



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Edile-Architettura

Modellazione BIM 3D e 4D: quantificazione, pianificazione e analisi strutturale di una struttura complessa.

3D and 4D BIM Modelling: quantification, planning and structural analysis of a complex structure.

Relatore:

Prof. Ing. Sandro Carbonari

Tesi di Laurea di:

Mattia Francavilla

Correlatore:

Prof. Ferruccio Mandorli

A.A. 2021/2022

INDICE

1. INTRODUZIONE	2
2. CASO STUDIO	7
2.1 OGGETTO.....	7
2.2 SITO	9
2.3 OBIETTIVI E PROBLEMATICHE CONNESSE	10
2.3.1 ASPETTI GEOMETRICI.....	14
2.3.2 ASPETTI STRUTTURALI.....	15
2.3.3 ASPETTI GESTIONALI.....	17
2.4 APPROCCIO METODOLOGICO	19
3. MODELLAZIONE GEOMETRICA	24
3.1 RILIEVO	24
3.2 CREAZIONE POLISUPERFICIE.....	25
3.3 DIVISIONE POLISUPERFICIE.....	29
4. ANALISI STRUTTURALE	31
4.1 OSSERVAZIONI E MODELLAZIONE PRELIMINARE	33
4.2 DEFINIZIONE DEI COMPONENTI.....	40
4.3 DEFINIZIONE DEI CARICHI	46
4.4 VALUTAZIONE DEI RISULTATI	55
4.5 INQUADRAMENTO TECNICO-TEORICO SULLE PIASTRE.....	64
4.5.1 TEORIA ELASTICA.....	66
4.5.2 TEORIA PLASTICA O YELD LINE METHOD	74
4.5.3 REINFORCEMENT DESIGN ALGORITHM FOR CONCRETE SHELLS.....	79
4.5.4 METODO DAL FIB MODEL CODE 2010	86
5. PIANIFICAZIONE DELLA COSTRUZIONE	88
5.1 QUANTIFICAZIONE.....	90
5.1.1 QUANTITA' DI CENTINE	90

5.1.2 QUANTITA' DI CASSEFORME E DI CALCESTRUZZO PER IL GETTO	95
5.1.2.1 OSSERVAZIONE E MODELLAZIONE PRELIMINARE	95
5.1.2.2 ESTRAZIONE COMPUTO METRICO.....	103
5.1.2.3 ESPORTAZIONE E FORMATTAZIONE	106
5.2 PIANIFICAZIONE 4D	108
5.2.1 CREAZIONE DIAGRAMMA DI GANTT.....	109
5.2.2 SIMULAZIONE DELLA COSTRUZIONE.....	113
6. CONCLUSIONI.....	117

ABSTRACT

Complex structures usually require complex solutions, but not always, not anymore. The engineer aims to find the fastest or the shortest solution taking into account the safety of the results, achievable by adopting a right and guaranteed methodology of development. This is the goal of this thesis, to find a solution to facilitate and ensure a successful construction management of a curvy and complex shape pavilion in a hostile environment with harsh conditions. Digitalization is central to all the project phases; more specifically, BIM technology is implemented taking the initial geometric model on a journey through different softwares where it is enriched with various details. At first, a quantification of the necessary amount of concrete to create the complete shell is provided as well as other materials and supporting elements quantities. In addition to this, the fourth project dimension, planning, is achieved. The data about quantification are merged with engineering knowledge and skills to plan the construction work; the softwares allow to generate the best tools to help and facilitate the supervisors' task in the construction site. A Gantt diagram is elaborate and imported in professional environments to extrapolate a video that simulates the succession of the yard sceneries.

On the other hand, the pavilion is studied from a structural point of view and its behaviour is analysed under the effects of the loads, highlighting tension values and other phenomena that may arise. Finally, the elastic and the plastic shell descriptive methods are shown, and reinforcement calculation methods are displayed.

1. INTRODUZIONE

Se un tempo l'aspetto cruciale di ogni processo produttivo era l'efficacia, e quindi il conseguimento del più alto standard possibile di fedeltà di una costruzione al progetto corrispondente; negli anni a venire il punto focale risulta essersi spostato verso la ricerca dell'efficienza, ovvero la capacità di ottenere un risultato quanto più soddisfacente con il minimo impiego di risorse, quali tempo e denaro. L'efficienza da sola, però, può non bastare a garantire che il lavoro portato a termine sia un effettivo successo. Le tecniche e le tecnologie riguardanti i processi costruttivi si sono evolute e perfezionate, rendendo i processi efficienti come desiderato e senza perdere qualità nel risultato finale. Ma un ulteriore passo avanti è stato compiuto da questo stadio. Nell'era della tecnologia digitale e informatica, l'ultima frontiera dello sviluppo e della ricerca di perfezionamento nel settore edile è quello della sicurezza, coniugato nelle sue accezioni di affidabilità dei risultati e rispetto degli standard concordati, da ottenere già nelle fasi precedenti all'inizio dei lavori. Gli sforzi quindi si stanno concentrando sulla ricerca di un metodo che permetta di prevedere, per poi organizzare e gestire, molti nuovi aspetti di tutta la macchina della costruzione; in questo modo si prospetta un incremento di efficienza e soprattutto una riduzione dei rischi, che permette una maggiore affidabilità riguardo al raggiungimento degli standard concordati e al rispetto dei presupposti.

Nel settore edile, infatti, avviene la trasmissione di una grande mole di dati, che si intrecciano di continuo; una moltitudine di professionisti diversi si susseguono ricevendo e trasmettendo risultati parziali, arricchendoli di volta in volta delle informazioni a loro competenti. Spesso accade anche che queste informazioni vengano riprocessate e rielaborate, modificate per l'insorgenza posteriore di situazioni incompatibili. Quello che ne risulta non è solo un iter tutt'altro che efficiente, ma anche un processo non totalmente affidabile e garantito. Adottare misure preventive o degli approcci metodologici che evitino la formazione di errori che vanno a minare l'affidabilità di un risultato è sicuramente la strada da percorrere al fine di ottenere l'efficienza che si ricerca. Lavorando in questa ottica, spesso, scaturisce anche un incremento della efficienza, comportando maggior attenzione nella precisione e completezza dei risultati intermedi che si concretizza, in ultimo, in un elevato livello di certezza sulla congruenza e sulla sintonia dei contributi di cui il prodotto finale si avvale.

La fattualità di queste problematiche e la necessità di superarle per poter dare impulso all'industria del settore edilizio, soprattutto nelle sue fasi precedenti alla cantierizzazione, ha portato alla definizione di un nuovo modo di lavorare, coadiuvato da una tecnologia che appoggia e facilita una metodologia di lavoro improntata all'abolizione dello spreco delle risorse tramite la facile accessibilità alle informazioni da parte degli operatori e all'unicità della fonte di dati. Quello che sarebbe auspicabile generare infatti, in questi casi, è un modello unico che accorpi in sé, oltre alla geometria che fa da supporto, anche dati grafici e attributi tecnici specifici, testuali o numerici (come schede tecniche dei componenti, le loro caratteristiche e proprietà, i loro codici identificativi), che possano far riferimento ai più svariati aspetti dell'edificio o delle sue parti e delle dinamiche che lo coinvolgono.

Il BIM, acronimo di "Building Information Modelling" è la fase più recente di un percorso rivoluzionario che negli ultimi decenni ha trasformato profondamente il mondo della progettazione nel settore dell'edilizia in tutte le sue varie forme: architettonica, ingegneristica e gestionale.

Il BIM implica un nuovo modo di interfacciarsi al progetto dalla concezione, all'esecuzione, fino potenzialmente alla manutenzione dell'opera. Questo nuovo approccio è utile per la pianificazione della fase di costruzione attraverso il calcolo dei tempi e dei costi di esecuzione rendendoli prevedibili da prima dell'inizio della costruzione. Infatti, dipendentemente dai vari livelli ai quali la tecnologia BIM è implementata, le informazioni possono considerarsi come parte di un unico processo esteso fino all'intero ciclo di vita del prodotto, che previene e riduce errori o incongruenze. Ogni fase dello sviluppo, dell'esecuzione e della gestione del progetto percepisce evidenti vantaggi dall'adozione dell'approccio BIM rispetto ai metodi tradizionali di gestione del progetto sia in termini di produttività che di precisione del flusso operativo. Nella fase di progettazione, in particolare, l'uso del BIM permette la creazione di modelli virtuali che migliorano e ampliano la gestione dei dati e la qualità delle informazioni, consentendo ai progettisti di lavorare in maniera collaborativa su scelte tecniche condivise e con un'immediata identificazione e risoluzione delle incongruenze del progetto. Un modello in BIM permette anche di effettuare simulazioni e calcoli precisi dei materiali, di generare automaticamente i componenti e di eseguire calcoli avanzati relativi a diversi aspetti del progetto (illuminazione, fabbisogno energetico, prestazioni acustiche, tempi di costruzione, ecc.). In definitiva, ciò che si ottiene implementando questo modo di procedere nella progettazione è un elevato grado di precisione e di agilità nella gestione dei dati che semplifica la collaborazione e il

conseguente miglioramento dell'efficienza di tutte le fasi del processo. Nonostante tutti questi vantaggi acquisiti nella fase di progettazione e di sviluppo dell'attività edificatoria, il tutt'ora mancato utilizzo di questa tecnologia non permette la fluidità di comunicazione e di trasmissione delle informazioni tra i professionisti, ritardando i processi e producendo un inefficiente utilizzo delle risorse.

Il seguente lavoro di tesi si propone di mostrare un approccio che rispetti i concetti precedentemente esposti, che sia quindi efficace ed efficiente, per la risoluzione di problematiche ingegneristiche di carattere diverso ma complementari ai fini della progettazione strutturale e pianificazione della costruzione di una struttura. Attraverso strumenti relativamente recenti ma tuttavia innovativi, che oggi più che mai si stanno diffondendo nel mondo della progettazione dando a questo termine nuove accezioni e rinnovato valore, si vuole risolvere tematiche di frequente ricorso e aprire nuovi orizzonti alle possibilità di successo di una costruzione. All'interno di questo processo si entrerà nel merito delle questioni strutturali e gestionali prendendo in esame un caso studio che desta molto interesse per la complessità della soluzione formale adottata e per le caratteristiche del sito di cantiere, che impongono degli accorgimenti aggiuntivi per il successo dell'opera.

Nello svolgimento vedremo come sia possibile ottenere un workflow di progetto ideale che dia garanzie sulla compatibilità dei risultati e sul conseguimento dell'obiettivo finale, che è quello di portare a termine l'opera con successo nonostante le varie difficoltà eccezionali che si possono incontrare. Inoltre, si entrerà nel merito delle tematiche stesse con approfondimenti tecnico-pratici, attraverso i quali verrà analizzato il caso studio. Lo studio e gli incarichi che ci siamo proposti di svolgere sono l'occasione per affrontare una sfida atipica che ci stimolasse a sviluppare dei processi informatici da mettere al servizio della creatività architettonica, in modo da liberare la figura del disegnatore dai vincoli della fattibilità e delle complicità nella gestione e pianificazione dell'opera. Ci avvarremo di software altamente specializzati usati in ambito professionale e che sono oggetto di progressiva e irreversibile diffusione. Infatti, dal momento che la data per l'entrata in vigore è già stata fissata nelle normative e nei codici che regolano i processi di appalto e aggiudicazione della realizzazione delle opere pubbliche, si prospetta in breve tempo l'espletamento quanto più esteso e totalizzante della tecnologia BIM, che per l'appunto, è conseguibile attraverso un approccio mirato e software adeguati.

La struttura della tesi si articola in tre parti principali nelle quali si susseguiranno lo studio, le valutazioni e le riflessioni che sono state compiute per tracciare una strada il più possibile retta e unidirezionale; verranno riportati i procedimenti appunto scaturiti da questa traccia, che mirano ad arginare le difficoltà con l'aiuto delle potenti funzionalità che gli strumenti, se ben padroneggiati, riescono a offrire agli operatori.

Nel capitolo a seguire si introdurrà e presenterà dettagliatamente il problema, sviscerando le situazioni contingenti e indagandone gli sviluppi attraverso un procedimento a ritroso che, partendo dai problemi più immediati ed evidenti e passando per quelli procedurali della progettazione ci ha portato ad ottenere il nostro punto di partenza. Dopo aver presentato la fattispecie del caso studio si riassumerà l'approccio metodologico che si intende intraprendere per la gestione generale del progetto.

Nel capitolo terzo si entrerà nel merito delle questioni strutturali che riguardano il nostro oggetto. Si illustreranno la modellazione specifica della struttura nelle parti fondamentali alla descrizione totale della struttura, le scelte progettuali prese motivandone i criteri, e infine i risultati ottenuti con relative valutazioni. In seguito, si farà un resoconto delle teorie analitiche di base che descrivono le strutture a piastra e si ritrarrà un quadro dello stato dell'arte, attraverso la proposta di alcuni metodi di calcolo, della progettazione di elementi come quello in esame.

Successivamente, si passerà allo svolgimento del processo che porterà all'estrazione delle quantità di alcuni dei materiali necessari alla costruzione del padiglione.

Infine, questi dati saranno messi al servizio di una successiva esperienza di progettazione, meglio nota come pianificazione della costruzione. Questa parte risulta allo stesso modo importante poiché permetterà di valutare ancor più nel complesso le situazioni di cantiere e offrirà una base integrale per la previsione dei costi totali dell'intera macchina dell'opera. Inoltre, darà ai lavoratori chiamati in causa e ai gestori del cantiere un documento informativo per controllare dinamicamente in maniera agevole che tutto si stia svolgendo come previsto dal momento di inizio della costruzione.

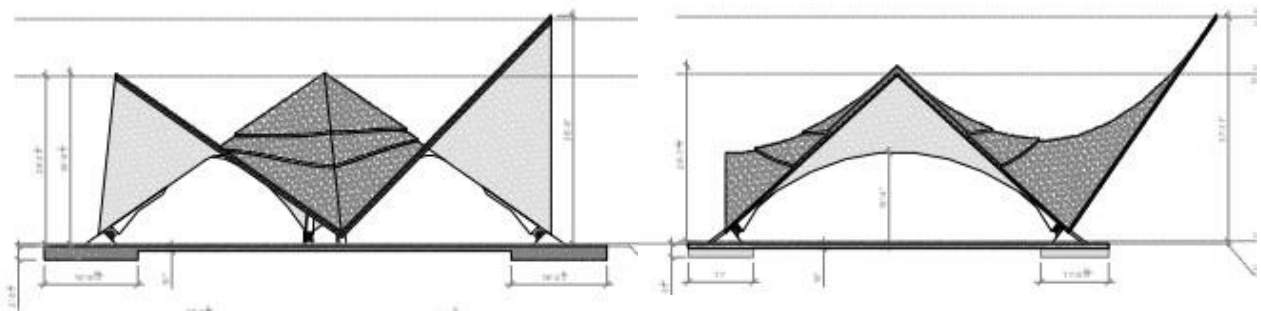
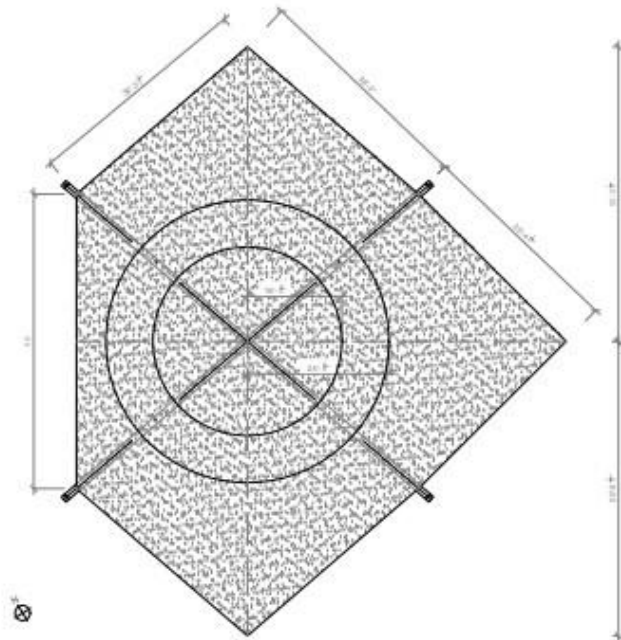
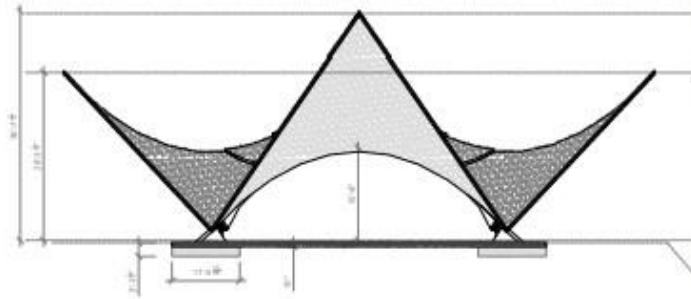
2. CASO STUDIO

2.1 OGGETTO

L'oggetto preso in esame come caso studio durante lo sviluppo della nostra tesi è un padiglione progettato per essere collocato, come tettoia, all'ingresso dell'Anichi Resort & Spa, nell'isola Dominica, prendendo parte a un più grande complesso edilizio.

Il padiglione è formato da una struttura curva laminare in calcestruzzo fibrorinforzato formata da quattro paraboloidi iperbolici e sostenuto su quattro plinti. La parte centrale della struttura è di forma quadrata alla sua base in pianta tra i quattro supporti (17,7x15,23 m) e sale fino al suo apice nel centro del quadrato a 8,62 m. La struttura laminare è convessa tra ciascuno dei supporti "ad arco" tra ogni blocco di ancoraggio. Tre dei lati della sezione centrale hanno una struttura a sbalzo triangolare in pianta che raggiungono il punto più alto nel vertice più lontano dalla sezione centrale, ad un'altezza massima di 11,55 m. La struttura laminare, spessa prevalentemente 12 cm, ha due incrementi di spessore in direzione radiale, dove lo spessore aumenta prima a 24 cm e poi a 36 cm rispettivamente. Gli incrementi si verificano circolarmente e concentricamente secondo una vista in pianta. La struttura laminare è in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio con uno strato di rete di rinforzo in acciaio.

La sottostruttura, in cemento armato, è formata da quattro blocchi di ancoraggio sostenuti su fondazioni a plinti, collegati da una soletta portante di 20 cm di spessore. Due delle fondazioni poggiano sopra la struttura del seminterrato. Queste fondazioni sono di 70 cm di spessore e poggiano su strisce elastomeriche rinforzate di 4 cm, che a loro volta sono poste direttamente sopra la struttura del seminterrato. Le altre due fondazioni sono formate da cassoni monolitici per ridurre il rischio di assestamento differenziale.



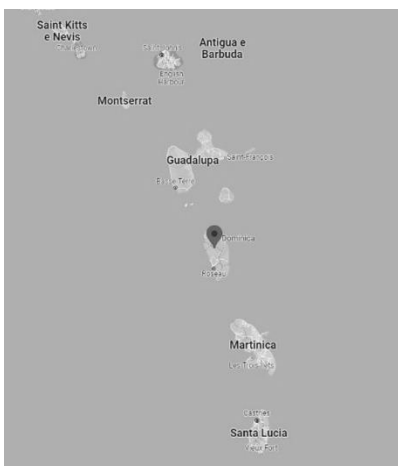
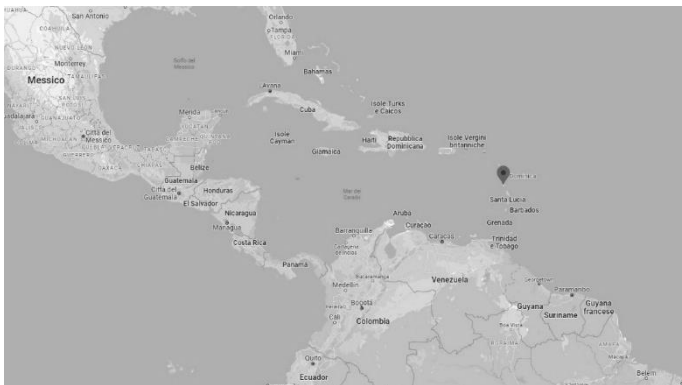
Piani 2D del padiglione

2.2 SITO

La Dominica è un'isola nazione situata nel mar dei Caraibi ed è l'isola più meridionale delle isole Sopravento Settentrionali (sebbene talune volte la si è considerata come la più settentrionale delle isole Sopravento Meridionali). L'estensione della nazione si aggira intorno ai 750 km².

La Dominica è un'isola dei Caraibi orientali, situata a circa metà strada tra le isole e dipartimenti d'oltremare francesi della Guadalupa (a nord) e della Martinica (a sud).

Nota come l'"isola della natura", la Dominica è in buona parte coperta da lussureggianti foreste pluviali e ospita quello che secondo alcuni è il secondo lago di vapore del mondo in ampiezza. La Dominica ha inoltre numerose cascate, sorgenti e fiumi (ben 365). L'area di Calibishie, nel nordest dell'isola, è invece caratterizzata da spiagge sabbiose. Animali e piante credute estinte sulle isole limitrofe possono essere ancora rinvenuti nelle foreste della Dominica. Numerose sono infine le aree protette, tra cui spiccano il Parco nazionale di Cabrits nonché il Parco nazionale Morne Trois Pitons, costituito da un territorio caratterizzato da un forte vulcanesimo e ricoperto da una fitta foresta tropicale, valsegli il riconoscimento di patrimonio dell'umanità il 4 aprile 1995.



2.3 OBIETTIVI E PROBLEMATICHE CONNESSE

La peculiarità, quindi allo stesso tempo l'attrattività e la complessità, del caso studio deriva da due fattori principali: l'oggetto della costruzione e il sito di costruzione.

In primo luogo, il padiglione risulta essere una struttura complessa per la soluzione geometrica-formale adottata, che si plasma dall'unione di quattro componenti riconducibili alla stessa matrice geometrica, cioè quella del paraboloide iperbolico, ma con dimensioni diverse. Da ciò possiamo facilmente intuire che la non planarità delle superfici della nostra architettura complica molto la sua gestione e la rende poco maneggiabile, aggravando compiti che potrebbero in altri casi risultare banali.

In secondo luogo, come abbiamo visto, il sito prescelto per la costruzione è un'isola in mezzo all'Oceano e in quanto tale si ritrova ovviamente in condizioni di isolamento data l'impossibilità di raggiungerla tramite sistemi di trasporto comuni ed economici. Tuttavia, questa circostanza, seppur scomoda, non costituirebbe da sola un problema così determinante. La geomorfologia diventa critica a causa del concomitante riscontro di una orografia molto penalizzante, che può costituire un'attrazione turistica da una parte, ma rende anche molto difficile lo svolgimento di attività produttive e ostacola lo svolgimento delle operazioni.

Data la suddetta congiuntura, risulta evidente che il processo della realizzazione, fin dalle prime fasi, non possa essere condotto con i metodi classici, ma piuttosto si debba avvalere di una pianificazione e una progettazione accurata e finalizzata a risolvere gli specifici problemi sopraelencati. Infatti, come in generale risulta essere indispensabile l'importazione di materie e risorse dall'esterno per provvedere ai bisogni della popolazione e delle attività dell'isola, nello specifico caso di una costruzione questa esigenza si tramuta nella necessità di pianificare alcuni aspetti di tutto il processo che risultano cruciali. Questo spiega, appunto, la richiesta di una stima quanto più precisa e sensibile dei materiali e delle attrezzature da costruzione necessari, dei tempi delle attività di cantiere e dei modi di impiego delle risorse. Infatti, un eccesso nella fornitura dei primi produrrebbe una spesa ovviamente inutile; ma una carenza di materiale produrrebbe danni economici ancora maggiori dal momento che si dovrebbero richiedere ulteriori risorse e ricoprire le spese, oltre che per la materia prima, anche per il trasporto della stessa, che, essendo via mare richiede maggiori oneri. In concomitanza si arrecherebbero danni economici derivanti alla posticipazione di lavorazioni

e prestazioni da parte degli operatori, con conseguente prolungamento dei tempi di affitto di macchinari e aumento delle ore di prestazione richieste agli operai.

Soffermandoci sull'ambito degli obiettivi proposti, ci troviamo a fronteggiare da una parte lo svolgimento di una analisi strutturale, e dall'altra un compito gestionale-organizzativo che richiede la cura e la risoluzione di aspetti legati alla pianificazione della costruzione. È evidente che i due compiti sono molto diversi tra loro, condizione per cui l'oggetto viene reso protagonista di due analisi che richiedono allo stesso di inglobare informazioni di natura ben differente.

Inoltre, anche l'estensione della parte dell'oggetto interessata cambia che si tratti di un'osservazione strutturale o gestionale: se nel primo caso la struttura non può che essere trattata in tutta la sua interezza proprio per la natura della questione, nella seconda fase, per quanto riguarda la quantificazione è stato richiesto che l'attenzione si concentrasse su una parte di essa, ovvero sulla lamina di calcestruzzo fibrorinforzato e ciò che deriva dalla peculiarità di quest'ultima in quanto risulta essere la parte predominante e che effettivamente detta le esigenze della costruzione in maniera preponderante. Tuttavia, nell'ultima parte di questa fase, quella della pianificazione della costruzione, non si può evitare di tenere in conto del processo costruttivo in tutte le sue parti, dato che nella fase di cantiere le lavorazioni sono svolte in successione e legate una all'altra.

Entrando nel merito della quantificazione, descriviamo gli obiettivi che ci siamo proposti di conseguire:

- 1) Quantità di centine;
- 2) Quantità di materiale da getto per la copertura;
- 3) Quantità di casseforme;

Analizziamo più nel dettaglio le situazioni che ci si prospettano:

- 1) Quantità di centine:

Le centine sono strutture di appoggio alle casseforme deputate al compito di sorreggerle durante la fase di getto. Infatti, se le casseforme danno la forma al getto, le centine, che si concretizzano in tubi di ferro disposti a mo' di pali, si occupano di mantenere il complesso in posizione. Assolvono al compito portante provvisoriamente.

La quantità necessaria di centine viene determinata a partire dal valore del volume da riempire con esse. La struttura necessita, per via della sua conformazione, durante la fase della costruzione e finché il getto non si solidifica, di una sottostruttura di appoggio continua; perciò, le centine vengono posizionate a terra e poi montate in pila fino ad esaurire lo spazio tra il piano d'appoggio del terreno e le casseforme. Lateralmente questo spazio sarà delimitato da piani verticali passanti per la proiezione ortogonale dei bordi della copertura sul piano d'appoggio e i bordi corrispondenti della copertura stessa.

Questa descrizione teorica e astratta in realtà traccia il percorso che viene seguito anche in Rhinoceros per generare un solido dal quale si possa estrapolare poi il valore del volume da esso racchiuso.

2) Quantità di casseforme

Per calcolare la superficie di casseforme, ovvero le strutture ausiliari per il getto di calcestruzzo, bisogna prima avere chiaro il procedimento con il quale viene creato il guscio.

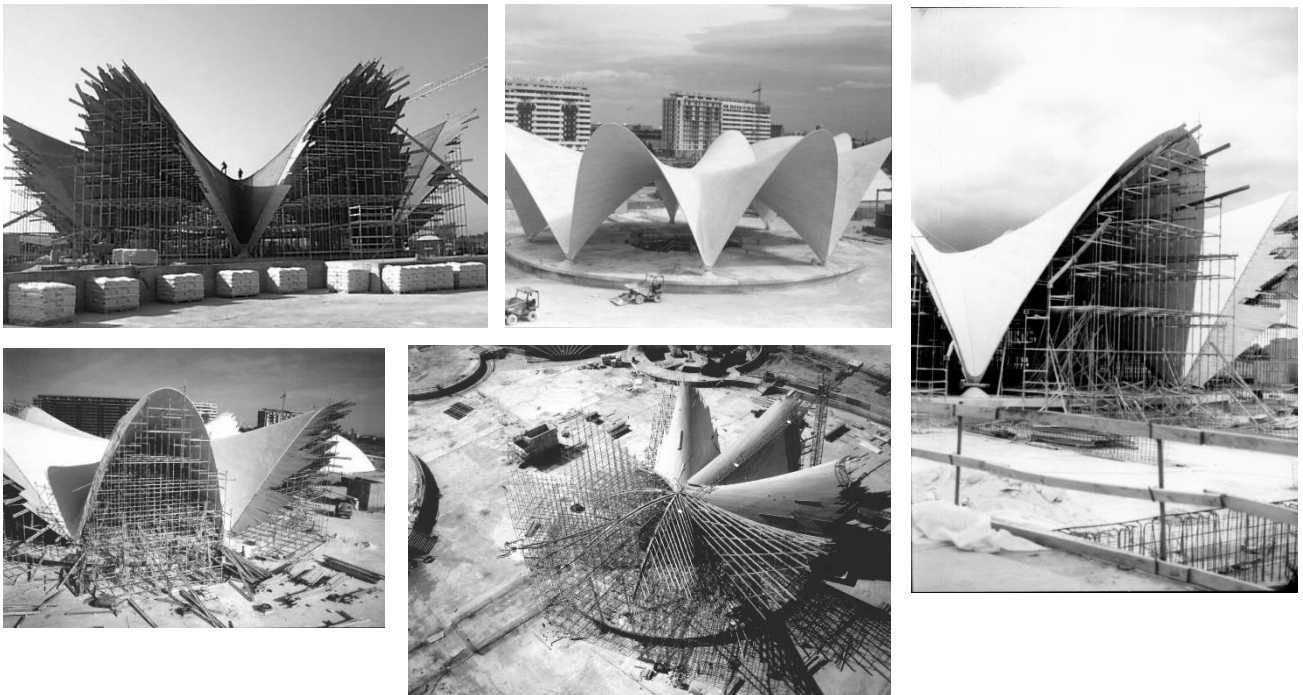
Per la realizzazione di superfici di questa tipologia (curve e di piccolo spessore) è comune procedere al getto del materiale strutturale (calcestruzzo fibrorinforzato) attraverso la tecnica dello spritz beton, che è uno speciale conglomerato di cemento che viene spruzzato ad altissima velocità su una superficie, grazie all'aiuto di una lancia ad aria compressa. Si tratta di una miscela a base di cemento, acqua, aggregati e fibre che contiene anche additivi di presa che consentono al conglomerato di aggrapparsi istantaneamente alla superficie, con un risultato omogeneo e compatto senza l'ausilio di casseforme esterne.

La preparazione per questa attività prevede quindi la realizzazione di una superficie composta di tavole in legno continua per tutta l'interezza della copertura e che abbia la stessa forma della superficie inferiore dell'elemento che vogliamo ottenere. L'idea che si persegue è quella di creare uno "stampo" sul quale poi proiettare il materiale affinché solidifichi nella forma da esso imposta.

Le assi di legno sono impiegate con la filosofia "a perdere", ovvero senza il presupposto di riutilizzarli successivamente dopo lo smantellamento, quando la struttura soprastante avrà raggiunto la resistenza necessaria per reggersi autonomamente.

All'interno dello scopo gestionale il primo obiettivo è quello di ricavare il valore di suddetta superficie (m^2) creata attraverso l'accostamento di assi di legno.

Mostriamo in seguito, con intento esplicativo, le foto del cantiere dell'edificio che ospita l'Oceanografico di Valencia nella fase di allestimento di questa struttura ausiliaria provvisoria. Questo edificio è molto simile, nella geometria e nei problemi costruttivi che da essa derivano, a quello in esame e può orientarci nelle valutazioni da fare.



3) Quantità di materiale per il getto

Il materiale di nostro interesse è quello di cui si compone il guscio della struttura, ovvero il calcestruzzo fibrorinforzato. Ci occuperemo solo di questa parte della struttura in generale, trascurando le altre componenti come i bracci di connessione tra il guscio e le cerniere di appoggio o la platea alla base.

E', ovviamente, un volume pieno quello del guscio e non cavo; quindi, dovremo creare un elemento pieno unico o degli elementi pieni diffusi senza soluzione di continuità in tutta la superficie, che in ogni punto rispettino il giusto spessore e che unitamente restituiscano tutta

la forma totale. Infatti, lo spessore della calotta è variabile e ne possiamo contare tre diversi. In particolare, in direzione radiale dal centro dell'oggetto verso le estremità, incontreremo per primo lo spessore maggiore, poi successivamente il medio e infine il più sottile. Sono rispettivamente di 42 cm, 30 cm e 18 cm.

Notiamo che quindi a partire dal più basso, abbiamo un ispessimento progressivo di 12 cm.

Essendo una parte strutturale ha al suo interno le barre di armatura, che vanno ad occupare spazio e riducono la quantità di cemento necessario. Tuttavia, questo dettaglio verrà trascurato in quanto questa scelta risulta certamente conservativa ai fini di una valutazione dei costi. Avere del materiale in eccesso, entro limiti contenuti, costituisce con ogni probabilità un problema minore rispetto a non averne a sufficienza, e addirittura potrebbe risultare un vantaggio dato il rendimento non ottimale dei processi, anche sotto l'aspetto degli sprechi.

Quello che ci proponiamo di trovare quindi è un valore che esprima un volume (m^3), in particolare il volume di calcestruzzo fibrorinforzato di cui la lamina in totale si compone.

Dopo aver visto le difficoltà reali e concrete legate allo stato di fatto e le loro conseguenze sulle operazioni di cantiere, passiamo ad approfondire le difficoltà che riscontriamo lungo il procedimento che abbiamo ideato per raggiungere i risultati. Esamineremo le complicità che ci si pongono nelle fasi di modellazione geometrica, di analisi strutturale e di estrazione dei volumi dovute alla complessità formale dell'oggetto in esame.

2.3.1 ASPETTI GEOMETRICI

La prima criticità che troviamo è quella della modellazione della struttura. In primis, ricreare una geometria come quella dell'oggetto in esame non è sicuramente un processo banale, anzi richiede delle buone capacità da parte dell'operatore che si incarica della fase di modellazione. Le stesse devono poi essere messe nella condizione di potersi esprimere tramite gli strumenti che il software d'ausilio mette a disposizione. Una forma come quella con cui ci confrontiamo può sicuramente essere definita inusuale nell'ambito ingegneristico. Perciò ci scontriamo con l'impossibilità di utilizzare gli usuali software di modellazione per l'architettura, ma dobbiamo pensare fuori dagli schemi classici e attuare un approccio diverso.

I software per modellazione architettonica convenzionali, che si tratti di quelli che implementano la tecnologia BIM o degli altri, hanno delle configurazioni e dei comandi che cercano di rispecchiare le più ricorrenti esigenze formali che una forma architettonica o edilizia richiede. Per questo possono escludersi in un caso come il nostro tutti quei programmi pensati per la generazione di geometrie afferenti al settore edilizio. Dobbiamo pensare la nostra struttura come un qualcosa che esula dal concetto di “edificio” o di opera architettonica nel senso stretto del termine, piuttosto intenderla come un’oggetto, un’opera di design, una geometria che necessita di un alto livello di controllo spaziale e geometrico per essere riproposta esattamente nella sua forma.

Un ulteriore aspetto, legato alla configurazione della struttura, concerne la presenza di ispessimenti nella struttura laminare del guscio. Questi si generano come un incremento dello spessore in concomitanza di curve risultanti dalla proiezione di circonferenze sulla calotta.

Anche in questo caso riscontriamo l’incapacità dei software predisposti all’architettura di governare agevolmente situazioni simili.

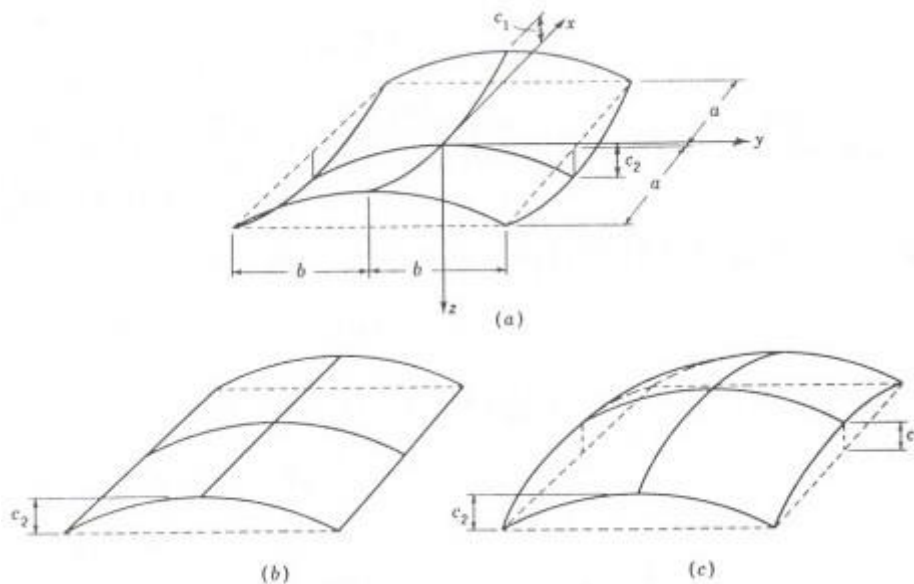
2.3.2 ASPETTI STRUTTURALI

La struttura che ci proponiamo di analizzare è una struttura laminare composta di quattro parti, tre delle quali hanno la forma di paraboloidi iperbolici completi e la quarta è invece un paraboloide iperbolico generato per metà, poiché per motivi estetico-funzionali è stato effettuato un taglio lungo la curva di sella più bassa in direzione perpendicolare a quella di sviluppo della struttura. La copertura nel complesso è una struttura laminare le cui parti, in quanto paraboloidi iperbolici, ricadono nella categoria delle strutture a guscio.

Il guscio è un elemento strutturale avente due dimensioni (lunghezza e larghezza) prevalenti rispetto alla terza (lo spessore), con una superficie media non riconducibile ad un piano (lastra curva o volta) ed il cui comportamento statico sia caratterizzato sia da azioni membranali che da azioni flessionali.

I gusci ottenuti mediante la traslazione di una curva piana su un’altra curva piana sono usualmente chiamati gusci di traslazione. Se questo guscio infine è ottenuto dalla

traslazione di una parabola convessa su una curva parabolica concava si otterrà un paraboloido iperbolico.



Una doverosa precisazione è che in ambito strutturale, il termine “struttura” assume il suo significato gerghale e specifico che si riferisce non solo alla parte del padiglione strettamente intesa, ma anche alle parti che costituiscono i vincoli e come queste si relazionano con la copertura essendo indissolubilmente legate ad essa. In merito a ciò possiamo evidenziare che la atipicità della forma non si limita solo alla copertura laminare; anche i dispositivi di vincolo hanno una loro complessità formale. Dovremo studiare la geometria delle componenti al fine di comprendere la loro relazione con il guscio per categorizzare e poi modellare il vincolo ideale che relaziona la lamina di calcestruzzo con l’esterno. Allo stesso tempo dovremo escogitare il modo di riportare fedelmente le giuste posizioni relative tra il vincolo e la lamina, aspetto che risulta molto importante per il calcolo delle sollecitazioni e per la valutazione del suo stato tensionale.

Questa forma, che possiamo definire non consueta, anzi anticonvenzionale, potrebbe risultare difficile da analizzare se non si prendono degli accorgimenti adeguati a far sì che il programma nel quale importeremo il modello per l’analisi riesca a leggere bene la geometria e tutte le circostanze a cui essa è sottoposta.

In particolare, la struttura si compone di una geometria non a telaio, come le strutture più diffuse nella contemporaneità, ma continua, di superficie: questo cambia notevolmente le condizioni di lavoro. Infatti, trattando con elementi superficiali, il programma utilizza riferimenti relazionati a elementi diversi di identificazione e calcolo dei risultati rispetto a quelli che usa per elementi lineari come travi e colonne. SAP2000 è un calcolatore strutturale piuttosto versatile, che offre molte possibilità sia nella tipologia di analisi, sia nel tipo di modello sul quale eseguirle. Il fatto che la nostra sia una struttura laminare non ci limita nella possibilità di utilizzarlo, nonostante dovremo considerare come il programma opera e gestisce le geometrie che gli vengono proposte. Nel complesso, lo fa nella stessa maniera in cui lo fanno quasi tutti i software non pensati per la modellazione, cioè applicando una discretizzazione delle superfici attraverso l'approssimazione in mesh della stessa.

2.3.3 ASPETTI GESTIONALI

Il calcolo di grandezze come volumi e superfici può risultare di diversa onerosità computazionale. Se applicato a geometrie semplici, come prismi a base poligonale, il problema risulta banale tanto da poter estrarre i valori cercati anche tramite calcoli manuali. Si assiste a una notevole complicazione non appena si passa da superfici piane a superfici concave e convesse, come nel nostro caso. In tale circostanza il calcolo risulterebbe necessitare di operazioni di integrazione lungo curve parametriche, che si rendono più complicati via via che si complica l'equazione che descrive queste curve.

Data la nostra architettura e stando alle premesse fatte, arrivare ad ottenere il valore delle grandezze precedentemente elencate non si prospetta un lavoro immediato. Si rende chiaramente necessario appoggiarsi a un calcolatore. Ci sono dei software per la modellazione che includono certe funzionalità che fanno al caso nostro, ma questi devono essere messi nella condizione di poter svolgere tali calcoli; noi, da operatori, dovremo quindi seguire i procedimenti, in maniera rigorosa per poter soddisfare le richieste in input del software affinché questo possa leggere i dati e interrogarlo nella maniera giusta affinché ci restituisca le risposte che vogliamo.

Inoltre, essendo l'architettura della struttura molto peculiare e fuori dagli schemi convenzionali, genera anche dei problemi costruttivi, che necessitano un'attenta valutazione della fattibilità e della consequenzialità delle lavorazioni che richiede. Le superfici curve

impongono scelte ad hoc nell'utilizzo dei materiali, nei processi costruttivi, nelle tecniche e nelle modalità di esecuzione, che saranno particolari come la forma stessa con cui ci confrontiamo.

In conseguenza a ciò, possiamo bene immaginare che i costi derivanti dall'impiego di suddetti accorgimenti non saranno quelli convenzionali, perché il livello di dettaglio e di precisione si alza notevolmente proprio per assecondare la atipica sinuosità delle superfici. Per la realizzazione di questo edificio avremo bisogno di adottare delle misure straordinarie in varie fasi dell'opera. Prime fra tutti sono la scelta del materiale da getto e la tecnica del getto, due scelte strettamente correlate e consequenziali.

Per esempio, la scelta della tecnica di getto ricadrà sull'utilizzo dello spritz beton:

Lo spritz beton, conosciuto anche come calcestruzzo proiettato o shotcrete, è un conglomerato di cemento che, mediante una lancia ad aria compressa, viene spruzzato ad alta velocità su una superficie.

Una miscela di cemento che, a differenza dei tradizionali calcestruzzi, è ottenuta con l'aggiunta di additivi di presa che forniscono al conglomerato una capacità di adesione istantanea ed efficace (chiamata tecnicamente "flash set").

Dalla precedente definizione si comprende immediatamente l'adeguatezza di questa opzione. Una scelta che però porta con sé, come già detto, degli oneri consistenti, in quanto questa tecnica è già di per sé più costosa di un tradizionale getto; in aggiunta, per l'applicazione ad una struttura di grandi dimensioni come la nostra, si richiederanno macchinari e trasporti appositi, che vanno ad appesantire l'esborso economico. Lo stesso discorso vale per le operazioni di posa delle casseforme e delle armature, che saranno maneggiate da mani specializzate e qualificate, in quanto dovranno assecondare la sinuosità delle superfici in quello che si prospetta essere un lavoro di dettaglio.

Per mitigare le spese, si rivela fondamentale una previsione quanto più precisa dei tempi di impiego di queste risorse, che si traduce nel limitare i tempi di permanenza delle stesse in cantiere e di ottimizzare il più possibile la loro presenza, compattando le attività tramite la sovrapposizione quando possibile e sopprimendo i tempi morti. Anche in questo caso la tecnologia BIM ci viene in aiuto: la previsione e la gestione dei tempi, attraverso l'integrazione di vari tipi di dati, è tra i punti chiave dei benefici che ci permette di sviluppare.

Tramite l'utilizzo di Revit saremo in grado prima di quantificare i materiali e poi grazie a Microsoft Project saremo in grado di redigere un piano di attuazione delle lavorazioni di cantiere che permetta di trasmettere ai gestori della costruzione le informazioni di cui hanno bisogno per organizzare nella forma più efficiente il cantiere ed il processo costruttivo. In ultimo, cercheremo di fornire anche contenuti interattivi per sciogliere eventuali dubbi sulla creazione graduale dell'opera tramite una simulazione digitale. Anche questa premura deriva dalla consapevolezza che supervisionare lo svolgimento di lavori che richiedono accorgimenti e tempi atipici possa necessitare di un controllo dinamico agevole.

2.4 APPROCCIO METODOLOGICO

Le problematiche precedentemente illustrate, e la volontà di svolgere un lavoro preciso, fluido, efficiente e sicuro ci spingono a pianificare le mosse che andremo a svolgere per portare a termine le consegne affidateci.

Il nostro modello, rappresentazione virtuale dell'oggetto di progetto, affronterà quindi una sorta di viaggio dalla sua genesi fino alla estrazione da esso delle informazioni che ci interessano, attraverso la manipolazione e l'interrogazione dello stesso nei vari ambienti dedicati per mano dell'operatore che supervisiona e conduce il processo. Vedremo come ottenere tutti questi risultati senza riprocessare le informazioni e senza ripetere le attività di modellazione, in pieno accordo con la metodologia "Lean".

Il metodo con il quale intendiamo conseguire questo risultato è quello di avere chiaro il livello di dettaglio richiesto ad ogni fase del processo, così da rimandare il più possibile nel tempo il dispendio di risorse, per soddisfarlo solo al momento limite in cui il dettaglio è effettivamente necessario. In questo modo si anticipano i tempi e soprattutto si arriva all'aggiunta di dettagli solo nel momento in cui ci si interfaccia con il problema in maniera diretta e concreta beneficiando della massima evidenza delle problematiche. In questo modo si abbattano le possibilità di errore, e anche se si dovesse verificare una circostanza erronea, questa sarebbe recuperabile con poco sforzo e senza coinvolgere fasi molto precedenti del lavoro.

In questo percorso che possiamo considerare diramarsi solo nel punto del tragitto che corrisponde allo svolgimento delle due anime dell'intero lavoro, abbiamo prima di tutto

dovuto affrontare una modellazione geometrica a partire dagli elaborati grafici che ci sono stati forniti. In questo momento iniziale, oltre a riprodurre la geometria pura dell'oggetto, si è prestata attenzione alla ricerca di tutti quegli accorgimenti che potessero servire per svolgere al meglio gli incarichi futuri negli ambienti di lavoro corrispondenti. Avere chiari a priori i limiti e le potenzialità degli strumenti che avremmo usato è stato sicuramente uno degli aspetti prioritari che hanno permesso uno sviluppo del lavoro fluido e il conseguimento dei risultati sperati.

Il primo passo pratico è stato creare un modello che servisse da base per i passaggi futuri. Una volta che questo fosse sufficientemente preciso nelle componenti che lo compongono, ma non eccessivamente dettagliato, lo abbiamo importato nei programmi specifici per assolvere ai vari compiti.

Abbiamo usato questo modello preparato ad hoc per eseguire un'analisi dal punto di vista strutturale della proposta a noi pervenuta al principio; poi, abbiamo utilizzato lo stesso modello per svolgere il compito di carattere gestionale organizzativo. In questo caso abbiamo sfruttato a pieno le potenzialità della tecnologia BIM, grazie a un software che ne permette l'implementazione, e ci siamo potuti spingere verso quella che in gergo si chiama la quarta dimensione, ovvero la pianificazione della costruzione. Nella tesi si assolverà a questo compito eseguendo una quantificazione, cioè una stima molto precisa della fornitura dei materiali necessari alla realizzazione dell'opera, e deducendo da questa una programmazione temporale delle attività di cantiere.

Il modello iniziale, prettamente geometrico, generato in Rhinoceros e perfezionato in Autocad, è stato importato nel software SAP2000, che è stato scelto per condurre l'analisi strutturale. Al suo interno, il modello ha subito un completamento geometrico e tecnico-pratico della modellazione riguardante le mesh agli appoggi e altre parti specifiche della calotta; si sono definite tutte le sue caratteristiche strutturali, come il materiale e le sezioni; si sono descritte le condizioni esterne a cui è sottoposto, come i carichi e le combinazioni degli stessi. Eseguiremo un'analisi statica lineare per verificare la proposta a noi pervenuta al principio. Infine, si elaboreranno i risultati confrontandoli con i valori proposti dalle norme.

Una volta validata la proposta, si passa a lavorare sul secondo obiettivo: pianificare la costruzione. Si inizia con il quantificare i materiali, ovvero ottenere una stima quanto più precisa possibile delle quantità necessarie. Per l'ottenimento di queste informazioni ci avvarremo di diversi softwares: in primis di Rhinoceros stesso in una fase immediatamente

successiva alla modellazione; secondariamente di Autodesk Revit tramite un processo di modellazione intermedio aggiuntivo. All'interno di quest'ultimo la geometria si arricchirà di componenti edilizie, in particolare saranno aggiunti i pacchetti di copertura che la struttura realmente possiede. Grazie a questo attributo si è reso possibile il calcolo, da parte del software, di alcune grandezze che erano legate ad esso. In questo caso sfrutteremo a pieno le potenzialità della tecnologia BIM e grazie ad essa ci appresteremo a compiere un primo passo verso quella che in gergo si chiama la quarta dimensione, ovvero la pianificazione della costruzione, in cui si introduce la variabile "tempo".

Questo potente software permette anche di generare geometrie da zero, ma soprattutto implementa la tecnologia BIM e permette quindi di integrare informazioni numeriche e testuali al modello geometrico. Quello da cui partiamo sarà il modello tridimensionale di Rhinoceros e, tramite le potenti funzionalità del software, arricchiremo l'oggetto con elementi costruttivi e informativi. L'atto conclusivo sarà quello di estrarre un report, che il programma mette a disposizione su nostra specifica richiesta, in cui saranno visibili i dati che ci servono.

Questo strumento è una tabella di quantificazione, che in Revit prende il nome di "computo dei materiali" e permettere di scegliere i parametri che più ci interessano tra tutti quelli messi a disposizione dalla macchina, ed ottenere il loro valore. Come vedremo potremo anche modificare sia in ordine che in contenuto a piacimento le intestazioni delle colonne della tabella per rendere il più chiaro possibile il contenuto informativo estrapolato.

Successivamente, si procederà a rendere i risultati fruibili e utili anche all'esterno della catena del processo di pianificazione. Infatti, questo report ha duplice valore e funzionalità: può essere visto come un risultato intermedio del workflow e passare da output di un procedimento a input di uno successivo combinandosi con altri dati o, avendo le informazioni contenute già una propria autonomia, può fungere da riferimento alle richieste di fornitura che l'azienda costruttrice richiederà ai produttori. Per dare concretezza a questo ultimo aspetto il report dovrà costituire un documento, osservabile in totale libertà al di fuori del programma di creazione.

Tuttavia, come vedremo, Revit non è stato l'unico programma utilizzato, anzi ha ricoperto il ruolo di convogliatore finale dei risultati di processi precedenti poiché tramite le sue funzionalità ha permesso di estrarre i risultati da un lavoro che è iniziato ben prima in software di modellazione pura come Autocad e Rhinoceros.

I risultati ottenuti ci offrono dati molto importanti non solo sotto l'aspetto economico, poiché come già detto gli stessi troverebbero già una loro applicazione diretta da parte degli addetti ai lavori per effettuare gli ordini sulle quantità dei materiali, ma questi dati risultano utili anche nell'ottica di potersi spingere ancora oltre nella ricerca di garanzie sul processo di costruzione attraverso una previsione totale di quello che si genererà nella fase di cantiere.

Infatti, la potenzialità di cui parlavamo e che queste informazioni possiedono è la possibilità di essere utilizzati per proseguire il cammino nella filiera del BIM e della progettazione, permettendo, se necessario, di spostare l'attenzione in altri ambiti, o meglio di superare i confini della staticità addentrando nel merito di come il cantiere funzionerà, di quali scenari si verificheranno e di quale sarà la mole di lavoro generata dalla costruzione dell'edificio. I termini con i quali possiamo iniziare a ragionare sono quelli del tempo. Le precedenti informazioni possono essere integrate con altre valutazioni e con le competenze e l'esperienza degli ingegneri coinvolti per definire le durate delle operazioni che si avvicenderanno nelle fasi della costruzione. Grazie alla conoscenza delle grandezze in gioco, infatti, siamo in grado di stimare, o calcolare in alcuni casi, le tempistiche richieste per le lavorazioni di cantiere che serviranno per far divenire realtà il progetto nel miglior modo possibile, ovvero quello più efficiente: rapido, senza sprechi e con il minor utilizzo di risorse, badando sempre alla riuscita effettiva dell'opera che rimane ovviamente l'obiettivo principale.

La situazione appena illustrata, nell'ambito della metodologia BIM prende forma con il processo noto come "pianificazione della costruzione", ed è quello che andremo a sviluppare a completamento del progetto.

Essa illustra in anticipo i tempi di esecuzione, dal momento di inizio a quello di fine dell'opera. La pianificazione della costruzione si inserisce in un nuovo orizzonte o, nel gergo, in una nuova "dimensione": la "dimensione 4D". Le scelte, le valutazioni e infine le informazioni che ne derivano si rendono concrete e vengono organizzate in una maniera intuitiva e pratica grazie all'ausilio di un software, Microsoft Project, nato appositamente per questi scopi e che è capace di creare una configurazione perfettamente fruibile delle informazioni risultanti. Questo elaborato è una tabella che riporta delle barre rappresentati la durata temporale delle azioni a cui sono associate. Inoltre, permette di impostare i vincoli tra le attività così da ordinarle e creare una linea temporale che infine restituisce, oltre ai

periodi precisi di durata di ogni lavorazione, anche la durata complessiva e l'ordine con cui esse vanno eseguite.

Infine, a coronazione del lavoro svolto, grazie all'ausilio del programma Naviswork, andremo a fondere le informazioni precedentemente ricavate, con la dimensione 3D offerta dal modello geometrico per produrre una rappresentazione multimediale esplicativa e di impatto del processo costruttivo in tutta la sua durata e sviluppo, dal quale si potranno osservare i metodi, i tempi e gli scenari di cantiere che si verificheranno nella realizzazione di questa opera complessa. Per fare ciò dovremo affinare la modellazione dell'oggetto 3D per renderla ulteriormente funzionale e il più possibile collaborativa con il piano temporale. Più specificatamente dovremo modellare tutte quelle parti mancanti fino a questo momento nel modello e che sono oggetto esplicito delle attività o sotto-attività riportate nelle voci del programma temporale e creare un modello composto di "oggetti indipendenti" da associare proprio alle lavorazioni di cui sono il frutto.

3. MODELLAZIONE GEOMETRICA

Come abbiamo precedentemente chiarito, il primo passo, fondamentale, è quello di munirsi di un modello da poter poi importare nei vari ambienti dedicati. Il modello ha una forma complessa, che non rispecchia i canoni degli edifici convenzionali, perciò affronteremo questo problema in Rhinoceros, un programma pensato per la realizzazione di dettaglio di oggetti e componenti meccanici o di design, che permette quindi di possedere in ogni momento del lavoro un grande controllo sull'operato.

3.1 RILIEVO

Per prima cosa è stato eseguito un rilievo della geometria in Autocad dei piani 2D a noi pervenuti. In questa sede, previa valutazione geometrica della generazione spaziale dell'oggetto, sono state ricalcate le linee con cui poi ricostruire uno "scheletro", composto da elementi lineari, che ci servirà nel software di modellazione 3D per definire le superfici curve.

Abbiamo quindi acquisito:

- Lo schema della pianta (con le proiezioni di tutte le curve di bordo);
- I prospetti su tre lati (la figura è simmetrica);
- Le altezze di tutti i massimi e i minimi della superficie dal piano 0 (per facilitare il prossimo passo);
- Le linee di spigolo che dividono i quattro "spicchi" della copertura;
- Le curve di sella (parabole concave) dei quattro "spicchi" della copertura;
- Le proiezioni delle circonferenze che delimitano le aree sottoposte a ispessimento.

Ovviamente, è stato tenuto in considerazione che i file pdf forniti, in quanto tali, riportino delle imprecisioni dovute alla rasterizzazione rispetto ad un software che lavora ad una precisione infinitesimale come quella di Autocad che genera grafica vettoriale. Per sopperire ad eventuali errori è stato fatto anche un lavoro di aggiustamento critico in modo che risultassero le simmetrie come da progetto originale.

Descriveremo, da qui in avanti, i passaggi eseguiti in maniera sintetica perché trattasi di mosse obbligate e funzionali al maneggio dei programmi, soffermandoci al momento opportuno se riterremo di dover dare spiegazione delle scelte fatte.

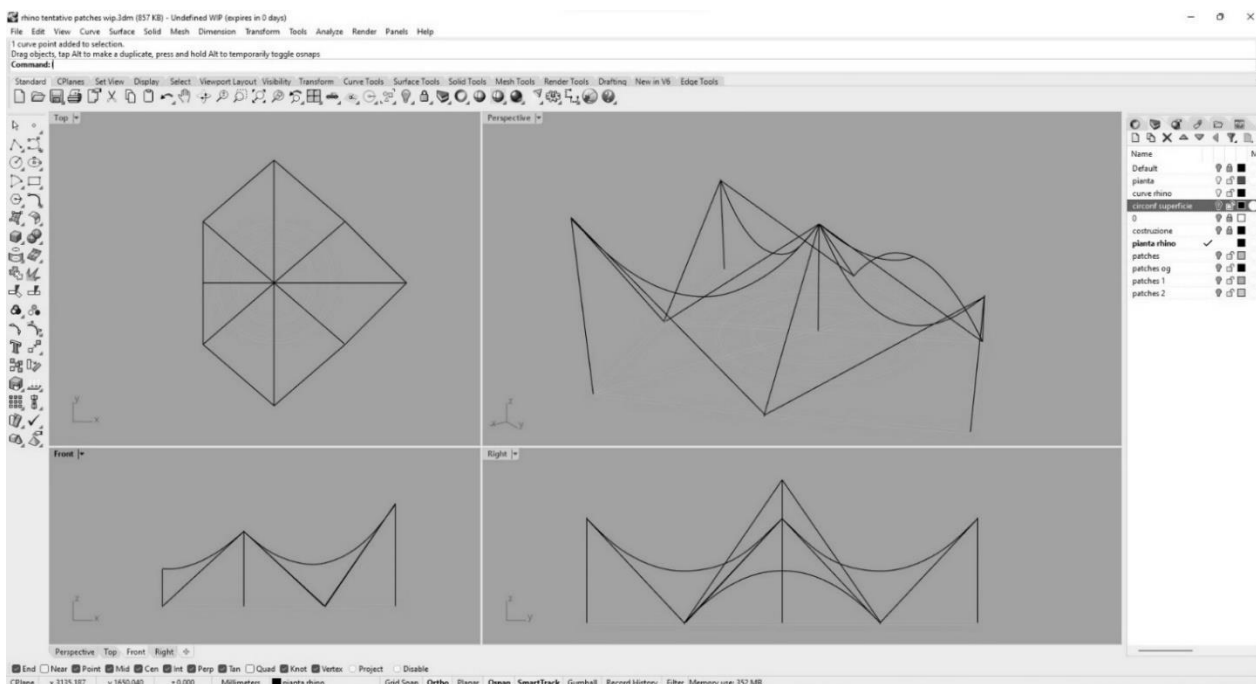


Figura 1

All'interno di Rhinoceros si svolge un lavoro simile ad un assemblaggio per ricostruire quello che può essere considerato uno scheletro: si prendono i vari gruppi di curve e si ricompongono nello spazio le generatrici della geometria posizionandole in maniera coincidente al vero per ottenere il risultato in *figura 1*.

3.2 CREAZIONE POLISUPERFICIE

Avendo preparato tutto il necessario, siamo ora pronti per passare alla generazione delle superfici, motivo per il quale abbiamo scelto questo software. La superficie totale sarà ottenuta come unione delle singole superfici. Infatti, la superficie nella sua interezza è in realtà, per il software, una "polisuperficie", ovvero l'unione di più elementi "superficie".

Lo strumento di modellazione offerto dal programma che meglio si adatta alle nostre esigenze è la "patch"; l'algoritmo eseguito da questo comando prevede che un piano, non generato previamente nel modello, ma creato in automatico dalla macchina al momento

dell'esecuzione e che sarà quello che poi formerà la superficie che vogliamo, venga "adagiato" su delle curve designate. La assegnazione delle curve è l'input che noi forniamo al comando in maniera manuale; perciò, dovranno essere state già precedentemente create, devono essere geometria generata (*figura 2*).

Una volta eseguito, otterremo una superficie curva che passa per le curve designate come desiderato, ma che fuoriesce dalle curve di bordo che desideriamo costituisca il perimetro della stessa (*figura 3*).

Per ottenere la forma definitiva della superficie desiderata dovremo eseguire una operazione di taglio della stessa in concomitanza dei bordi, tramite il comando "trim". Il risultato apparirà come quello di *figura 4*. Notare che si vede chiaramente la curva di sella al centro della superficie definitiva. Questo ci rende certi che il risultato è buono, in quanto ci assicura che i punti della curva coincidono con quelli della superficie curva proprio come volevamo.

Procedendo alla stessa maniera per ognuna delle quattro zone, selezionando di volta in volta le curve perimetrali che fungono da bordo e da sella al paraboloide interessato, otterremo tutta la superficie completa, come in *figura 5*.

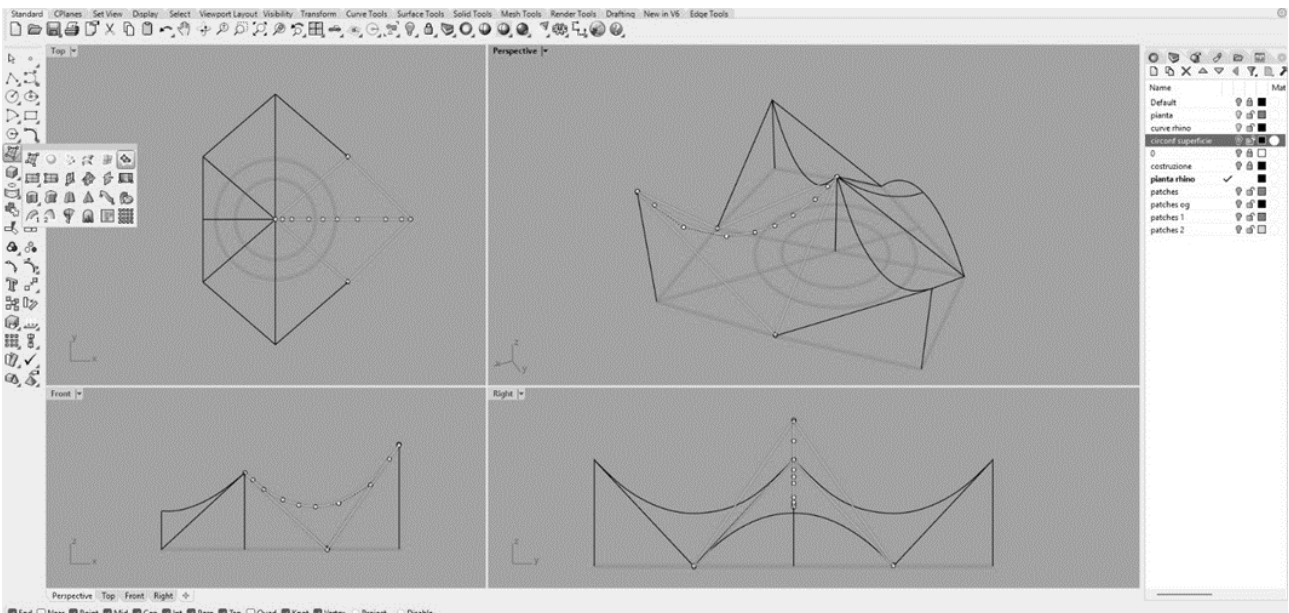


Figura 2

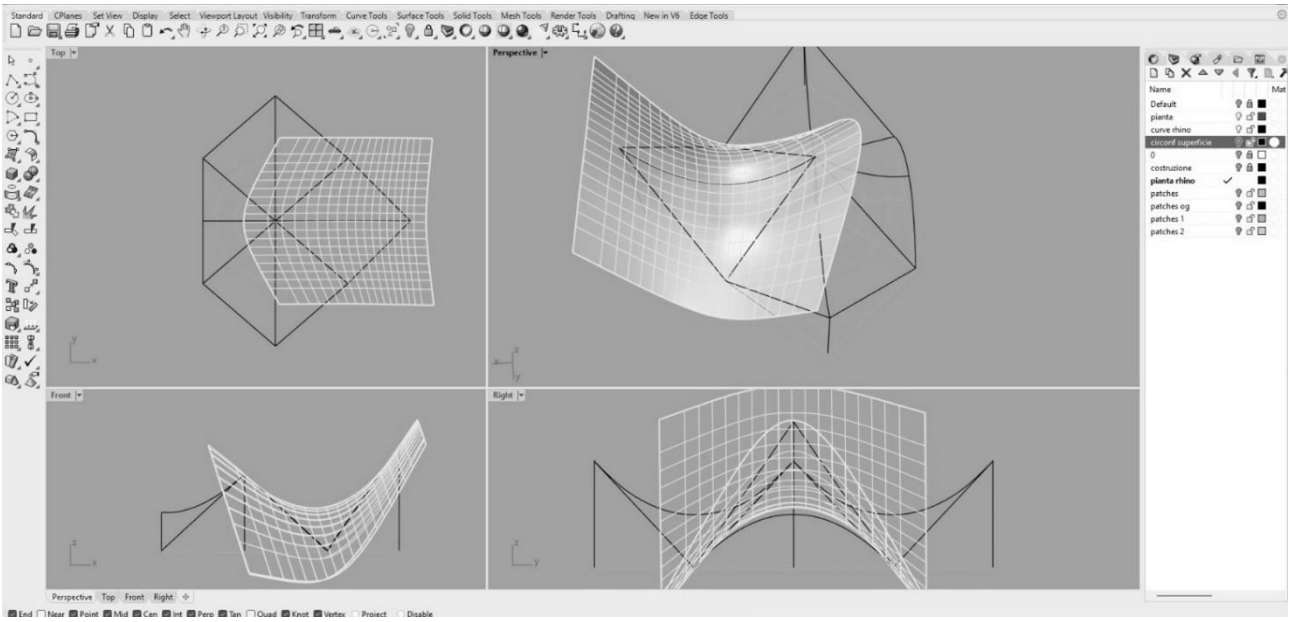


Figura 3

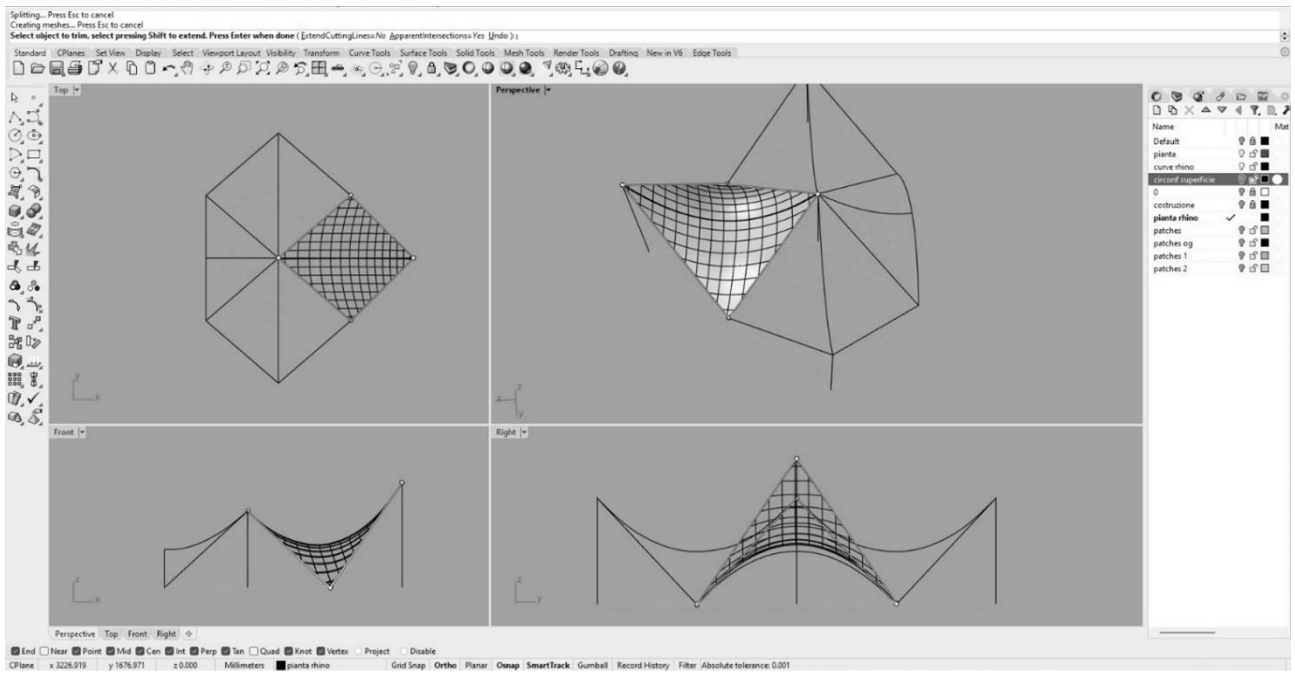


Figura 4

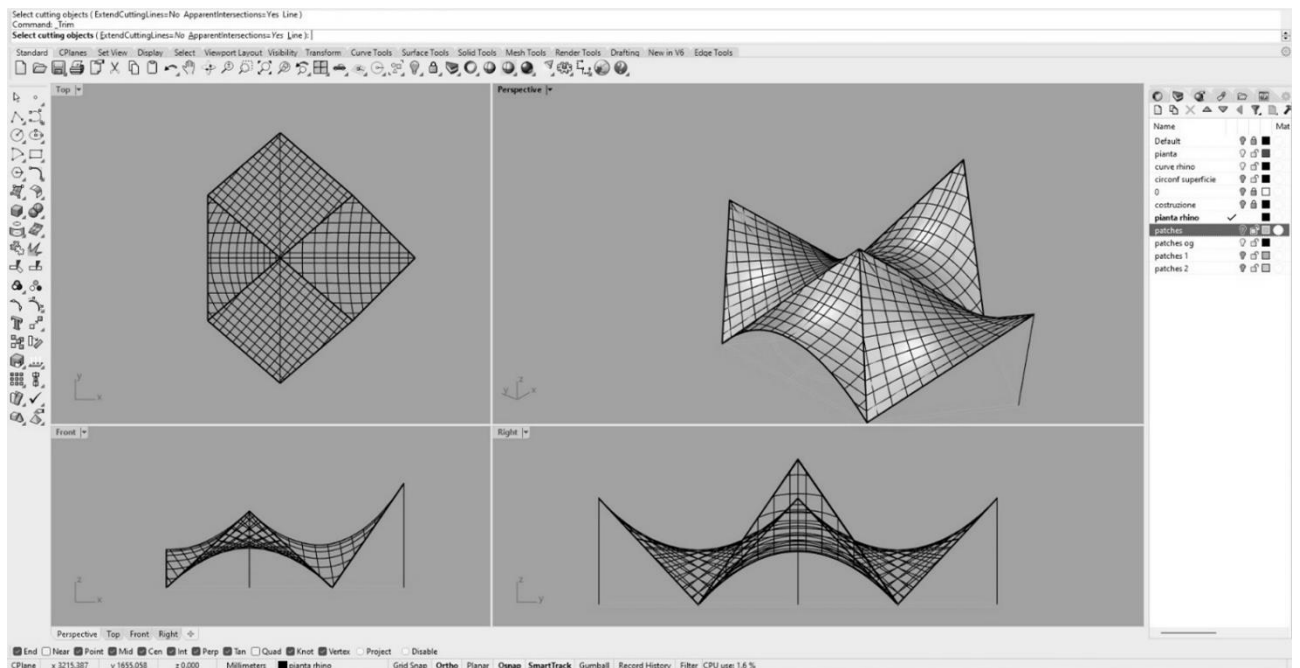


Figura 5

Eseguire l'unione dei quattro pezzi di superficie con il comando "boolean union". Il risultato che dobbiamo ottenere è quello che, nel gergo di Rhinoceros, si chiama "polisuperficie".

L'idoneità del risultato può essere comprovata tramite il tasto "details" che si trova nel menù alla destra, come mostrato in *figura 6.1* e *figura 6.2*, per la apparizione della dicitura "Valid Polysurface".

Ad effetto immediato ci si accorge anche che risulta impossibile selezionare separatamente le singole superfici.

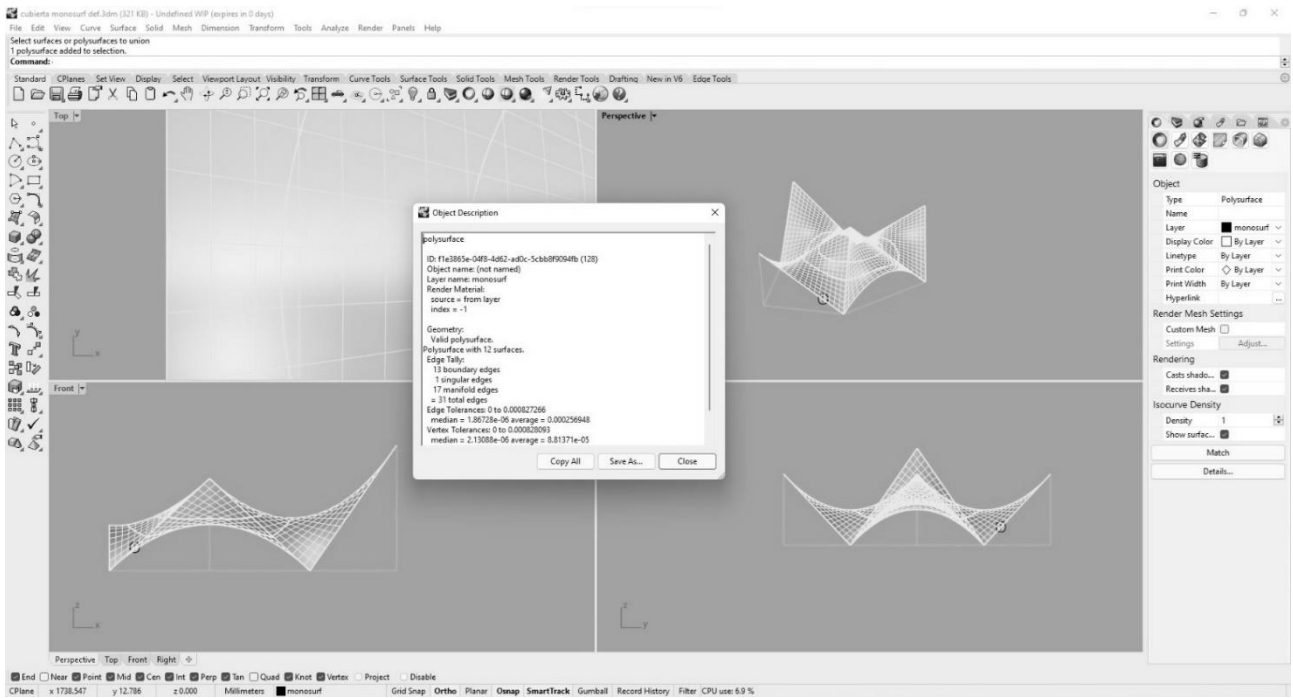


Figura 6.1

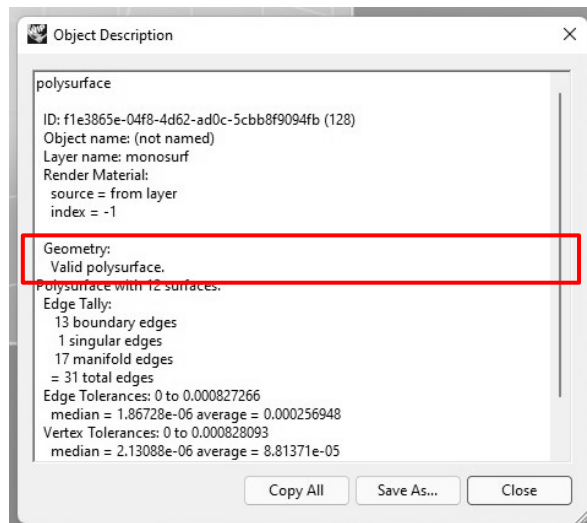


Figura 6.2

3.3 DIVISIONE POLISUPERFICIE

A questo punto dobbiamo escogitare un modo per far sì che risulti possibile modellare gli offset della copertura. In questa prima modellazione grezza e basilare dobbiamo occuparci

di definire nella maniera più precisa possibile le zone, e in particolare i bordi di esse, che riportano spessori diversi e differenziarle tra loro. Avendo già chiara questa consapevolezza, quando abbiamo ricreato la pianta da Autocad abbiamo riportato anche due circonferenze, concentriche. Sono quelle che, proiettate sul paraboloide iperbolico, descrivono le aree che posseggono spessori differenti dal resto.

Le azioni da compiere saranno quelle di estrarre una superficie chiusa che riesca a tracciare la proiezione della circonferenza in pianta sulla polisuperficie. Tramite il comando “extrude straight” intersecheremo il cilindro che si genera con la polisuperficie (*figura 7*) e poi eseguiremo il comando “split” per dividere le due parti, quella interna e quella esterna, che si configurano. In questo modo le due parti del modello saranno riconosciute come due parti diverse e separate (*figura 8*).

Ripetere il procedimento spiegato in questo paragrafo con l'altra circonferenza, la più piccola, per poter ottenere anche la seconda delimitazione e una terza zona separata, come si evidenzia nella *figura 9*, dove i tre colori diversi evidenziano la tripartizione della superficie originale in zone che in pianta risultano concentriche.

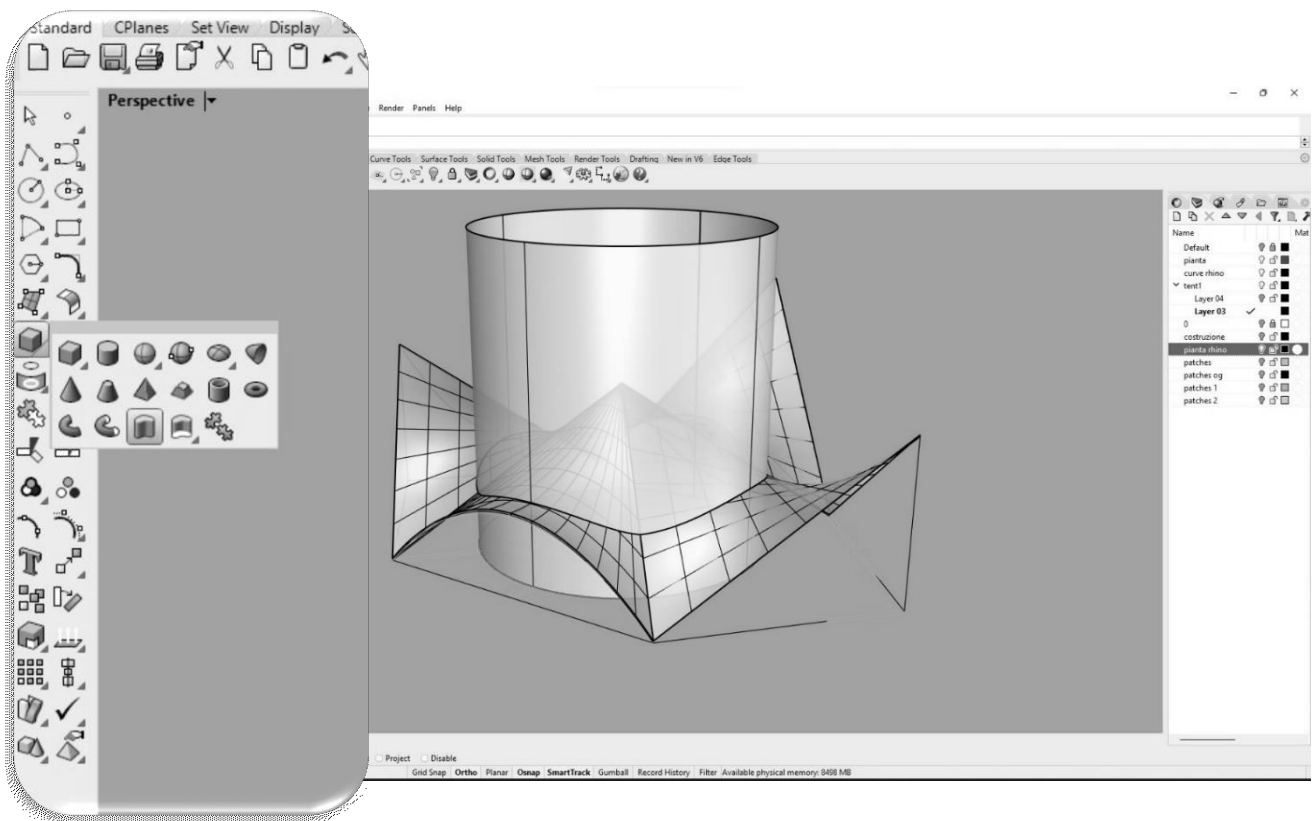


Figura 7

Risulta fondamentale, per la futura esportazione, creare un layer apposito in cui inserire solo le superfici per dividerle dal resto della geometria precedentemente creata per facilitare il lavoro nei programmi successivi, dove si richiederà precisione e maggior pulizia possibile nel modello. Quella che abbiamo costruito è la superficie involvente inferiore del padiglione.

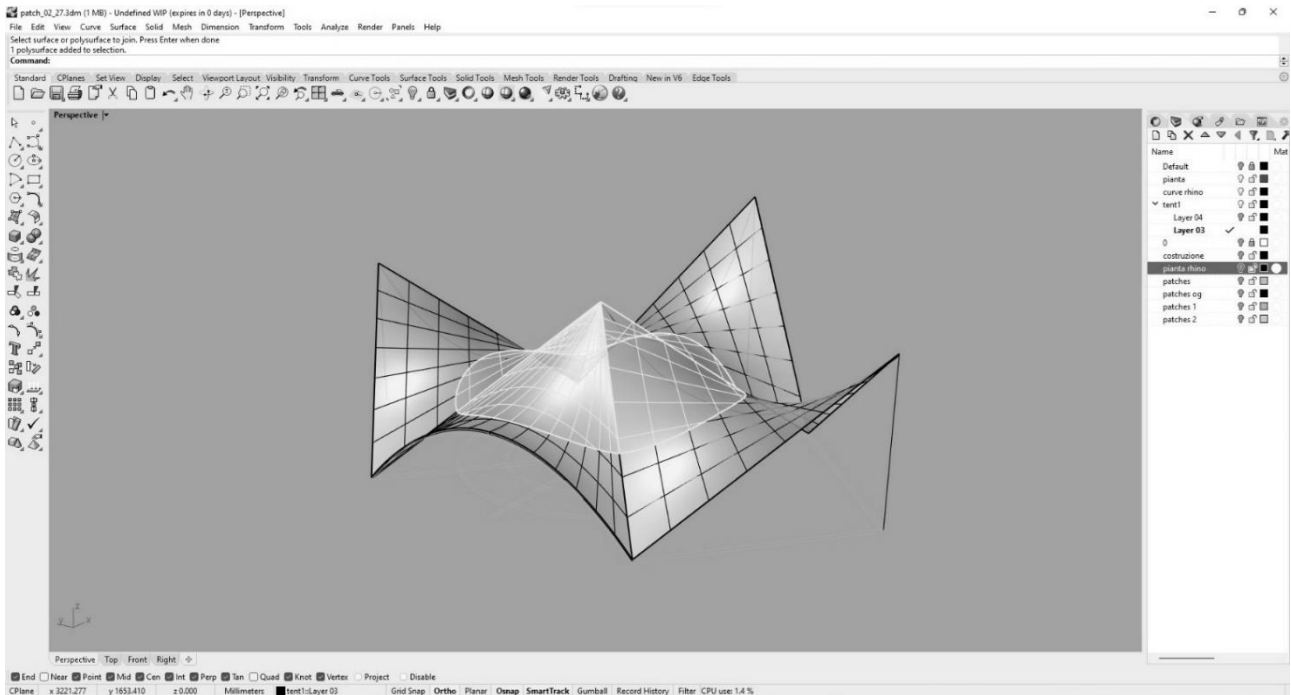


figura 8

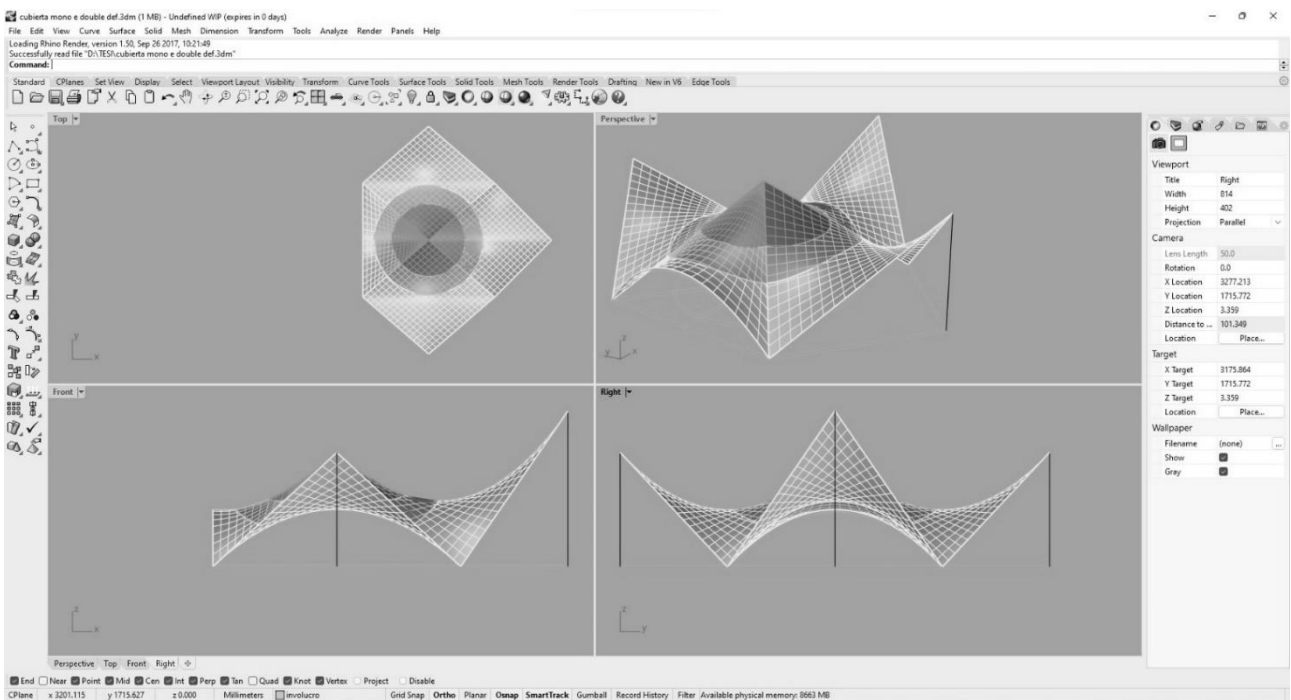


figura 9

4. ANALISI STRUTTURALE

Ci accingiamo in questo capitolo ad affrontare il percorso che ci permetterà di studiare l'oggetto sotto l'aspetto strutturale. Inizieremo con delle osservazioni preliminari che ci consentiranno, attraverso scelte di modellazione, di ottenere un'agevole e fedele definizione dei carichi, oltrech  risultati affidabili e quanto pi  aderenti alla realt .

Quello che ci proponiamo   di analizzare lo stato tensionale della struttura soggetta ai carichi statici, inclusa l'azione del vento che verr  schematizzata con delle forze statiche equivalenti.

L'oggetto del nostro interesse, in questo ambito,   la struttura del padiglione, termine con il quale non si intende solo il guscio di calcestruzzo formato dai quattro paraboloidi iperbolici ma anche tutto ci  che si relaziona con esso e ne determina lo stato tensionale.

Nel dettaglio, quello che ci interessa   determinarne i valori massimi e minimi delle tensioni e il loro andamento qualitativo per identificare i punti pi  sollecitati e quelli meno; in generale tutto ci  che risulter  rilevante ai fini di capire come il guscio assolve al suo compito di struttura.

Per poter compiere un'analisi abbiamo quanto meno bisogno di: un modello geometrico-meccanico della struttura; una sollecitazione o pi  sollecitazioni che impegnino la struttura; un calcolatore che estragga, secondo lo scenario da noi creato, le tensioni che si generano nelle fibre della struttura.

Partiamo parlando del calcolatore ed in seguito vedremo gli altri elementi. Utilizzeremo il software SAP 2000, un programma di calcolo agli elementi finiti, pensato per la progettazione o verifica strutturale di strutture mono-, bi- o tridimensionali modellate con elementi beam, shell o solidi. Il software presenta caratteristiche molto versatili, tanto da rientrare nella categoria dei programmi cosiddetti "generalisti", capaci cio  di analizzare strutture con caratteristiche molto diverse tra loro.   correntemente utilizzato in oltre 160 paesi sparsi in tutto il mondo e pu  vantare il numero pi  alto di utilizzatori nel settore. Questa vasta diffusione consente al programma di godere di controllo sul campo e feedback inestimabili. Grazie ad essi, l'affidabilit  del software   mantenuta costantemente a livello di eccellenza.

Il modello rispetterà il più fedelmente possibile la geometria, quindi forma e dimensione, della struttura che si realizzerà mediando tra precisione e onerosità di calcolo a carico del software. La superficie ondulata infatti verrà dal programma automaticamente mesciata in elementi shell a 3 o 4 nodi. Dal numero degli elementi della mesh dipende la maggiore o minore approssimazione della superficie, con una relazione di tipo inverso. Il fatto che le mesh siano per definizione una superficie poligonale piana comporta inevitabilmente un'approssimazione quando si trovano a sostituire una superficie curva. Risulta tuttavia impossibile aggirare questa semplificazione perché il programma in questione necessita di superfici piane per il calcolo che gli compete. Agli elementi shell saranno poi associati i relativi spessori.

SAP 2000 mette a disposizione strumenti per continuare la modellazione e arricchirla di parti essenziali, quali geometrie nuove, ma anche materiali, sezioni, vincoli ecc., e sarà nostra cura assegnare in maniera approssimata ma realistica e, se vogliamo conservativa, tutte le caratteristiche del soggetto che vengono coinvolte in un'analisi strutturale.

Successivamente passeremo ad approfondire l'ambito teorico e applicativo che contempla l'analisi e la progettazione delle strutture a piastra, vedendo le principali interpretazioni, come la teoria elastica e la teoria plastica, e i metodi di calcolo elaborati nel tempo per dare operatività alle considerazioni teoriche.

Infine, ci approcceremo al calcolo di una shell, come elemento rappresentativo della famiglia delle piastre.

4.1 OSSERVAZIONI E MODELLAZIONE PRELIMINARE

Prima di accingerci al lavoro esporremo degli aspetti concettuali che da una parte ci renderanno più coscienti dell'oggetto che stiamo maneggiando, e dall'altra ci permetteranno di capire meglio le scelte che si effettueranno durante lo svolgimento pratico del compito.

Come già detto, una parte essenziale per comprendere il comportamento e la meccanica di ogni struttura è la conoscenza e lo studio dei vincoli che la pongono in relazione con l'esterno.

Questo padiglione, come abbiamo già visto, possiede quattro punti in cui tocca terra e in ognuno di essi è dotato di un dispositivo che configura una cerniera cilindrica.

Il resto del corpo di vincolo è costituito da un blocco monolitico di cemento armato che nel suo sviluppo longitudinale presenta due sezioni distinte. La più grande è nei pressi della cerniera, la più piccola nella parte più lontana da essa.

In tutta la sua lunghezza questo elemento rimane attaccato alla lamina, andando a costituire un rinforzo consistente nella zona in cui si trova, costituendo un ispessimento repentino e considerevole della soletta di calcestruzzo. Il rinforzo si traduce in incremento di rigidità, che assumerà un valore proporzionale allo spessore del braccio di appoggio.

La valutazione del caso, alla luce delle precedenti considerazioni, ci fa convenire sul considerare la zona in esame come una zona a rigidità infinita rispetto al resto della struttura a causa della consistente differenza di inerzia che si verifica. Per questo motivo andremo a modellare l'area come un corpo rigido non soggetto a deformazioni.

Dalla *figura 10* è possibile vedere come è costruttivamente implementato il vincolo cerniera: tramite l'incastro di una tripla placca, incorporata nel braccio attaccato alla copertura, con una doppia placca fissata nel sito d'appoggio predisposto dalla fondazione. Le placche sono posizionate in modo da allineare i fori su di esse e poter far passare al loro interno un perno.

Lo studio dei carichi non è da noi elaborato, ci limitiamo a riportare che sono stati calcolati e definiti conformemente all'Eurocodice 1 utilizzando valori corrispondenti al sito di riferimento. Essi prendono in considerazione principalmente i carichi permanenti del peso proprio e quelli variabili del vento e della manutenzione. Quello che faremo sarà creare le combinazioni e, dopo aver valutato caso per caso quelle più svantaggiose e che massimizzano i momenti sulla struttura in esame nelle due direzioni, li applicheremo alla copertura.

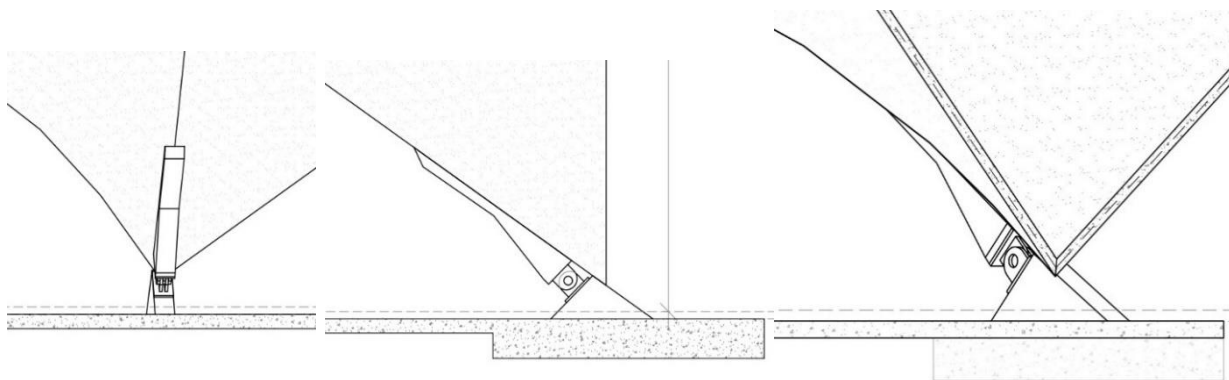


Figura 10

Vediamo come dare attuazione alle idee precedentemente esposte. Si mostreranno le azioni che servono a preparare il modello ad accogliere tutte le nostre necessità nelle fasi successive. Per questo, a volte, le ragioni di alcune operazioni potrebbero risultare oscure e saranno comprese solo nella fase successiva. Questa fase vedrà intercambiarsi i programmi di Autocad e Rhinoceros, in cui manipoleremo il modello a seconda della comodità che i due offrono all'utente nella risoluzione degli specifici problemi.

Una prima operazione consiste nell'affinare il modello prima di importarlo nel programma di calcolo poiché quest'ultimo non dispone delle capacità che permettono di eseguire certi tipi di modifiche geometriche. Le parti interessate sono sostanzialmente quelle della lamina di calcestruzzo in concomitanza degli appoggi. Continuiamo quindi il procedimento con Rhinoceros.

Inizialmente dobbiamo definire con precisione le regioni, zonizzandole e dividendole dal resto della copertura per poter consentire un trattamento riservato e specifico nelle aree dei bracci. Questo ci permetterà di prendere degli accorgimenti che costituiranno uno dei principali contributi per il conseguimento del comportamento reale della struttura. Essendo il braccio di rinforzo in posizione obliqua, è difficile per noi estrarre dagli elaborati 2D le misure, la forma e la posizione direttamente nella lamina, tanto più perché in quella zona riscontriamo anche la coincidenza degli spigoli di confine tra un paraboloide iperbolico e l'altro.

Quello che ci siamo proposti di fare è tracciare l'impronta in pianta ricavandola dai vari prospetti in Autocad, avvalendoci di nozioni di proiezione ortogonale e disegno tecnico, per poi riproiettarlo sulla superficie della copertura che abbiamo pronta in Rhinoceros. Due elaborati in particolare tra quelli forniti inizialmente ci offrono le dimensioni reali di questo elemento, rappresentando essi due sezioni derivanti da piani paralleli alle direzioni principali in cui si sviluppano i bracci.

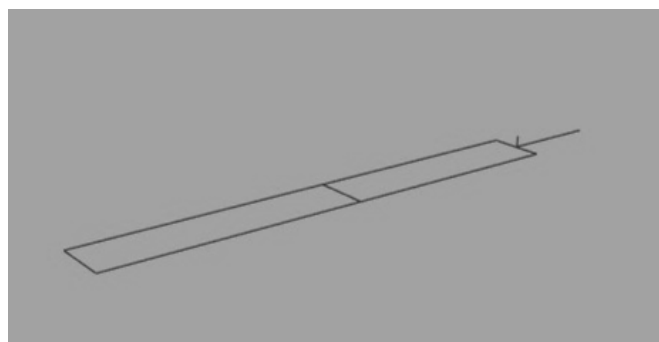


Figura 11

Una volta estratta la proiezione in pianta dotata dei riferimenti di collocazione (*figura 11*), la apponiamo nella giusta posizione rispetto al resto dell'oggetto e, proiettando le linee sulla lamina, otterremo la zona reale di concomitanza tra bracci e lamina ben delineata (*figura 12*). Il passo successivo consiste nel dividere le aree così definite dalla superficie intorno ad esse.

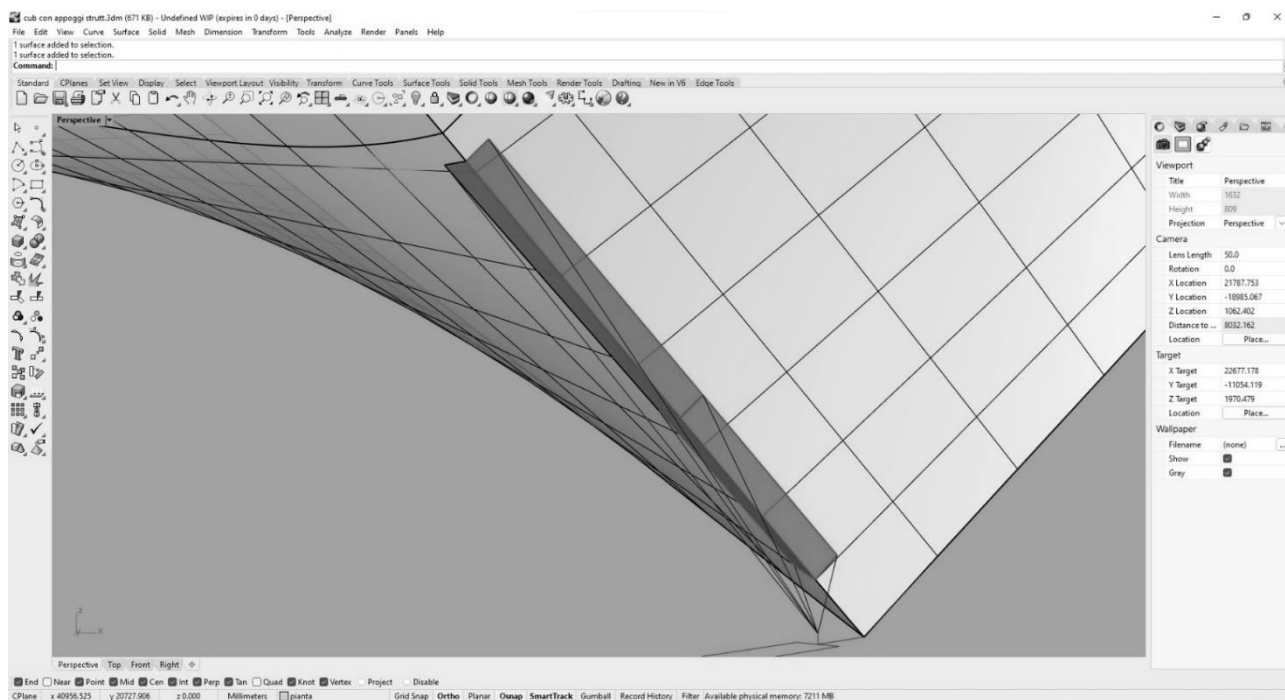


Figura 12

Come si può vedere dalla *figura 11*, le proiezioni erano munite non solo di segmenti per la collocazione rispetto alla struttura, ma anche di un segmento, più piccolo, perpendicolare agli altri, che serviva a identificare il punto in cui la cerniera si concretizza. Questo risulta molto importante poiché, come abbiamo detto, la posizione del vincolo risulta determinante per la buona rappresentazione della struttura nel suo complesso e per l'attendibilità delle sollecitazioni che si generano per l'effetto dei carichi. In generale è stato importante quindi procedere con molta cautela e precisione. Allo stesso tempo si è prestato attenzione a rendere il più possibile saldi ed evidenti i riferimenti geometrici, poiché sapevamo che il modello avrebbe subito molti passaggi da un software all'altro. Perciò è stata creata una rete di linee convergenti al punto di cerniera che limitasse la perdita di riferimenti nei passaggi tra un software all'altro a causa del potenziale spostamento delle geometrie che a volte capita.

A questo punto potremmo introdurre il modello nel calcolatore, ma purtroppo abbiamo bisogno ancora di manipolare le mesh per dare regolarità e per rendere gestibili queste parti che abbiamo diviso. Infatti SAP2000 riesegue l'operazione di meshing della superficie, producendo configurazioni, a volte, che potrebbero produrre errori nei risultati.

I problemi che abbiamo riscontrato sono i seguenti:

- Meshing incontrollabile nelle zone critiche di appoggio (*figura 13*);
- Non coincidenza generalizzata tra i nodi delle mesh (*figura 14*);
- Non aderenza generalizzata dei lati delle mesh (impercettibile ad una osservazione non mirata).

Il primo problema non permette la gestione e la descrizione delle caratteristiche strutturali effettive del padiglione, il secondo non permette al programma di eseguire il suo algoritmo di calcolo secondo il quale le sollecitazioni su tutta l'estensione di una superficie (mesh) si rende nota a partire dalle equazioni che descrivono l'equilibrio dei suoi nodi, poiché ogni nodo dovrebbe essere in comune tra due o più mesh per garantire il comportamento dovuto alla continuità della superficie. Il terzo, infine, chiaramente rende impossibile la trasmissione delle forze tra una mesh e l'altra, quindi interromperebbe i percorsi degli sforzi impedendo di portare a termine l'analisi.

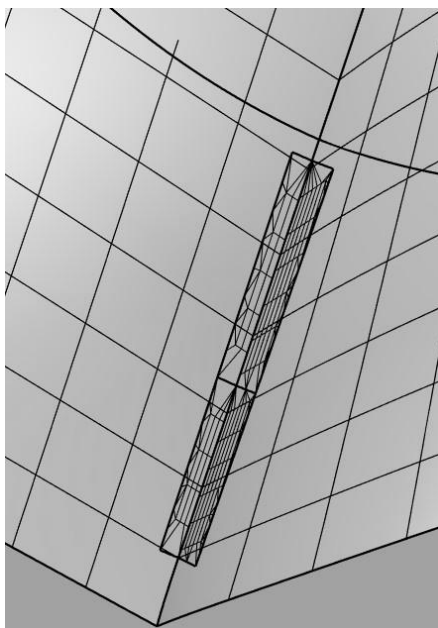


Figura 13

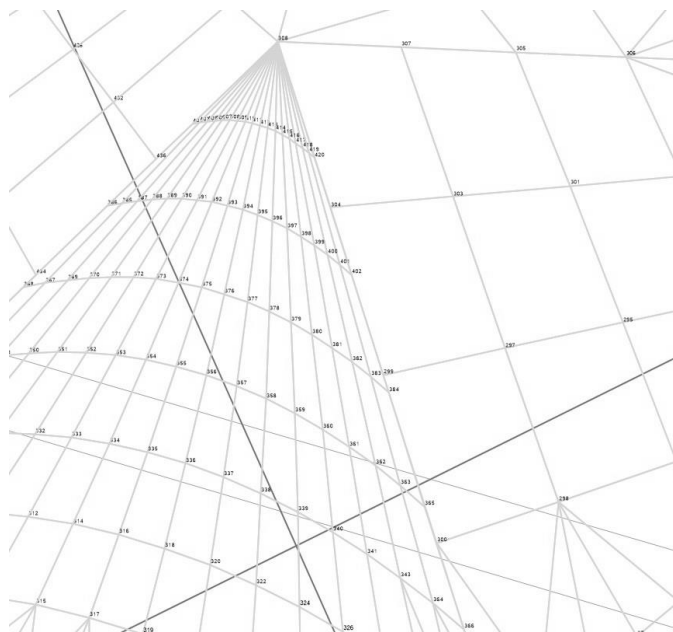


Figura 14

Eseguendo una manipolazione, con processi di aggiustamento e rifacimento della mesh nel programma Autocad, infine, si è arrivati ad ottenere un modello perfettamente funzionante e adatto sia alle nostre esigenze di modellazione, sia a quelle del calcolatore.

Mostriamo in *figura 15* la forma risolutiva del problema numero due precedentemente elencato. Ora i nodi coincidono tutti; nessuno di essi tocca un punto che non sia un altro nodo. Inoltre, abbiamo semplificato anche la configurazione delle mesh in prossimità del vertice alto della struttura: dove prima convergevano moltissime superfici, ora ne abbiamo solo tre. Questo sicuramente aiuta il programma a non incappare in errori e a svolgere l'analisi in forma più snella.

Inoltre, abbiamo regolarizzato la suddivisione in mesh della parte di appoggio in modo che il trattamento che le riserveremo avrà un effetto omogeneo su tutta l'area nonostante sia suddivisa al suo interno (*figura 16*).

Con un occhio alle possibili problematiche future si è infine pensato di ridefinire localmente il meshing dell'oggetto affinché assecdasse la forma dei carichi che si andranno ad applicare su di esso (*figura 8*).

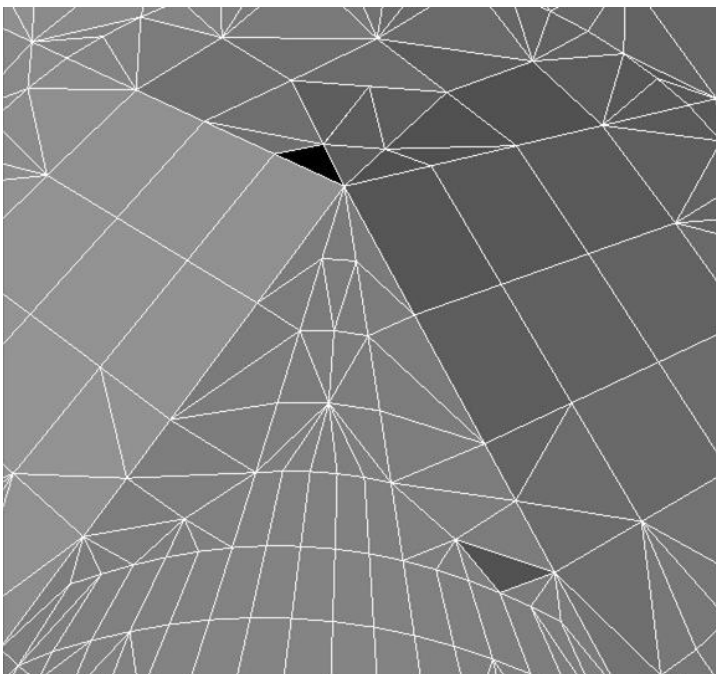


Figura 15

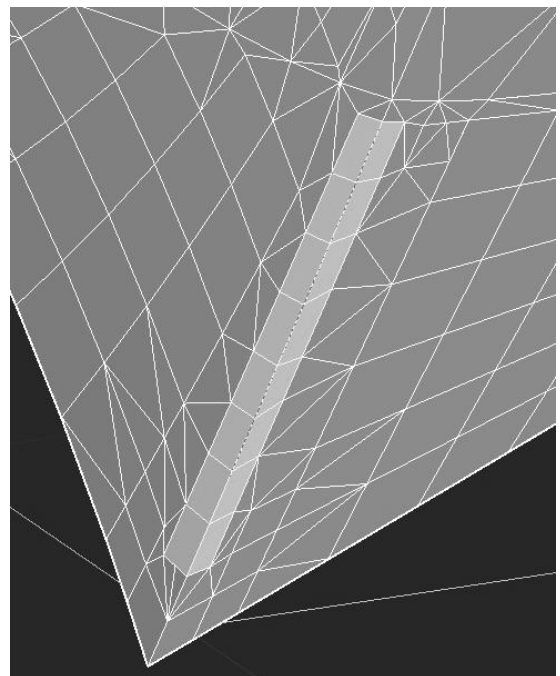


Figura 16

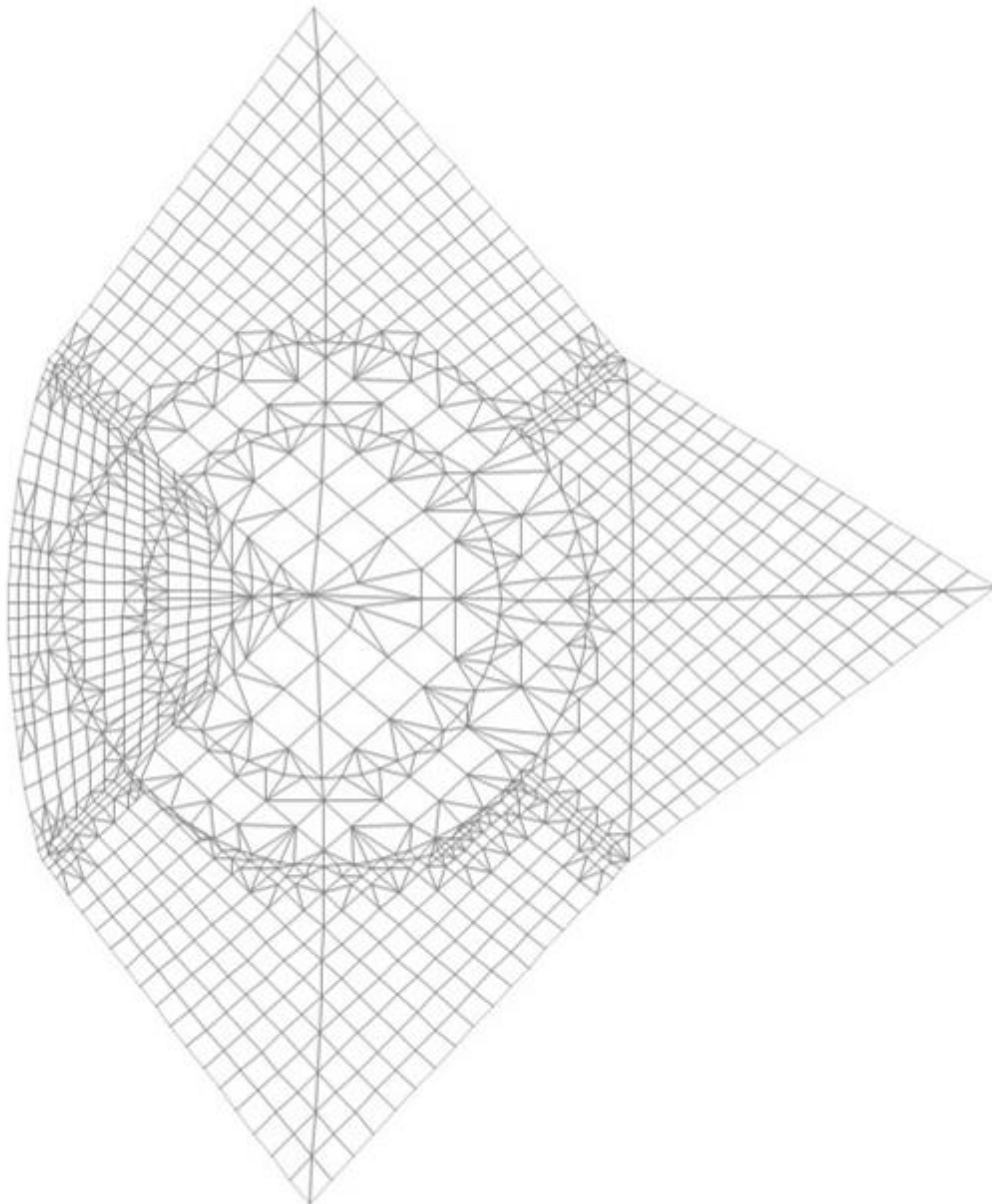


Figura 17

La *figura 17* rappresenta la forma finale nel momento dell'importazione in SAP2000, dove si applicheranno le caratteristiche inerziali e meccaniche all'oggetto e si definiranno tutte le istanze del caso. Questa forma risulta soddisfacente per avere una divisione in mesh accurata nelle zone degli appoggi e precisa e coerente nel resto della sua figura con la forma dei carichi che dovrà sopportare.

4.2 DEFINIZIONE DEI COMPONENTI

Nel programma SAP2000 andremo a completare la formazione del modello con degli attributi specificamente strutturali. Quello che verrà mostrato può tuttavia considerarsi una modellazione, ma questa non si rivolge agli aspetti geometrici formali. Le geometrie o le indicazioni che aggiungeremo al suo interno saranno finalizzate a conferire alla struttura il comportamento che, in base ai disegni pervenutici, pensiamo sia quello più realistico e che quindi restituisca la situazione più simile a quella che si verificherà una volta che la struttura sarà costruita ed entrerà nel suo ciclo di vita. Anche nei casi in cui genereremo geometrie, queste saranno la riproposizione di elementi fisici concreti presenti nell'architettura complessiva dell'opera, ma non avranno la loro forma. Conferiranno però all'oggetto la capacità di rispondere nel modo realistico, perché quelli che andremo ad aggiungere saranno degli elementi che portano con sé delle proprietà ben determinate.

Primariamente andiamo a risolvere la questione degli appoggi di cui ci siamo tanto preoccupati nelle fasi precedenti. Finalmente, andremo a completare il processo che porta all'ottenimento del vincolo della struttura. Lo strumento di cui ci avvaliamo prende il nome di link e porta con sé la proprietà di essere indeformabile. Questo connettore, che apparirà come un braccio, avrà i due estremi attaccati a due nodi distinti. Il primo sarà quello posto nel punto in cui è collocata la cerniera e sarà comune a tutti i links, poi ognuno di questi connettori si andrà ad agganciare ad uno dei vertici delle mesh che si trovano nell'area in corrispondenza degli appoggi fino a che non saranno tutti occupati. Questa configurazione crea la condizione per cui tutta la zona risulta vincolata in maniera rigida alla cerniera, andando a ricreare la condizione effettivamente imposta dall'esistenza del braccio di cemento in corrispondenza degli appoggi, che assolve ad una funzione di ripartizione sulla copertura delle azioni concentrate localizzate in corrispondenza del vincolo.

In *figura 18* e *figura 19* si può osservare la loro configurazione spaziale e le caratteristiche che abbiamo definito.

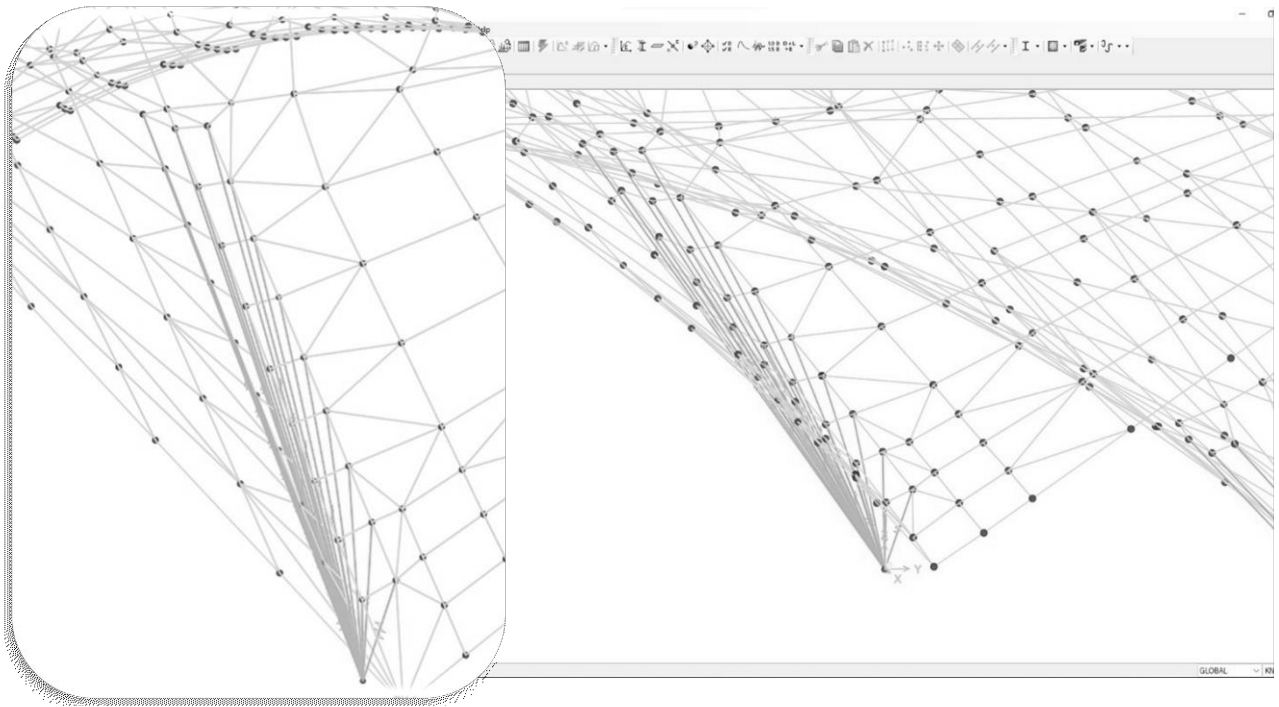


Figura 18



Figura 19

Come vediamo dalla *figura 19*, ai link è stato imposto il vincolo di traslazione (U1, U2, U3) e rotazione (R1, R2, R3) per cui non è permesso loro di deformarsi né in compressione, né in trazione e né in flessione, poiché sono state spuntate tutte le caselle corrispondenti ai gdl da vincolare. Questa configurazione blocca tutti i nodi delle mesh nell'area di appoggio.

La seconda cosa che trattiamo è il comportamento della cerniera, nello specifico la sua meccanica e i suoi movimenti.

Abbiamo già esaminato l'implementazione di questa da un punto di vista fisico, e si è evinto che il meccanismo non costituisce una cerniera sferoidale, piuttosto la rotazione avviene in un unico piano, che è quello che passa per le due cerniere opposte e in cui giacciono anche gli spigoli tra i paraboloidi corrispondenti ad esse.

Per definire questo comportamento dobbiamo avvalerci della manipolazione degli assi locali, che il programma assegna ad ogni elemento della geometria (nodi, mesh, ecc.) e andarli a disporre in una posizione consona che permetta di definire il piano che ci interessa e bloccare le rotazioni negli altri due. Infatti, i piani di rotazione sono in cinematica descritti dalla direzione normale ad essi. Perciò dovremo orientare gli assi del nodo di cerniera in modo che uno dei tre sia perpendicolare al piano precedentemente descritto, mentre gli altri due saranno inseriti proprio in questo.

Il lavoro non risulta complesso perché, fortunatamente, il software ci permette di definire il piano in cui orientare un asse a nostra scelta tramite la selezione di due punti per cui il piano perpendicolare ad esso passa. Nel nostro caso corrisponderanno alle posizioni delle due cerniere opposte e sarà quindi un lavoro che verrà svolto in due coppie poiché le cerniere sono quattro (*figura 20.1*).

Dalla *figura 20.2* vediamo come ora l'orientamento degli assi del nodo di cerniera sia diverso, leggermente ruotato, rispetto a quello degli altri nodi; inoltre possiamo apprezzare dalla *figura 20.3* la definizione del vincolo attraverso le limitazioni traslazionali e rotazionali. È molto importante in questo passaggio avere chiaro il nome dei singoli assi, per evitare associazioni errate.

La conferma dell'esattezza del procedimento la possiamo ottenere dall'osservazione del simbolo che appare al piede della cerniera, in cui il rettangolo deve essere posto in posizione perpendicolare al piano in cui si verificherà la rotazione e il triangolo invece complanare ad esso.

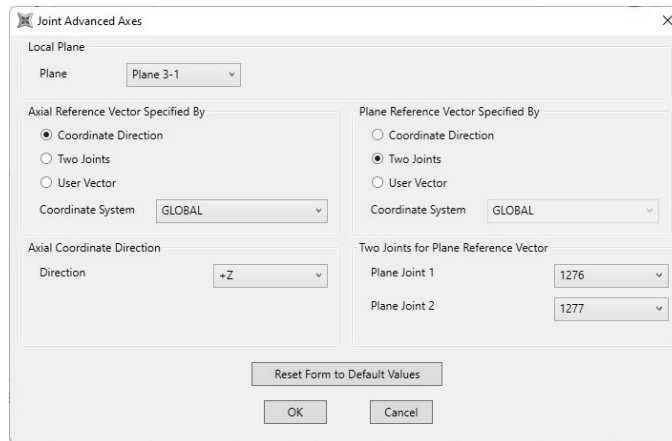


Figura 20.1

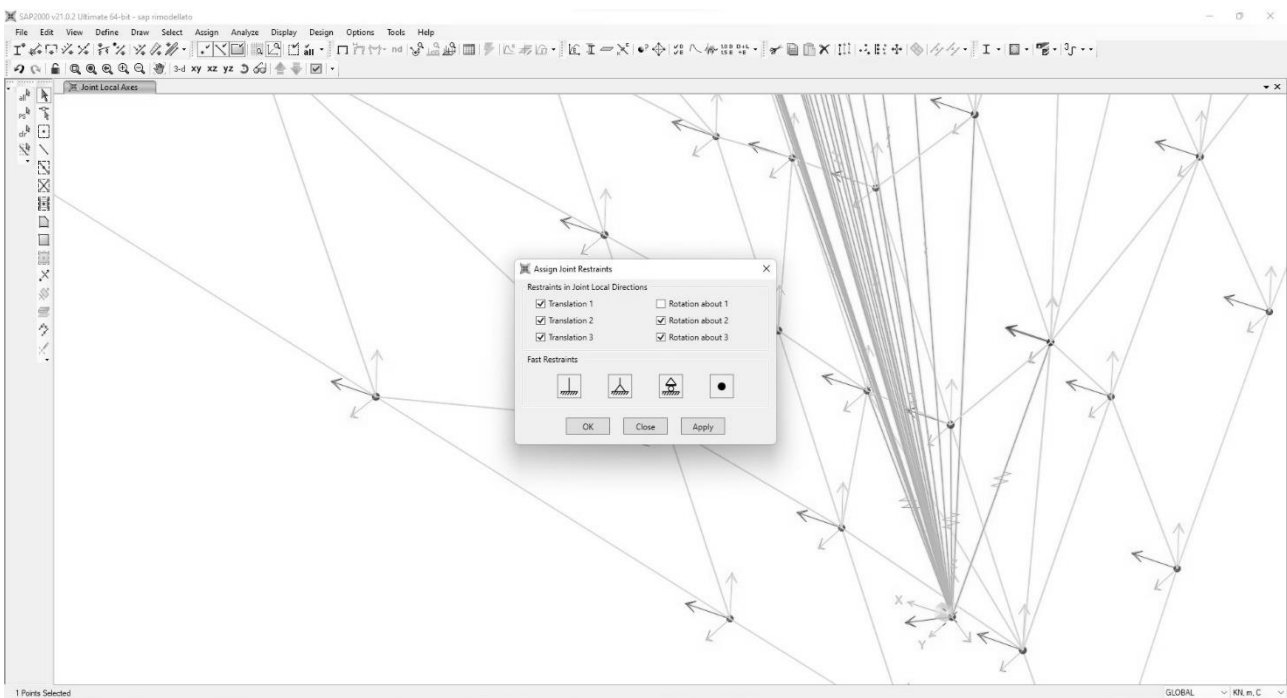


Figura 20.2

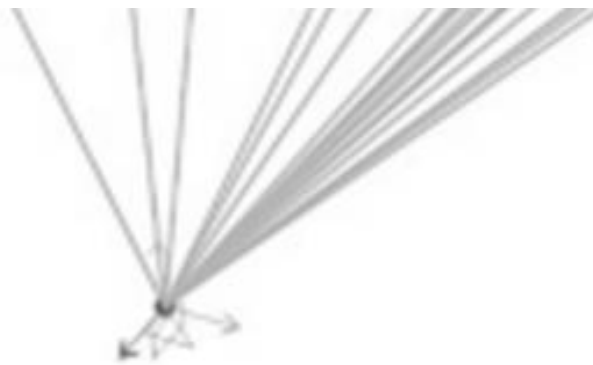


Figura 20.3

Dopo gli appoggi andiamo a modellare la lamina della struttura a guscio del padiglione. Nel pratico andiamo ad assegnare le varie sezioni alle mesh che costituiscono tutta la superficie. Gli spessori sono tre; avremo bisogno di definire tre diverse sezioni. È proprio in questo momento che si rivela fondamentale la divisione della superficie prodotta attraverso le circonferenze concentriche effettuata previamente e preventivamente. Infatti, potendo assegnare un'unica sezione ad una mesh nella sua interezza, sarebbe risultato problematico se le mesh si fossero estese per due zone che sarebbero dovute essere destinate a spessori diversi.

Assegnando una sezione ad un elemento di superficie (un'area), quello che si genera è una "shell" ovvero un elemento che ha due dimensioni predominanti rispetto alla terza, che è appunto lo spessore che andremo ad indicare.

Alla definizione della sezione risulta indissolubilmente legata la definizione del materiale. Per quest'ultimo abbiamo impostato i valori come su indicazione pervenutaci. Trattandosi di un calcestruzzo fibrorinforzato posto in opera con la tecnica dello *spritz beton* la classe richiesta è la C 50/60 e sono poi stati assunti i valori comuni di un calcestruzzo come questo (*figura 22*).

Per le shell invece, sono stati impostati i valori di spessore, diversi per le tre differenti definite, indicando la tipologia di *shell-thin* (*figura 22*).

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Reinforced Concrete

Material Type: Concrete

Material Grade: C50/60

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 24,9926

Mass per Unit Volume: 2,5485

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 37239259,

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,000E-05

Shear Modulus, G: 15516358,

Other Properties For Concrete Materials

Concrete Characteristic Compressive Strength, fck: 49800000,

Expected Concrete Compressive Strength: 49800000,

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 21

Shell Section Data

Section Name: sezione 12 cm

Section Notes: Modify/Show...

Display Color:

Type

Shell - Thin

Shell - Thick

Plate - Thin

Plate Thick

Membrane

Shell - Layered/Nonlinear

Modify/Show Layer Definition...

Thickness

Membrane: 0,12

Bending: 0,12

Material

Material Name: + Reinforced Concrete

Material Angle: 0,

Time Dependent Properties

Set Time Dependent Properties...

Concrete Shell Section Design Parameters

Modify/Show Shell Design Parameters...

Stiffness Modifiers

Set Modifiers...

Temp Dependent Properties

Thermal Properties...

OK Cancel

Figura 22

4.3 DEFINIZIONE DEI CARICHI

Presi questi accorgimenti di modellazione, siamo finalmente pronti per definire i carichi da assegnare alla nostra struttura.

Le azioni applicate nell'analisi della struttura sono state determinate in conformità alle norme vigenti e, in particolare, agli Eurocodici 0 e 1. Conformemente all'Eurocodice 1, sono state prese in considerazione le seguenti azioni:

- Azioni Permanenti:

Come definito nell'Eurocodice 0, è probabile che le azioni permanenti agiscano per tutto un determinato periodo di riferimento e per le quali la variazione di entità nel tempo sia trascurabile o per le quali la variazione sia sempre nella stessa direzione (monotonica) fino a quando l'azione non raggiunge un certo valore limite. Le azioni permanenti considerate sono elencate di seguito:

▪ Peso proprio	25.0 kN/m ³
▪ Finitura	0.5 kN/m ³

- Azioni Variabili:

L'Eurocodice 0 definisce le azioni variabili come azioni "per le quali la variazione di entità con il tempo non è né trascurabile né monotono." Le seguenti azioni variabili considerate come parte di questo progetto sono elencate di seguito:

▪ Copertura non praticabile: manutenzione	0.4 kN/m ³
▪ Vento	2.84 kN/m ³

Il vento per sua natura è un carico che impone una pressione o una depressione sugli oggetti ad esso esposti, dipendentemente dalla direzione del vento e dall'orientamento dell'oggetto affetto. Per questo motivo si ritiene necessario, valutando la forma della struttura in esame, applicare varie combinazioni di come il vento agisce sulla struttura. Questa, infatti, proprio per il suo comporsi dall'unione di più superfici curve, che portano a cambi di orientamento della normale alla stessa, potrebbe facilmente essere soggetta al contempo a pressioni di segno opposto in due regioni diverse.

Le combinazioni dei carichi che si scelgono per sollecitare la struttura devono ovviamente ipotizzare e contemplare tutte le condizioni possibili, per poi basarsi su quelle che amplificano in maniera massima i momenti sul guscio, sia in un verso che nell'altro.

A partire dalla forma della struttura, si possono concepire due regioni all'interno di essa, distinte per entità della sollecitazione a cui saranno soggette, che variano in base alla direzione del carico del vento. Le zone si conformeranno in direzione perpendicolare alla traiettoria del vento, così da avere sempre una zona di alta pressione e una di bassa pressione contemporaneamente.

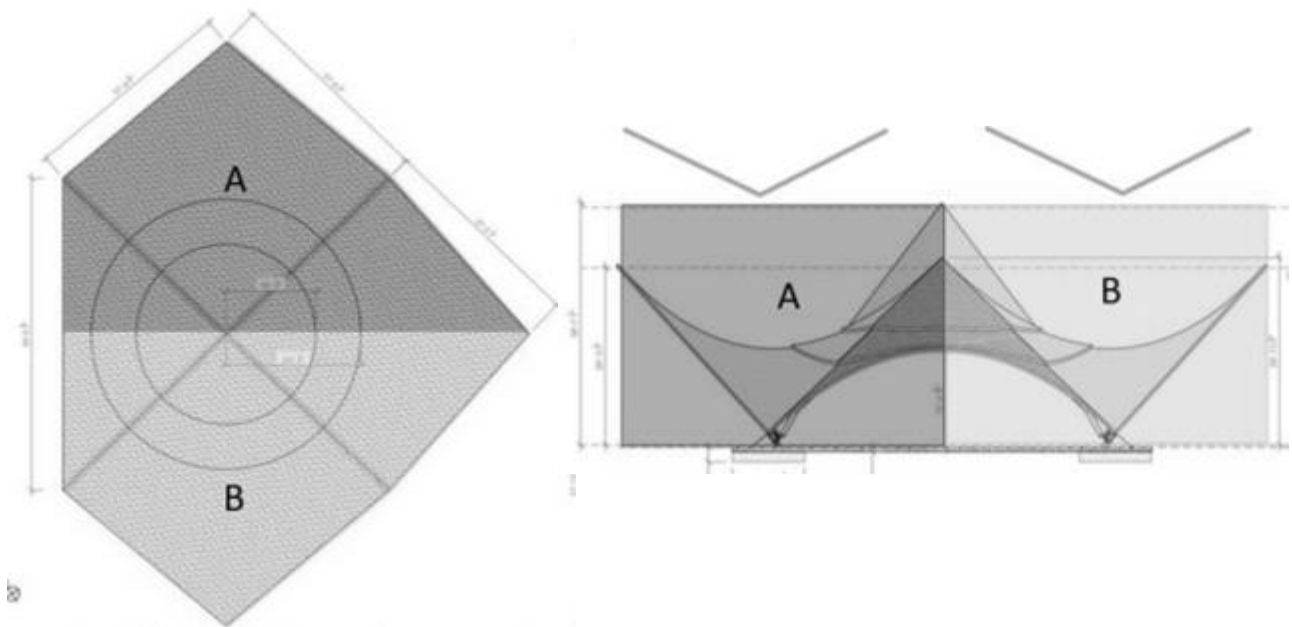


Figura 23.a – direzione del vento longitudinale

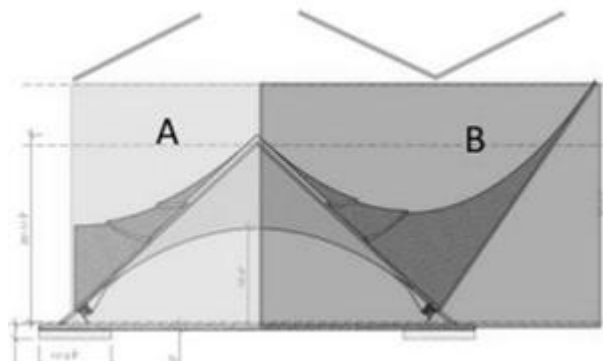
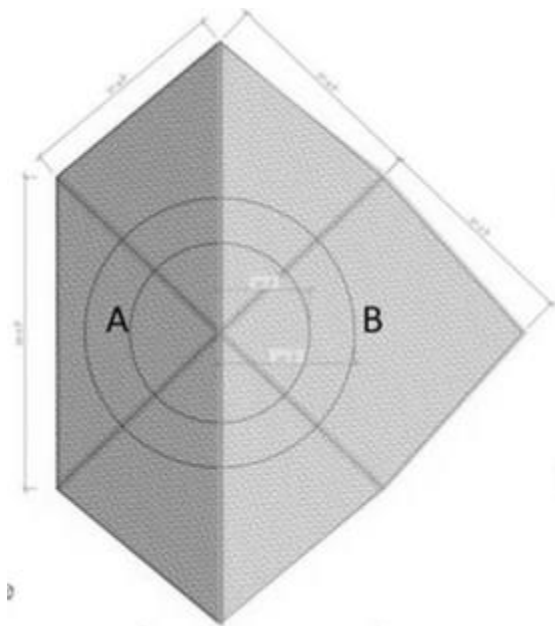


Figura 23.b – direzione del vento longitudinale

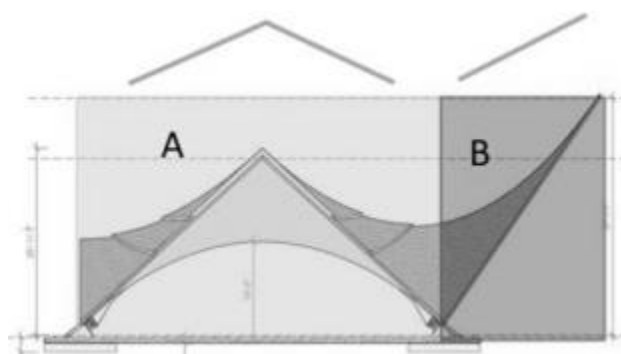
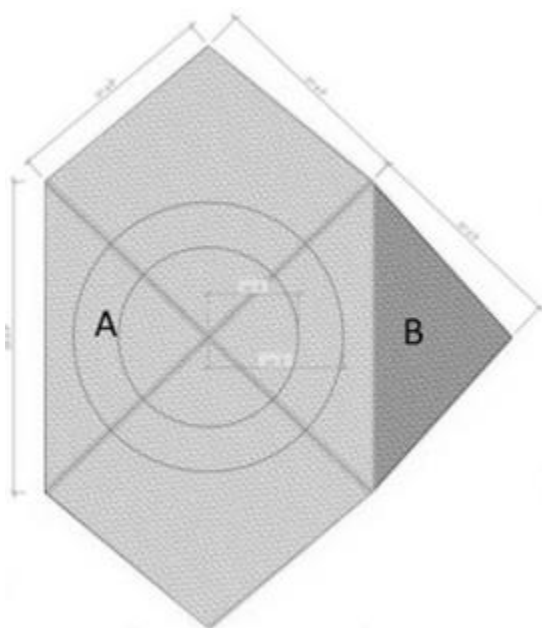


Figura 23.c - direzione del vento trasversale

Ognuna delle tre configurazioni indica un modo in cui il vento potrebbe sollecitare la struttura. Ogni punto che fa parte di una delle due zone sarà soggetto allo stesso tipo di sollecitazione. Principalmente le due zone si distinguono per il segno della sollecitazione; quindi, per essere sottoposte a pressione o depressione nello stesso momento in cui l'altra è sottoposta alla sollecitazione opposta.

Dovremo quindi caricare allo stesso tempo la struttura con due carichi relativi al vento di uguale valore ma con segno variabile in due zone distinte e complementari, che abbiano

alternativamente le forme viste nelle *figure 23.a, 23.b e 23.c*, creando tutte le possibilità di entità del carico.

Per ognuna delle tre possibilità di forma del carico, avremo le seguenti combinazioni:

COMB	ZONA A	ZONA B
COMB 1	Positivo	Positivo
COMB 2	Positivo	Negativo
COMB 3	Negativo	Positivo
COMB 4	Negativo	Negativo

Tabella 1

Essendo tuttavia una struttura simmetrica, potremmo risparmiarci nel caso della forma illustrata in *figura 14.a* di eseguire entrambe le combinazioni di segno alternato, già una delle due risulta esauriente.

Nel definire il carico “vento” all’interno del programma SAP 2000 dovremo quindi dettagliare ognuna delle situazioni tramite la creazione di 6 carichi, che chiameremo W1a, W1b, W2a, W2b, W3a, W3b, e che avranno le forme precedentemente viste. La necessità di definire un percorso di carico differenziato per ogni zona dipende dal dover gestire in maniera divisa i segni.

La *figura 24* riassume i carichi definiti:

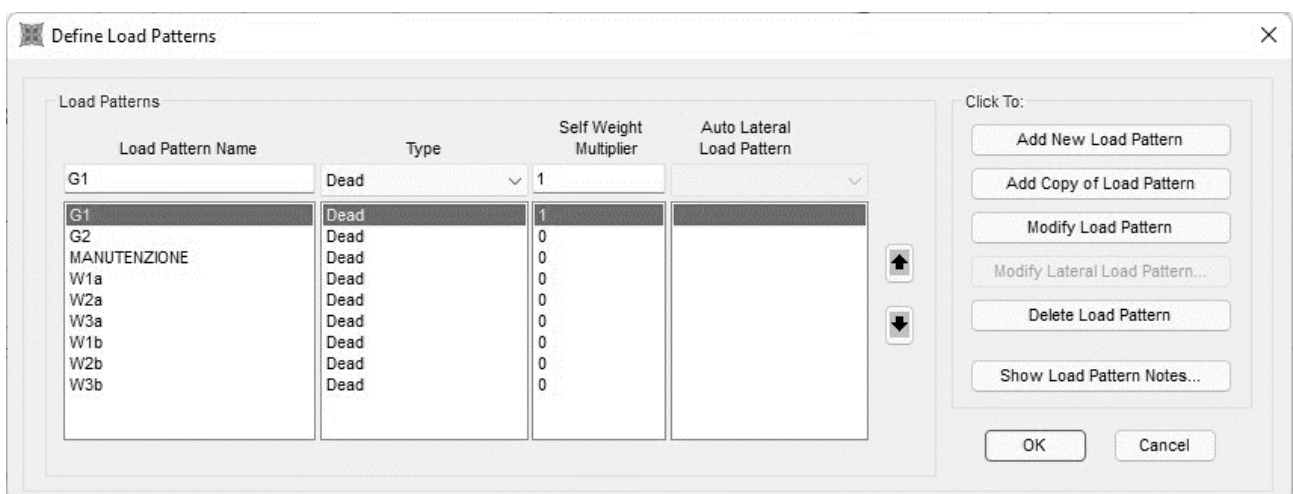


Figura 24

Illustrato nello specifico l'azione variabile del vento, passiamo a trattare delle combinazioni che abbiamo creato. I coefficienti sono stati presi dall'Eurocodice 1, per quanto si riferisce allo Stato Limite Ultimo. La combinazione che useremo sarà quella fondamentale, o caratteristica, ed avrà la seguente struttura generale da coniugare nei casi opportuni:

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,j} \varphi_{0,i} Q_{k,j}$$

Dove:

$\gamma_{G,j} = 1$ se favorevole, 1.35 se sfavorevole;

$\gamma_{Q,j} = 0$ se favorevole, 1.5 se sfavorevole;

$\varphi_{0,i}$ = assume un valore variabile in base alla tipologia di carico.

Considerando che l'intento della verifica o progettazione strutturale è quello di accertarsi, nella condizione più gravosa per la struttura, del suo stesso comportamento e della sua resistenza, per assegnare la caratteristica di favorevole o sfavorevole ad un carico, con il conseguente coefficiente, si fa riferimento alla direzione di applicazione dei carichi, o meglio alla natura dello sforzo che questi generano su di essa e come contribuisce alla causa della massimizzazione della sollecitazione che si è presa in esame. I carichi sollecitano la struttura in una certa direzione, ma si deve pensare che non è detto che sia la somma dei contributi di tutti i carichi a fornire la situazione peggiore, poiché questi potrebbero gravare sulla struttura in direzioni opposte e le azioni mitigarsi l'un l'altra. Questi coefficienti permettono proprio di ricreare le condizioni più provanti, ovvero generare gli sforzi massimi che si possono verificare, alla luce dello studio della natura dei carichi.

Nella combinazione che usiamo, come abbiamo visto, prendiamo in considerazione azioni variabili; bisogna quindi definire quale tra di esse è la principale e quali le secondarie. Nel nostro caso le azioni sono solo due: il vento e la manutenzione. Sebbene il rigore vorrebbe che fossero applicate tutte le combinazioni di carico, alternando tutte le azioni variabili nel ruolo di principali e secondarie, da progettisti ci sentiamo di poter snellire il lavoro e prendere in considerazione solo le combinazioni in cui apporremo l'azione Vento come variabile principale. L'azione variabile che viene assegnata al ruolo di secondaria, viene coerentemente smorzata, o indebolita, proprio in virtù della sua posizione. Sebbene il coefficiente φ_0 , predisposto a tale compito, valga 0,6 nel caso del vento e 0 nel caso della

manutenzione, risulta quasi immediato, alla vista dei valori, capire quale sia l'azione più determinante anche considerando l'effetto dei coefficienti riduttivi.

Infine, prima di illustrare le combinazioni create ed eseguite, svizzeremo un ultimo dubbio che potrebbe sorgere. Rapportandoci con il programma infatti abbiamo dovuto sottostare a degli adattamenti che potrebbero a primo impatto confondere i ragionamenti precedentemente esposti, ma che in realtà sono perfettamente concordi.

L'ultima manipolazione che la lamina composta di mesh ha dovuto subire prima che potessero essere generate le combinazioni è stata la gestione degli assi locali delle mesh stesse. Infatti, le terne di assi tridimensionali non risultavano orientati nella stessa maniera, e questo avrebbe generato sforzi non compatibili tra le varie mesh della superficie totale pregiudicando la riuscita dell'analisi. Abbiamo dovuto prestare parecchia attenzione ad individuare ognuna delle mesh che fosse orientata in maniera diversa rispetto alla maggioranza e orientarle nella maniera consona in modo che potessero essere trattate tutte unitariamente. In particolar modo, le situazioni di incongruenza si riscontrano nelle aree dove è avvenuta definizione manuale delle mesh (nodi e aree di divisione per i carichi), mentre il resto della mesh automaticamente creata in un processo unico e unitario possiede lo stesso orientamento (*figura 25*).

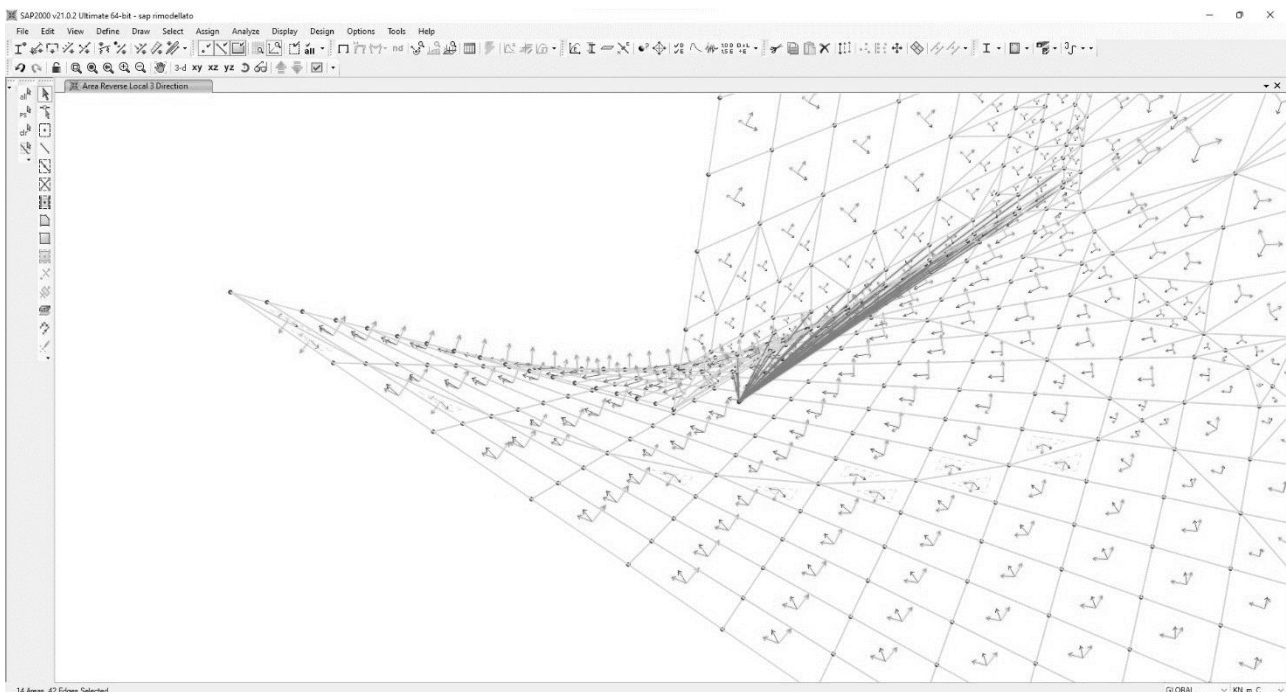


Figura 25

Una volta individuate e selezionate possiamo ruotare la terna di vettori attraverso il comando “Reverse local 3 axis”, come illustrato in *figura 26*.

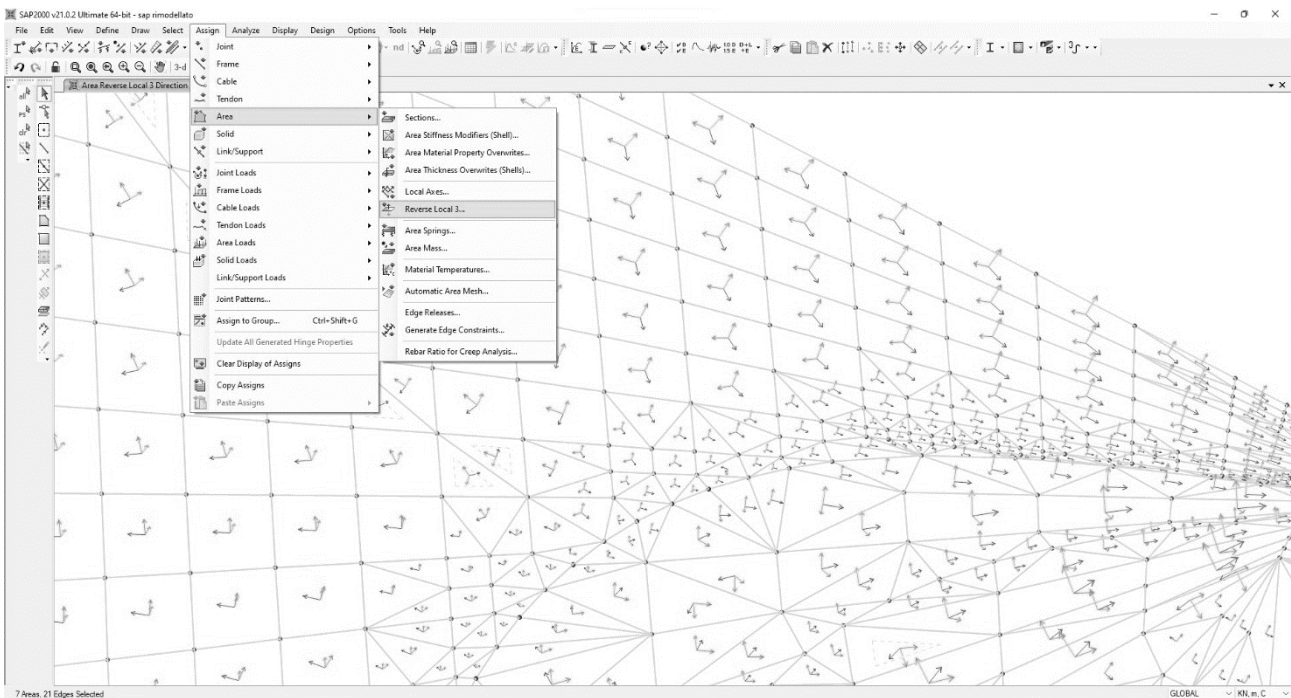


Figura 26

In ogni mesh l’asse normale ad esse è “uscente”, ovvero rivolto all’esterno della struttura. Questa condizione, impone la direzione nella definizione dei carichi che, se definiti in direzione perpendicolare alla mesh nel sistema di coordinate locali, renderà rivolti verso l’alto i carichi positivi e verso il basso quelli negativi. Ecco perché, avendo definito tutti i carichi del vento con valore negativo, si rende necessario porre, nella struttura delle combinazioni, un segno negativo con funzione correttiva ai carichi del vento quando vogliamo che questi siano rivolti verso il basso, cioè il vento generi pressione sulla struttura. Quando il carico del vento comparirà invece nella sua forma positiva significa che lo si starà considerando in depressione, ovvero agente dalla superficie verso l’esterno.

Per gli altri carichi questa differenza non sussiste perché la loro direzione è descritta dal sistema di coordinate globali anziché locali ed è stato quindi indicato che seguano la direzione della gravità.

Le combinazioni usate sono quelle illustrate in *tabella 3*, *tabella 3* e *tabella 4*:

situazione 1	γ	carico	γ	carico	γ	carico	γ	φ	carico	
massimizzare verso il basso (pressione)	1.35	G	-1,5	w1a	-1,5	w1b	1.5	0	M	COMB1
	1.35	G	-1,5	w1a	0	w1b				COMB 2
	1.35	G	0	w1a	0	w1b				
massimizzare verso l'alto (depressione)	1	G	0	w1a	0	w1b	0	0	M	
	1	G	1,5	w1a	0	w1b				COMB 3
	1	G	1,5	w1a	1,5	w1b				COMB 4

Tabella 2

situazione 2	γ	carico	γ	carico	γ	carico	γ	φ	carico	
massimizzare verso il basso (pressione)	1.35	G	-1,5	w2a	-1,5	w2b	1.5	0	M	COMB 5
	1.35	G	-1,5	w2a	0	w2b				COMB 6
	1.35	G	0	w2a	-1,5	w2b				COMB 15
	1.35	G	0	w2a	0	w2b				
massimizzare verso l'alto (depressione)	1	G	0	w2a	0	w2b	0	0	M	
	1	G	1,5	w2a	0	w2b				COMB 7
	1	G	0	w2a	1,5	w2b				COMB 16
	1	G	1,5	w2a	1,5	w2b				COMB 8

Tabella 3

situazione 3	γ	carico	γ	carico	γ	carico	γ	φ	carico	
massimizzare verso il basso (pressione)	1.35	G	-1,5	w3a	-1,5	w3b	1.5	0	M	COMB 9
	1.35	G	-1,5	w3a	0	w3b				COMB 10
	1.35	G	0	w3a	-1,5	w3b				COMB 11
	1.35	G	0	w3a	0	w3b				
massimizzare verso l'alto (depressione)	1	G	0	w3a	0	w3b	0	0	M	
	1	G	1,5	w3a	0	w3b				COMB 12
	1	G	0	w3a	1,5	w3b				COMB 13
	1	G	1,5	w3a	1,5	w3b				COMB 14

Tabella 4

Le combinazioni non considerate sono state scartate perché sono state valutate con ogni probabilità meno determinanti.

Insieme a queste è stata anche creata la combinazione “Envelope”, che consiste nell’involuppo di tutte le precedenti e che ci permette, al di là del comportamento della struttura sotto l’effetto di ogni schema, di capire se la struttura verifica o meno l’analisi.

4.4 VALUTAZIONE DEI RISULTATI

Avendo impostato tutti i fattori contribuenti all'analisi e dopo aver chiesto al calcolatore di eseguire l'analisi, passiamo ora alla valutazione del risultato ottenuto.

Ad un primo sguardo possiamo già renderci conto che le tensioni risultanti sono di carattere modesto sia in compressione che in trazione, con quest'ultima che si verifica in forma più estesa sulla superficie indipendentemente dalla direzione principale di inerzia che si considera.

Prima di passare ad analizzare nello specifico le sollecitazioni e i valori di queste sulla lamina risulta doveroso chiarire alcuni concetti e convenzioni, ben spiegati dalla *figura 27*.

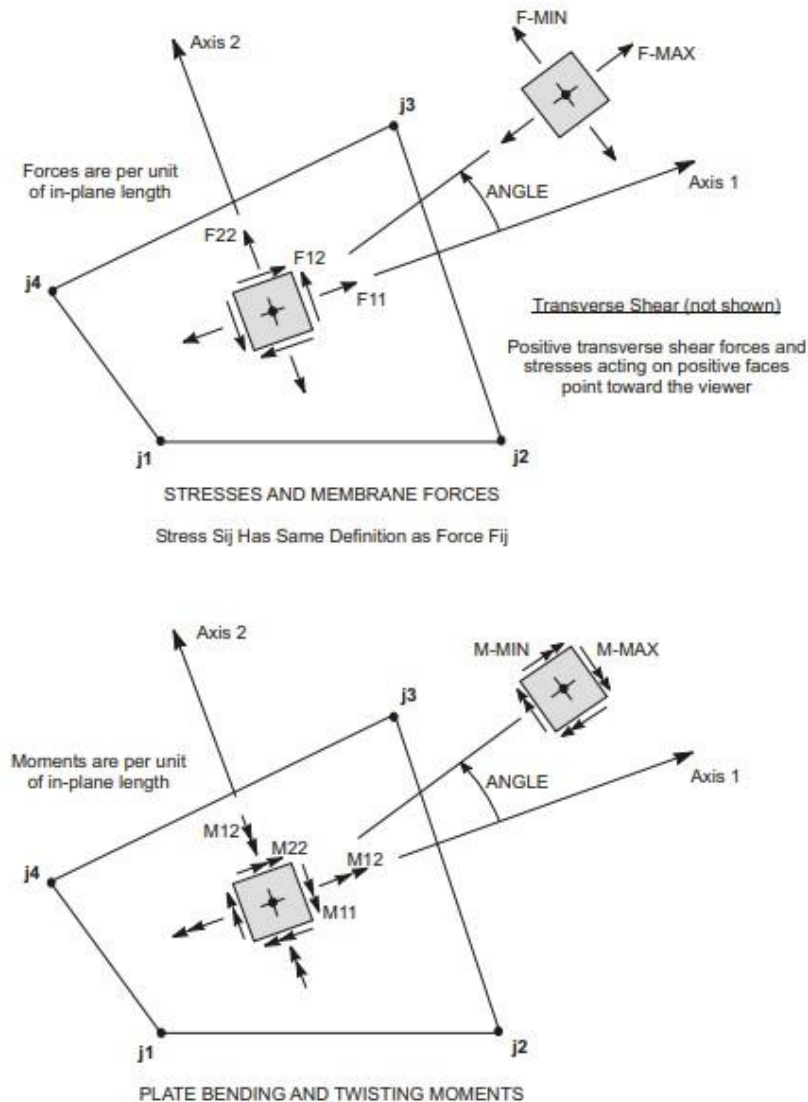


Figura 27

Le direzioni 1-1 e 2-2 sono le direzioni degli assi di riferimento locali, che cambiano per ogni elemento, e si sviluppano nel piano della shell, così come le forze e gli sforzi che portano il loro nome si riferiscono nella maniera più intuitiva ad esse. F_{11} e F_{22} sono quindi le forze normali che si esercitano in direzione tra esse perpendicolari e seguono l'orientamento dell'asse 1 e dell'asse 2. La F_{12} è invece una forza che si esercita in direzione tangenziale. Come si può vedere, infine, le F_{max} e F_{min} non cadono obbligatoriamente nella stessa giacitura delle direzioni principali di inerzia. Vale lo stesso identico discorso per lo sforzo flessionale, che porterà quindi la stessa nomenclatura.

Inoltre, lavorando con le shell, ovvero degli elementi dotati di spessore, le forze e le tensioni sono intese così come raffigurato in *figura 28*.

$$\sigma_{11} = \frac{F_{11}}{th} - \frac{12 M_{11}}{thb^3} x_3$$

$$\sigma_{22} = \frac{F_{22}}{th} - \frac{12 M_{22}}{thb^3} x_3$$

$$F_{11} = \int_{-th/2}^{+th/2} \sigma_{11} dx_3$$

$$F_{22} = \int_{-th/2}^{+th/2} \sigma_{22} dx_3$$

$$M_{11} = - \int_{-thb/2}^{+thb/2} x_3 \sigma_{11} dx_3$$

$$M_{22} = - \int_{-thb/2}^{+thb/2} x_3 \sigma_{22} dx_3$$

Figura 28

Date le tensioni normali σ_{11} e σ_{22} , vediamo la forza normale essere l'integrazione della tensione in direzione corrispondente sullo spessore della shell; il momento essere l'integrale del prodotto tra tensione e braccio nell'intervallo pari all'altezza utile della shell (lo spessore flessionale).

Entrando nello specifico andremo a commentare l'analisi tensionale tramite lo studio delle tensioni σ_{11} e σ_{22} su entrambi i lati della lamina poiché le shell che la costituiscono possiedono una superficie inferiore e una superiore e queste soffriranno di sforzi diversi. Parte fondamentale del commento sarà costituita dal confronto tra le tensioni risultanti e la resistenza di progetto che i materiali usati possono fornire, andando ad evidenziare eventuali fenomeni che si riscontreranno.

Partendo dal presupposto che il nostro materiale è un calcestruzzo fibrorinforzato di classe C50/60, dobbiamo tenere in considerazione che questo non si comporta come un calcestruzzo tradizionale e il suo legame costitutivo si differenzia da quello di un calcestruzzo per cemento armato classico. Nel nostro caso, il legame costitutivo si può considerare approssimativamente simmetrico rispetto all'origine, riscontrando un ampio aumento delle prestazioni offerte in trazione che sappiamo derivare appositamente dalle fibre di acciaio di cui si è additivata la miscela.

Passiamo ora a ricavare le resistenze di progetto del nostro materiale sapendo la classe a cui appartiene.

Come da indicazione dell'Eurocodice nel capitolo 3.1.6, la resistenza a compressione di progetto del calcestruzzo f_{cd} risulta essere:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$$

con:

$\alpha_{cc} = 1$ come da valore raccomandato.

$\gamma_c = 1,5$ per situazione persistente.

$$f_{cd} = 50 / 1,5 = 33,3 \text{ MPa}$$

La resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo f_{ctd} risulta essere:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{ctk,0.05} / \gamma_c$$

con:

$\alpha_{cc} = 1$ come da valore raccomandato.

$\gamma_c = 1,5$ per situazione persistente.

$f_{ctk,0.05} = 2,9 \text{ MPa}$ per C50/60

$$f_{ctd} = 2,9 / 1,5 = 1,93 \text{ MPa}$$

Dall'analisi dei risultati ottenuti si evince che in direzione 1-1 la tensione sulle facce superiori delle shells è generalmente positiva, quindi si riscontra diffusa trazione con valori che si aggirano tra 0 e 4 MPa con massimi di 4,65 MPa vicino agli appoggi. Si riscontrano

sporadiche zone a compressione molto lieve, per un massimo di 0,24 MPa nel dorso del paraboloide in basso (quello più piccolo). Infatti, dalla *figura 29*, possiamo notare tramite le “macchie” più scure che la compressione in generale si verifica, nei singoli paraboloidi iperbolici, nelle parti centrali medio-sommitali, ovvero in corrispondenza del ramo in ascesa della parabola confluyente al vertice centrale.

Sulla superficie inferiore, invece, come visibile dalla *figura 30*, lo scenario è qualitativamente simile: la maggior parte della copertura lavora a trazione a tensioni comprese tra lo 0 e i 1,1 MPa, con massimi che raggiungono il valore dei 2,5 MPa. La compressione, nei rari punti in cui si verifica, si attesta sull'ordine di 1 MPa, raggiungendo 1,2 MPa in prossimità degli appoggi inferiori (secondo l'orientamento della *figura 23*)

In direzione 2-2 la copertura nella superficie superiore è soggetta a tensioni principalmente di trazione di entità modesta (0 – 1,5 MPa), con inasprimenti delle stesse in corrispondenza delle zone medio sommitali dei singoli paraboloidi iperbolici nelle zone più distanti dal vertice centrale. In queste regioni le tensioni arrivano fino ad un massimo di 5,3 MPa. Si registra un massimo di compressione nella solita zona in prossimità degli appoggi di 1,8 MPa. (*figura 31*)

Nella *figura 32* possiamo apprezzare la copertura mappata con le tensioni relative alla faccia inferiore delle shell. In questo caso la situazione risulta molto più omogenea rispetto alla faccia superiore. La trazione, diffusa sulla grande maggioranza della superficie, assume valori che oscillano generalmente tra 0 e 1,5 MPa ma che arrivano in qualche punto a toccare i 3,5 MPa. Le poche regioni sollecitate a compressione registrano mediamente valori tra 0 e 1,5 MPa.

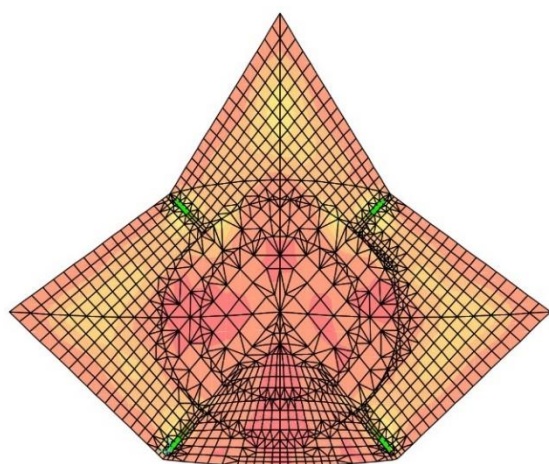


Figura 29 – σ_{11} sulla superficie superiore della copertura

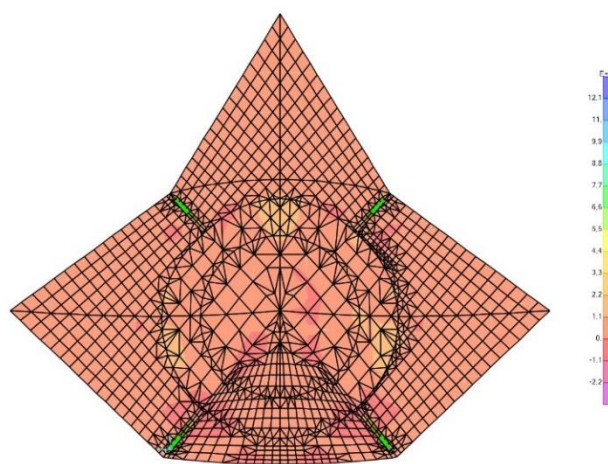


Figura 30– σ_{11} sulla superficie inferiore della copertura

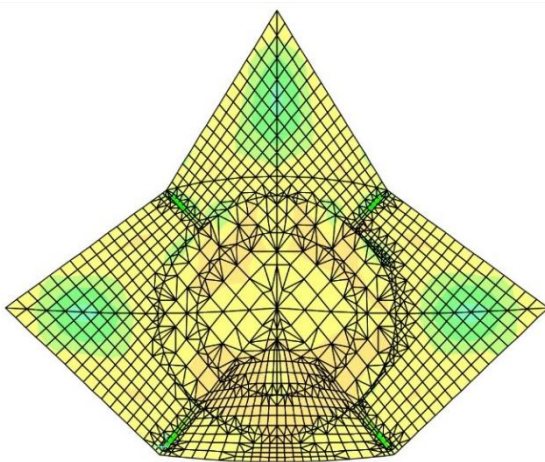


Figura 31 – σ_{22} sulla superficie superiore della copertura

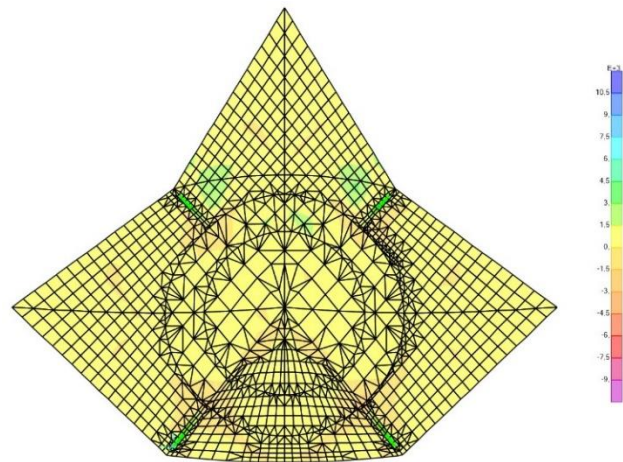


Figura 32– σ_{22} sulla superficie inferiore della copertura

Dopo la precedente valutazione generale seguiamo l'analisi mettendo in evidenza un fenomeno frequente nelle strutture di calcestruzzo, che è quello della fessurazione. Le strutture costituite di questo materiale che per sua natura è fragile e poco deformabile, presentano di frequente fessure, anche in condizioni ordinarie di esercizio e già dopo poco tempo la loro ultimazione.

Il valore limite di tensione di trazione per la fessurazione a cui si fa riferimento nell'Eurocodice è indicato con f_{ctm} e viene riportato nella tabella 3.1 dello stesso. Per il nostro materiale (dipende dalla classe del calcestruzzo) risulta pari a 4,1 MPa. Nelle NTC2008 viene indicato che per il controllo della fessurazione del calcestruzzo viene utilizzato lo stesso valore ridotto per 1,2. Quindi il valore limite risulta essere approssimativamente di 3,42 MPa.

Per evidenziare il fenomeno della fessurazione e localizzarlo con facilità sulla struttura possiamo avvalerci di una funzionalità che il programma di calcolo ci mette a disposizione che consiste nello stabilire un range di valori (impostando un min e un max) a cui il SAP fa riferimento per generare la mappatura tensionale di output. Sapendo che il programma considera valori di trazione come positivi e valori di compressione come negativi, abbiamo impostato il valore massimo pari al valore limite di fessurazione indicato dalle NTC2008 (3,42 MPa) cosicché l'output che si sarebbe generato avrebbe riportato con diverse colorazioni tutti i punti della struttura a tensione compresa nel range stabilito manualmente

e avrebbe lasciato di colore uniforme tutti quei punti che, seppure fossero sollecitati a tensioni diverse, si sarebbero collocati al di sopra del valore massimo.

Nello specifico, il colore che corrisponde a tensioni uguali o maggiori a quella di fessurazione (presa come massimo del range) è il blu; dalle *figure 33, 34, 35 e 36* possiamo osservare tutte le zone in cui avviene apertura di fessure grazie alla presenza delle aree di questo colore.

Per la combinazione di inviluppo, ricavata appunto come l'inviluppo di tutte le altre combinazioni definite precedentemente, il programma restituisce le tensioni lungo le direzioni principali 1-1 e 2-2. dalle *figure 33,34,35 e 36* possiamo osservare che le tensioni σ_{11} generano fessure localizzate nelle zone centrali dei singoli paraboloidi, dove avevamo effettivamente già riscontrato le tensioni di trazione più elevate, e nelle zone immediatamente adiacenti ai bracci di appoggio. La superficie inferiore non riporta invece consistenti fenomeni di questo tipo. Possiamo inoltre constatare che le σ_{22} , allo stesso modo, creano fessurazioni nelle zone centrali dei paraboloidi, ma in maniera più estesa, come preannunciato dalle maggiori trazioni precedentemente osservate in *figura 31* rispetto a quelle di *figura 29*. In questo caso sono risparmiate le zone degli appoggi ma si registrano minime fessure anche ai lati del paraboloide in alto nella superficie inferiore.

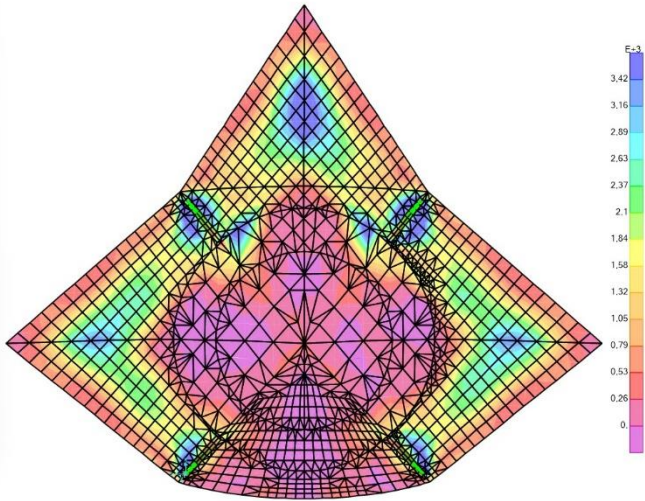


Figura 33 –tension di trazione σ_{11} sulla superficie superiore

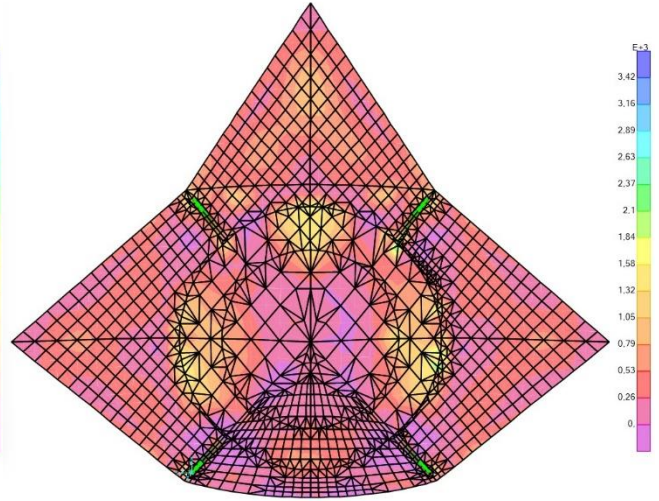


Figura 34 –tensioni di trazione σ_{11} sulla superficie inferiore

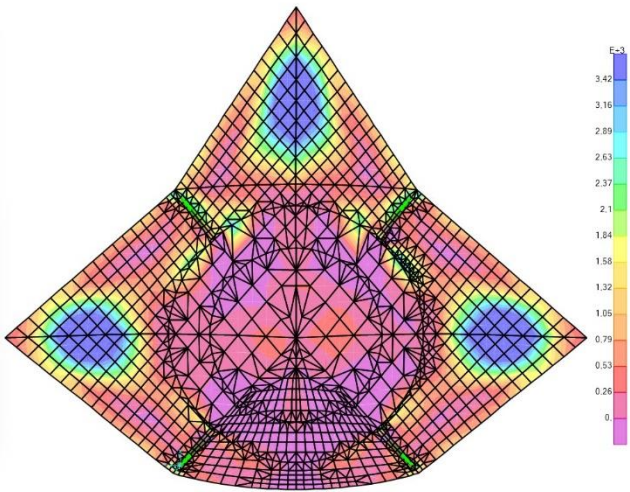


Figura 35 –tensioni di trazione σ_{22} sulla superficie superiore

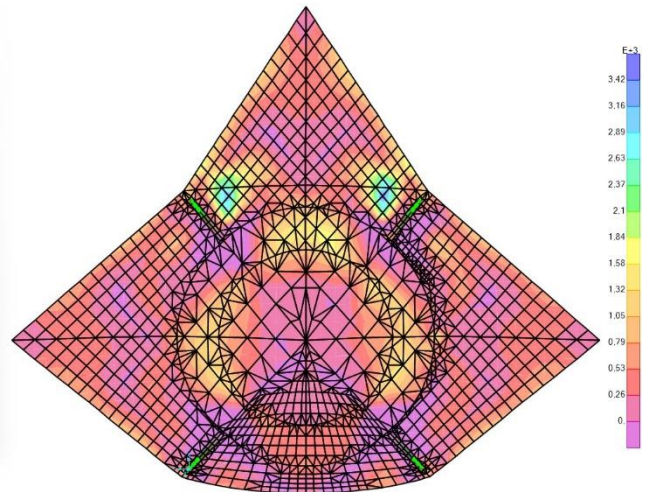


Figura 36 –tensioni di trazione σ_{22} sulla superficie inferiore

Nel valutare gli stati tensionali generati dalle singole combinazioni di carico dovremo riferirci alle tensioni massime e minime, cioè a quelle lungo le principali di inerzia, cosa che non era possibile con la combinazione “Inviluppo” precedentemente analizzata. Riportiamo, a seguire, la *figura 37* in cui viene rappresentato lo stato tensionale della copertura che corrisponde alla combinazione di carico più significativa, che è la COMB-1. Questa, infatti, è quella che massimizza i carichi che spingono nella direzione della gravità, considerando il vento che si impone su tutta la copertura in aggiunta al peso proprio della struttura. Le configurazioni di output sono le stesse usate per il caso precedente e quindi anche ora possiamo individuare in blu le aree soggette a fessurazione, ovvero dove la tensione supera il valore di $3,42 \text{ MPa}$ (la convenzione dei segni nel SAP prevede che la trazione sia positiva). L'immagine seguente riporta solo la superficie superiore perché è quella su cui i carichi, per forma e direzione, impongono uno stato di trazione generalizzato, inducendo fessurazione

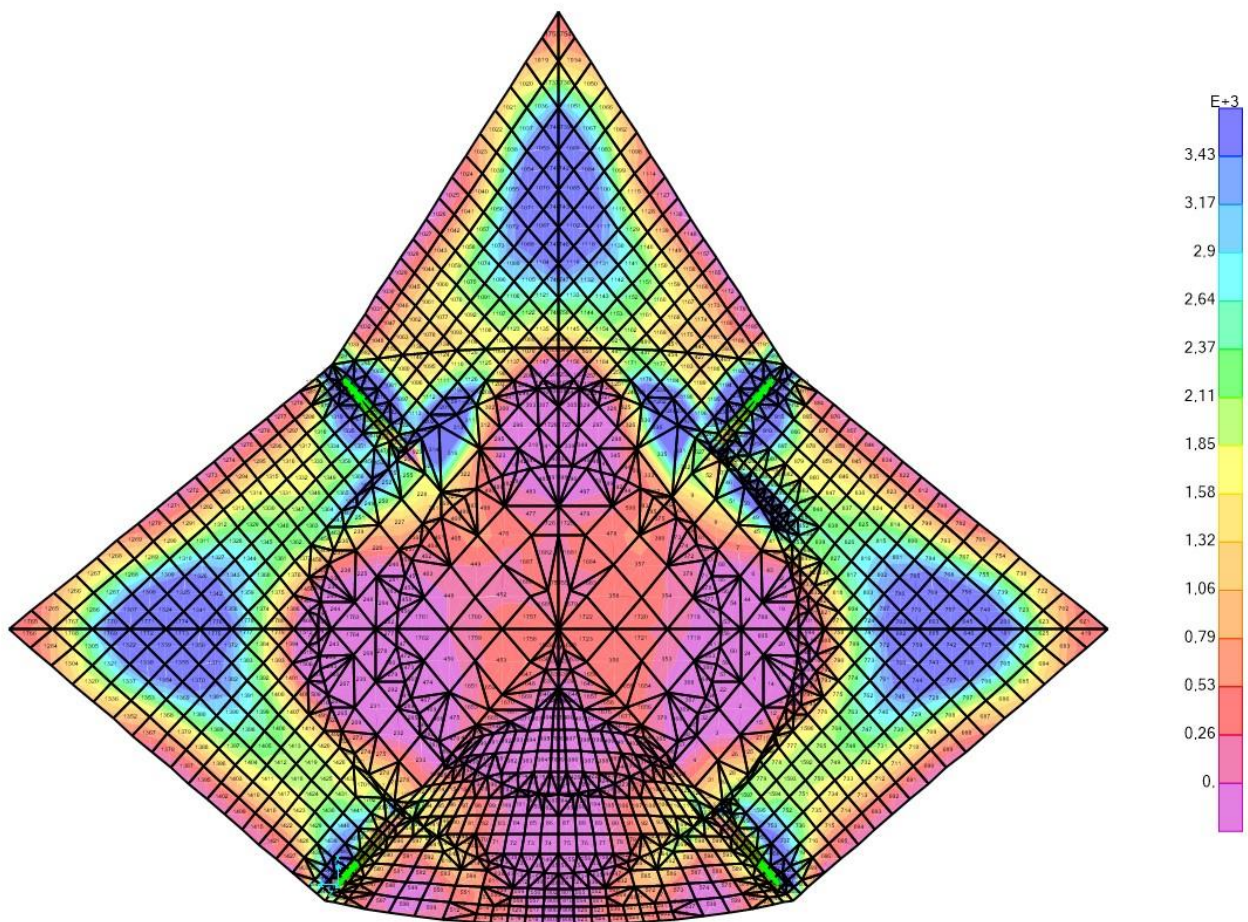


Figura 37 – tensioni principali di trazione sulla superficie superiore per COMB1

In un caso come quello preso in esame, l'approccio alla progettazione sarà, con molta probabilità, condotto non con metodi ortodossi, bensì pragmatici e dettati soprattutto dall'esperienza del progettista.

In merito alla verifica dello SLU, il primo passo sarebbe quello di scegliere due direzioni ortogonali tra loro in cui armare le shell di calcestruzzo in maniera agevole, senza dover seguire le direzioni principali di inerzia che cambiano di shell in shell. Successivamente, quello che si potrebbe pensare di fare è di partire assumendo il valore di armatura pari al valore minimo di normativa e verificare il comportamento della struttura non tanto sotto il piano della resistenza, rimanendo in campo elastico, quanto piuttosto in termini di spostamenti, quindi considerando la struttura in campo plastico. Si andrebbe a valutare che la capacità deformativa, o duttilità, sia sufficiente da resistere la richiesta dettata dalla situazione di progetto. Quella che si condurrebbe sarebbe un'analisi non lineare in cui la struttura verrebbe valutata per la sua capacità di sopportare gli spostamenti richiesti grazie alla formazione delle cerniere plastiche per lo snervamento delle barre di armatura.

Una volta ottenuti i risultati, se questi non risultano soddisfacenti (la capacità è inferiore alla sollecitazione), si andrebbe a reiterare la procedura aggiungendo gradualmente area di acciaio alle shell e si ripeterebbe l'analisi, fino a trovare il quantitativo minimo di armatura che permette di sopportare le rotazioni delle cerniere senza arrivare alla rottura delle barre.

In ultimo si andrebbe a valutare lo SLE, e più specificamente lo stato limite di apertura delle fessure, si prenderebbero in considerazione le zone in cui avviene fessurazione, aumentando la resistenza dell'armatura considerando la perdita di rigidità della sezione dovuta alla assenza del contributo del calcestruzzo e il conseguente trasferimento di tutta la tensione alle barre di armatura. Apportare più armatura in queste zone potrebbe essere concretizzato orientando le barre localmente secondo le direzioni principali di inerzia o, più semplicemente, incrementando il quantitativo conservando inalterate le direzioni della rete, che automaticamente registrerà in quelle stesse zone un passo inferiore.

4.5 INQUADRAMENTO TECNICO-TEORICO SULLE PIASTRE

L'assenza di soluzioni universalmente accettate nei codici del calcestruzzo strutturale per la progettazione dell'armatura degli elementi shell, dà tutt'oggi luogo al problema di calcolare l'armatura necessaria negli elementi di questa tipologia strutturale. Il costante sviluppo delle prestazioni e della capacità di memorizzazione dei computer, combinati con i metodi numerici potenti rivelano la necessità di una procedura standard per la progettazione di gusci soggetti a forze di membrana e di flessione. La mancante codifica e accettazione univoca come è avvenuto per la progettazione di altri tipi di elementi come travi o pilastri ha prodotto ricerca e studio incessanti, i quali hanno arricchito nel tempo il panorama trattatistico che presenta al momento molti metodi, più o meno semplificati e onerosi, che si avvalgono di diversi procedimenti.

Le piastre sono elementi strutturali, inizialmente piani, aventi spessore molto più piccolo in confronto alle altre dimensioni, e dotate di rigidità flessionale. Nello studio delle piastre è usuale dividere lo spessore in due metà con un piano parallelo alle facce, e che pertanto viene chiamato piano medio. Lo spessore h è misurato in direzione normale al piano medio e costituisce l'unico parametro geometrico che interviene nella definizione delle proprietà flessionali della piastra. Ai fini del calcolo tecnico, si parla di piastre sottili quando il rapporto fra lo spessore h e la più piccola larghezza l della piastra risulta $h/l < 1/20$. L'analisi delle piastre sottili si differenzia poi a seconda che si abbiano piccoli spostamenti (in genere in questo caso si accetta una freccia massima $w_{max} < 0.75 h$) o grandi spostamenti. Nel primo caso la piastra inflessa (ossia caricata solo in direzione normale al suo piano medio) risponde alle sollecitazioni esterne solamente con la sua rigidità flessionale, mentre nel secondo caso si manifestano non-linearità geometriche che evocano una risposta che chiama in causa, oltre alla rigidità flessionale (che si manifesta con tensioni a distribuzione bi-triangolare sullo spessore), anche la rigidità membranale (che si manifesta con tensioni a distribuzione costante sullo spessore). Grazie alla presenza di tensioni membranali preponderanti rispetto alle tensioni flessionali, la piastra mostra una capacità portante nettamente superiore.

Il comportamento di tali strutture piane, come quello di tutti gli elementi in cemento armato, può essere suddiviso nelle seguenti fasi:

- *Fase elastica*: il calcestruzzo rimane in campo elastico, la lamina non riporta fessurazione.
- *Fase plastica*: le tensioni superano la resistenza a trazione del calcestruzzo con conseguente apertura di fessure nel lembo corrispondente, che rimangono di entità contenuta fino a quando le armature rimangono in fase elastica.
- *Fase di plasticizzazione*: gli sforzi sono di entità pari o superiore al limite elastico non solo del calcestruzzo, ma anche dell'acciaio. Il momento a cui sono sottoposte, spinge le armature ad entrare in campo plastico, con derivata redistribuzione del momento in tratti di barra non ancora plasticizzati. Le deformazioni che emergono danno forma alle cosiddette "linee di plasticizzazione" o "di rottura".
- *Fase di collasso*: avviene nel momento in cui nelle linee di plasticizzazione si raggiunge la condizione per cui si rende possibile il cinematismo, che si realizza tramite la rotazione delle aree delimitate dalle linee di rottura fino alla frantumazione del calcestruzzo in compressione.

Il calcolo delle piastre può essere condotto sia tramite analisi di tipo elastico che plastico: nel caso di un materiale come il nostro, elastico ed isotropo, i risultati che la prima tipologia di analisi restituisce sono sufficientemente aderenti alla realtà nei limiti delle condizioni di esercizio, cioè fino a quando le lesioni, come le fessurazioni, sono leggere e localizzate in parti limitate dell'elemento. Con l'aumento delle sollecitazioni e le conseguenti deformazioni che la struttura subisce, dovute all'inasprimento e la diffusione del regime fessurativo, si rende necessario ricorrere a teorie che contemplino i meccanismi non lineari che possono avvenire nella struttura all'avvicinarsi del collasso.

4.5.1 TEORIA ELASTICA

Il riferimento geometrico generico per la trattazione che seguirà è la piastra rettangolare riferita ad una terna levogira di assi cartesiani x , y e z , con il piano (x, y) coincidente con il piano medio e l'asse z orientato verso il basso. In dette direzioni, le corrispondenti componenti di spostamento di un punto generico vengono denotate con u , v e w .

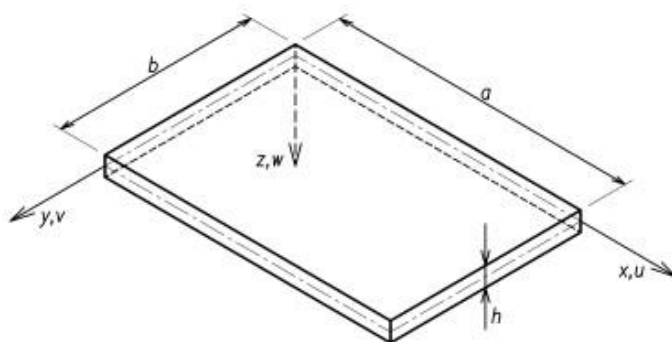


Figura 38 – riferimento geometrico per piastre rettangolari

Storicamente, le equazioni indefinite di equilibrio della piastra sottile si fanno risalire a Lagrange, per questo la teoria elastica è anche nota come *equazioni di Lagrange*. Tuttavia, nel 1850 Kirchhoff formulò alcune assunzioni fondamentali (ipotesi di Kirchhoff) a sostegno del problema che consentirono di definire con chiarezza e semplicità la teoria delle piastre inflesse sottili, e per queste ragioni detta teoria viene oggi riferita pure come *teoria di Lagrange-Kirchhoff*.

Le ipotesi di Kirchhoff, su cui si basano le assunzioni che avverranno, sono enunciabili come segue:

1. Il materiale della piastra è elastico-lineare, omogeneo e isotropo;
2. La piastra è inizialmente piana, con spessore “sottile” rispetto alle altre due dimensioni;
3. Gli spostamenti w conseguenti all’inflessione del piano medio sono piccoli in confronto con lo spessore h ;
4. Ipotesi di conservazione delle normali rette: Un segmento rettilineo e normale al piano medio dopo l’inflessione della piastra rimane ancora rettilineo, inalterato in lunghezza e normale alla superficie elastica;
5. In conseguenza dell’inflessione il piano medio non subisce deformazioni, ossia sul piano medio sono nulle le dilatazioni lineari ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$) e gli scorrimenti angolari ($\gamma_{xy} = 0$). Pertanto, il piano medio è anche piano neutro;

6. Lo sforzo σ_z può essere trascurato.

Grazie alle ipotesi di Kirchhoff la trattazione delle piastre inflesse assume minore complessità ed il problema da tridimensionale si riduce ad un problema in due dimensioni.

Alcune delle ipotesi producono implicazioni che è bene evidenziare e tenere a mente.

L'ipotesi 3. Permette di considerare gli angoli di inclinazione φ assimilabili a $\tan\varphi$ e quindi alla derivata prima di w .

$$\begin{aligned} \varphi_x &\simeq \tan \varphi_x = -\frac{\partial w}{\partial x} & \chi_x &= \frac{1}{r_x} = \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varphi_y &\simeq \tan \varphi_y = -\frac{\partial w}{\partial y} & \chi_y &= \frac{1}{r_y} = \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{aligned}$$

L'ipotesi 4. equivale a trascurare sia gli scorrimenti angolari dovuti al taglio trasversale ($\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = 0$), sia la dilatazione lineare nella direzione dello spessore ($\varepsilon_z = 0$). Inoltre, dichiara l'indipendenza dello spostamento w dalla coordinata z del punto in esame, quindi

$$w(x, y, z) = w_0(x, y)$$

mentre, per la conservazione di planarità delle facce della shell con normale x e y , risulta:

$$u = u_0 + z\varphi_x$$

$$v = v_0 + z\varphi_y$$

Tuttavia, queste due ultime, nel caso di soli carichi trasversali gravanti sulla lastra, e quindi spostamenti plausibilmente unicamente verticali, possono essere semplificate trascurando il primo termine. Il **campo degli spostamenti** può essere in definitiva così descritto:

$$u = z\varphi_x = -z \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

$$v = z\varphi_y = -z \frac{\partial w_0}{\partial y}$$

$$w = w_0$$

Le curvature flessionali χ_x e χ_y , rispettivamente in direzione x e y, e quelle torsionali χ_{xy} e χ_{yx} sono così definite:

$$\chi_x = \frac{1}{r_x} = \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial w}{\partial x} \right) = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

$$\chi_y = \frac{1}{r_y} = \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial w}{\partial y} \right) = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

$$\chi_{xy} = \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial w}{\partial y} \right) = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

$$\chi_{yx} = \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial w}{\partial x} \right) = -\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x}$$

Essendo la deformazione relativa ad una direzione la derivata prima dello spostamento nella corrispondente direzione rispetto alla direzione stessa, il **campo delle deformazioni**, può essere definito come segue:

$$\varepsilon_x = z \chi_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

$$\varepsilon_y = z \chi_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

$$\gamma_{xy} = 2z \chi_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

Noto il campo delle deformazioni, il corrispondente **campo delle tensioni** (a destra) può essere esplicitato a partire dalle leggi costitutive del materiale (Leggi di Hooke, a sinistra).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y)$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy}$$

Tenendo conto delle relazioni membranali, le tensioni possono scriversi in questo modo:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} z (\chi_x + \nu \chi_y) = -\frac{E}{1-\nu^2} z \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} z (\chi_y + \nu \chi_x) = -\frac{E}{1-\nu^2} z \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy} &= 2G z \chi_{xy} = \frac{E}{1+\nu} z \chi_{xy} = -\frac{E}{1+\nu} z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\end{aligned}$$

Le tensioni parallele al piano medio σ_x , σ_y e τ_{xy} danno luogo alle seguenti risultanti:

$$\begin{aligned}M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z \, dz \\ M_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z \, dz \\ M_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z \, dz\end{aligned}$$

Espressi in relazione alle grandezze cinematiche i momenti risultano:

$$\begin{aligned}M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z \, dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E z}{1-\nu^2} (\chi_x + \nu \chi_y) z \, dz = \frac{E}{1-\nu^2} (\chi_x + \nu \chi_y) \int_{-h/2}^{h/2} z^2 \, dz = \\ &= D (\chi_x + \nu \chi_y)\end{aligned}$$

dove D è la *rigidezza flessionale* e si compone in questo modo:

$$D = E' J = \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \left(\frac{h^3}{12} \right)$$

con:

E' *modulo di elasticità effettivo*, maggiore del modulo di Young di circa il 10%. Nella piastra il materiale è come se rispondesse con una maggiore rigidezza dovuta al fatto che nella striscia unitaria considerata le dilatazioni trasversali sono impedito dalle strisce adiacenti che manifestano analoghe tendenze deformative. Questo risulta dal fatto che nella piastra il materiale è come se fosse un po' più rigido per l'effetto contenitivo delle strisce adiacenti a quella considerata che si espandono trasversalmente allo stesso modo.

J *momento di inerzia* della sezione rettangolare di base unitaria e altezza pari allo spessore.

Il momento torcente, per lo stesso procedimento, risulta essere:

$$M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z \, dz = \int_{-h/2}^{h/2} G 2 z \chi_{xy} z \, dz = \frac{E}{1+\nu} \chi_{xy} \int_{-h/2}^{h/2} z^2 \, dz = (1-\nu) D \chi_{xy}$$

I tre momenti possono essere anche espressi in funzione degli spostamenti:

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad M_{xy} = -(1-\nu) D \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

Le espressioni per le tensioni “bidimensionali” (ossia quelle parallele al piano di giacitura della piastra e specificate mediante i soli pedici x e y) in funzione dei momenti agenti si possono così scrivere:

$$\sigma_x = z \frac{M_x}{h^3/12} \quad \sigma_y = z \frac{M_y}{h^3/12} \quad \tau_{xy} = z \frac{M_{xy}}{h^3/12}$$

Le caratteristiche di taglio (T_x e T_y) possono essere espresse in funzione delle caratteristiche di momento (M_x , M_y e M_{xy}) considerando l'equilibrio alla rotazione del generico elementino di controllo di base $dx \times dy$ e altezza h .

$$T_x = \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y}$$

$$T_x = D \frac{\partial}{\partial x} (\chi_x + \nu \chi_y) + D \frac{\partial}{\partial y} [(1-\nu) \chi_{yx}]$$

Tenuto conto della presenza di un carico distribuito $p(x, y)$ agente normalmente al piano medio, si potrà scrivere:

$$p \, dx \, dy - T_x \, dy + (T_x + dT_x) \, dy - T_y \, dx + (T_y + dT_y) \, dx = 0$$

ossia:

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = -p$$

e in funzione dei momenti flettenti e torcenti:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -p$$

tenuto conto che $M_{xy} = M_{yx}$, si arriva alla seguente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} \right) = -p$$

che costituisce *l'equazione indefinita di equilibrio* di una piastra sottile in funzione delle caratteristiche di momento.

L'equazione indefinita di equilibrio può essere scritta dapprima in funzione delle curvatures e poi in funzione degli spostamenti $w(x, y)$, venendo a definire in tal modo l'equazione differenziale della superficie elastica della piastra inflessa. In questa prospettiva, conviene trovare preventivamente le relazioni differenziali esistenti tra la curvatura torsionale χ_{xy} e le curvatures flessionali χ_x e χ_y .

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi_{xy}}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = \frac{\partial \chi_x}{\partial y} \\ \frac{\partial \chi_{xy}}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial \chi_y}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 \chi_{xy}}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \chi_{xy}}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \chi_y}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \chi_y}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \chi_{xy}}{\partial y \partial x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \chi_{xy}}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \chi_x}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \chi_x}{\partial y^2} \end{aligned}$$

Le ultime due relazioni consentono di affermare:

$$\frac{\partial^2 \chi_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \chi_x}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \chi_{xy}}{\partial x \partial y}$$

Riscrivendo ora l'equazione indefinita di equilibrio ricaviamo:

$$T_x = -D \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = -D \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 w)$$

alla quale, sostituendo alle curvature le espressioni in funzione degli spostamenti otteniamo finalmente:

$$\frac{\partial^2 \chi_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \chi_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \chi_y}{\partial y^2} = -\frac{p}{D}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = -\frac{p}{D}$$

che nella sua forma semplificata finale si presenta così:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D}$$

Quella sopra riportata costituisce l'*equazione differenziale della superficie elastica* $w(x, y)$, anche nota come *equazione di Lagrange*.

Trattasi di un'equazione differenziale lineare alle derivate parziali la cui integrazione si sa eseguire in modo esatto soltanto in un numero ristretto di casi. Le soluzioni per i casi più semplici e più frequenti nella pratica possono essere espresse mediante serie doppie di Fourier (Navier) o serie semplici (Lévy) o ancora ricorrendo al metodo delle differenze finite (Marcus). Per determinare $w(x, y)$ andranno definite opportune costanti di integrazione dipendenti dalle condizioni al contorno della piastra.

Il calcolo elastico della piastra fornisce pertanto i momenti m_x, m_y , i quali non rappresentano i momenti principali in quanto non agiscono su piani privi di torsione, e il momento torcente m_{xy} . Inoltre, i momenti principali forniscono i massimi valori delle tensioni di trazione e compressione ai lembi opposti della sezione. Si renderebbe quindi necessario adottare un tracciato delle armature allineato alle direzioni dei momenti principali. Questo però non è di facile applicazione in termini operativi; pertanto, si provvederà alla posa delle armature secondo due direzioni costanti. Si procederà quindi, secondo le due direzioni principali x e y , determinando l'espressione del momento sollecitante attraverso la seguente relazione:

$$m_\alpha = m_x \cdot \cos^2 \alpha + m_y \cdot \sin^2 \alpha + m_{xy} \cdot \sin 2\alpha$$

Con α che rappresenta l'orientazione degli assi principali, lungo i quali il momento torcente si annulla.

Si dovrà quindi verificare che:

$$\frac{m_{\alpha R}}{\gamma_R} \geq m_{\alpha}$$

con:

γ_R = coefficiente di sicurezza del materiale

$m_{\alpha R}$ = momento resistente lungo la direzione α , che assume il seguente valore:

$$m_{\alpha R} = m_{xR} \cdot \cos^2 \alpha + m_{yR} \cdot \sin^2 \alpha$$

In definitiva si adottano le seguenti formulazioni:

- Caso della flessione fortemente positiva ($m_{xd}, m_{yd} \geq 0$):

$$m_{xd} + |m_{xyd}| \leq \frac{m'_{xR}}{\gamma_R}; \quad m_{yd} + |m_{xyd}| \leq \frac{m'_{yR}}{\gamma_R}$$

- Caso della flessione fortemente negativa ($m_{xd}, m_{yd} \leq 0$):

$$-m_{xd} + |m_{xyd}| \leq \frac{m'_{xR}}{\gamma_R}; \quad -m_{yd} + |m_{xyd}| \leq \frac{m'_{yR}}{\gamma_R}$$

- Caso della flessione fortemente negativa in una sola direzione con debole torsione. Supponendo che la flessione si abbia nel piano x-z, l'armatura lungo x non sarebbe necessaria, pertanto la disuguaglianza da verificare sarà:

$$m_{yd} + \left| \frac{m_{xyd}^2}{m_{xd}} \right| \leq \frac{m_{yR}}{\gamma_R}$$

Tale modello rappresentato corrisponde a un traliccio di tiranti costituiti dalle barre di armatura in direzione x e y e da puntoni innestati su nodi dell'armatura e orientati a 45° rispetto alla direzione x e y delle barre.

4.5.2 TEORIA PLASTICA O YELD LINE METHOD

Come già espresso in precedenza, la teoria dell'elasticità ben rappresenta il comportamento delle piastre sotto i carichi di esercizio; tuttavia, sotto l'azione di carichi sempre più vicini a quelli dello stato limite ultimo, nelle sezioni più sollecitate, al raggiungimento dello snervamento si ha la formazione di cerniere plastiche, le quali consentono di trasmettere il momento, che sarà pari al momento di plasticizzazione. Col progredire del numero di sezioni che si plasticizzano si ha la formazione di un meccanismo cinematico.

Il metodo delle linee di rottura (Yield-Line Method) rientra nei metodi cinematici, nei quali si va ad individuare un meccanismo cinematicamente ammissibile e si procede impostando il sistema delle condizioni di equilibrio di ogni parte della struttura delimitata dalle linee di plasticizzazione. Alla base del metodo elastico si trova il "teorema cinematico", il quale afferma che qualunque carico, al quale corrisponde un meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile, è superiore o uguale al carico ultimo esatto.

Il meccanismo di collasso ipotizzato è determinato in particolare dalla disposizione spaziale nella piastra delle yield lines (linee di plasticizzazione). Queste ultime, come detto in precedenza, svolgono per la piastra lo stesso ruolo delle cerniere plastiche nelle travi. In *figura 39* troviamo vari meccanismi di rottura, in relazione alle condizioni al contorno (vincoli di bordo) che fungono da discriminanti principali per la scelta del cinematismo.

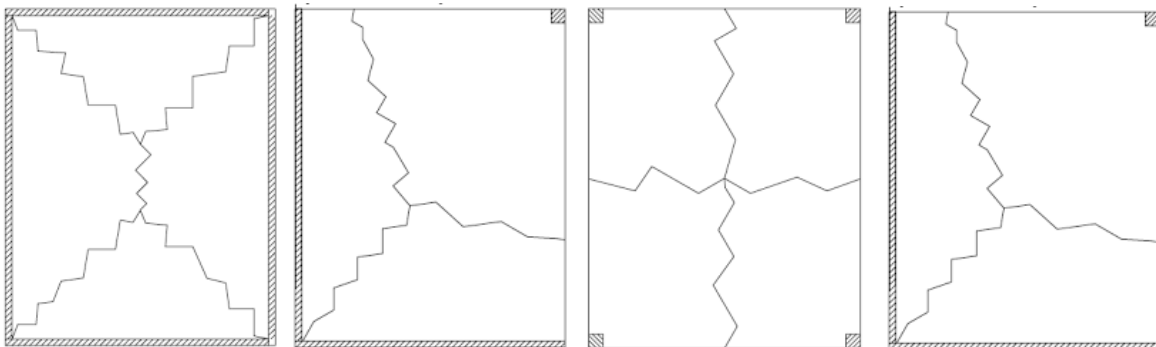


Figura 39

Si assumono quindi che valgano le seguenti ipotesi per tali linee:

- Esse si propagano fino al raggiungimento dei lati della piastra;
- Sono rettilinee;
- Passano per l'intersezione degli assi di rotazione dei conci adiacenti;

- L'asse di rotazione si trova generalmente lungo la linea di supporto e passano per le colonne;
- Sono simmetriche se tale proprietà vale sia per i vincoli della piastra sia per il carico applicato.

I modi di collasso sono infiniti; pertanto, Lo scopo è quello di individuare la famiglia che contenga il meccanismo che fornisce il più piccolo valore del carico di collasso. Non esistono regole precise per la individuazione dei meccanismi: l'esperienza e l'intuito ingegneristico devono essere di guida. Tuttavia, il disegno del meccanismo deve soddisfare le seguenti prescrizioni:

- la figura del meccanismo deve suddividere la piastra in settori rigidi, che si assume restino piani anche a collasso, mentre tutte le deformazioni sono concentrate nelle cerniere cilindriche;
- le cerniere cilindriche sono segmenti di retta; • una cerniera cilindrica che separa due settori rigidi a collasso deve passare per il punto di intersezione degli assi di rotazione dei settori rigidi medesimi;
- una cerniera cilindrica non può separare più di due settori rigidi;
- gli assi di rotazione sono in numero pari a settori rigidi e sono fisicamente definiti da bordi appoggiati, da cerniere cilindriche in corrispondenza a bordi incastrati ovvero ad appoggi puntuali (pilastri).

Questo metodo presenta però una condizione di utilizzo ben precisa per essere rappresentativo. Si richiede che il collasso della struttura avvenga per causa della flessione, escludendo vari casi quali piastre sensibili al taglio (alveolari), piastre fortemente armate o spesse, piastre in cui l'aderenza tra le barre di armatura e il calcestruzzo è bassa, poiché in questo ultimo caso la rottura sarebbe governata dallo sfilamento delle barre.

Lo strumento di calcolo di cui ci si avvale per ricavare il carico limite è il Principio dei Lavori Virtuali: ipotizzando un particolare meccanismo di collasso, è possibile determinare il carico critico associato.

Vediamo a continuazione come impostare il problema.

Prendiamo il caso di una piastra con armatura superiore e inferiore disposta secondo gli assi principali, e le convenzioni dei segni come rappresentato in *figura 40*.

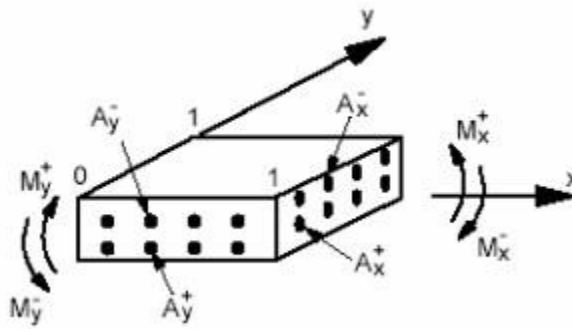


Figura 40

Indichiamo con k il coefficiente di ortotropia, rapporto tra le aree delle armature disposte nelle due direzioni ortogonali nel medesimo lembo per unità di lunghezza della piastra, e consideriamolo costante nei due lembi.

$$k = \frac{A_y^+}{A_x^+} = \frac{A_y^-}{A_x^-}$$

Allo stesso modo facciamo per g coefficiente di anisotropia.

$$g = \frac{A_y^-}{A_y^+} = \frac{A_x^-}{A_x^+}$$

Indicando il braccio di leva interno con d , i momenti limite per unità di lunghezza risultano essere:

$$M_x^+ = A_x^+ \cdot d \cdot F_{sy,x}$$

$$M_y^+ = k \cdot M_x^+$$

$$M_x^- = g \cdot M_x^+$$

$$M_y^- = k \cdot g \cdot M_x^+$$

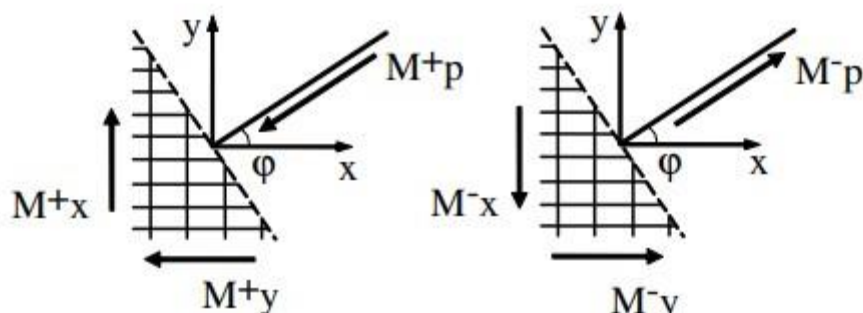


Figura 41

In una retta d'articolazione inclinata di un angolo φ rispetto alla direzione dell'asse x (figura 41), i momenti limite per flessione positiva M_p^+ (snervamento delle sole armature inferiori) e per flessione negativa M_x^- (snervamento delle sole armature superiori) possono scriversi, relativamente alla lunghezza unitaria, in base al criterio di plasticità di Johansen:

$$M_p^+ = M_x^+ (\text{sen}^2 \varphi + k \cdot \text{cos}^2 \varphi)$$

$$M_p^- = M_x^+ (\text{sen}^2 \varphi + k \cdot \text{cos}^2 \varphi) \cdot g$$

Per piastre isotrope $k = 1$, il fattore all'interno della parentesi ha valore 1, e i momenti plastici risultano costanti e indipendenti dall'orientazione.

Per determinare il valore del carico che trasforma la piastra in un cinematismo, secondo il principio dei lavori virtuali si eguaglia il lavoro dei carichi esterni a quello svolto nelle linee di rottura (cerniere plastiche cilindriche) dalle reazioni interne. Il PLV assume la seguente forma:

$$W_i + W_\varphi = W_e$$

Con

W_i = Lavoro dissipato dai momenti plastici agenti nelle cerniere plastiche;

W_φ = Lavoro dissipato nei meccanismi a ventaglio che si formano negli spigoli delle piastre;

W_e = Lavoro effettuato dai carichi esterni.

- *Lavoro dissipato dai momenti plastici agenti nelle cerniere plastiche*

$$W_i = \sum D_i^+ + D_i^-$$

Dove $D_i = M_p \cdot \Delta l \cdot |\theta|$, con Δl lunghezza della cerniera e θ il modulo del vettore rotazione relativa fra le porzioni rigide separate dall'articolazione, come mostrato in figura 42.

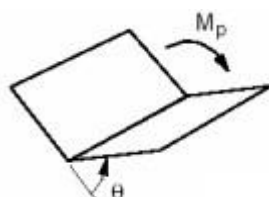


Figura 42

- Lavoro dissipato nei meccanismi a ventaglio che si formano negli spigoli delle piastre

Nelle piastre ortotrope, l'espressione del lavoro $D\varphi_j$ dissipate nello j-mo ventaglio assume la forma:

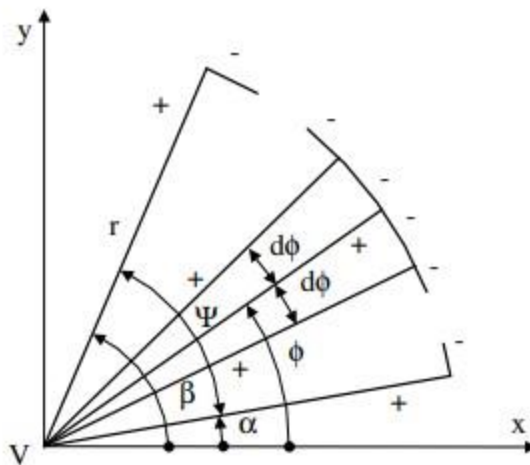


Figura 43

$$W_\varphi = \sum_j M_x^+ \cdot \left[(g - 1) \frac{1 - k}{2} \cdot \cos(\alpha_j + \beta_j) \cdot \sin \psi_j + (1 + g) \cdot \frac{1 - k}{2} \psi_j \right] \cdot \delta_{vj}$$

Come risulta da *figura 43*, δ_{vj} è lo spostamento virtuale del vertice V del ventaglio; ψ_j è l'angolo al centro del ventaglio; α_j e β_j sono gli angoli dei raggi di periferia del ventaglio rispetto all'asse x.

Nelle piastre isotrope, indicando con M_p^+ e M_p^- i momenti delle cerniere plastiche relativi alle armature, l'espressione di W_φ si semplifica a:

$$W_\varphi = \sum_j (M_p^+ + M_p^-) \cdot \delta_{vj} \cdot \psi_j$$

- *Lavoro effettuato dai carichi esterni*

Detto C un punto della piastra sul quale agisce il carico per unità di superficie $P(x,y)$, se dA è un'areola infinitesima che contiene C e $V(x,y)$ è lo spostamento trasversale a collasso, il lavoro fornito dai carichi esterni vale:

$$W_e = \int P(x,y) \cdot V(x,y) \cdot dA$$

4.5.3 REINFORCEMENT DESIGN ALGORITHM FOR CONCRETE SHELLS

Le teorie precedentemente esposte analizzano e trattano gli elementi “piastra”, ovvero elementi piani sottoposti a carichi trasversali, perpendicolari al loro piano medio e che sono quindi sottoposti a sforzo principale di flessione. D'altra parte, esistono gli elementi noti come “membrane”, ovvero la tipologia strutturale di elementi piani resistenti attraverso forze che si distribuiscono in maniera costante sullo spessore. La nostra struttura, tuttavia, non appartiene né all'una né all'altra dei tipi descritti perché gli elementi di cui il padiglione è formato si definiscono come “shell”. Le shell sono strutture ibride che si avvale di entrambi i meccanismi fondendo in esse entrambi i comportamenti resistenti che troviamo separati nei due tipi precedentemente esposti.

Anche se le shell resistono alle forze applicate principalmente attraverso l'azione della membrana in piano, la flessione è comunque indotta sul guscio; pertanto, un approccio più razionale al processo di progettazione è quello di includere simultaneamente le forze della membrana e dei momenti flettenti. La progettazione di armatura dei gusci per una sollecitazione combinata di membrana e di flessione è un problema complesso e finora non è stata trovata una soluzione completa per questo problema nei codici internazionali né si prevede alcun progresso in questo in questo campo specifico.

Questo metodo è l'ultimo traguardo, la versione più completa e rifinita, di una serie di esperimenti ed elaborazioni portate a termine con successo ma parzialità nel tempo. Il primo approccio fu ad opera di Gupta, successivamente di Lourenco e Figueiras e, passando per

Min nel 2004, si arriva alla pubblicazione del metodo attuale. A seguire si presentano le premesse nella ricerca, nello sviluppo, nel perfezionamento e infine per l'utilizzo di questo strumento di progettazione.

Per quanto riguarda la necessità di rinforzo metallico, devono essere analizzati e trattati separatamente quattro casi diversi: rinforzo necessario in entrambi gli strati; rinforzo necessario solo nello strato inferiore; rinforzo necessario solo nello strato superiore; e nessuna necessità di rinforzo.

Un tipico elemento shell è soggetto simultaneamente a forze membranali N_x, N_y, N_{xy} e ad azioni flettenti e torcenti M_x, M_y, M_{xy} . Allo stato ultimo, le forze applicate devono essere in equilibrio con le forze di trazione dell'armatura, e le forze di compressione nel puntone in calcestruzzo devono essere parallele alla direzione della fessura. In questo stato limite, la sollecitazione del calcestruzzo in compressione si ipotizza che sia uniforme nella profondità del blocco di sollecitazione di Whitney.

Si ipotizza che i rinforzi di armatura consistano in due strati ortogonali tra loro, posizionati nella faccia superiore e nella faccia inferiore, con opportuno ricoprimento, e che ognuno di questi presenti barre sia in direzione x che in direzione y (figura 44). La resistenza dell'armatura sarà indicata con $N_{xt}^*, N_{xb}^*, N_{yt}^*, N_{yb}^*$, dove b e t indicano le facce (superiore ed inferiore) e x e y le direzioni in cui queste resistenze si esercitano. Allo stato limite, un piano verticale di fessurazione, la cui normale forma un angolo θ_t e θ_b con l'asse x nel piano x - y , penetra le superfici superiore e inferiore (figura 44). Il calcestruzzo è in compressione parallelamente a questa fessura e si assume che la profondità dello stress block di Whitney sia pari a a_t e a_b .

Dopo aver osservato le specificazioni e le ipotesi alla base, riportiamo l'apparato algebrico-matematico che implementa l'algoritmo. Questo metodo si avvale di una metodologia di calcolo reiterativa per conseguire il risultato finale ottimale.

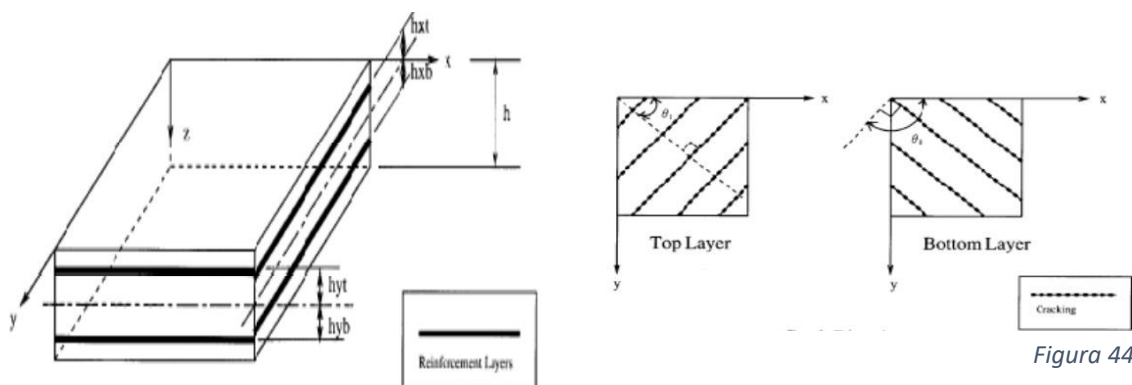


Figura 44

- *Caso 1: Armatura necessaria sia nello strato superiore che nello strato inferiore*

Le forze e i momenti resistenti offerti dall'armatura si possono così definire:

$$N_x^* = N_{xt}^* + N_{xb}^*$$

$$N_y^* = N_{yt}^* + N_{yb}^*$$

$$M_x^* = -N_{xt}^* h_{xt} + N_{xb}^* h_{xb}$$

$$M_y^* = -N_{yt}^* h_{yt} + N_{yb}^* h_{yb}$$

La tensione a cui lavora il calcestruzzo è f^c , quindi il contributo resistente del calcestruzzo è dato da:

$$N_t^c = -a_t f_t^c$$

$$N_b^c = -a_b f_b^c$$

$$M_t^c = -h_t N_t^c$$

$$M_b^c = -h_b N_b^c$$

Dove h è lo spessore totale, $h_t = \frac{(h-a_t)}{2}$ e $h_b = \frac{(h-a_b)}{2}$

Le forze e i momenti resistenti devono essere in equilibrio con le forze e i momenti applicati. Pertanto, le equazioni di equilibrio per un elemento unitario fessurato in direzione x e y saranno:

$$\begin{aligned} N_x &= N_x^* + N_t^c \sin^2 \theta_t + N_b^c \sin^2 \theta_b, & M_x &= M_x^* + M_t^c \sin^2 \theta_t + M_b^c \sin^2 \theta_b \\ N_y &= N_y^* + N_t^c \cos^2 \theta_t + N_b^c \cos^2 \theta_b, & M_y &= M_y^* + M_t^c \cos^2 \theta_t + M_b^c \cos^2 \theta_b \\ N_{xy} &= -N_t^c \sin \theta_t \cos \theta_t - N_b^c \sin \theta_b \cos \theta_b, & M_{xy} &= -M_t^c \sin \theta_t \cos \theta_t - M_b^c \sin \theta_b \cos \theta_b \end{aligned}$$

Le precedenti equazioni contengono otto incognite: le quattro resistenze delle armature, le due direzioni di fessurazione e le due profondità dello stress block.

Il procedimento iterativo inizia proprio con l'assegnazione iniziale di alcuni valori. Come suggerito prima da Gupta e poi da Lourenco e Figueiras, i valori iniziali di θ_t e θ_b possono

essere presi pari a 45° concomitantemente ai valori $a_t = a_b = 0,2h$ e dovrebbero essere aggiustati affinché il quantitativo di armatura risulti il minimo possibile e allo stesso tempo soddisfino le condizioni di equilibrio.

Le risultanti sui blocchi di calcestruzzo superiore e inferiore, ricavandole dalle espressioni precedenti, possono scriversi nella seguente forma:

$$-N_t^c = \frac{2(h_b N_{xy} - M_{xy})}{h_c \sin 2\theta_t}$$

$$-N_b^c = \frac{2(h_b N_{xy} - M_{xy})}{h_c \sin 2\theta_b}$$

Dove $h_c = h - \frac{(a_t + a_b)}{2}$

La resistenza delle barre invece si può esprimere come segue (equazioni 1 – 4):

$$N_{xt}^* = N_{xt} + N_{xyt} C_{xtt} \tan \theta_t + N_{xyb} C_{xtb} \tan \theta_b \quad \text{Equazione 1}$$

$$N_{xb}^* = N_{xb} + N_{xyt} C_{xbt} \tan \theta_t + N_{xyb} C_{xbb} \tan \theta_b \quad \text{Equazione 2}$$

$$N_{yt}^* = N_{yt} + N_{xyt} C_{ytt} \cot \theta_t + N_{xyb} C_{ytb} \cot \theta_b \quad \text{Equazione 3}$$

$$N_{yb}^* = N_{yb} + N_{xyt} C_{ybt} \cot \theta_t + N_{xyb} C_{ybb} \cot \theta_b \quad \text{Equazione 4}$$

Dove:

$$N_{xt} = \frac{h_{xb} N_x - M_x}{h_x} \quad N_{xb} = \frac{h_{xt} N_x + M_x}{h_x} \quad C_{xtt} = \frac{h_{xb} + h_t}{h_x} \quad C_{xtb} = \frac{h_{xb} - h_b}{h_x}$$

$$N_{yt} = \frac{h_{yb} N_y - M_y}{h_y} \quad N_{yb} = \frac{h_{yt} N_y + M_y}{h_y} \quad C_{xbt} = \frac{h_{xt} - h_t}{h_x} \quad C_{xbb} = \frac{h_{xt} + h_b}{h_x}$$

$$N_{xyt} = \frac{h_b N_{xy} - M_{xy}}{h_c} \quad N_{xyb} = \frac{h_t N_{xy} + M_{xy}}{h_c} \quad C_{ytt} = \frac{h_{yb} + h_t}{h_y} \quad C_{ytb} = \frac{h_{yb} - h_b}{h_y}$$

$$C_{ybt} = \frac{h_{yt} - h_t}{h_y} \quad C_{ybb} = \frac{h_{yt} + h_b}{h_y}$$

Le forze di compressione nel calcestruzzo sono quindi date da:

$$-N_t^c = \frac{2N_{xyt}}{\sin 2\theta_t} \quad -N_b^c = \frac{2N_{xyb}}{\sin 2\theta_b}$$

Quando i valori di θ sono molto piccoli, le forze diventano molto grandi e il metodo iterativo non risulta stabile. Laurenco e Figueras proposero di limitare il range del valore di inclinazione dei puntoni tra 10° e 80° per evitare l'instabilità numerica che si verifica nell'algoritmo per valori estremi. Min invece adottò la scelta di attribuire il valore 0 ogni qualvolta l'angolo misurasse tra -5° e 5° .

Quando i valori delle equazioni dalla 1 alla 4 danno risultato negativo significa che non è richiesta armatura in quello strato in quella direzione. Tuttavia, se si dovesse ottenere questo risultato converrebbe assumere la resistenza in quella direzione pari a zero e ricalcolare i valori di θ_t e θ_b .

L'algoritmo è completato dalla valutazione sull'armatura minima da rispettare in ogni caso, atta a limitare l'apertura di fessure e la deformazione in condizioni di esercizio, che risulta essere:

$$N_{min}^* = A_{s,min} \cdot f_y / 2$$

Con f_y indicante la tensione di snervamento delle barre.

Anche nel caso in cui una delle armature risulti di quantità necessaria inferiore alla minima, e quindi assunta pari a questa, conviene reiterare il processo per calcolare θ_t , o θ_b , come segue:

$$\theta_t = \frac{\tan^{-1}(N_{min}^* - N_{xt} - N_{xyb} C_{xtb} \tan \theta_b)}{N_{xyt} C_{xtt}}$$

- *Caso 2: armatura necessaria solo nello strato superiore*

Forze e momenti resistenti in direzione x e y possono esprimersi così:

$$\begin{aligned} N_x^* &= N_{xt}^* \\ N_y^* &= N_{yt}^* \\ M_x^* &= -N_{xt}^* h_{xt} \\ M_y^* &= -N_{yt}^* h_{yt} \end{aligned}$$

Le risultanti delle forze e dei momenti nello strato di calcestruzzo superiore sono:

$$N_t^c = -a_t f_t^c \qquad M_t^c = -h_t N_t^c$$

Dove h è lo spessore totale, $h_t = \frac{(h-a_t)}{2}$ e $h_b = \frac{(h-a_b)}{2}$

Se denotiamo con N_{xb}^c e N_{yb}^c le forze del blocco di cemento inferiore nelle direzioni x e y , e con N_{xyb}^c le forze di taglio, le equazioni di equilibrio possono essere così riassunte:

$$\begin{aligned} N_x &= N_x^* + N_{xb}^c + N_t^c \sin^2 \theta_t, & M_x &= M_x^* + M_{xb}^c + M_t^c \sin^2 \theta_t \\ N_y &= N_y^* + N_{yb}^c + N_t^c \cos^2 \theta_t, & M_y &= M_y^* + M_{yb}^c + M_t^c \cos^2 \theta_t \\ N_{xy} &= -N_t^c \sin \theta_t \cos \theta_t - N_b^c \sin \theta_b \cos \theta_b, & M_{xy} &= M_{xyb}^c - M_t^c \sin \theta_t \cos \theta_t \end{aligned}$$

In cui

$$\begin{aligned} M_{xb}^c &= h_b N_{xb}^c, \\ M_{yb}^c &= h_b N_{yb}^c \\ M_{xyb}^c &= -h_t N_{xyb}^c \end{aligned}$$

Le precedenti equazioni contengono otto incognite: le resistenze dell'armatura superiore in due direzioni (N_{xt}^* , N_{xb}^*), l'angolo di fessurazione superiore (θ_t) le due profondità dello stress block (a_t , a_b) e le tre risultanti inferiori dovute alla resistenza del calcestruzzo (N_{xb}^c , N_{yb}^c , N_{xyb}^c).

Dalle espressioni precedenti ricaviamo che la risultante del blocco superiore di calcestruzzo può essere scritta come:

$$-N_t^c = \frac{2(h_b N_{xy} - M_{xy})}{h_c \sin 2\theta_t}$$

La forza principale dello strato sottostante e la profondità dello stress block di compressione possono essere rispettivamente espressi così:

$$\begin{aligned} N_{b1b2}^c &= \frac{N_{xb}^c + N_{yb}^c}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{N_{xb}^c - N_{yb}^c}{2}\right)^2 + (N_{xyb}^c)^2} \\ a_b &= \frac{N_{b2}^c}{f_b^c} \end{aligned}$$

Come nel caso precedente, è stata presa in considerazione un'area minima di armatura $A_{s,min}$, preso dal codice ACI 318M-05. Pertanto, considerando la minima resistenza nello strato inferiore N_{min}^* , la resistenza sviluppata dall'armatura superiore risulta essere:

$$N_{xt}^* = N_{xxt} + N_{xyt} \tan \theta_t + D_{xt} N_{min}^*$$

$$N_{yt}^* = N_{yyt} + N_{xy2} \cot \theta_t + D_{yt} N_{min}^*$$

in cui

$$N_{xxt} = \frac{h_b N_x - M_x}{h_b + h_{xt}} \quad N_{yyt} = \frac{h_b N_y - M_y}{h_b + h_{yt}}$$

$$N_{xyt} = \frac{h_b N_{xy} - M_{xy}}{h_b + h_{xt}} \quad N_{xy2} = \frac{h_b N_{xy} - M_{xy}}{h_b + h_{yt}}$$

$$D_{xt} = \frac{-h_b + h_{xb}}{h_b + h_{xt}} \quad D_{yt} = \frac{-h_b + h_{yb}}{h_b + h_{yt}}$$

Se $N_{xt}^* < N_{min}^*$, allora $N_{xt}^* = N_{min}^*$ e θ_t sarebbe ricalcolata con la seguente espressione:

$$\theta_t = \tan^{-1} \left(\frac{[-N_{xxt} + (1 - D_{xt}) N_{min}^*]}{N_{xyt}} \right)$$

Se $N_{yt}^* < N_{min}^*$, allora $N_{yt}^* = N_{min}^*$ e θ_t sarebbe ricalcolata con la seguente espressione:

$$\theta_t = \tan^{-1} \left(\frac{N_{xy2}}{[-N_{yyt} + (1 - D_{yt}) N_{min}^*]} \right)$$

Questo programma può essere utilizzato come versione stand-alone, per determinare la capacità di carico di punti critici in pannelli, piastre e gusci in cemento armato, e per verificare il codice di progettazione a livello di elementi. Sono stati progettati cinque modelli sperimentali. Gli elementi progettati forniscono resistenze ultime calcolate dal 7 al 18% più elevate rispetto ai valori dei risultati delle prove, ad eccezione di un modello, che conferma l'adeguatezza dell'algorithmo di progettazione, e del codice di progettazione sviluppato.

4.5.4 METODO DAL FIB MODEL CODE 2010

Un altro metodo per il calcolo delle armature ci è offerto dal “*FIB Model Code 2010*”, un documento prodotto in cooperazione da CEB e FIP, due enti internazionali che operano nel campo della ricerca e gli obiettivi dei quali sono orientati all’esplorazione di nuove prospettive e alla formulazione di linee guida nell’ambito della progettazione strutturale. In questo documento normativo si tratta, al capitolo 7.3.2.2, degli elementi shell e di come ottenere le sollecitazioni adeguate al progetto strutturale delle stesse.

Il procedimento prende in esame la situazione a valle di una analisi strutturale come quella del nostro caso; le sollecitazioni nelle direzioni principali a cui l’elemento è sottoposto sono note e costituiscono i dati di partenza. Lo scopo è quello di ottenere gli sforzi effettivi a cui saranno soggette le armature che si posizioneranno nella lamina di calcestruzzo.

L’interpretazione offerta da questo metodo prevede che l’elemento shell venga concepito come l’unione di tre strati sovrapposti configurando una composizione funzionalmente e meccanicamente simmetrica in cui i due strati esterni si occupano di assorbire le sollecitazioni nel piano provocate dagli sforzi assiali e di flessione ospitando una rete di barre di armatura, mentre lo strato interno provvede a trasferire il taglio tra gli strati precedenti. Come mostrato in *figura 45*, la scomposizione delle azioni gravanti sulla shell si esprime tramite otto componenti: tre di sforzo assiale, due momenti flettenti, un momento torcente e due componenti tangenziali o di taglio.

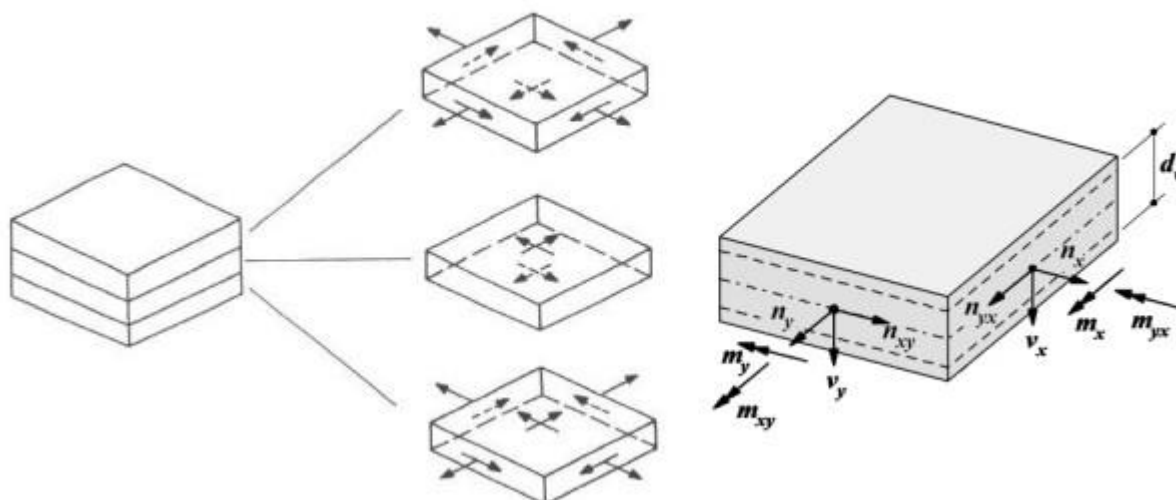


Figura 45

Dalla situazione descritta in figura si evince che le forze effettive che insisteranno sui due strati esterni, ovvero quelli in cui si situeranno le reti di armatura, si ottengono nel seguente modo:

$$n_{x \text{ inf,sup}} = \frac{n_x}{2} \pm \frac{m_x}{d_v}$$

$$n_{y \text{ inf,sup}} = \frac{n_y}{2} \pm \frac{m_y}{d_v}$$

$$n_{xy \text{ inf,sup}} = \frac{n_{yx}}{2} \pm \frac{m_{xy}}{d_v}$$

Le precedenti formule sono valide per una sezione non fessurata, cioè per $v_0/d_v < \tau_{cd}$.

Nel caso in cui si abbia una sezione fessurata le formule richiamano il contributo del taglio, come si può notare dalle formule seguenti:

$$n_{x \text{ inf,sup}} = \frac{n_x}{2} \pm \frac{m_x}{d_v} \pm \frac{v_x^2}{2v_0 \tan \theta}$$

$$n_{y \text{ inf,sup}} = \frac{n_y}{2} \pm \frac{m_y}{d_v} \pm \frac{v_y^2}{2v_0 \tan \theta}$$

$$n_{xy \text{ inf,sup}} = \frac{n_{xy}}{2} \pm \frac{m_{xy}}{d_v} \pm \frac{v_y v_x}{2v_0 \tan \theta}$$

dove:

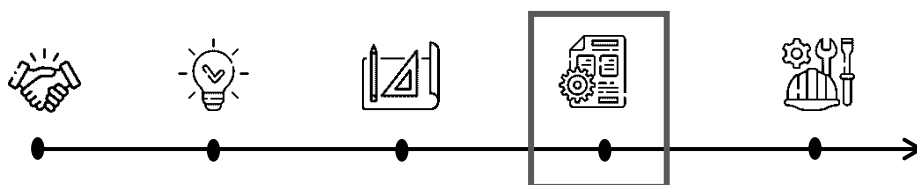
θ è l'inclinazione delle bielle compresse dovute al taglio nello strato centrale della shell;

d_v è il braccio di leva tra le forze che agiscono in corrispondenza degli strati esterni;

$$v_0 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

5. PIANIFICAZIONE DELLA COSTRUZIONE

In questa parte il lavoro assume un carattere organizzativo-gestionale, o “manageriale”. Ci collochiamo sempre in una fase previa a quella della costruzione in cantiere, ma questa volta si tratta di quella della pianificazione della costruzione. Lo sviluppo di questo ambito può comprendere vari compiti: l’approvvigionamento dei materiali, il trasporto degli stessi, l’ottimizzazione dei turni dei vari operai specializzati, la successione intelligente delle lavorazioni e in generale il workflow della costruzione.



Nella progettazione e pianificazione edilizia è emersa sempre più prorompente la figura del “project manager”, ovvero colui che si occupa di coordinare un gruppo dedito ad ingegnerizzare, ottimizzare e rendere il più possibile fluido il processo di costruzione. Il Project Manager è la persona responsabile della pianificazione e della salvaguardia del successo dell'esecuzione e della realizzazione di un progetto. In altre parole, è il profilo che coordina il lavoro della squadra per raggiungere gli obiettivi. Nel nostro caso, tuttavia, svolgeremo solo alcuni compiti che fanno parte di un pacchetto di prestazioni più ampio e che normalmente è affidato ad un gruppo di lavoro e non ad un solo individuo.

La mansione specifica che andiamo a svolgere riguarda il calcolo delle quantità di alcuni materiali e strumenti che servono alla costruzione della nostra struttura, lavoro che assume un'importanza critica date le speciali condizioni del progetto. Il fatto che questa struttura si trovi in un'isola impone degli accorgimenti e una pianificazione dedicata sotto molti aspetti che potrebbero risultare secondari in altre occasioni. Stiamo avendo a che fare, più praticamente, con la questione, resa problematica dall'intrinseco isolamento di un territorio isolano, dell'approvvigionamento delle risorse, che risulta ancor più evidente in un'isola dell'arcipelago delle Antille di 754 km². La condizione di isolamento, come già spiegato, comporta nel complesso costi superiori alla media, e per contrastare il più possibile l'incremento della spesa dovuto a queste complicazioni si rende necessaria un'attenta stima dei materiali e delle risorse da trasportare nel sito di costruzione affinché non si verifichino

perdite, di tempo e denaro spiacevoli o addirittura dannose che potrebbero stravolgere i presupposti con i quali il progetto era stato approvato e avviato.

La previsione, attraverso lo studio che porta alla pianificazione, è tra le capacità più importanti che la tecnologia BIM ci permette di sviluppare tramite la possibilità di associare informazioni anche in termini di tempo a modelli visuali geometrici o a singole parti di essi. Tra i più famosi abbiamo, per esempio, Autodesk Revit, il software di cui è stato fatto ampio utilizzo anche nel lavoro da noi svolto. Sebbene i programmi sviluppati e che abbiamo usato siano molto potenti, il lavoro che esporremo da qui in avanti trarrà la sua vera forza dalla sinergia che riusciremo a creare tra i vari programmi e i risultati che questi ci forniscono. Non a caso è stato creato, per implementare la tecnologia BIM, un formato apposito che garantisca la compatibilità e favorisca la portabilità dei file da un programma all'altro. Infatti, oltre al programma Revit, che è stato utilizzato in un momento intermedio della catena, abbiamo anche utilizzato altri programmi specializzati prima e dopo di lui, o per generare gli input da fornire o per assorbire e inglobare gli output da esso derivanti. Una volta che avremo estrapolato le informazioni sulle quantità, fungeranno da base per i calcoli delle tempistiche che le varie lavorazioni richiedono. Questa è un'altra parte fondamentale del lavoro di pianificazione, forse la principale e quella più consistente e che richiede maggiore competenza e strategia. Infatti, in questa fase, alla conoscenza delle quantità dei materiali e alle dimensioni dell'opera si devono mescolare le competenze specifiche per avere un'idea chiara e corretta di come si possono svolgere le diverse operazioni di cantiere. Successivamente si passerà all'ingegnerizzazione propriamente detta, cioè la disposizione delle lavorazioni in successione temporale, regolando gli avvisi e i termini, con il fine di contrarre il più possibile la durata complessiva della macchina dell'opera. Ovviamente è proprio in questo momento che le competenze strutturali, tecniche, tecnologiche e costruttive vanno fuse e impiegate per non creare situazioni di incompatibilità e sovrapposizioni conflittuali.

È il primo passo oltre la soglia della progettazione classica e convenzionale, ovvero quella 3D, e prende quindi il nome di "dimensione 4D". Da qui, il lavoro si potrebbe proiettare conseguentemente verso una successiva dimensione, la 5D, ovvero quella dei costi. Tutti questi risultati, nell'ecosistema del BIM, possono essere ottenuti in maniera consecutiva, solo e semplicemente integrando il risultato previo con nuove informazioni che daranno vita ad altri risultati; la previsione così verrà spinta sempre verso altri traguardi e verso una maggior totalità.

5.1 QUANTIFICAZIONE

Nella seguente parte andremo ad illustrare come riuscire ad ottenere le quantità reali di alcuni dei materiali o strumenti ausiliari alla costruzione. In particolare, sono quelli che si interfacciano in forma diretta, quindi con contatto fisico, al guscio di cemento. Proprio per questa condizione la loro misurazione risente della complessità della geometria della calotta e la rende impossibile da eseguire senza l'aiuto di un sistema informatico. Ricordiamo a cosa si riferiscono le quantità che stiamo cercando: valore volumetrico per la quantità di centine necessarie per sorreggere la struttura nella fase di getto, valore superficiale delle casseforme costituite da un tavolato di legno che riceverà il getto di cemento, valore volumetrico di calcestruzzo fibrorinforzato necessario per la costituzione stessa del guscio del padiglione.

Andremo ad illustrare, d'ora in avanti, i procedimenti che porteranno all'ottenimento dei risultati desiderati, secondo i ragionamenti espressi in precedenza. Partiremo dal modello 3D creato in Rhinoceros, che aveva costituito la base già per la parte strutturale e seguiremo due differenti passaggi, in due diversi programmi, per il calcolo delle suddette quantità. Estrarremo il volume racchiuso tra il terreno e il padiglione direttamente in Rhinoceros, invece per le altre due ci avvarremo di Revit.

5.1.1 QUANTITA' DI CENTINE

Abbiamo visto nella parte introduttiva del *capitolo 2.3* da quali superfici è costituito il solido che contiene il volume richiesto. Usando il comando *estrudi curva*, genereremo una superficie da ogni singolo segmento della linea spezzata che costituisce il bordo del padiglione. Queste verranno estese fino al livello di appoggio della struttura. Aggiungendo, infine, il piano orizzontale coincidente con il terreno al livello di appoggio della struttura, avremo descritto uno spazio chiuso, un volume definito. Tuttavia, finché il software non lo riconoscerà come tale, non avremo la possibilità di ricavare il risultato di nostro interesse. La creazione del solido avviene tramite l'unione di tutte le precedenti superfici mediante il comando *boolean union*. A questo punto, selezionando la struttura unita e impartendo il comando *volume* otterremo il valore desiderato.

Nel nostro specifico caso, è stato escogitato un espediente per rendere più agevole il processo e aggirare errori di coincidenza negli spigoli dovuti a una modellazione non impeccabile: si è proceduto considerando le quattro parti in maniera distinta. O meglio, solo tre di esse saranno trattate visto che la struttura risulta essere simmetrica per via dell'uguaglianza dei due paraboloidi laterali. Si è deciso di scomporre l'intero corpo nelle sue singole parti e vederlo come la somma di queste ultime; allo stesso modo il volume sarà ricavato come la somma di quello dei singoli.

Partiamo con il generare delle superfici nel piano d'appoggio del nostro padiglione che abbiano la forma della pianta. Questo sarà facile e rapido grazie al fatto che abbiamo in principio ricostruito lo schema di linee della pianta. In particolare, saranno quattro superfici diverse che avranno la forma delle figure piane descritte dalla proiezione in pianta dei corrispondenti paraboloidi, ovvero dei quadrilateri.

Avendo ora la superficie della copertura laminare e della pianta (*figura 46*), procediamo alla scomposizione della struttura allontanando tra di loro le quattro singole parti e generiamo in ognuno dei componenti separati le superfici laterali fino ad intersecare la superficie di base. Rifinando il risultato ed eseguendo l'unione booleana delle superfici in ogni singolo elemento, otterremo il risultato di *figura 47*, dove in viola possiamo apprezzare le superfici di chiusura ausiliari che abbiamo creato con il processo descritto.

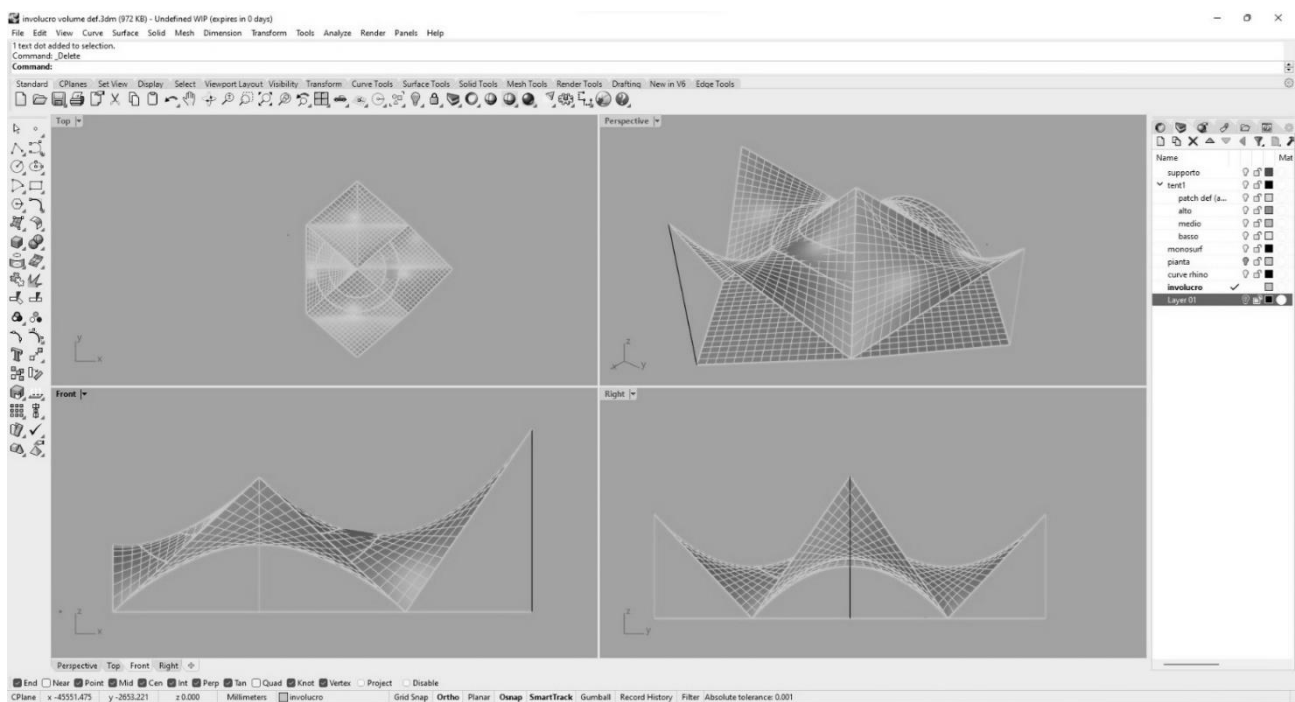


Figura 46

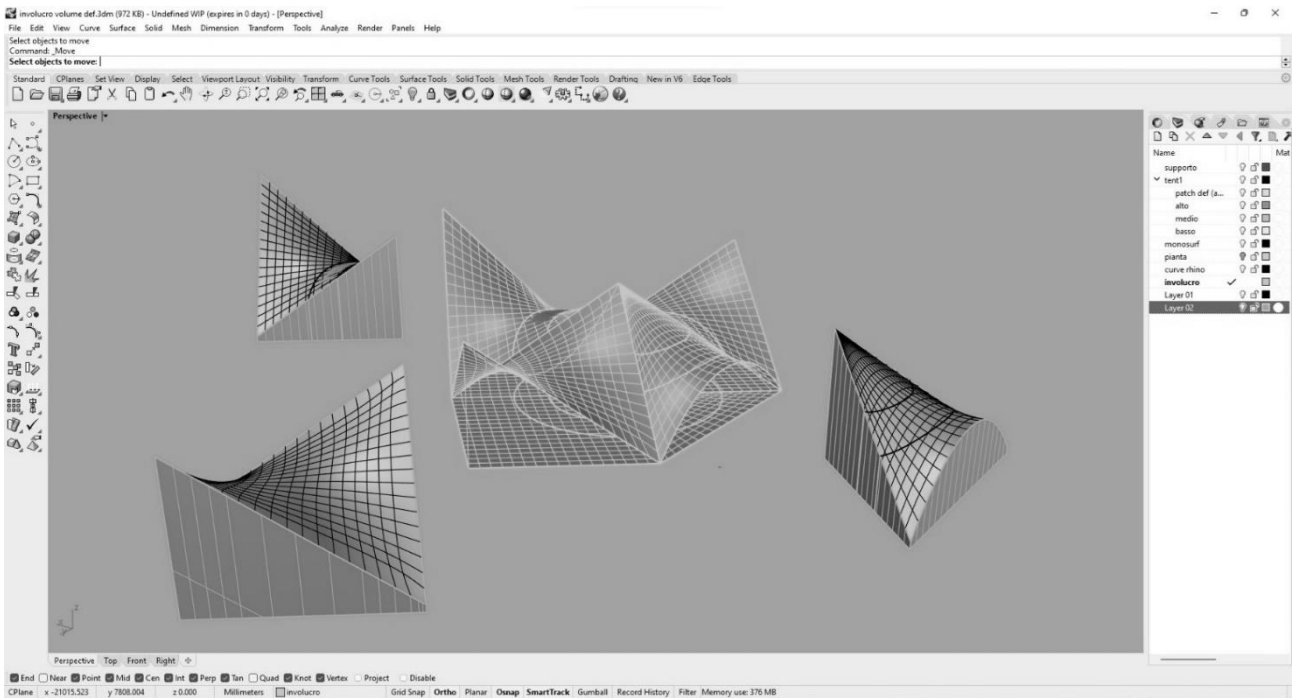


Figura 47

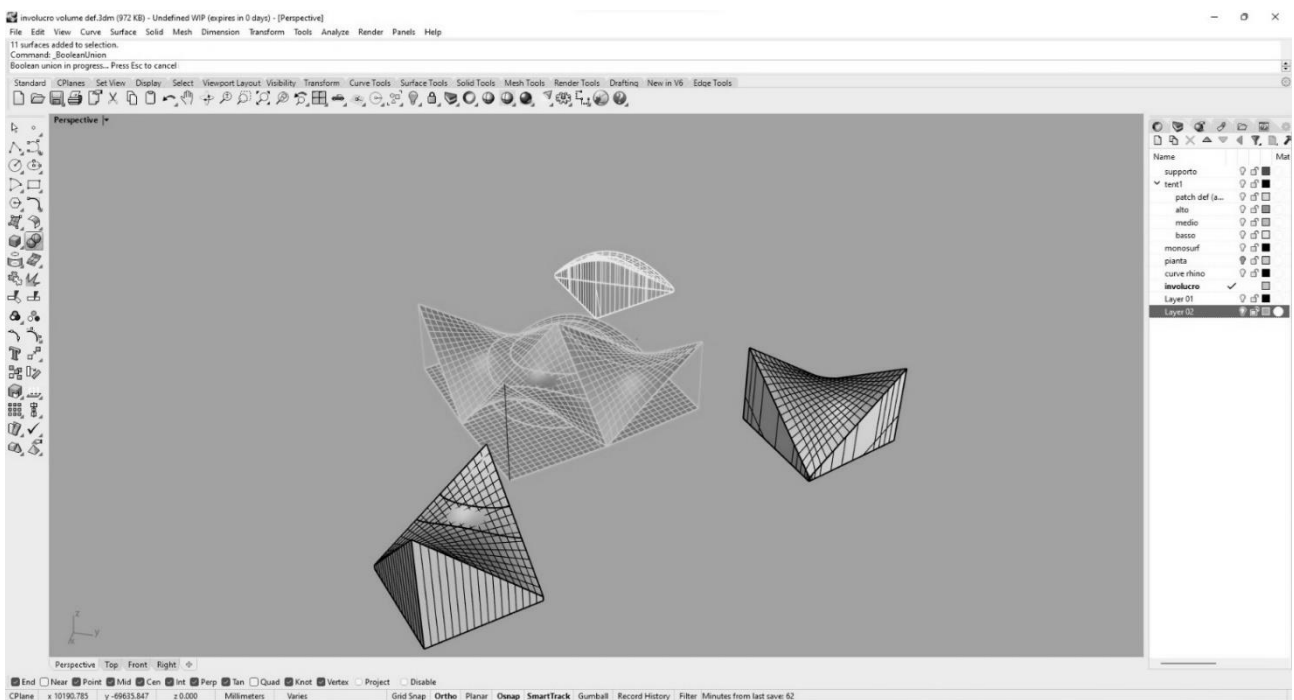


Figura 48

Un sintomo della buona riuscita della creazione del componente è che le varie superfici che lo compongono assumano lo stesso colore, come visibile dalla *figura 48*. A questo punto, selezionando la struttura e impartendo il comando *volume*, comparirà il valore richiesto: andiamo a illustrare i casi in *figura 49*, *figura 50*, *figura 51*.

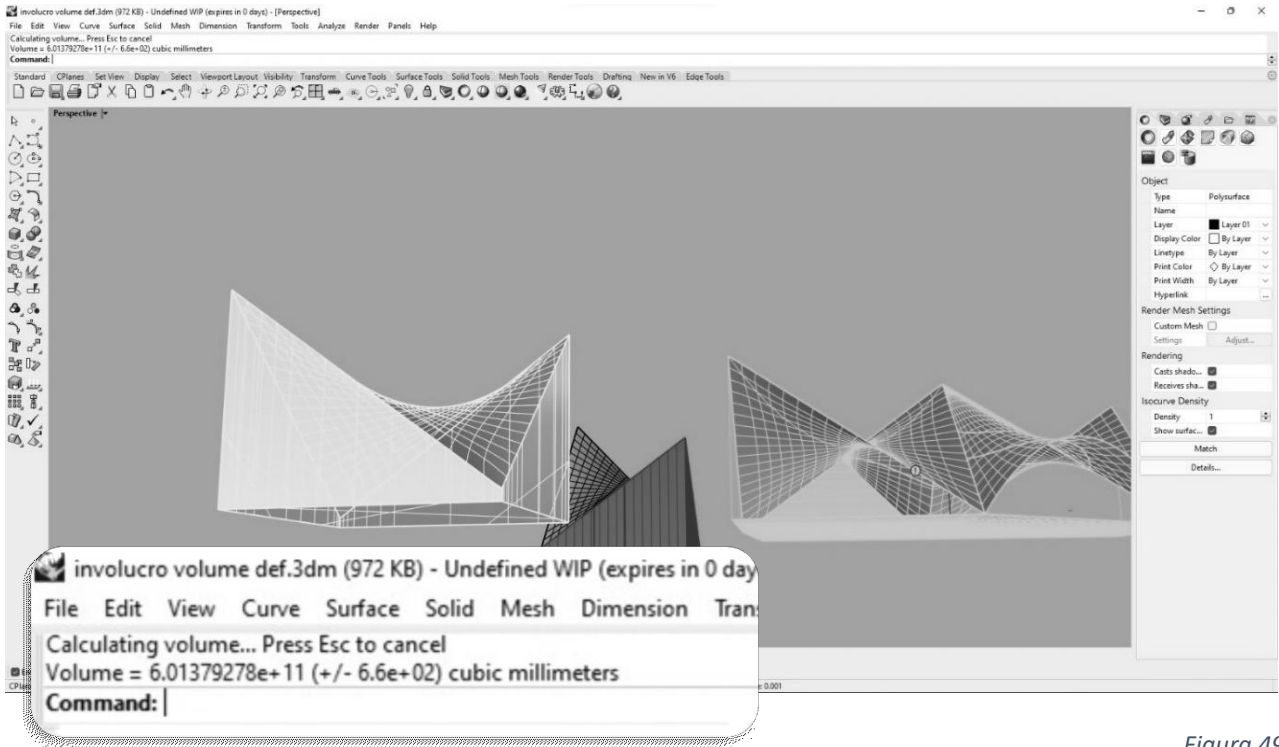


Figura 49

Parte laterale: $\text{Volume} = 601379,278 \text{ dm}^3$

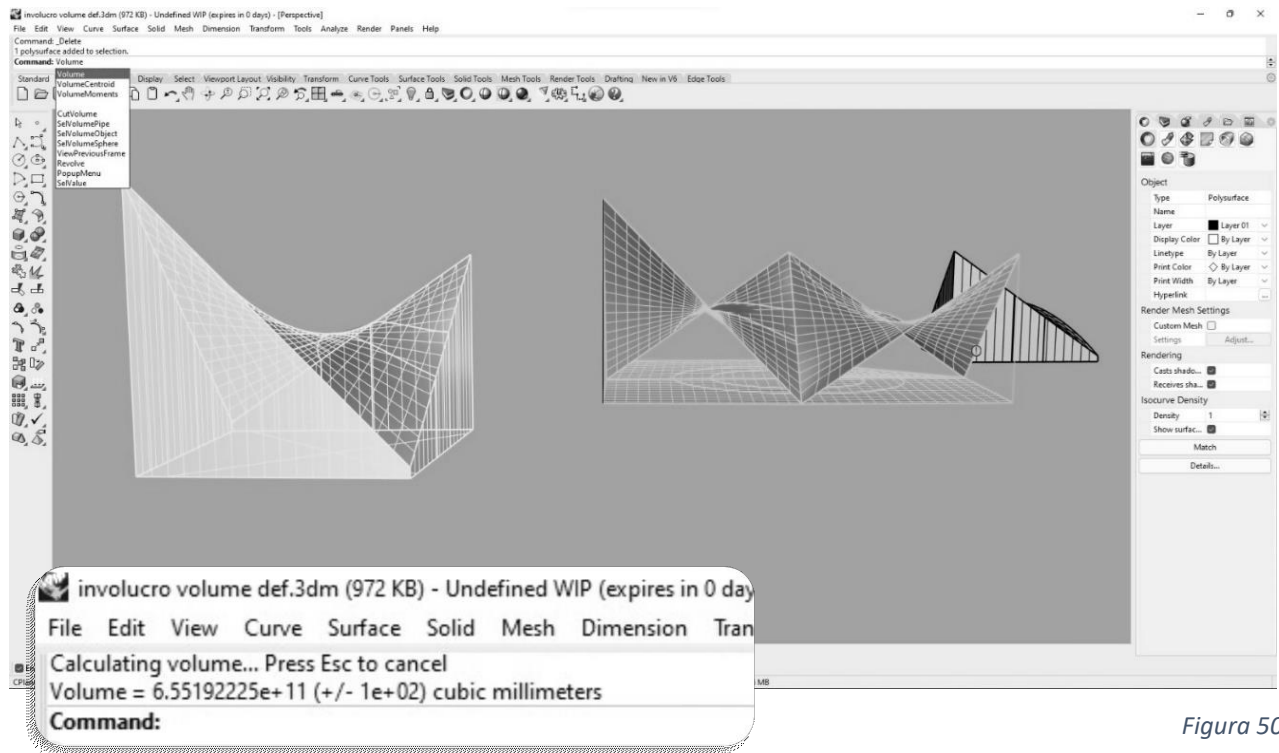


Figura 50

Parte anteriore: $\text{Volume} = 655192,225 \text{ dm}^3$

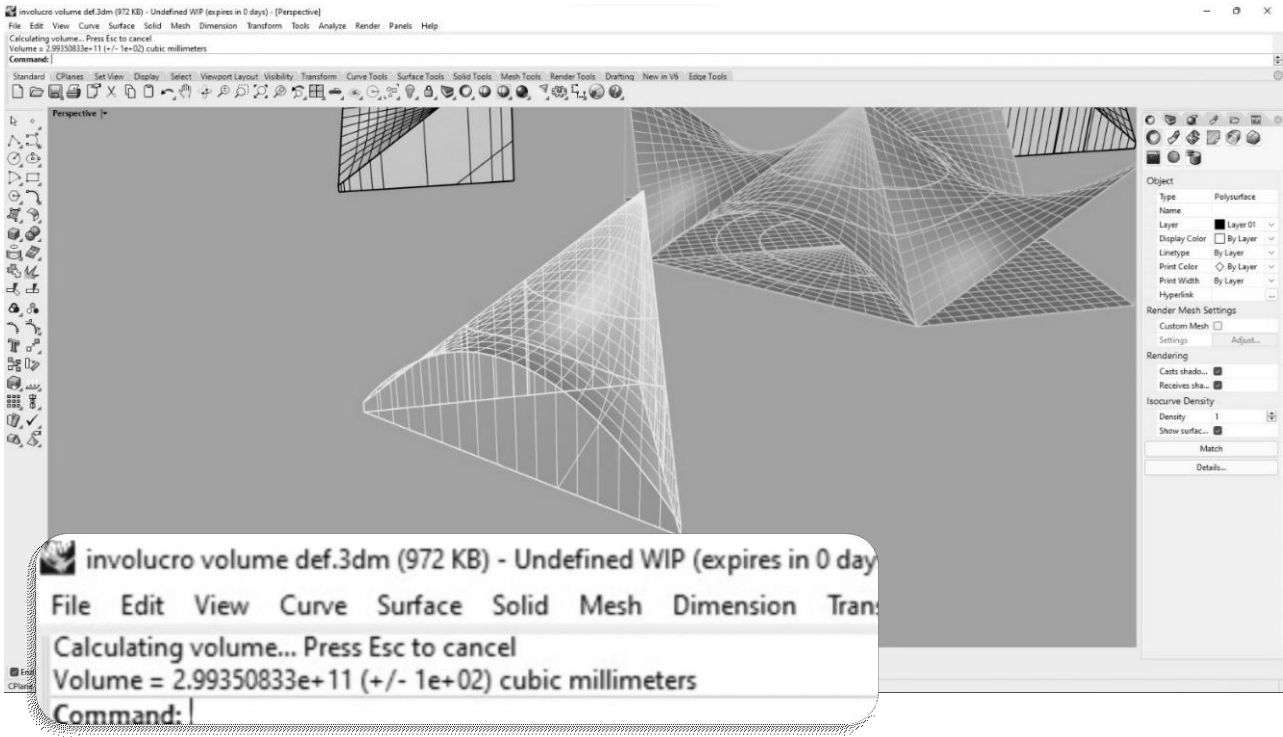


Figura 51

Parte posteriore: $\text{Volume} = 299350,833 \text{ dm}^3$

Il volume totale, risultato della somma dei singoli (in cui viene considerato due volte il volume del componente laterale), risulta essere:

$$Vol_{ant} + Vol_{pos} + 2 Vol_{lat} = 2157301,614 \text{ dm}^3$$

5.1.2 QUANTITA' DI CASSEFORME E DI CALCESTRUZZO PER IL GETTO

Come già anticipato, per ricavare il volume e la superficie della copertura utilizzeremo il software Revit. Quello che questo programma ci mette a disposizione è uno strumento che permette di estrarre dei valori quantitativi di elementi del modello al suo interno e prende il nome di “computo dei materiali”.

Andiamo ad illustrare, passo per passo, il procedimento da seguire per creare il computo dei materiali. Chiariamo subito che si tratta di un procedimento in due fasi: la prima tratta di ottenere un modello adeguato alla lettura da parte del software in previsione dei parametri che ci interessano partendo dal nostro modello di input; la seconda concerne la manipolazione del risultato, ovvero la creazione e l'editing della tabella.

5.1.2.1 OSSERVAZIONE E MODELLAZIONE PRELIMINARE

Importare il modello in Revit non è un procedimento banale poiché la struttura ha una forma complessa per le capacità del software di destino. Infatti, il programma tenderebbe a semplificare la geometria tramite il processo di meshing e si creerebbero delle discrepanze che potrebbero dar luogo ad imprecisioni evitabili. Si è riusciti ad ovviare a questa circostanza facendo ricorso alla “massa concettuale”. È un formato di modello che Revit utilizza per dare la possibilità di lavorare al suo interno con forme previamente modellate che non vogliamo subiscano variazioni o che non avremmo potuto creare in Revit per via della complessità delle forme o che, per semplice comodità o evenienza, possediamo già come prodotto al di fuori di esso.

Per sfruttare questa possibilità il primo passo è aprire un documento apposito chiamato, appunto, “Massa Concettuale” (*figura 52*), all'interno del quale andremo ad importare il file di Rhinoceros costituito dalla polisuperficie tripartita dopo averlo convertito in formato .dwg per questioni di compatibilità (*figura 53*). Il passo successivo è verificare immediatamente che l'importazione sia avvenuta correttamente e non abbia prodotto errori o modifiche alla superficie. Se riteniamo il risultato attinente a ciò che ci serve per proseguire il lavoro, lo salveremo. Il file sarà salvato però come un file di *famiglia di Revit* (.rfa) come si può apprezzare dalla *figura 54*.

Le famiglie di modellazione Revit sono la definizione e la raccolta di tutti gli elementi che possiamo inserire in un progetto, sia in 2D che in 3D. In pratica, le famiglie sono muri, solai, porte, tetti, finestre, arredi, testi, quote e tutto quello che si può creare con questo software. In questo modo avremo noi creato una nuova famiglia e l'avremo inserita all'interno della libreria del programma, facendo in modo che essa non venga modificata quando viene introdotta in un progetto.



Figura 52

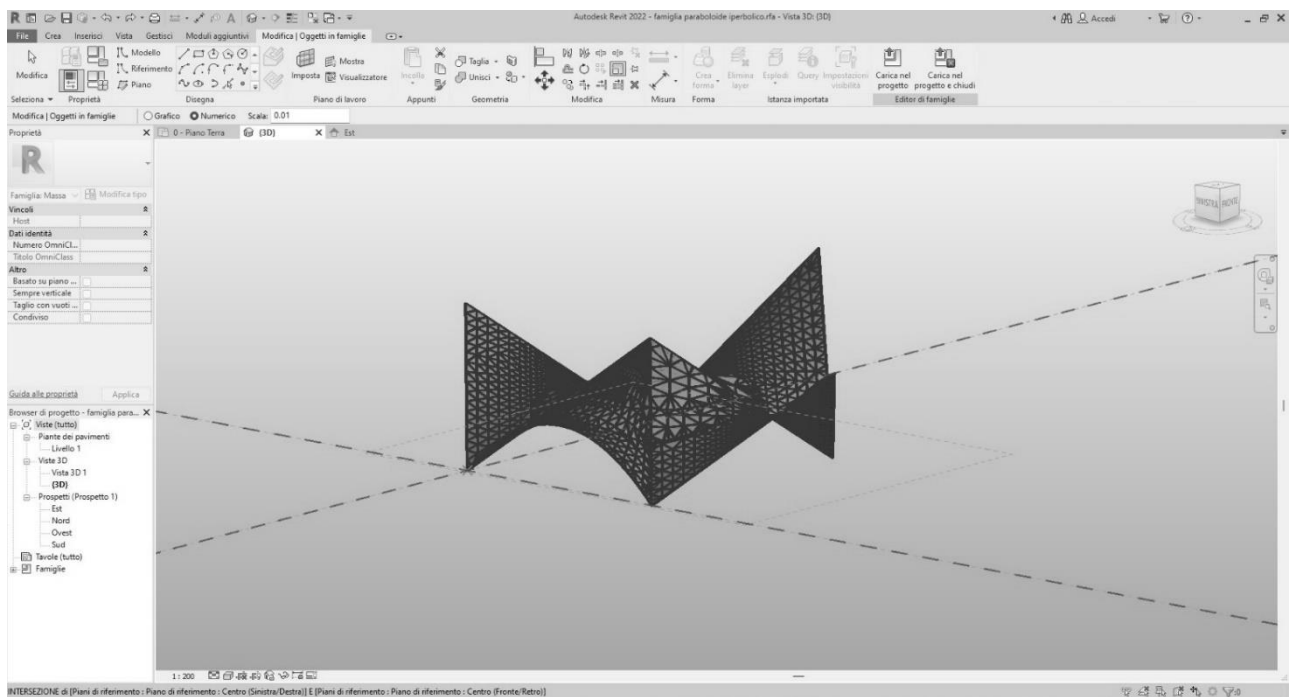


Figura 53

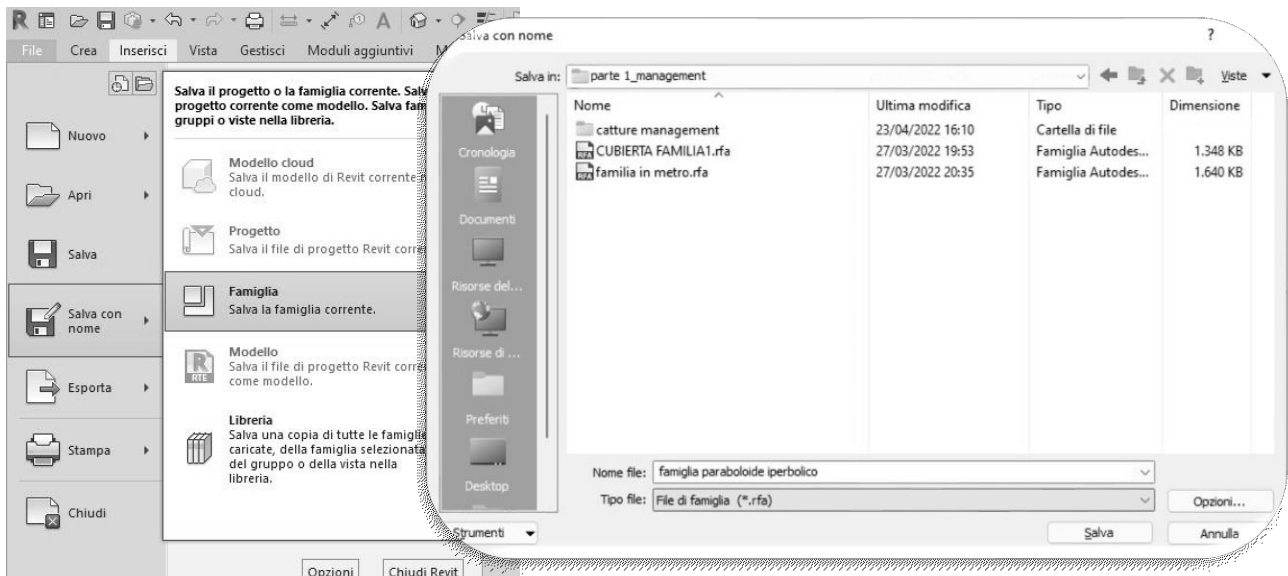


Figura 54

In questo momento, avendo definito la nostra massa concettuale come una famiglia di Revit, ci è permesso di importarla in un file di progetto come indicato in *figura 55* attraverso la sezione “Volumetrie e Cantiere”.

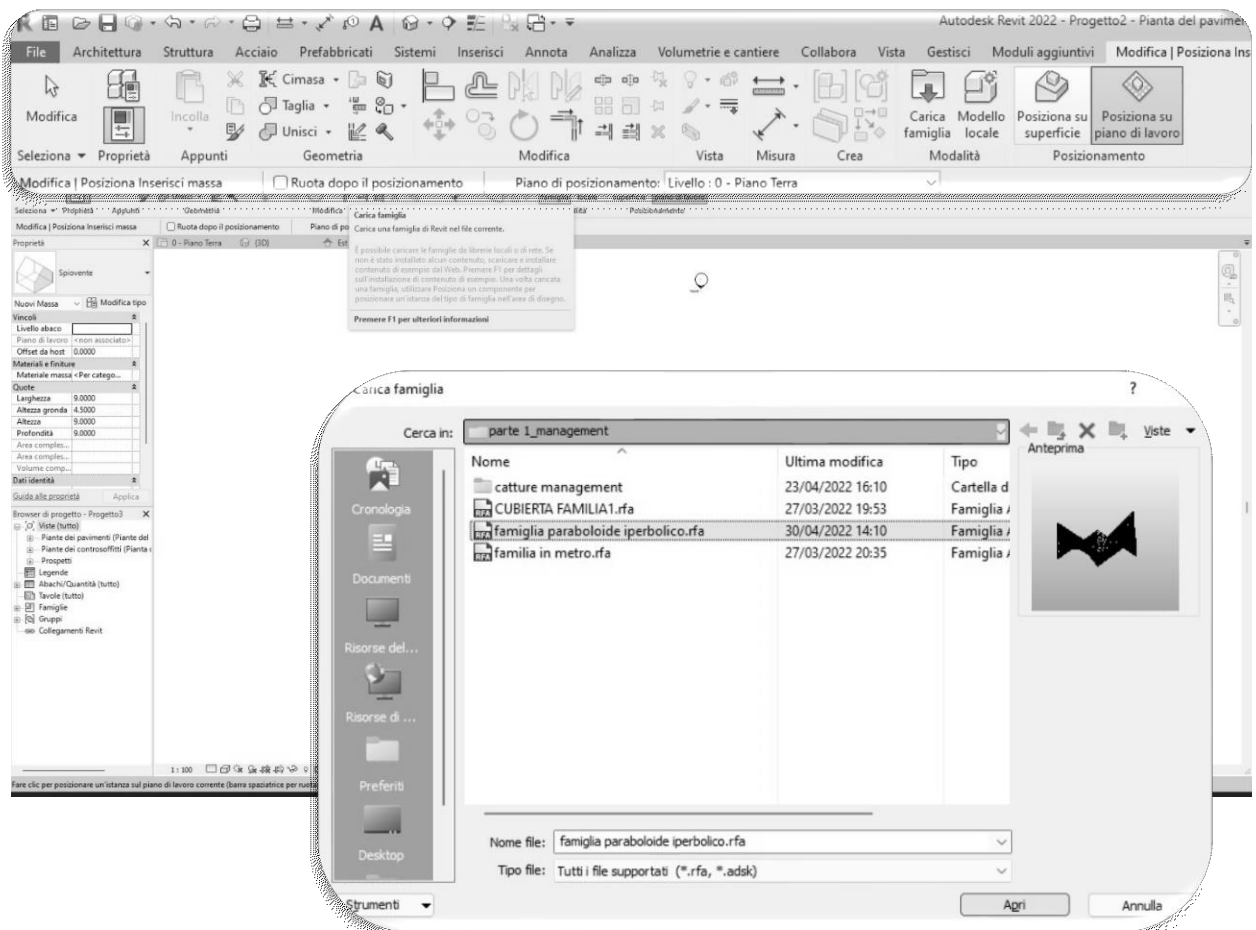


Figura 55

All'apertura del file troveremo agganciato al nostro cursore l'elemento da posizionare nello spazio. A sinistra avremo la possibilità di scegliere il piano di appoggio, il layer d'appartenenza ed altre impostazioni che non risultano vincolanti e possono essere considerate del tutto arbitrare. In *figura 56* possiamo apprezzare il modello importato definitivo, nella *figura 57* un suo dettaglio.

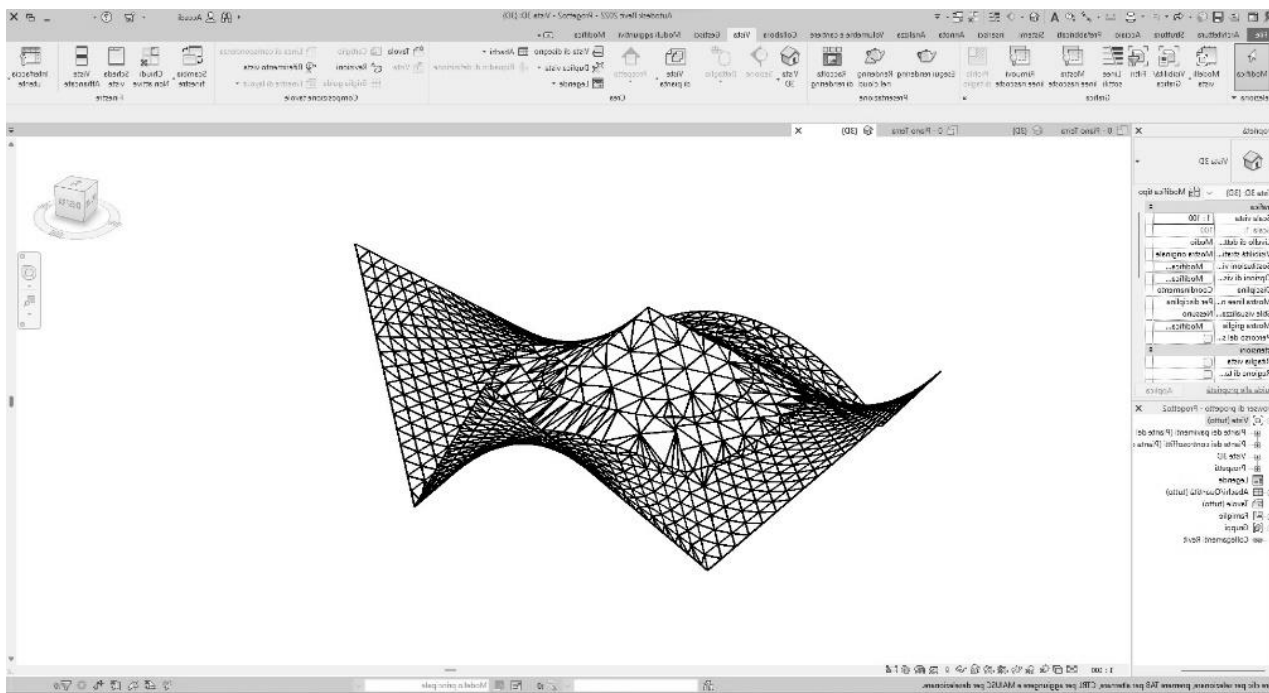


Figura 56

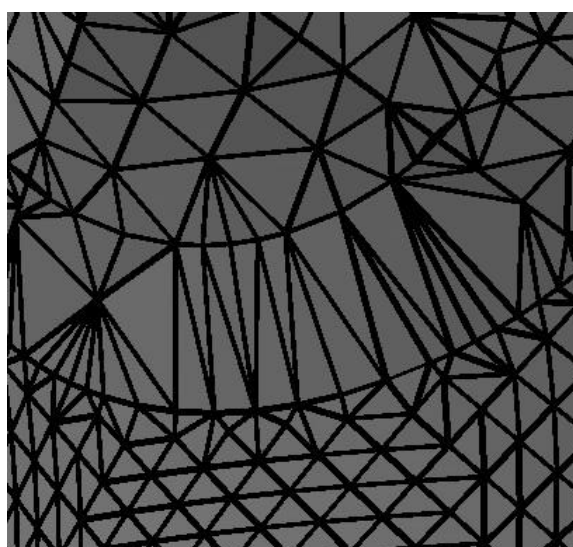


Figura 57

Osservando la divisione, possiamo apprezzare che le proiezioni delle circonferenze che abbiamo tracciato all'inizio, e la successiva divisione della superficie intera tramite le stesse, ha prodotto l'effetto di creare delle mesh che si generano a partire proprio da queste curve di proiezione e non permette l'esistenza di mesh solcate dalla curva. Ovvero Le mesh più vicine alla curva hanno sempre un bordo coincidente con quest'ultima. Ovvero nessuna delle mesh si estende in due zone diverse delle tre predefinite.

Questo è fondamentale perché ci permetterà di differenziare in maniera precisa ed esatta le zone della superficie in base allo spessore della lamina di calcestruzzo e riportare fedelmente in ogni punto il valore reale.

Quello che dobbiamo fare ora per creare la nostra copertura è generare la volumetria della stessa, donando spessore alla lamina. Tradotto nei comandi del programma si tratterà di assegnare una famiglia, o meglio un tipo specifico di famiglia, ad ogni mesh della copertura.

Le famiglie comprendono al loro interno molti tipi, che costituiscono le diverse tipologie che possiamo desiderare di quella famiglia, come i diversi tipi di tetto, i diversi tipi di porta, ecc. differenziati per caratteristiche fisiche, stratigrafia ed altri parametri a nostra discrezione.

Le librerie di Revit hanno tipi limitati, ma il programma permette anche di definirne e crearne dei propri. È quello che andremo a fare perché i tipi di copertura che fanno al caso nostro non sono presenti nelle librerie.

Andremo quindi ad assegnare alle mesh un tipo di famiglia della categoria tetto una volta che lo avremo definito.

Vediamo come fare:

Il comando esteso si chiama in realtà "tetto da superficie" e serve proprio a creare un tetto da una superficie non verticale di una massa. Questo comando è specifico per lavorare con le masse, come nel nostro caso, e serve ad assegnare delle categorie, famiglie e tipi alle superfici del modello. Facendo click sul comando si apre automaticamente, sulla sinistra, una finestra di dialogo che permette di scegliere il tipo che desideriamo assegnare alle mesh che selezioniamo.

Cliccando sul bottone “modifica tipo” visibile nella *figura 58*, si aprirà la finestra della *figura 59*. Se vogliamo partire dal tipo che è già inserito, clicchiamo su “duplica”, rinominiamo e andiamo a modificarne la struttura, a cui accediamo dal bottone “Modifica”.

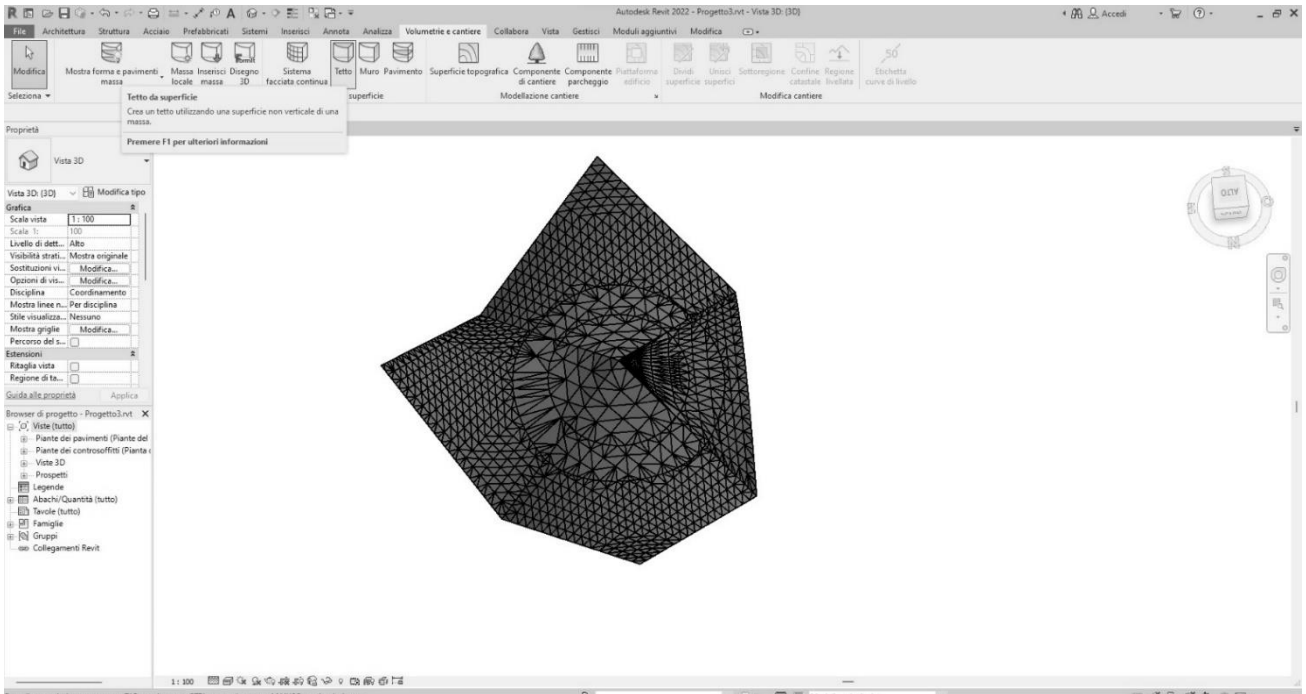


Figura 58



Figura 59

La *figura 60* sotto riportata descrive la struttura del guscio di calcestruzzo da noi creata. L'unica caratteristica che ci interessa in questo momento è lo spessore, è indifferente il materiale e le sue caratteristiche fisico-tecniche. Per questo motivo non le abbiamo cambiate.

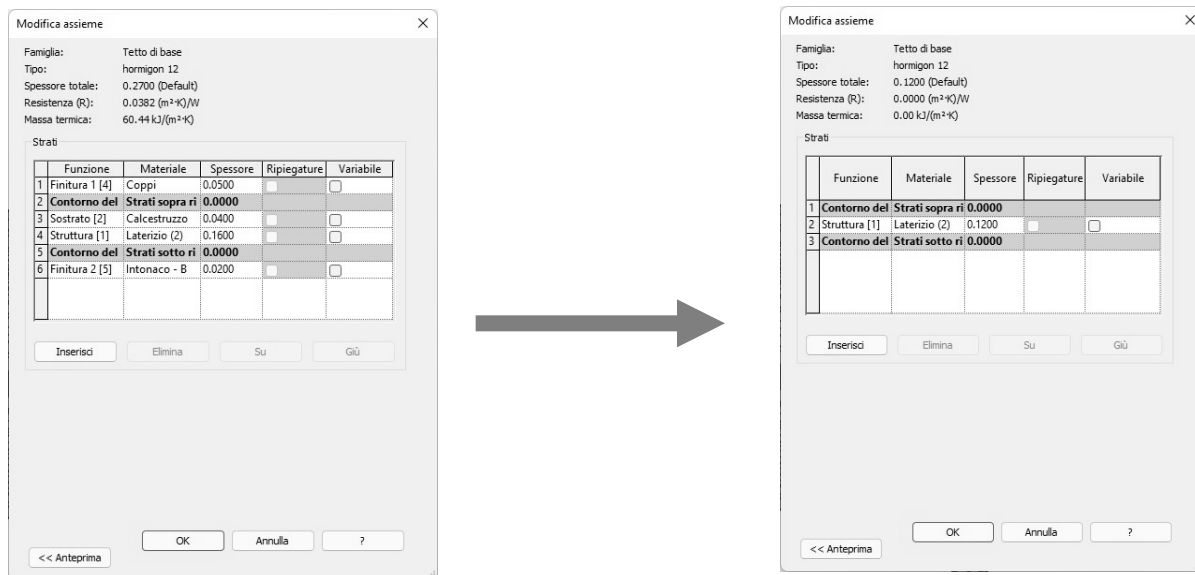


Figura 60

Dovremo creare tre tipi diversi della stessa famiglia poiché il padiglione, come sappiamo, è composto da tre diverse stratigrafie, benché cambino solo nello spessore. Il procedimento è lo stesso visto poc'anzi per tutti e tre. Una volta aver creato tutti i tipi che ci interessano, che saranno tre, ovvero quello di spessore 12, quello di 24 e quello di 36 cm, andremo a selezionare le rispettive mesh e li assegneremo ad esse con il comando crea tetto precedentemente visto.

Fortunatamente il programma permette la selezione multipla così da velocizzare e rendere più agevole il lavoro ed evitare dimenticanze. Quando vogliamo associare il pacchetto di copertura (tipo) da noi predisposto con le mesh selezionate, basterà dare il comando che corrisponde a "crea tetto" per vedere spuntare da ognuna delle mesh un prisma che ha come base la mesh stessa. Ogni prisma simboleggia quindi il pacchetto di copertura applicato ad una singola superficie (mesh), dunque l'unione di questi darà la copertura del padiglione nel complesso.

Possiamo anche scegliere che i prismi si generino verso il basso o verso l'alto. Noi sceglieremo verso l'alto coerentemente con le scelte effettuate dal principio. Quindi andiamo nel menù a sinistra e cambiamo la voce "posizione superfici" da "superfici parte inferiore del tetto" a "superfici parte superiore del tetto" (figura 61). Una volta che avremo assegnato una famiglia e un tipo specifico di copertura ad ognuna delle mesh, avremo il risultato di figura 62.

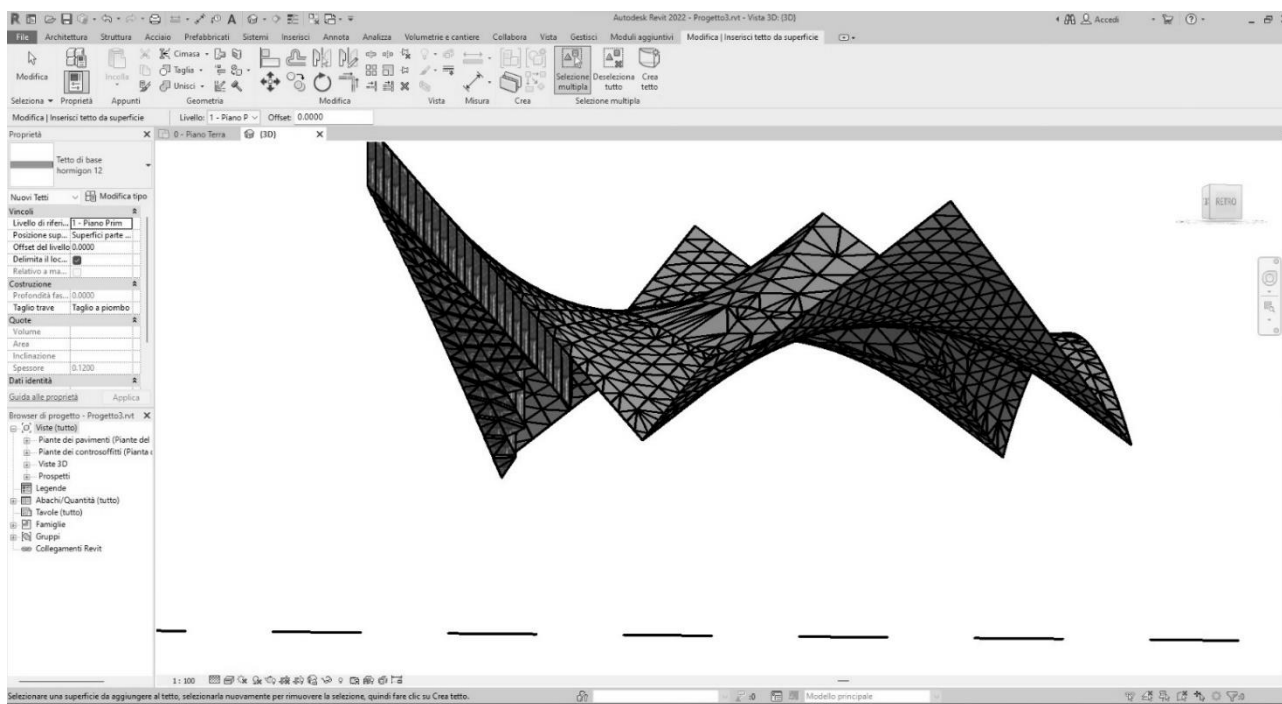


Figura 61

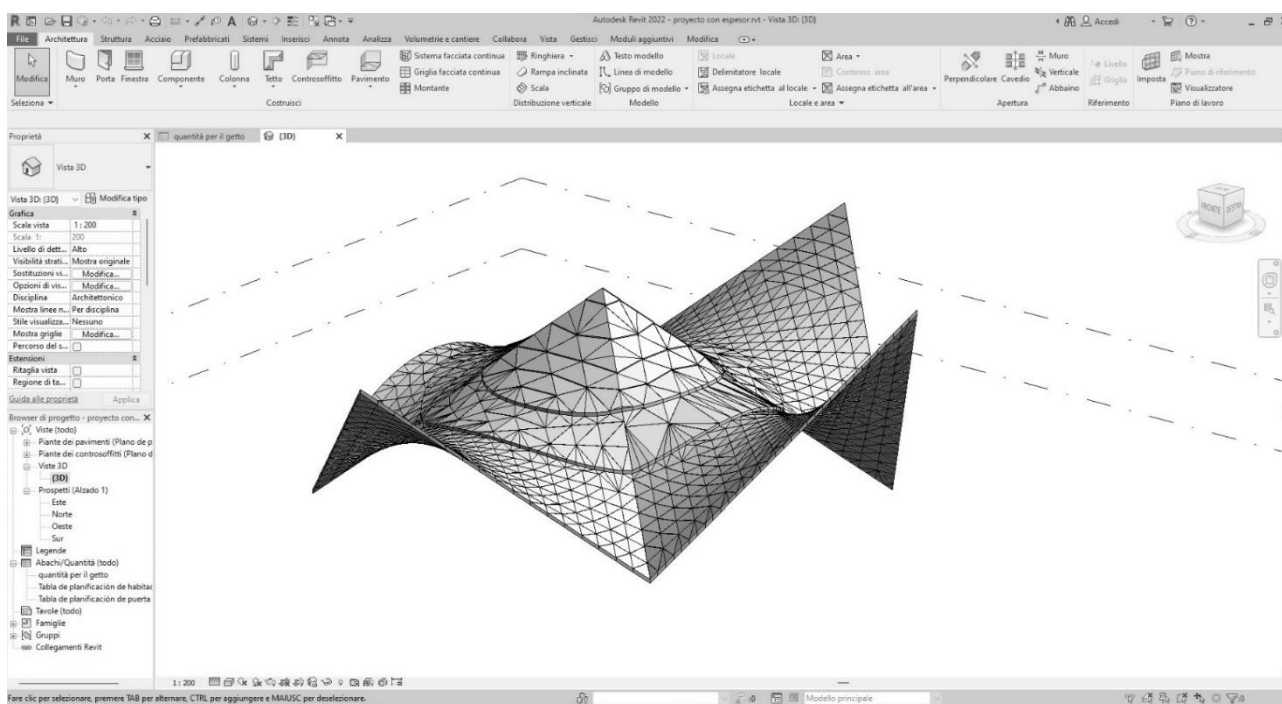


Figura 62

5.1.2.2 ESTRAZIONE COMPUTO METRICO

Ottenuto un modello soddisfacente possiamo entrare nell'ultima fase del lavoro, che consiste nell'impartire i comandi che ci permettono di estrapolare, appunto, le informazioni che ricercavamo. Nel menù al lato sinistro troviamo la voce "Abachi/Quantità" che è esattamente lo strumento di cui abbiamo parlato.

Creiamo un "nuovo computo dei materiali" e cerchiamo i filtri che ci interessano nella che si apre sotto la voce "Architettura". Infatti come abbiamo detto la tecnologia BIM e di conseguenza i programmi che lavorano con essa, danno modo di inglobare nel modello geometrico svariati attributi e caratteristiche, che possono esulare dall'essere di stampo architettonico, bensì meccanico, impiantistico, economico ecc.

Dall'elenco selezioniamo le voci che corrispondono alle grandezze di cui vogliamo conoscere la misura spostandole nello spazio a destra della finestra di dialogo (figura 63).

Confermando le scelte si ottiene già il computo dei materiali; tuttavia, abbiamo avuto bisogno di effettuare degli aggiustamenti per raggiungere il nostro obiettivo. Infatti questa prima versione non contiene i totali che considerano la somma dei valori assegnati ad ogni singola mesh, porta invece soltanto il valore parzializzato di ogni mesh.

Come possiamo vedere dalla *figura 64*, le voci che abbiamo scelto sono: Categoria; Famiglia; Tipo e Famiglia; Area; Volume. Ognuna di queste voci andranno a costituire una colonna del nostro computo. Le righe sono invece in numero pari al numero di mesh in cui è suddivisa la superficie della struttura.

Per ottenere il valore della somma totale comprensivo di tutte le mesh rispetto alle grandezze selezionate dobbiamo muoverci nel menù di editing del computo. Nella *figura 65* si mostra come chiedere che vengano mostrati anche i totali conteggiati dalla macchina in automatico per le grandezze che ci interessano. Nel pratico, basterà selezionare "calcola totali" selezionando "Volume" tra le voci una volta, e selezionando "Area" nell'altro caso.

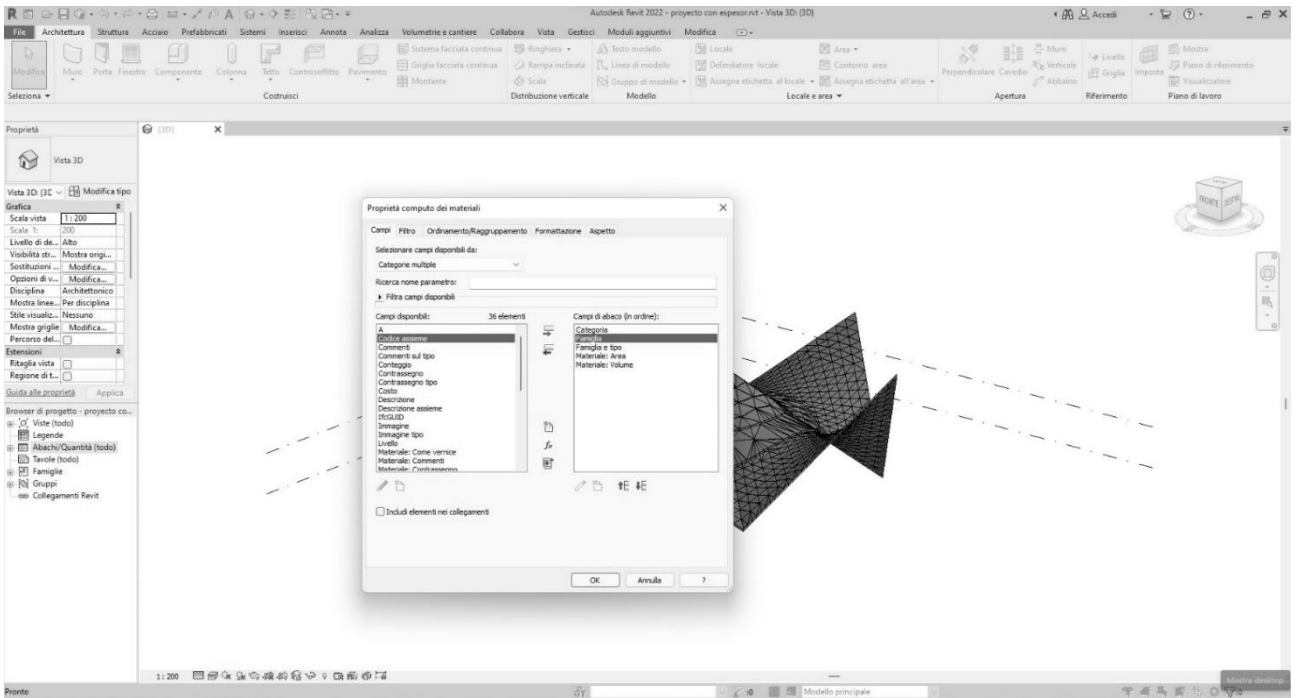


Figura 63

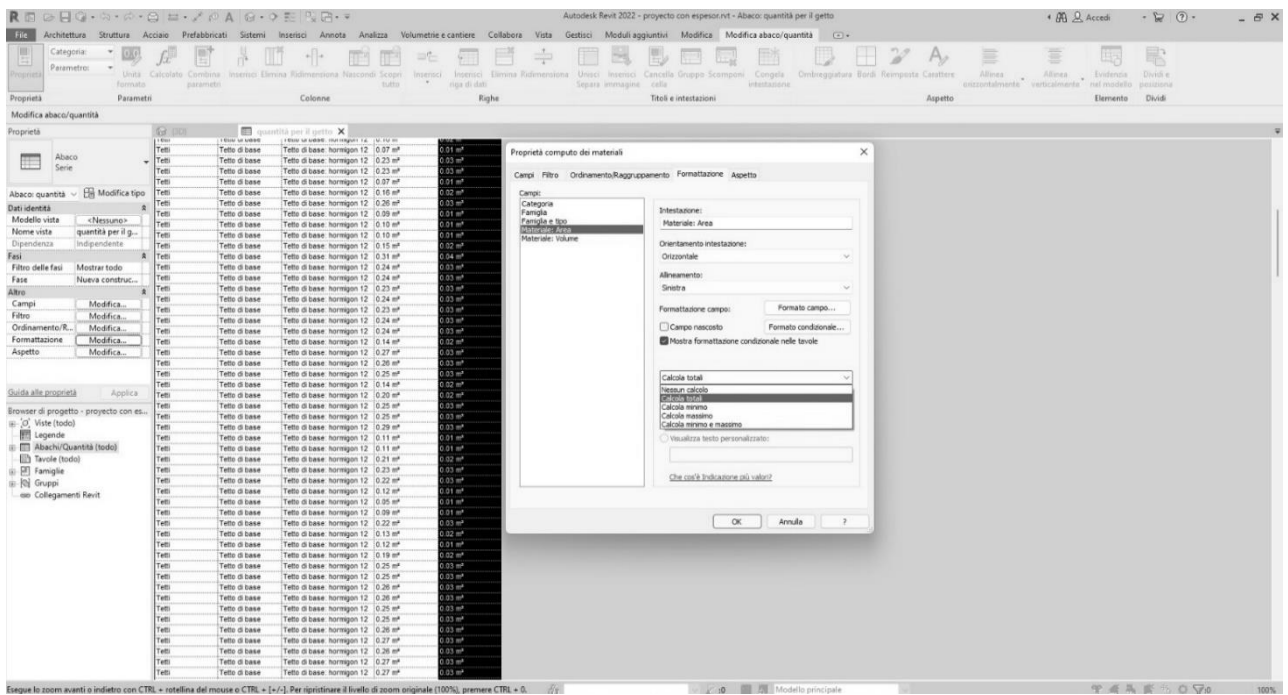


Figura 64

Tetto	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	0.43 m³	0.16 m³
Tetto	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	0.22 m³	0.08 m³
Tetto	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	0.02 m³	0.01 m³
Tetto	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	0.02 m³	0.01 m³
Tetto	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	0.02 m³	0.01 m³
Tetto	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	0.59 m³	0.21 m³
Tetto	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	0.91 m³	0.33 m³
Tetto	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	2.35 m³	0.85 m³
Totale generale: 307			542.62 m³	99.16 m³

Figura 65

Riportiamo i totali calcolati da Revit che possiamo osservare anche dalla *figura 65*:

La **superficie della copertura**, che corrisponde all'area di casseforme, è pari a **542,62 m²**.

Il **volume occupato dalla lamina di copertura in calcestruzzo** è pari a **99,16 m³**.

5.1.2.3 ESPORTAZIONE E FORMATTAZIONE

Per poter essere davvero fruibile questo contenuto ha bisogno di essere esportato al di fuori di Revit, così da favorirne la lettura e l'utilizzo presso gli uffici ai quali compete la richiesta e la fornitura dei materiali. Estrarremo il computo dei materiali ottenuto dal programma e lo organizzeremo in una tabella di Excel.

File > Esporta > Rapporti > Abaco

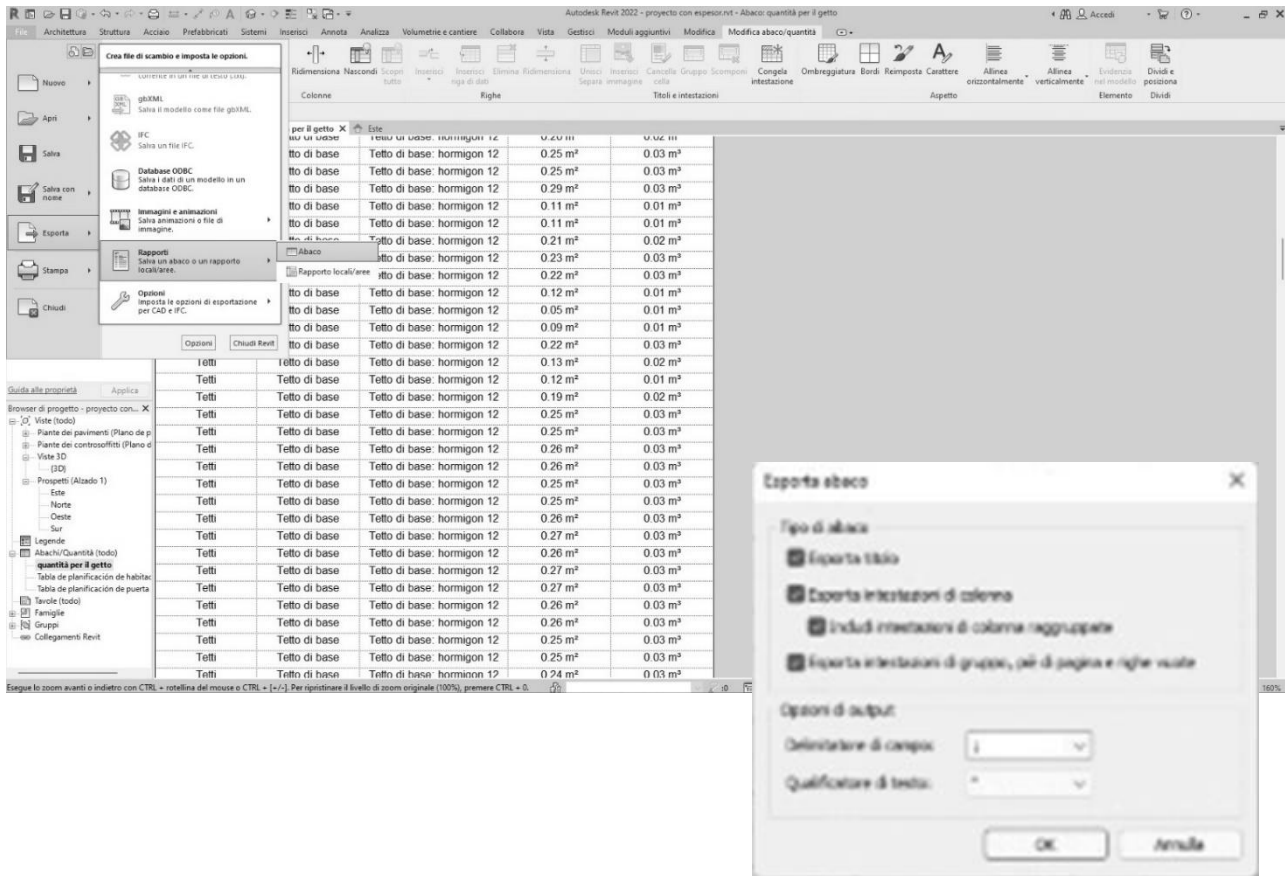
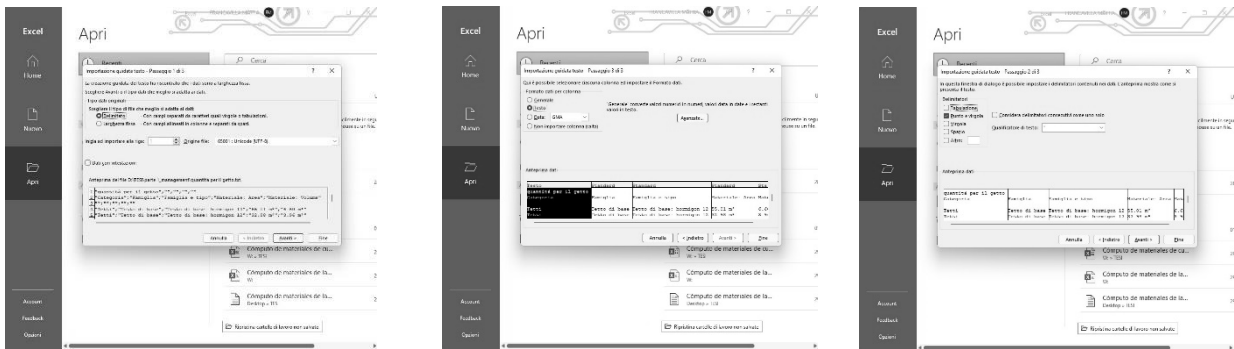


Figura 66

Salveremo il documento in .txt e impostiamo le opzioni come mostrato nella figura 66.

Apriamo il programma di destinazione e seguiamo i passaggi indicati a continuazione in figura 67.



Figura_67

Ed ecco, in definitiva, il computo metrico che cercavamo in Excel.

Quantità per il getto	Area	Volume		
Tetti				
Tetto di base				
Tetto di base: hormigon 12	55.01 m²	6.90 m³		
Tetto di base: hormigon 12	32.98 m²	3.96 m³		
Tetto di base: hormigon 12	42.25 m²	5.07 m³		
Tetto di base: hormigon 12	46.12 m²	5.53 m³		
Tetto di base: hormigon 12	18.95 m²	2.27 m³		
Tetto di base: hormigon 12	4.16 m²	0.50 m³		
Tetto di base: hormigon 12	14.25 m²	1.71 m³		
Tetto di base: hormigon 12	16.03 m²	1.92 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.84 m²	0.10 m³		
Tetto di base: hormigon 12	4.09 m²	0.49 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.54 m²	0.06 m³		
Tetto di base: hormigon 12	27.31 m²	3.28 m³		
Tetto di base: hormigon 12	21.80 m²	2.62 m³		
Tetto di base: hormigon 12	7.12 m²	0.85 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.54 m²	0.02 m³		
Tetto di base: hormigon 12	2.66 m²	0.32 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.05 m²	0.01 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.10 m²	0.01 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.25 m²	0.03 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.07 m²	0.01 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.07 m²	0.01 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.25 m²	0.03 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.25 m²	0.03 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.25 m²	0.03 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.11 m²	0.01 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.16 m²	0.02 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.10 m²	0.01 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.24 m²	0.03 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.25 m²	0.03 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.24 m²	0.03 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.24 m²	0.03 m³		
Tetto di base: hormigon 12	0.15 m²	0.02 m³		
Tetti	Tetto di base	Tetto di base: hormigon 36	2.35 m³	0.85 m³
Totale generale: 387			542.62 m²	99.16 m³

Figura 68

5.2 PIANIFICAZIONE 4D

A partire dai risultati ottenuti si apre una nuova fase della progettazione, ovvero quella della pianificazione. Nell'ambito del BIM questa viene anche chiamata "dimensione 4D" con specifico riferimento alla nuova variabile introdotta a seguito delle tre dimensioni già assolute dalla modellazione geometrica, ovvero il tempo. Infatti, la nostra attenzione da qui in avanti sarà posta sulla valutazione e definizione di tutte le circostanze interne al cantiere che possono incidere sulla cronologia, sulla sequenzialità e sulla durata delle azioni.

La conoscenza delle quantità dei materiali, della portata del progetto, dei metodi costruttivi e delle dinamiche di costruzione congiunte alle stime sul rendimento unitario delle squadre di lavoro permettono di concepire con un sufficiente grado di precisione le tempistiche della realizzazione dell'opera.

Questa pianificazione è molto utile perché permette di integrare anche valutazioni riguardanti l'impiego di risorse umane e professionali, con il fine di ottenere un quadro completo dello scenario di cantiere in un momento t generico. Alla fine di questo processo, quindi, il risultato ottenuto potrà essere utilizzato anche per la stima complessiva dei costi di tutta la macchina della costruzione. Infatti, se grazie alla quantificazione dei materiali avremo un riscontro sulle spese per le materie utilizzate, a valle della pianificazione 4D avremo quasi tutto quello che ci occorre per renderci conto dei costi degli impieghi di macchinari ed operatori che saranno coinvolti. Anche in questo caso, per l'isolamento che affligge il luogo di costruzione, sarà particolarmente importante sapere quando e per quanto tempo si renderà necessaria la presenza di certe figure e certi macchinari nel cantiere affinché offrano le loro prestazioni e non vengano mobilitati per più tempo del dovuto o in momenti non consoni generando sprechi di finanze. Il risultato di questo compito sarà l'estrazione di un diagramma di barre esportato in formato pdf, perfettamente fruibile, secondo la stessa logica esposta per il computo dei materiali.

Andremo a spiegare più nel dettaglio le valutazioni e i procedimenti che abbiamo seguito per il nostro caso.

5.2.1 CREAZIONE DIAGRAMMA DI GANTT

Quello che ci permette di integrare tutti questi aspetti è un unico ambiente di lavoro in cui convogliare diversi dati e informazioni da cui scaturisce un piano organizzativo in cui le varie lavorazioni ed attività da eseguire trovano una collocazione temporale assoluta, ma anche e soprattutto una posizione relativa all'interno del processo nel complesso su una linea del tempo che parte con il giorno 0, inizio dell'opera, e finisce con il giorno di fine dei lavori, ad opera ultimata. Nel documento schematico che concretizza queste idee e valutazioni, sono elencate in ordine temporale le categorie di lavorazioni rappresentanti i macro-componenti dell'opera da realizzare dettagliate nelle varie sotto attività che queste comprendono. Nella redazione di questa programmazione, sono stati riportati al fianco del nome della lavorazione altri aspetti quali le durate, le conseguenti date di inizio e fine al netto dei giorni non lavorativi e, infine, un dato che serve a legare i compiti tra loro e che trasmette la vera essenza della pianificazione. Stiamo parlando di vincoli, tra le lavorazioni, che servono proprio a decretare quando inizia una attività rispetto ad un'altra. Questo dato infatti può avere diverse forme, ed esprime le tempistiche relative tra una attività e l'altra, permettendo o vietando l'inizio di una dipendentemente dal grado di sviluppo di un'altra. Ovviamente il comando è strutturato in modo da poter programmare come meglio si crede le attività; le sue funzionalità non si limitano a porre queste strettamente una di seguito all'altra, bensì riesce ad assecondare relazioni ben più complesse, riuscendo davvero a rappresentare nel minimo dettaglio quello che noi vorremmo succeda in cantiere. Infatti, come vedremo, nella nostra esperienza non ci avvarremo solo della combinazione più semplice tra due lavorazioni, ossia l'inizio dopo il termine della precedente, ma abbiamo avuto esigenza e abbiamo organizzato il lavoro tramite sovrapposizioni di attività e concomitanza temporale dove possibile, in modo da abbreviare i tempi della costruzione, raggiungendo lo scopo specifico di questa attività.

Queste relazioni tra le attività e le durate delle stesse si rappresentano graficamente con un sistema logico e ordinato in cui le lavorazioni sono rappresentate mediante barre, ovvero come elementi che occupano un tempo ben definito all'interno del totale. Queste barre sono poi legate da frecce o elementi lineari che congiungono le stesse rappresentando lo stato di vincolo. Nella maggior parte dei casi, come si può evincere dal pdf che ricaveremo, si avrà una successione ordinata e non sovrapposta delle attività; tuttavia, in alcuni casi si assisterà alla sovrapposizione parziale o totale delle stesse. Questo diagramma di barre, in grado di

fornire in maniera intuitiva e chiara le informazioni riguardo al workflow della costruzione, è propriamente noto con il nome di *Diagramma di Gantt*.

Per quest'ultima fase del lavoro, ci sarà richiesta una buona dose di capacità critica e conoscenze e competenze in campo ingegneristico. Nello specifico si tratterà di avere una buona capacità estimativa rispetto alle tempistiche che saranno necessarie alla realizzazione totale delle specifiche parti. Parliamo di tempi totali anche quando ci riferiamo a specifiche componenti dell'edificio perché, in molti casi, la creazione dei vari elementi si compone di più fasi. Avendo a che fare con una struttura che si compone in tutte le sue parti principalmente di calcestruzzo, dobbiamo tenere sempre in considerazione i tempi di stagionatura del materiale con la sua conseguente acquisizione graduale di resistenza e fare i conti con questa circostanza in gran parte dello sviluppo della costruzione.

Riportiamo, a seguire alcune delle osservazioni e valutazioni applicate nella fase di creazione del piano temporale per ottimizzare la costruzione.

La prima valutazione degna di nota è quella di tenere presente che durante la fase del getto della copertura, il terreno sottostante sarà esposto a un peso considerevole. Le esperienze passate hanno fatto scuola in questo senso e hanno dimostrato che durante il periodo in cui sul terreno gravano il peso del getto unitamente a quello della struttura ausiliaria temporanea composta di centine e casseforme, esso può essere soggetto a cedimenti, anche differenti tra una zona e l'altra, con alto rischio di compromissione del lavoro. La scelta che ne deriva è stata quella di predisporre una platea che si gettasse insieme ai plinti che accolgono i piedi della struttura.

Prima di descrivere il procedimento della creazione della calotta andiamo ad analizzare la gestione delle cerniere di appoggio. Queste sono composte di una parte cuneiforme che deve essere realizzata in continuità strutturale con il piede della fondazione; quindi, sarà realizzata appena la sottostruttura sarà capace di sorreggere il carico di questo nuovo getto. Alla luce di ciò si prevede che saranno necessari dieci giorni per gettare tutta la platea e i plinti, e che si possa eseguire cassetta, armatura e getto in due giorni a partire da sette giorni dopo l'ultimazione dei primi. La disposizione del vincolo cerniera prevede anche il posizionamento del braccio di cemento, collegato al cuneo attraverso una cerniera in metallo che dovrà essere immersa nel calcestruzzo già dalla fase di getto. Il braccio poi sarà tenuto in posizione tramite sistemi di sostegno temporanei.

La disposizione delle centine, dato l'ingente numero delle stesse, è una delle attività più consistenti da svolgere, come quella della creazione della superficie di assi di legno che funge da cassaforma per il getto. Era quindi nostra premura far sì che le tempistiche di questa attività fossero ottimizzate il più possibile. Per tali ragioni abbiamo fatto iniziare questa nel primo momento utile, ovvero quando la platea di calcestruzzo avesse acquisito una buona dose della sua resistenza, ovvero a partire da una settimana dopo la fine del getto. La disposizione delle centine, quindi, partirà non appena si sarà terminato di formare le cerniere agli appoggi; a seguire si avrà l'allestimento del tavolato di cassaforma. Rispettivamente dureranno dieci giorni e quindici giorni. A seguire, non appena il tavolato sarà concluso, avremo il posizionamento delle armature, che richiede un tempo maggiore del normale data la complessità del lavoro, che corrisponde ad altrettanti quindici giorni.

Dopo aver finito di allestire tutti i preparativi, si passa alla fase centrale dell'opera: il getto del materiale da costruzione. Come abbiamo detto, questa operazione è prevista sia eseguita con la tecnica dello *spritz beton*, la tecnica che permette di gettare il calcestruzzo anche in piani non orizzontali, piuttosto pendenti, senza il pericolo che questo scivoli via dalla superficie. Il motivo di tale conquista è dato dalla miscela e dalla velocità con il quale il calcestruzzo, nel nostro caso fibrorinforzato, sarà proiettato sulla cassaforma.

L'inizio di questa operazione non avverrà prima della maturazione completa della struttura di fondo costituita da plinti e platea, ovvero ventotto giorni dopo la fine del getto della stessa. L'aspetto più rilevante per noi è quello dei tempi di esecuzione. Si tratta di un procedimento, quello al quale assisteremo, che segue un ordine ben preciso ed impiegherà in totale, per completare il getto, diciannove giorni. Con l'aiuto della *figura 69* spiegheremo il procedimento e le durate delle varie fasi di questa specifica attività.

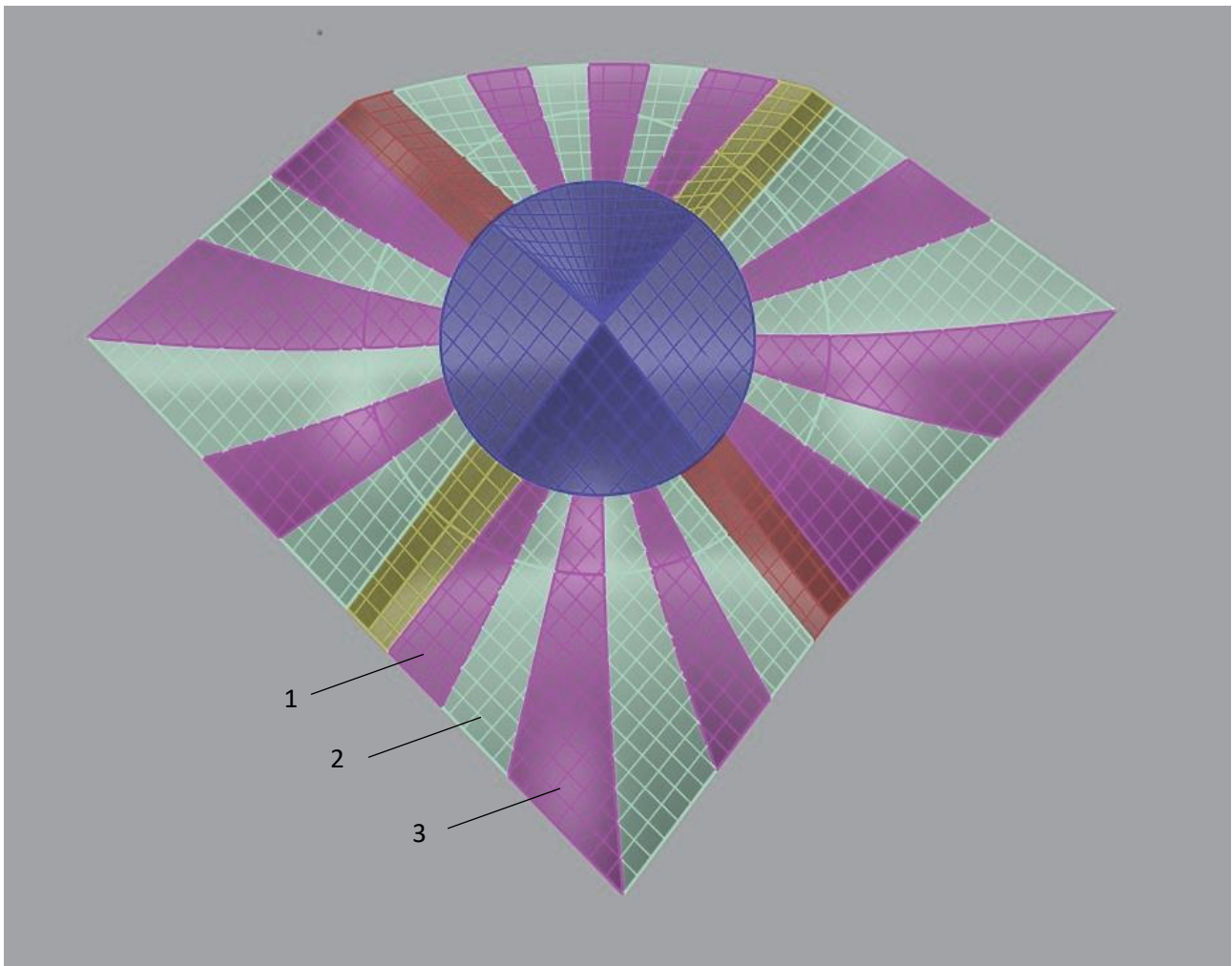


Figura 69

Questo l'elenco ordinato delle fasi di getto con le durate parziali:

- 1) "casco" in sommità (blu), 1 giorno
- 2) Costolone laterale (rosso), 1 giorno
- 3) Costolone laterale (giallo), 1 giorno
- 4) Paraboloidi 1 (verde-magenta), 4 giorni (da moltiplicare per i quattro paraboloidi).

Il procedimento che si seguirà per la creazione dei paraboloidi iperbolici è la stessa per ognuno di essi e prevede l'esecuzione di una metà alla volta. Ogni singola metà viene eseguita in tre fasi, come si può evincere dalla *figura XW*, e richiede due giorni per essere completamente ricoperta. Ognuna delle quattro componenti richiederà quattro giorni per essere terminata, la totalità di esse sedici.

Finito il getto dovrà essere smantellato l'impalcato di centine e casseforme. Le due verranno tolte contemporaneamente poiché le prime sorreggono le seconde, e il momento di inizio dell'operazione è calcolato come quello risultante dall'attesa di una settimana dopo la fine del getto della parte concomitante alla cassaforma da smontare. Infatti, essendo il procedimento di smantellamento di lunga durata, esso può essere ottimizzato partendo nel primo momento utile togliendo le parti corrispondenti a quelle in cui il calcestruzzo è pronto per il disarmo e lasciando invece montate le parti in corrispondenza del calcestruzzo ancora in fase di solidificazione fino a che queste non risulteranno autoportanti. Infatti, per poter essere disarmato, il calcestruzzo, così posto in opera, necessita di sette giorni di riposo. Per questo dobbiamo anche impostare la fine di questa attività non prima di una settimana dalla conclusione del getto dell'ultima parte di calcestruzzo.

L'intero processo, comprensivo di implementazione delle misure organizzative e di sicurezza iniziali, dello scavo, delle operazioni descritte e della pulizia finale, risulta durare poco meno di quattro mesi, più precisamente si estenderà per 117 giorni.

5.2.2 SIMULAZIONE DELLA COSTRUZIONE

Infine, per dare maggiore concretezza ed ottimizzare la trasmissione dei risultati prodotti, si procederà alla elaborazione di un contenuto multimediale che simulerà la costruzione della nostra opera. Il video sarà il risultato dell'integrazione di più dimensioni e sintetizzerà il lavoro fatto dall'inizio di questo capitolo.

Abbiamo introdotto il piano temporale in un altro programma, chiamato Naviswork. Nel suo ambiente è possibile fondere ed integrare informazioni come quella appena descritta a modelli geometrici associando le lavorazioni, con le rispettive durate, alle corrispondenti parti del modello, che dovranno risultare come oggetti autonomi. Per la buona riuscita del lavoro è indispensabile che la divisione del piano temporale e quella del modello geometrico si assecondino l'un l'altra, così da poter ottenere un risultato quanto più dettagliato, armonioso, veritiero, e soprattutto utile.

Il modello allo stato in cui lo abbiamo usato per l'introduzione in Revit non soddisfa le attuali esigenze, perché manca di tutte quelle parti al di fuori della lamina in cemento. Per questo dobbiamo arricchirlo, riprendendo una modellazione in Rhinoceros.

Dovremo aggiungere tutte quelle parti che, seppur in maniera indiretta, possono essere interessate dalla costruzione. Infatti, il programma Naviswork permette di distinguere le lavorazioni del piano esecutivo-temporale in tre diverse categorie: costruzione, demolizione e temporale. Perciò potremmo creare un modello che includa tutti gli elementi che vengono in uno dei precedenti modi interessati nella costruzione. Per questo andremo ad aggiungere:

- Terreno, perché interessato da scavo;
- Volume delle fondazioni e della platea;
- Centine;
- Casseforme;
- Spessore del guscio diviso in parti corrispondenti alle varie fasi del getto;
- Dispositivo agli appoggi.

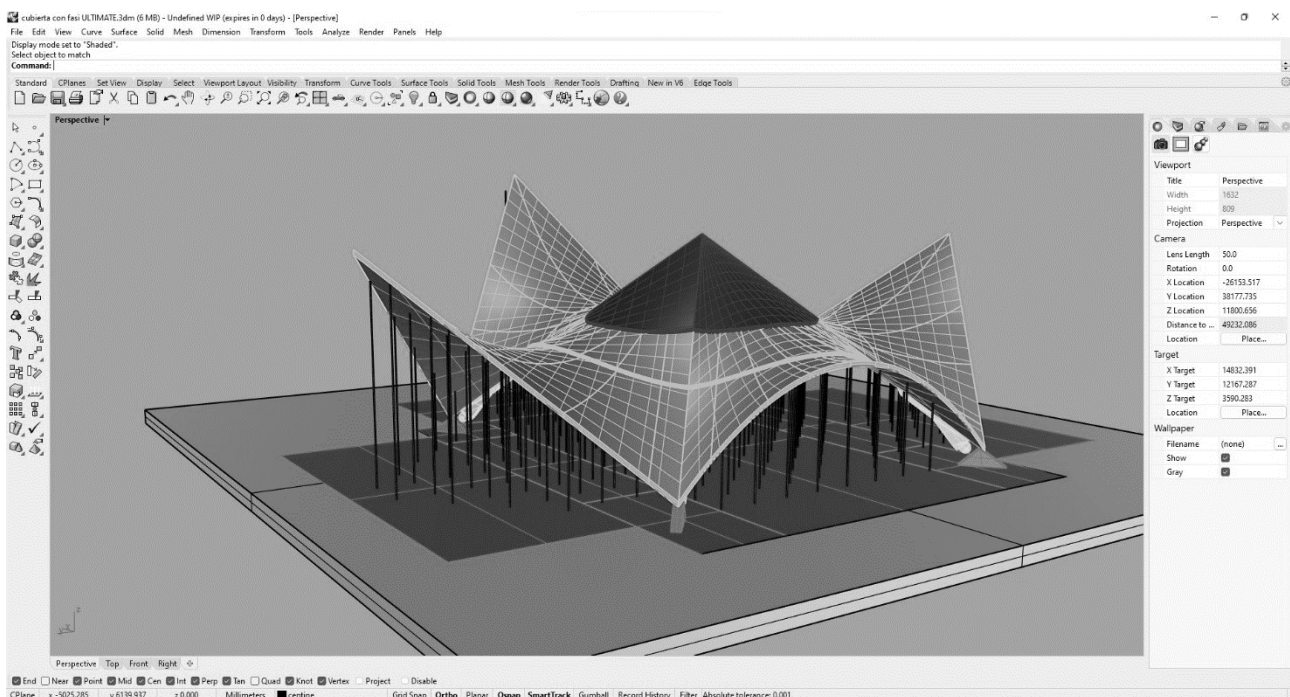


Figura 70

Il risultato una volta ultimato si presenterà come in figura 70, da cui si può osservare che sono state aggiunte tutte quelle parti che hanno un loro autonomia costruttiva ed occupano

risorse quali tempo ed energie, e di cui, inoltre, desideriamo rendere evidente e chiara la creazione o la semplice posa in opera all'interno del processo nel complesso.

Quello che invece non si può vedere, ma che risulta fondamentale è stata la definizione di gruppi di elementi superficie all'interno del modello tramite il solito comando "boolean union" che provvede a creare un unico elemento dall'unione di più di uno, cosa diversa da quella che provoca il comando "gruppo". Infatti, il nostro bisogno è quello di avere il modello diviso in "oggetti" selezionabili autonomamente, che rispecchino ognuno una specifica lavorazione del piano temporale con il quale dovremo lavorare congiuntamente. Ad esempio, saranno un unico "pezzo" ognuno degli "spicchi" in cui è stata suddivisa la copertura rappresentanti le fasi del getto del calcestruzzo; saranno selezionabili solo congiuntamente tutti i bracci agli appoggi perché abbiamo previsto verranno montati allo stesso tempo senza distinzione, saranno un unico elemento tutti i pali disegnati che costituiscono le centine, ecc. In altre parole, gli elementi sono raggruppati tra loro quando devono essere associati alla stessa voce dell'elenco attività stilato, con il quale il modello dovrà interagire per creare la simulazione della costruzione.

Possiamo portare finalmente in Naviswork il modello geometrico e il workflow perché possano dialogare, ed ottenere lo scenario di *figura 71* che rappresenta il punto di partenza per poter fondere ed integrare le informazioni.

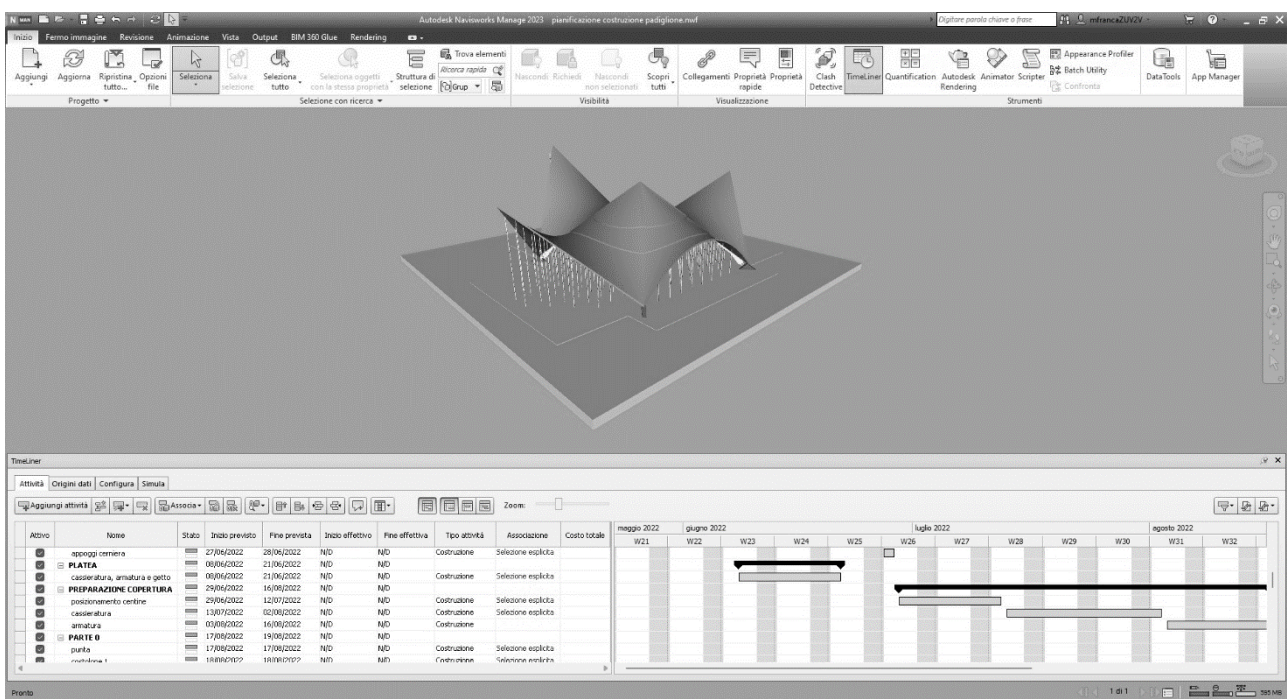


Figura 71

Abbiamo quindi nello spazio 3D il modello completo di tutte le parti, anche quelle provvisorie, e nella parte in basso le attività e il diagramma di Gantt associato.

Prima operazione da fare è specificare per ogni attività specifica che vogliamo venga mostrata nel video se questa è di costruzione, demolizione o temporanea, poiché da tale informazione scaturirà una grafica diversa che tenta proprio di trasmettere questa circostanza.

Secondariamente bisognerà associare le attività agli oggetti modello che rappresentano il risultato pratico dell'attività in questione. Basterà selezionare il totale degli oggetti che sono frutto di una attività, andare nella casellina corrispondente del "TimeLiner" e con il tasto sinistro opzionare l'associazione (*figura 72*).

Attivo	Nome	Stato	Inizio previsto	Fine prevista	Inizio effettivo	Fine effettiva	Tipo attività	Associazione	giugno 2022	
									W23	W24
<input checked="" type="checkbox"/>	PARTE 2		24/08/2022	26/08/2022	N/D	N/D				
<input checked="" type="checkbox"/>	1		24/08/2022	24/08/2022	N/D	N/D	Costruzione	Selezione esplicita		
<input checked="" type="checkbox"/>	2		24/08/2022	25/08/2022	N/D	N/D	Costruzione	Selezione esplicita		
<input checked="" type="checkbox"/>	3		25/08/2022	26/08/2022	N/D	N/D	Costruzione	Selezione esplicita		
<input checked="" type="checkbox"/>	PARTE 3		26/08/2022	30/08/2022	N/D	N/D				
<input checked="" type="checkbox"/>	1		26/08/2022	26/08/2022	N/D	N/D	Costruzione	Selezione esplicita		
<input checked="" type="checkbox"/>	2		26/08/2022	27/08/2022	N/D	N/D	Demolizione	Selezione esplicita		
<input checked="" type="checkbox"/>	3		29/08/2022	30/08/2022	N/D	N/D	Temporaneo	Selezione esplicita		
<input checked="" type="checkbox"/>	PARTE 4		30/08/2022	01/09/2022	N/D	N/D				
<input checked="" type="checkbox"/>	1		30/08/2022	30/08/2022	N/D	N/D	Costruzione	Selezione esplicita		
<input checked="" type="checkbox"/>	2		30/08/2022	31/08/2022	N/D	N/D	Costruzione	Selezione esplicita		

Figura 72

Una volta eseguite tutte le associazioni ci sposteremo nella finestra "Simula" dove apparirà una schermata simile ad un lettore di riproduzione video in cui si possono modificare preferenze e opzioni e, infine, esportare il video della simulazione virtuale della costruzione.

6. CONCLUSIONI

Questa tesi nasce dall'esigenza e dalla volontà di dare risposta a uno o più problemi pratici che si possono manifestare in progetti in cui gli attori in gioco e le contingenze presenti non sono di carattere ordinario ma complesse e peculiari.

Questo lavoro si prometteva fin dall'inizio di implementare una catena informatica-digitale per assolvere efficientemente a problematiche legate alla complessità delle condizioni di progetto con il fine di garantire la sicurezza e l'affidabilità dei risultati ottenuti. Il processo ha visto la concretizzazione di una totale digitalizzazione dei compiti gestionali, che richiedevano in una prima fase di ricavare le quantità di alcuni dei materiali da usare per la realizzazione reale del padiglione, e successivamente di spingersi il più lontano possibile nella previsione e definizione degli scenari di cantiere e dell'attività edificatoria.

Il contenuto di questa tesi dimostra come la figura dell'ingegnere edile, figura che il percorso da me intrapreso intende formare, può declinarsi in moltissime forme, specializzate sotto vari aspetti: quello della gestione, dell'analisi e del calcolo strutturale, dello specialista BIM ed altre, derivate dai molteplici aspetti sotto i quali una costruzione deve essere attenzionata e curata. A riprova di ciò, in questa tesi si sono intrecciati saperi e susseguite valutazioni appartenenti a discipline molto diverse. Le potenzialità informatiche hanno permesso di sviluppare ed applicare le competenze ingegneristiche necessarie per affrontare un elemento di spiccata ispirazione architettonica senza indugiare e senza scendere a compromessi, anzi assecondando e valorizzando la complessità e la atipicità della forma ideata. Il lavoro ha avuto risvolti che sfociano anche in scenari economico-commerciali e logistici, fornendo dati precisi e accurati sulle quantità di calcestruzzo, casseforme e centine di cui fare provvigione per la costruzione. Organizzando il lavoro di cantiere attraverso la redazione di una WBS prima e aggiungendo successivamente le durate, si è riusciti a creare un processo unitario, completo e ordinato che restituisse informazioni utili sui momenti e le durate nei quali coinvolgere le risorse necessarie. I potenziali sviluppi del progetto potrebbero perfino sfociare negli aspetti di pubblicizzazione del lavoro di ingegnerizzazione svolto grazie alla elaborazione ed esportazione del video di simulazione della costruzione ottenuto in ultima istanza.

La tesi ha spiegato, durante il suo sviluppo, come processare e poi unire le informazioni in entrata in un unico modello attraverso i software specializzati che implementano la

tecnologia BIM per poter ricavare informazioni in maniera automatica ad opera di un calcolatore, la cui affidabilità di calcolo è infinitamente superiore a quella dell'uomo. Bisogna infatti ammettere che dati come la superficie e il volume della calotta e il volume da essa racchiuso non sarebbero stato possibile estrarli senza chiamare in causa i programmi citati. Il motivo del successo di tutto il processo è stata l'attenzione riposta nel rendere compatibili i risultati intermedi con i software che avrebbero dovuto assimilarli immediatamente dopo, ottimizzando al massimo l'interoperabilità e rendendo fluido il procedimento.

I vantaggi che si possono trarre da questo tipo di approccio consistono nel risparmio del tempo di esecuzione dei progetti, nell'efficienza e nella sicurezza dei risultati ottenuti. I vari compiti possono essere svolti da operatori diversi in contemporanea, svicolando così la posizione geografica del lavoratore, dell'azienda e del sito di costruzione, allargando gli orizzonti di collaborazione e di operazione. Il viaggio del nostro oggetto è stato un percorso rettilineo che ha guardato sempre avanti, aggiungendo quando necessario le informazioni al modello già elaborato per compiere passi progressivi verso la descrizione a tutto tondo del progetto. L'unicità del modello e il progressivo convogliamento delle informazioni in esso conferisce compatibilità tra risultati intermedi e sicurezza nel risultato finale se la ipotesi di entrata sono corrette.

Nonostante il risultato si possa ritenere già soddisfacente per quanto a noi richiesto dalla committenza, la filiera sorta non risulta chiusa e predeterminata. Al suo interno possono essere inseriti passaggi intermedi, come il lavoro di progettazione strutturale, atto a valutare che una prima proposta sia accettabile o no e in caso fornirne la correzione. Quindi, quello che in questa tesi è stato riportato come un approfondimento di interesse personale può essere, se necessario essere ospitato all'interno della catena progettuale. Analogamente, invece di interrompere la progettazione al punto di arrivo da noi raggiunto, si poteva raggiungere la dimensione 5D, ovvero la stima dei costi per la costruzione dell'opera, e spingersi verso le seguenti (le dimensioni sono attualmente setta, ed altre 3 in attesa di codifica), come la programmazione di interventi di manutenzione ordinaria.

RINGRAZIAMENTI

Arrivo alla conclusione di questa fatica in concomitanza con la fine del programma di mobilità Erasmus intrapreso per l'intero anno accademico che sta volgendo al termine. Il progetto sviluppato in questa tesi mi è stato proposto dal supervisore alla facoltà di Ingegneria Civile dell'Università Politecnica de Valencia, Alberto Domingo Cabo. Lo ringrazio per essersi reso disponibile a fornirmi la possibilità di relazionarmi con un compito così concreto, reale e per avermi trasmesso conoscenze e competenze che mi erano indispensabili per portare a termine il lavoro.

Ringrazio allo stesso modo, o anche di più, i professori dell'Università Politecnica delle Marche, ateneo nel quale concludo il mio percorso accademico, soddisfatto della visione del mondo acquisita, delle passioni trasmesse, e del bagaglio culturale fornitomi. Tra questi, due mi hanno aiutato in special modo, rendendosi disponibili per seguirmi e a loro volta trasmettermi nozioni, metodi e approcci ai problemi legati ai loro ambiti professionali: il mio relatore, il Prof. Ing. Sandro Carbonari, e il mio correlatore, il Prof. Ferruccio Mandorli. Senza la loro disponibilità e la loro benevolenza nell'accogliere la mia causa non sarebbe stato possibile per me portare a termine il lavoro.

Ringrazio tutte le persone che mi hanno sostenuto, incoraggiato, compreso, consigliato e confortato in questi sei lunghi anni di carriera universitaria. Alcuni di loro ci sono sempre stati, altri si sono aggiunti nel percorso, tutti sono stati per me importanti e speciali: mi hanno trasmesso stima e affetto, dandomi una ragione in più per proseguire con caparbia nei momenti difficili.

Infine, ringrazio me stesso, per essermi costantemente messo in gioco e aver fatto esperienze molto formative che mi aiuteranno a trovare la mia collocazione nel mondo, per aver fatto i sacrifici necessari e aver sudato per raggiungere i risultati che volevo; per aver sempre creduto che nonostante tutto quello che sarebbe successo, io ce l'avrei fatta.

BIBLIOGRAFIA:

- FIB, *Fib Model Code for concrete structure 2010*, vol. 1 e 2. John Wiley & Sons, ottobre 2013.
- Monza G., *Progetto di una piastra in calcestruzzo armato di grandi dimensioni con l'utilizzo di cavi unbounded*, Politecnico di Milano, luglio 2014.
- Marinò A., *Elementi di teoria delle piastre inflesse*, marzo 2020
- Mura I., *Piastre in c.a. e instabilità. Analisi limite: metodo delle linee di rottura*, Università di Cagliari, giugno 2010.
- Vona M., *Il metodo delle linee di rottura*, Università di Basilicata, 2013
- Hani M. F., Nabil M. A., *Reinforcement design algorithm for concrete shells*, NUCEJ vol.11, No.3, 2008