



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA CIVILE**

Tesi di laurea magistrale

**Dal progetto alla realizzazione:
Analisi tra forma e struttura del ponte
sul fiume Basento a Potenza di
Sergio Musmeci**

Relatori:

Prof. A. MANUELLO BERTETTO

Ing. J. MELCHIORRE

Candidato:

ANDREA BECCE

A.A 2023-2024

SOMMARIO

Nella presente tesi magistrale il principale intento è quello di eseguire una modellazione parametrica del Ponte Musmeci di Potenza, seguita da un'analisi strutturale del modello reale odierno in confronto al modello teorico progettato da Musmeci. Si intende dunque utilizzare un modello parametrico realizzato tramite **Grasshopper in Rhino 8.0**, il quale si basa sostanzialmente sulla progettazione analitico-matematica della struttura in esame. Partendo quindi dalla creazione dei punti alla base e i punti in sospensione del ponte e procedendo con l'introduzione di una sagoma contenente i punti e relativa mesh, sufficiente a garantire una soluzione soddisfacente con onere computazionale attuabile. La creazione di tale modello non è sufficiente a garantire una sagoma quanto più vicina a quella reale, per questo nella creazione del modello parametrico bisogna procedere con cicli iterativi tramite algoritmi genetici che vanno a minimizzare le differenze tra il modello creato e il modello proposto prima della realizzazione da Musmeci. Una volta minimizzate le differenze in termini di curvatura e valutata la correttezza del modello si è proceduti verso l'analisi del comportamento strutturale per mezzo di **Karamba 3D**; esso è un software di ingegneria strutturale parametrica, integrato come plug-in in Grasshopper, che fornisce un'accurata analisi strutturale semplificando la combinazione dei modelli parametrizzati, calcoli FEM e algoritmi di ottimizzazione. Nel suo utilizzo il modello sarà decostruito e ricostruito come un modello di linea o di mesh semplificato a cui vengono quindi assegnate le dimensioni, la forma e il materiale della sezione trasversale richiesti insieme ai carichi e ai vincoli di supporto, questo perché il programma non consente di prendere input di qualsiasi geometria. Sulla base degli esiti ottenuti si andrà a

confrontare la soluzione strutturale migliore tra il modello realizzato e il modello teorico che inizialmente prevedeva curvature della volta leggermente differenti, ma per problemi di cantiere dell'epoca quali, realizzazione di una volta continua di notevoli dimensioni e creazione di casseformi a doppia curvatura, la struttura ha subito delle variazioni.

ABSTRACT

In this master's thesis, the main intent is to perform a parametric modeling of the Musmeci Bridge in Potenza, followed by a structural analysis of today's real model in comparison with the theoretical model designed by Musmeci. Thus, it is intended to use a parametric model created using Grasshopper in Rhino 8.0, which is essentially based on the analytical-mathematical design of the structure under consideration. Thus, starting with the creation of the points at the base and the suspended points of the bridge and proceeding with the introduction of a template containing the points and related mesh, sufficient to ensure a satisfactory solution with feasible computational burden. The creation of such a model is not sufficient to guarantee a template as close as possible to the real one, so in the creation of the parametric model it is necessary to proceed with iterative cycles through genetic algorithms that go to minimize the differences between the created model and the model proposed before implementation by Musmeci. Once the differences in terms of curvature were minimized and the correctness of the model was evaluated, we proceeded toward the analysis of the structural behavior by means of Karamba 3D; it is a parametric structural engineering software, integrated as a plug-in in Grasshopper, that provides accurate structural analysis by simplifying the combination of parameterized models, FEM calculations and optimization algorithms. In its use, the model will be deconstructed and reconstructed as a

simplified line or mesh model to which the required dimensions, shape and material of the cross-section are then assigned along with the supporting loads and constraints, this is because the program does not allow taking inputs of any geometry. Based on the results obtained, the best structural solution will be compared between the realized model and the theoretical model, which initially included slightly different vault curvatures, but which due to site problems at the time, such as the construction of a continuous vault of considerable size and the construction of double-curved formwork, underwent variations.

INDICE

1	<i>INTRODUZIONE</i>	12
1.1	Il ponte sulle rive del Basento	14
1.2	Studio della forma ottimale	17
1.3	Calcolo della forma della Volta	19
2	<i>Software e algoritmi genetici</i>	33
2.1	Un software per la progettazione parametrica: Grasshopper	35
2.2	Un plug-in per l'analisi strutturale dei modelli parametrici: Karamba3D	41
2.3	Algoritmi genetici	43
3	<i>Caso di studio: IL DESIGN PARAMETRICO</i>	47
3.1	Codice Grasshopper	49
3.2	Analisi FEM	63
4	<i>RISULTATI E DISCUSSIONE</i>	69
5	<i>CONCLUSIONI</i>	77
	<i>Bibliografia e sitografia</i>	80

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Sergio Musmeci, Ponte sul Basento	12
Figura 2: modelli fisici di Musmeci per il Ponte del Basento: (a) modello in soluzione saponata; (b) modello con membrana in neoprene; (c) modello in metacrilato 1:100; (d) modello in micro-cemento 1:10 [Musmeci [1] : 82,83,85,87]	14
Figura 3 : Campata tipo, Prospetto	15
Figura 4 : Sezione trasversale Impalcato	15
Figura 5 : Fondazioni in fase di Progetto	16
Figura 6 : Fondazioni Spalla	17
Figura 7: Forze su un elemento infinitesimo di una membrana	20
Figura 8: Prima rappresentazione grafica del calcolo analitico	25
Figura 9 :Valori dei coefficienti del sistema per diversi valori di i , x/l e y/l	27
Figura 10: Valori dei coefficienti del sistema per diversi valori di i , x/l e y/l	28
Figura 11: Valori della funzione $z^{(0)}$	29
Figura 12: Valori di $z^{(0)}/H$ al variare di θ	30
Figura 13: Valori di $z^{(0)}/H$ al variare di θ con H fissato ⁸	30
Figura 14: Andamento della funzione $z^{(0)}/H$ al variare di θ per $y=0$	31
Figura 15: Andamento della funzione $z^{(0)}/c$ per differenti valori di H e θ ⁹	31
Figura 16: Curvature per diversi valori di y , con θ e λ fissati	32
Figura 17: Interfaccia Rhino	38
Figura 18: Interfaccia Grasshopper	40
Figura 19: Esempio di Sottocategorie	40
Figura 20: Funzioni Karamba3D	41
Figura 21: Rilievo ponte Musmeci	48
Figura 22: sezione Trasversale	48
Figura 23: Prospetto longitudinale	49

Figura 24: Differenziazione delle curve	50
Figura 25: Decostruzione delle curve	50
Figura 26: Raccolta dei dati	51
Figura 27: Risultato della costruzione delle curve del modello	51
Figura 28: Punti parametrici di riferimento	52
Figura 29: Costruzione del punto di controllo 0	52
Figura 30: Costruzione del punto di controllo 2	53
Figura 31: Costruzione del punto di controllo 1	53
Figura 32: Costruzione del punto di controllo 3	54
Figura 33: Costruzione del punto di controllo 4	54
Figura 34: Lista punti di controllo	55
Figura 35: Creazione della superficie	56
Figura 36: Costruzione della maglia della superficie e mesh	56
Figura 37: Decostruzione mesh	57
Figura 38: Costruzione vettori spostamento della mesh	57
Figura 39: Eliminazione delle distorsioni	58
Figura 40: Lista completa delle mesh	58
Figura 41: Soluzione del modello	59
Figura 42: Vista Frontale	59
Figura 43: Vista dall'alto	60
Figura 44: Vista in prospettiva	60
Figura 45: Vista laterale	60
Figura 46: Render Vista prospettica	61
Figura 47: "Sezione longitudinale"	62
Figura 48: Confronto tra i modelli; in rosso Modello reale, sul fondo il profilo longitudinale del modello teorico	62
Figura 49: Inserimento dei materiali sulla mesh	63
Figura 50: Definizione della sezione	64

Figura 51: Identificazione generale della mesh	64
Figura 52: Definizione dei supporti	65
Figura 53: Definizione dei carichi	65
Figura 54: Analisi del modello	66
Figura 55: Caratteristiche di restituzione grafica	66
Figura 56: Visualizzazione dei risultati	68
Figura 57: Visualizzazione abbassamenti	68
Figura 58: Confronto Modello realizzato con il diagramma ottenuto dall'analisi matematica di Musmeci	69
Figura 59: Confronto modello con la sezione longitudinale disegnata prima della realizzazione	70
Figura 60: Stato tensionale del Modello teorico	71
Figura 61: Risultati grafici in termini tensionali del modello Costruito	73
Figura 62: Zone di massima variazione delle tensioni	74
Figura 63: Zona di dettaglio massimi spostamenti	75
Figura 64: Risultati grafici in termini di spostamento modello Costruito	76

1 INTRODUZIONE

Sergio Musmeci (1926-1981) è considerato come tra i più audaci e visionari ingegneri strutturisti di tutto il Novecento. Molto spesso viene messo in secondo piano rispetto agli studiosi dell'epoca, ma nonostante ciò, i suoi studi e il suo pensiero divennero di grande interesse pubblico grazie alla realizzazione del Ponte sulle rive del Basento a Potenza, riconosciuto nel 2003 come monumento d'interesse culturale. Musmeci, con il suo approccio innovativo alla progettazione strutturale, propone una nuova filosofia che enfatizza il controllo del processo progettuale anziché la mera verifica tecnica. Critica, difatti, l'approccio tradizionale che considera le tensioni interne come la sola principale incognita, suggerendo invece di focalizzarsi sui parametri geometrici che definiscono la forma della struttura. La sua chance non tardò ad arrivare. La concretizzazione delle sue ricerche si consolidò infatti con la commissione della progettazione e realizzazione del ponte sulle rive del Basento a Potenza. Questa struttura gli ha fornito l'occasione di creare un ponte la cui forma è stata ottimizzata attraverso un processo di analisi del suo regime statico.



Figura 1: Sergio Musmeci, Ponte sul Basento¹

¹ Musmeci's Basento Bridge, 1967-75 [Archivio di Sergio Musmeci e Zenaide Zanini, MAXXI Roma]

In sintesi, il ponte sul Basento rappresenta l'adempimento pratico massimo delle sue idee teoriche. Il design del ponte è stato estratto da modelli via via più descrittivi.

L'aspetto più importante per Musmeci era la ricerca della forma, in gergo odierno il Form-finding. Il primo modello di studio era composto in soluzione saponata, la scelta di questa soluzione deriva dal fatto che la soluzione saponata ammette soltanto sforzi di trazione, questo può essere visto come l'inverso della soluzione strutturale della volta del ponte, che risulta completamente compressa. Questo modello è stato molto utile per affinare la forma ma poco adatto alla realizzazione dei disegni. Successivamente per realizzare i primi disegni si realizzò un modello in neoprene, anch'esso completamente in trazione, sul quale si implementò l'analisi statica. Infine, si costruirono un modello in micro-cemento, scala 1:10, e un modello in metacrilato, scala 1:100 di due campate del ponte, che è stato impiegato per confermare la congruenza della struttura con il progetto teorico iniziale.

Durante i test sono state utilizzate prove elastiche con estensimetri elettrici per valutare le tensioni generate dall'impalcato sotto l'azione del peso proprio e dei carichi variabili, ridotti in base alla scala del modello. Questo primo controllo delle previsioni di calcolo ha consentito di verificare la precisione delle stime di progettazione.

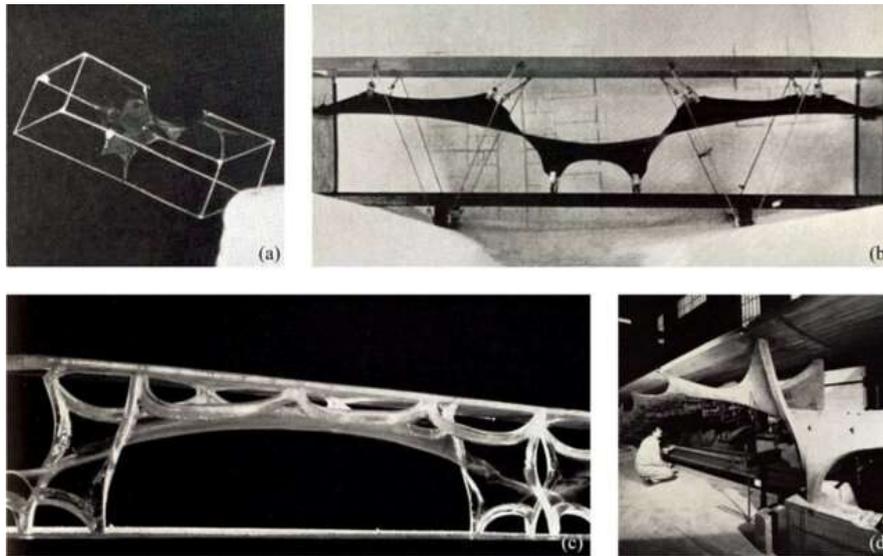


Figura 2: modelli fisici di Musmeci per il Ponte del Basento: (a) modello in soluzione saponata; (b) modello con membrana in neoprene; (c) modello in metacrilato 1:100; (d) modello in micro-cemento 1:10 [Musmeci [1] : 82,83,85,87]²

1.1 Il ponte sulle rive del Basento

Il Ponte Musmeci situato sulle rive del Basento a Potenza è costituito da un impalcato a cassone sostenuto in senso longitudinale ogni 17,30 m da una sottostante volta continua, che può essere considerata equivalente a quattro archi continui con interasse 69,2 m e luce libera fra gli appoggi di 58,8 m. La continuità dell'impalcato è interrotta da giunti con selle Gerber, allo scopo di assorbire le deformazioni termiche, così facendo si formano delle travi in semplice appoggio con luce di 10,38 m sostenute da mensole di 3,46 m appartenenti a travi continue su quattro appoggi e tre luci di 17,30 m.

² Musmeci S., Ponte sul Basento a Potenza. L'industria Italiana del Cemento, 1997; 2; 77-98

considerevole avvicinandosi verso gli appoggi, in modo da ottenere i dovuti irrigidimenti che, attraverso la compressione della membrana, possano comportarsi come archi sghembi nello spazio.

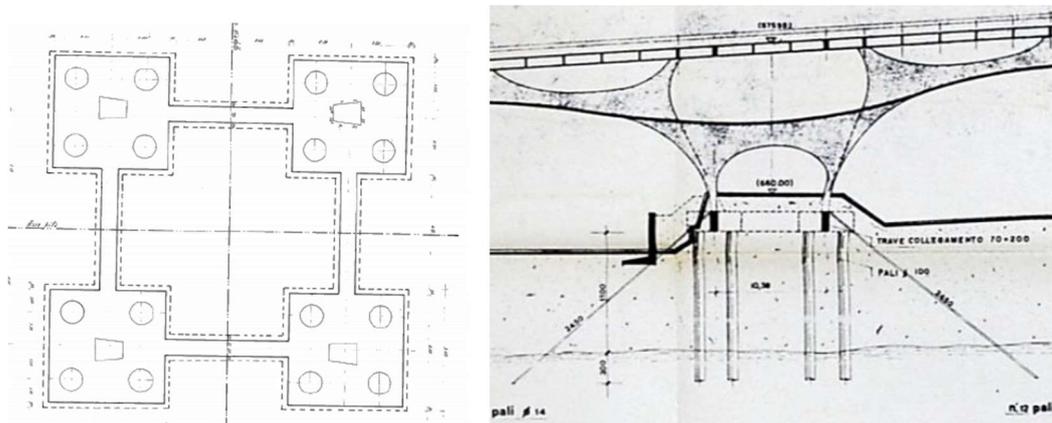


Figura 5 : Fondazioni in fase di Progetto⁴

In fase di progettazione le fondazioni furono variate diverse volte da Musmeci. Inizialmente pensò a una fondazione su plinti vincolati con 3 pali per plinto, successivamente modificò questo schema con quello effettivamente realizzato che prevedeva il supporto della membrana in quattro punti di appoggio per ogni pila. Ogni punto d'appoggio è situato ai vertici di un quadrato di lato 10,38 m e per ogni vertice del quadrato vennero realizzati i plinti, ognuno dei quali presenta 4 pali in calcestruzzo armato di diametro 1 m e 24 micropali di diametro 140 mm. La lunghezza di ogni palo invece varia da pila a pila in modo da consolidare il palo nelle argille plioceniche per almeno 3 m di profondità nello strato di terreno e, in base alla conformazione del suolo, i pali sono stati realizzati in diverse altezze.

⁴ Fonte: <https://concorsiawn.it/restauro-ponte-musmeci/documenti>

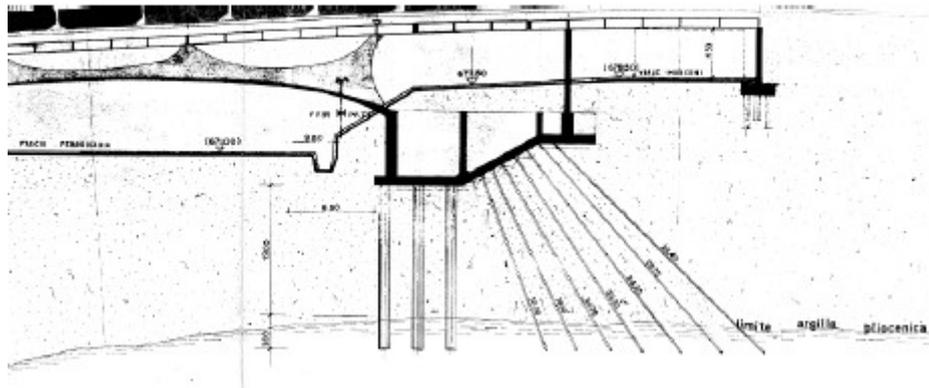


Figura 6 : Fondazioni Spalla⁵

Nella parte terminale del Ponte, la volta, trasmettendo la spinta alle spalle, poggia direttamente sul terreno su 15 pali verticali con diametro 1 m e 144 micropali in acciaio con diametro 140 mm. La forma specifica della volta è stata determinata mediante le analisi effettuate sui modelli citati precedentemente.

1.2 Studio della forma ottimale

La volta è caratterizzata da una doppia curvatura con spessore non uniforme ma rispetto alle dimensioni dell'opera è molto sottile. In base alle condizioni di vincolo datale ai bordi, la struttura presenta un comportamento statico prevalente a membrana, ovvero gli sforzi sono contenuti nel piano tangente.

La forma della volta non è stata stabilita a priori, bensì è stata ricavata stabilendo precise condizioni di tensioni interne e da questi input è risultata la forma. A differenza di una volta cilindrica che deve presentare una linea d'asse passante per

⁵ Fonte: <https://concorsiawn.it/restauro-ponte-musmeci/documenti>

la funicolare dei carichi per avere sforzi di flessione trascurabili, la volta a doppia curvatura è in grado di sopportare i carichi in assenza di flessione purché rispecchi precise condizioni al contorno, indipendentemente dalla forma assunta.

In sostanza invece di partire da una forma prefissata dove si vanno a ricavare gli sforzi attraverso le equazioni di equilibrio della membrana, si è partiti da una progettazione prefissando prima gli sforzi per poi dedurre la forma da realizzare.

La condizione data da Musmeci è stata quella di fissare sforzi uniformi sotto l'azione dei carichi statici permanenti, ottenendo una condizione di compressione uniforme in modo tale da sfruttare al massimo le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo.

Per spiegare quanto, detto Musmeci prese in considerazione una pellicola liquida dotata di tensione superficiale con sforzi di membrana uniformi ed isotropi, indipendentemente dalla tipologia dei bordi che la limitano. Questi bordi si possono immaginare come linee sghembe nello spazio. Ovviamente il modello in questione ha delle differenze rispetto alla membrana del ponte, e possiamo accertare che:

- la volta è in compressione e la pellicola è tesa, ma questo non ha una conseguenza diretta sulla forma;
- la pellicola, essendo in materiale molto leggero, ha un peso trascurabile e risultano solo le forze esterne sui bordi, la volta invece ha un peso pari a $1/4$ dei carichi mentre i restanti $3/4$ sono trasmessi attraverso i bordi dall'impalcato;
- nella pellicola, inoltre, abbiamo la condizione di isotropia nelle tensioni, ossia uguale in tutte le direzioni. Tale situazione è invece non indicata per la volta pertanto si è ridotto a $1/12$ la compressione trasversale del valore della componente longitudinale. Questo ci induce a un cambio drastico della forma della membrana che può essere tenuto in considerazione durante lo

studio. Dallo studio di Frei Otto sulle pellicole di sapone “Tensile Structures”, Musmeci indica che la forma è ricavabile per omotetia dalla forma che si avrebbe in ipotesi di isotropia considerando una larghezza 3,5 volte minore e con lo sviluppo longitudinale invariato.

Nello studio dei bordi la forma si è ricavata su considerazioni di ottimizzazione, cercando di evitare la nascita di sollecitazioni di flessione e assicurando la presenza di sola compressione sui bordi. Oltre quanto detto si è preventivamente assicurato un rinforzo su tutte le zone di contorno.

1.3 Calcolo della forma della Volta

Come precedentemente accennato la forma della volta si è ottenuta per conseguire il regime statico desiderato acquisendo una condizione di compressione uniforme su tutta la volta. Dallo studio citato precedentemente si è indotti a osservare la superficie ottenuta per similitudine da un’analoga superficie 3,5 volte più larga soggetta a compressione uniforme. Questa nozione porta a una condizione di compressione trasversale 12,25 volte minore di quella longitudinale.

Una conseguenza dell’aumento della compressione trasversale comporta un appiattimento della forma della volta, una tensione trasversale nell’impalcato eccessiva e un aumento notevole degli sforzi nei bordi.

Considerando la superficie ideale (compressa uniformemente e isotropa) e trascurando l’effetto il peso proprio (1/4 del peso totale) la superficie risulta avere in ogni punto curvature principali uguali, caso analogo della sfera, ma con segni invertiti, caso analogo di un paraboloide iperbolico. Le superfici con queste proprietà sono definite “minimali” perché hanno l’area minima ottenibile per un contorno prefissato.

In laboratorio è possibile replicare queste superfici tendendo una pellicola di un liquido dotato di tensione superficiale adeguata. La stesura è così concepita da tendere la pellicola con la stessa tensione in ogni sua parte, questo fa sì che si trovi nelle stesse condizioni della volta del ponte escludendo l'isotropia e i segni della sollecitazione. Introducendo nel sistema i bordi si ottiene l'assenza delle componenti flettenti.

Da queste considerazioni si sono disegnati i bordi della membrana in modo di avere la comparsa delle sole componenti di compressione.

Il primo passo per ricavare la forma è stato l'osservazione delle equazioni di equilibrio di una membrana di forma qualsiasi, in riferimento a un reticolo arbitrario di coordinate curvilinee ortogonali ξ_1 e ξ_2 .

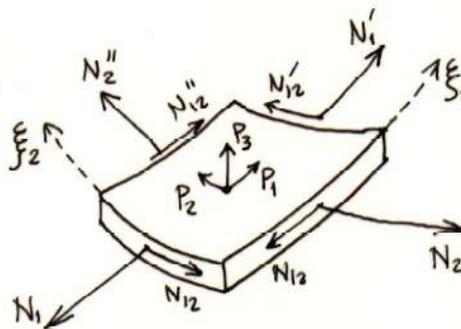


Figura 7: Forze su un elemento infinitesimo di una membrana⁶

$$\begin{cases} \frac{\partial N_1}{\partial S_1} + \frac{\partial N_{12}}{\partial S_2} - \frac{N_1 - N_2}{r_2} - \frac{2N_{12}}{r_1} + P_1 = 0 \\ \frac{\partial N_2}{\partial S_2} + \frac{\partial N_{12}}{\partial S_1} - \frac{N_2 - N_1}{r_1} - \frac{2N_{12}}{r_2} + P_2 = 0 \\ \frac{N_1}{R'_1} + \frac{N_2}{R'_2} + \frac{2N_{12}}{R_{12}} + P_3 = 0 \end{cases}$$

⁶ Fonte: Relazione tecnica di massima, S.Musmeci, 3.1 Caratteristiche generali delle superfici a compressione uniforme, (pg.31). Documenti Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza.

$$\left(N'_1 = N_1 + \frac{\partial N_1}{\partial s_1} ds_1\right) \text{ analogo per } N'_2$$

In queste equazioni abbiamo:

- s_1 e s_2 che sono le lunghezze degli archi sulle linee di coordinate ξ_1 e ξ_2 ,
- N_1 e N_2 che sono rispettivamente lo sforzo normale per unità di lunghezza agente lungo le linee ξ_1 e N_2 lungo ξ_2 ,
- N_{12} è la componente tagliante dello sforzo,
- P_1, P_2, P_3 , sono le forze esterne per unità di superficie lungo ξ_1 e ξ_2 e la normale,
- $1/r_1$ e $1/r_2$ sono le curvatures delle linee piane delle proiezioni ortogonali di ξ_1 e ξ_2 sul piano tangente,
- $1/R_1'$ e $1/R_2'$ sono le curvatures normali, positive se il centro di curvatura si trova dalla parte positiva della normale,
- $1/R_{12}$ è la torsione della superficie.

Quando le linee di curvatura coincidono con gli assi ottengo:

$$1/R_{12} = 0; \quad 1/R_1' = 1/R_1; \quad 1/R_2' = 1/R_2;$$

dove R_1 e R_2 sono i valori estremi.

Differentemente dalla concezione usuale di utilizzare le equazioni di equilibrio per determinare gli sforzi, in questo caso, gli sforzi verranno imposti e la forma sarà l'elemento incognito da ritrovare.

A questo punto scegliendo le linee in direzione ξ_1 si introduce la condizione:

$$N_1 = \lambda^2 N_2 = -N$$

λ è una costante che nel nostro caso dalle considerazioni fatte precedentemente risulta 3,5, mentre N è la compressione massima sopportata. Nel caso di $\lambda=1$ si ha una superficie allargata a compressione isotropa, quindi N_{12} sarà nullo.

Chiamando N come la pressione interna della membrana le equazioni diventano:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial N}{\partial S_1} = P_1 \\ \frac{\partial N}{\partial S_2} = P_2 \\ \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) N = P_3 \end{array} \right.$$

Assumendo l'ortogonalità tra le linee di riferimento e quelle di massima pendenza ottengo che l'unica forza esterna ripartita è la forza peso P , indicando con φ l'angolo tra le linee e la verticale si ha:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 0 \\ P_2 = -P \cos \varphi \\ P_3 = P \sin \varphi \end{array} \right.$$

Sostituendo (4) in (5) si trova che N è costante, se P è trascurabile allora

ricaviamo dall'ultima equazione della (4) che: $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = 0$

Con questo si è dimostrato che la superficie diventa una superficie iperbolica con proprietà di avere in ogni punto curvature principali uguali ma di segno opposto.

Per quanto riguarda il bordo della membrana bisogna prevedere una struttura capace di sostenere le tensioni, questa linea d'asse sarà fissata come una linea funicolare delle tensioni di membrana così da non generare flessione.

Indicando con S lo sforzo normale possiamo ricavare la forma e lo sforzo S dalle equazioni di equilibrio dell'elemento differenziale di lunghezza infinitesima dl :

$$\begin{cases} \frac{dS}{dl} = F_t \\ \frac{S}{\rho} = F_n \\ 0 = F_b \end{cases}$$

In queste equazioni abbiamo:

- $1/\rho$ la curvatura
- F_t, F_n, F_b le componenti di forza esterna ripartita lungo, la tangente, la normale e la binormale.

Quest'equazione ci indica che la binormale dell'arco coincide con la normale alla superficie, in altre parole il piano osculatore è tangente alla superficie. Questo ci dice che la linea di bordo deve essere asintotica alla superficie. Quindi si ha $F_t=0$; $F_n=N$ e ne deriva che $S=$ costante e $\rho= S/N$. In sostanza se S e N sono costanti ho che il raggio di curvatura ρ costante.

Tutte le formule viste fino ad ora sono di semplice utilizzo, ma tutte contengono la curvatura. Se si vuole valutare equazioni di superfici dei bordi il problema diventa molto complesso e per questo, nel caso della volta del Ponte in esame, si utilizza una soluzione approssimata con controllo su un modello in gomma tesa.

La soluzione approssimata della ricerca della forma della volta inizia con l'equazione cartesiana per cui il taglio N_{12} sia nullo.

$$z = z(xy)$$

Con z si intende la quota dal piano orizzontale; x è l'ascissa longitudinale; y quella trasversale.

Questa equazione deve soddisfare l'equazione differenziale a derivate parziali del secondo ordine, al cui interno ritroviamo: g la forza peso per unità di superficie e n la tensione che è funzione lineare di z .

$$(n_0 + g_z)[z_{xx}(1 + z_y^2) - 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}(1 + z_x^2)] = g(1 + z_x^2 + z_y^2)$$

Il problema viene risolto con la posizione:

$$z = z^{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} f^{(n)}$$

In forma compatta si ha:

$$\begin{cases} \Delta z^{(0)} = 0 \\ \Delta f^{(1)} = \bar{L}(z^{(0)}) \\ \Delta f^{(n)} = \bar{L}(z^{(n-1)}) - \bar{L}(z^{(n-2)}) \end{cases}$$

Dove per $\bar{L}(z)$ si intende:

$$\bar{L}(z) = \frac{1 + z_x^2 + z_y^2}{1 + Kz} K - z_x^2 z_{yy} + 2z_x z_y z_{xy} - z_y^2 z_{xx}$$

$$K = \frac{g}{n_0}$$

Andando a integrare la prima equazione e semplificando i vari termini grazie alla simmetria si ricava:

$$z^{(0)} = C_0 + \sum_{i=1}^{\infty} C_i \operatorname{Cosh} \frac{i2\pi y}{l} \cos i2\pi \frac{x}{l}$$

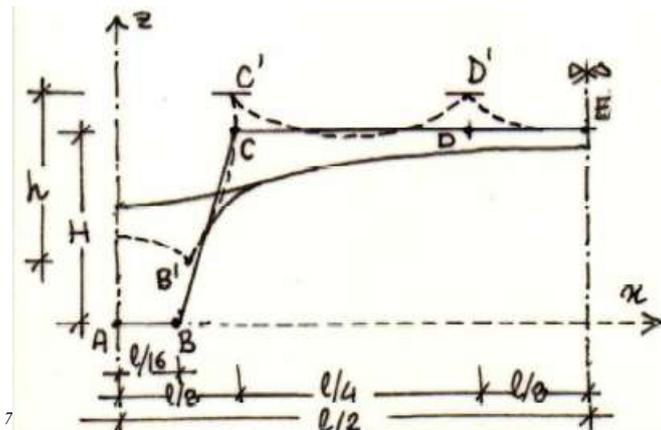


Figura 8: Prima rappresentazione grafica del calcolo analitico

La prima forma (linea spezzata) estratta risulta essere il passaggio ABCD (Fig.8), ma nei punti sopraelevati si estrapola parte della superficie assumendo la semi-larghezza b in funzione del coefficiente di omotetia λ .

Successivamente si sviluppa la funzione $z^{(0)}$ in serie di coseni:

$$s(x) = A_0 + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos i \frac{2\pi x}{l}$$

Da questo si trova:

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{l} \int_0^l s(x) dx = \frac{3}{16} H \\ A_i = \frac{2}{l} \int_0^l s(x) \cos i \frac{2\pi x}{l} dx = \frac{16H}{\pi^2 i^2} (\cos i \frac{\pi}{4} - \cos i \frac{\pi}{8}) \end{cases}$$

⁷ Fonte: Relazione tecnica di massima, S.Musmeci, 3.2 Soluzione approssimata del problema, (pg.38). Documenti Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza.

Per quanto riguarda le condizioni ai bordi l'equazione diventa:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 = \frac{3}{16} H \\ C_i = \frac{16H}{\pi^2 i^2} * \frac{\cos i \frac{\pi}{4} - \cos i \frac{\pi}{8}}{\text{Cosh } i \frac{2\pi b}{l}} \end{array} \right.$$

Fatto ciò e impostato i vari integrali dei coefficienti si passa ai conteggi numerici ponendo:

$$\alpha_i = \frac{A_i}{H} = \frac{16}{\pi^2} * \frac{\cos i \frac{\pi}{4} - \cos i \frac{\pi}{8}}{i^2}$$
$$\theta = \frac{b}{l} = 0,2 \qquad \alpha_0 = \frac{13}{16} = 0,8125 \qquad \gamma_0 = \alpha_0$$
$$\gamma_i = \frac{C_i}{H} = \frac{\alpha_i}{\text{Cosh } i2\pi\theta}$$

Figura 9 : Valori dei coefficienti del sistema per diversi valori di i , x/l e y/l^8

i	$\cos i \frac{\pi}{4}$	$\cos i \frac{\pi}{8}$	$\frac{\cos i \frac{\pi}{4} - \cos i \frac{\pi}{8}}{-\cos i \frac{\pi}{8}}$	$\frac{16}{\pi^2 i^2}$	α_i	$i 2\pi\theta$	γ_i
1	0,7071	0,9239	-0,2166	1,62114	-0,3511	1,2566	-0,18491
2	0	0,7071	-0,7071	0,40528	-0,2866	2,5133	-0,04613
3	-0,7071	0,3827	-1,0898	0,18013	-0,1963	3,7699	-0,00905
4	-1	0	-1	0,10132	-0,1013	5,0265	-0,00133
5	-0,7071	-0,3827	-0,3244	0,06485	-0,0210	6,2832	-0,00008
6	0	-0,7071	0,7071	0,04503	0,0318	7,5398	0,00003
7	0,7071	-0,9239	1,6310	0,03308	0,0540	8,7965	0,00002
8	1	-1	2	0,02533	0,0507	10,0531	0,000005

i	$\cos i 2\pi\theta$	$\cos i \frac{4\pi\theta}{3}$	$\cos i \frac{2\pi\theta}{3}$	$\sin i 2\pi\theta$	$\sin i \frac{4\pi\theta}{3}$	$\sin i \frac{2\pi\theta}{3}$
1	1,8990	1,3720	1,0890	1,6145	0,9393	0,4311
2	6,213	2,7644	1,3720	6,132	2,5772	0,9393
3	21,699	6,213	1,8991	21,677	6,132	1,6145
4	76,203	14,284	2,7644	76,197	14,249	2,5772
5	267,73	32,979	4,1217	267,73	32,964	3,9986
6	940,6	76,203	6,213	940,6	76,197	6,132
7	3305,2	176,12	9,411	3305,2	176,12	9,358
8	11612,	407,04	14,284	11612	407,04	14,249

$\frac{\alpha}{l}$	$2\pi \frac{\alpha}{l}$	$\cos 2\pi \frac{x}{l}$ per $i =$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1/16	$\pi/8$	0,9239	0,7071	0,3827	0	-0,3827	-0,7071	-0,9239	-1
1/8	$\pi/4$	0,7071	0	-0,7071	-1	-0,7071	0	0,7071	1
3/16	$3\pi/8$	0,3827	-0,7071	-0,9239	0	0,9239	0,7071	-0,3827	-1
1/4	$\pi/2$	0	-1	0	1	0	-1	0	1
5/16	$5\pi/8$	-0,3827	-0,7071	0,9239	0	-0,9239	0,7071	0,3827	-1
3/4	$3\pi/4$	-0,7071	0	0,7071	-1	0,7071	0	-0,7071	1
7/16	$7\pi/8$	-0,9239	0,7071	-0,3827	0	0,3827	-0,7071	0,9239	-1
1/2	$\pi/2$	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1

$y/l = 0$:

$\frac{\alpha}{l}$	$\gamma_i \cos i 2\pi \frac{x}{l}$ per $i =$								$\frac{z^{(0)}}{H}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	-0,18491	-0,04613	-0,00905	-0,00133	-0,00008	0,00003	0,00002	-	0,5710
1/16	-0,17084	-0,03262	-0,00346	0	0,00003	0,00002	-0,00001	-	0,6056
1/8	-0,13076	0	0,00640	0,00133	0,00006	0	0,00001	-	0,6896
3/16	-0,07077	0,03262	0,00836	0	-0,00007	0,00002	-	-	0,7827
1/4	0	0,04613	0	-0,00133	0	-0,00003	-	-	0,8573
5/16	0,07077	0,03262	-0,00836	0	0,00007	0,00002	-	-	0,9076
3/4	0,13075	0	-0,00640	0,00133	-0,00006	0	-0,00001	-	0,9381
7/16	0,17084	-0,03262	0,00836	0	-0,00003	-0,00002	0,00001	-	0,9541
1/2	0,18491	-0,04613	0,00905	-0,00133	0,00008	0,00003	-	-	0,9591

⁸ Fonte: Relazione tecnica di massima, S.Musmeci, 3.2 Soluzione approssimata del problema, (pg.41-42). Documenti Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza.

$y/l = 1/3$

$\frac{x}{l}$	$\gamma_i \cos i 2\pi \frac{x}{l} \cos i 2\pi \frac{y}{l}$ per $i =$								$\frac{z^{(0)}}{H}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	-0,2014	-0,0633	-0,0172	-0,0037	-0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,5271
1/8	-0,1861	-0,0448	-0,0066	0	0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0001	0,5147
1/4	-0,1424	0	0,0122	0,0037	0,0002	0	0,0002	0,0001	0,6865
3/16	-0,0771	0,0448	0,0159	0	-0,0003	0,0001	-0,0001	-0,0001	0,7957
1/2	0	0,0633	0	-0,0037	0	-0,0002	0	0,0001	0,8720
5/16	0,0771	0,0448	-0,0159	0	0,0003	0,0001	0,0001	-0,0001	0,9109
3/4	0,1424	0	-0,0122	0,0037	-0,0002	0	-0,0002	0,0001	0,9401
7/16	0,1861	-0,0448	0,0066	0	-0,0001	-0,0001	0,0002	-0,0001	0,9603
1/2	0,2014	-0,0633	0,0172	-0,0037	0,0003	0,0002	-0,0002	0,0001	0,9645

$y/l = 2/3$

$\frac{x}{l}$	$\gamma_i \cos i 2\pi \frac{x}{l} \cos i 2\pi \frac{y}{l}$ per $i =$								$\frac{z^{(0)}}{H}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	-0,2537	-0,1275	-0,0562	-0,0190	-0,0026	0,0026	0,0028	0,0018	0,3607
1/8	-0,2344	-0,0902	-0,0215	0	0,0010	-0,0018	-0,0026	-0,0018	0,4612
1/4	-0,1794	0	0,0397	0,0190	0,0018	0	0,0020	0,0018	0,6974
3/16	-0,0971	0,0902	0,0519	0	-0,0024	0,0018	-0,0011	-0,0018	0,8540
1/2	0	0,1275	0	-0,0190	0	-0,0026	0	0,0018	0,9202
5/16	0,0971	0,0902	-0,0519	0	0,0024	0,0018	0,0011	-0,0018	0,9514
3/4	0,1794	0	-0,0397	0,0190	-0,0018	0	-0,0020	0,0018	0,9692
7/16	0,2344	-0,0902	0,0215	0	-0,0010	-0,0018	0,0026	-0,0018	0,9762
1/2	0,2537	-0,1275	0,0562	-0,0190	0,0026	0,0026	-0,0028	0,0018	0,9801

Figura 10: Valori dei coefficienti del sistema per diversi valori di i , x/l e y/l^9

Fissando la differenza tra le z ricavo H , in questo caso si sceglie:

⁹ Fonte: Relazione tecnica di massima, S.Musmeci, 3.2 Soluzione approssimata del problema, (pg.43). Documenti Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza.

$$z^{(0)} \left| \begin{matrix} x = \frac{l}{2} \\ y = 0 \end{matrix} - z^{(0)} \right| \begin{matrix} x = 0 \\ y = 0 \end{matrix} = 4,4 \text{ m}$$

$$H = 11,44 \text{ m}$$

Fatto ciò, la superficie della volta è completamente fissata.

I dati di funzione, sotto riportati, si riferiscono alla striscia centrale tra i due lati nel piano $y=0$, al di fuori di questa zona i dati non sarebbero attendibili a causa del cambiamento notevole di pendenza rispetto il piano orizzontale.

$z = z^{(0)}(x, y) - z^{(0)} \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0}}$

$\frac{y}{b} = \frac{y}{l} =$	0	1/3	2/3	
membrana $\frac{y}{l} =$	0	0,06667	0,13333	
volta: $\frac{y}{l} =$	0	0,01905	0,03810	
$\frac{x}{l} = 0$	0,000	-0,502	-2,406	$x = 0,000$
1/16	0,396	0,042	-1,256	4,325
1/8	1,357	1,321	1,446	8,650
3/16	2,422	2,573	3,238	12,975
1/4	3,275	3,443	3,995	17,300
5/16	3,851	3,980	4,352	21,625
3/8	4,200	4,291	4,555	25,950
7/16	4,383	4,454	4,635	30,275
1/2	4,440	4,502	4,680	34,600
volta: $y =$	0,000	1,320	2,640	

Figura 11: Valori della funzione $z^{(0)10}$

¹⁰ Fonte: Relazione tecnica di massima, S.Musmeci, 3.2 Soluzione approssimata del problema, (pg.44). Documenti Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza.

La forma della volta è influenzata in modo notevole dalla scelta del parametro θ , nella figura sottostante si mostrano i risultati al variare di θ :

VALORI DI $\frac{z^{(0)}}{H} \Big|_{y=0}$ PER DIFFERENTI θ

$\frac{x}{l}$	0	1/16	1/8	3/16	1/4	5/16	3/8	7/16	1/2
$\theta=0.1$	0,2970	0,4118	0,6667	0,8596	0,9463	0,9796	0,9923	0,9964	0,9978
$\theta=0.2$	0,5710	0,6056	0,6896	0,7827	0,8573	0,9076	0,9381	0,9541	0,9591
$\theta=0.3$	0,6936	0,7064	0,7399	0,7778	0,8256	0,8604	0,8853	0,9000	0,9048

Figura 12: Valori di $z^{(0)}/H$ al variare di θ ¹¹

Andando a variare anche z con il valore di 4,44 m si ha:

$\frac{x}{l}$	0	1/16	1/8	3/16	1/4	5/16	3/8	7/16	1/2	H
$\theta=0.1$	0,000	0,727	2,342	3,564	4,114	4,325	4,405	4,431	4,440	6,34
$\theta=0.2$	0,000	0,396	1,357	2,422	3,275	3,851	4,200	4,383	4,440	11,44
$\theta=0.3$	0,000	0,269	0,973	1,770	2,775	3,507	4,030	4,339	4,440	21,02

Figura 13: Valori di $z^{(0)}/H$ al variare di θ con H fissato⁸

¹¹ Fonte: Relazione tecnica di massima, S.Musmeci, 3.2 Soluzione approssimata del problema, (pg.45). Documenti Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza.

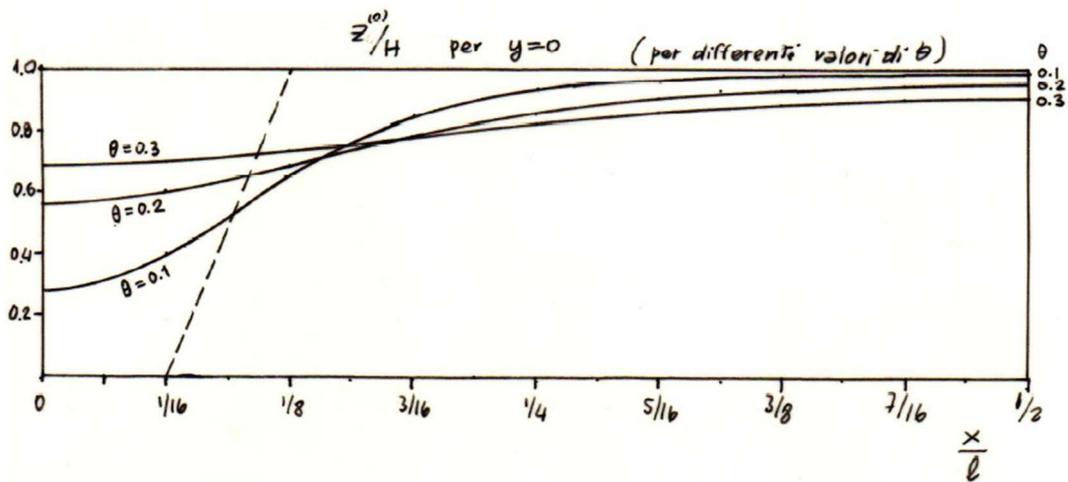


Figura 14: Andamento della funzione $z^{(0)}/H$ al variare di θ per $y=0$

12

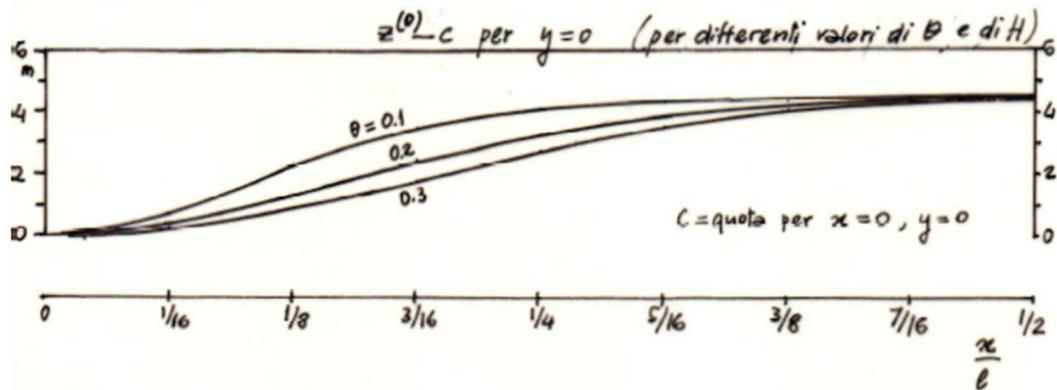


Figura 15: Andamento della funzione $z^{(0)}-c$ per differenti valori di H e θ^9

¹² Fonte: Relazione tecnica di massima, S.Musmeci, 3.2 Soluzione approssimata del problema, (pg.46). Documenti Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza.

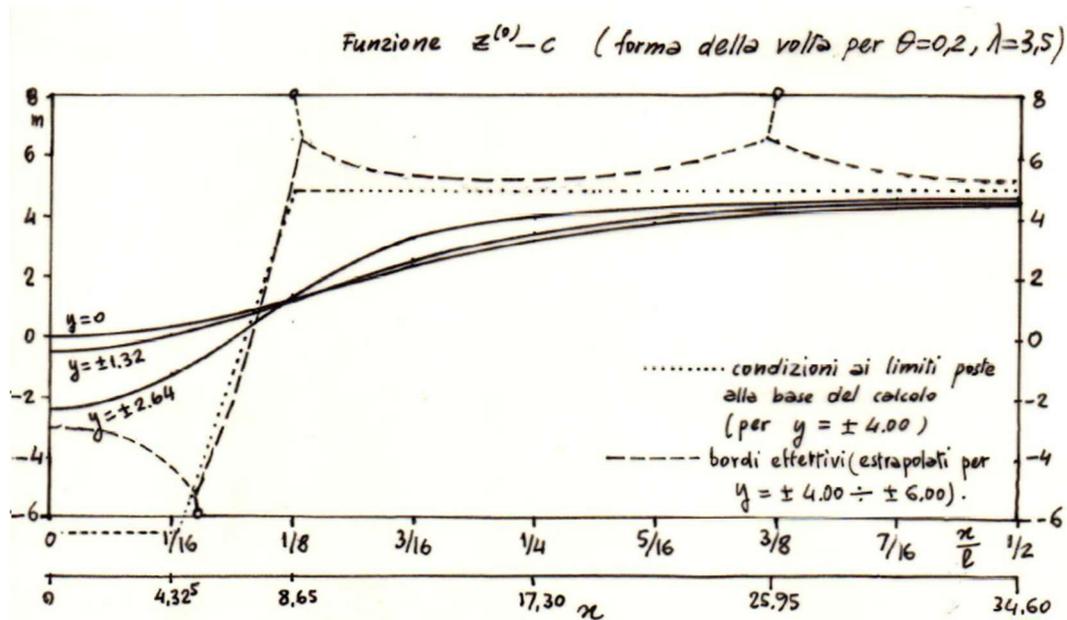


Figura 16: Curvature per diversi valori di y , con θ e λ fissati¹³

La forma della volta è stata ricavata attraverso i parametri θ , λ e H . Dall'analisi svolta si è osservato che una leggera variazione della forma teorica comporta la comparsa di zone non in compressione uniforme. Per tener conto di queste criticità si è adottato un valore di θ leggermente inferiore a 0,2. Il valore adottato è di 0,18 dove i bordi si stringono e 0,22 nei bordi allargati. Queste differenze portano a scostamenti dai 5 ai 13 cm.

Dal controllo sperimentale sui modelli di laboratorio è emerso che le analisi matematiche svolte precedentemente risultano attendibili per le zone di interlinea di spessore (ovvero le zone su cui è stato eseguito il calcolo), con buona rappresentazione del modello in esame.

¹³ Fonte: Relazione tecnica di massima, S.Musmeci, 3.2 Soluzione approssimata del problema, (pg.46). Documenti Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza.

2 SOFTWARE E ALGORITMI GENETICI

Comunemente nel ramo ingegneristico o più in generale nel dominio delle scienze esatte gran parte dei problemi vengono esaminati come problemi di ottimizzazione. Per ottimizzazione si intende lo sviluppo di modelli utilizzati per ricercare soluzioni opportune e ottimali. Questo genera un notevole interesse sia dal punto di vista tecnico che scientifico nello studio e nello sviluppo di tali modelli, adibiti alla risoluzione di una vasta gamma di sfide complesse.

Da un punto di vista pratico si possono avere problemi dovuti principalmente dalla non linearità delle funzioni, dal numero di vincoli e dalle variabili che contraddistinguono il problema. Nella pratica risolutiva, dunque, giocano un ruolo decisivo gli algoritmi iterativi che ci permettono di determinare una nuova approssimazione del risultato partendo da una prima soluzione approssimata.

Nel processo di ottimizzazione è usuale definire parametricamente il problema progettuale, ovvero, inquadrare le variabili che dipendono dalle funzioni di vincolo e dalle funzioni obiettivo del problema di ottimizzazione, in particolar modo per strutture di dimensioni considerevoli composte da tanti nodi e dunque tante variabili di progetto. Il vantaggio della parametrizzazione, in questo caso, è ridurre il problema a un numero piccolo di parametri che fanno parte delle variabili di ottimizzazione della forma, ossia, si va a modificare la forma variando i valori di pochi parametri anziché il numero completo di variabili, andando così a ridurre la complessità del processo.

Il principio del processo di ottimizzazione strutturale ha come caposaldo il progetto parametrico e i relativi strumenti associati ad esso, quali vengono integrati attraverso diversi software.

La riuscita delle operazioni dipende molto dal progettista che, grazie alla sua esperienza, dovrà inserire i diversi parametri che il software elaborerà e in base ai valori inseriti ci svilupperà la soluzione di design. Per questo motivo il design computazionale è comunemente considerato lo strumento che abilita l'uso dei metodi parametrici nei processi di progettazione.

Nel nostro caso di studio l'analisi parametrica è fondamentale in quanto la forma della volta costruita dovrà essere modificata, variando i parametri di interesse, per essere conforme alla volta inizialmente progettata da Musmeci. A seguito della variazione saremo in grado di eseguire l'analisi FEM in modo rapido ed accurato. Questa riduzione di tempistica è dovuta all'approccio dell'analisi parametrica, senza del quale avremmo dovuto costruire due modelli differenti.

Nel caso del Ponte Musmeci tutto ciò che è stato detto precedentemente si traduce, nel caso di assenza di progettazione parametrica, nella creazione di un numero crescente di modelli simili all'aumentare delle modifiche apportate, mentre implementando la parametrizzazione siamo in grado in pochissimi passaggi di modificare i punti d'interesse in modo preciso e istantaneo senza dover ricostruire un modello completo e ciò consegue una notevole riduzione di tempi di progettazione, questo sarà trattato nel capitolo successivo (Caso di studio: IL DESIGN PARAMETRICO).

Il design parametrico si basa sulle relazioni tra i parametri e le operazioni matematiche che ci indicano una linea per generare la forma finale. Definiti i dati e l'algoritmo matematico che ci specifica come i parametri interagiscono, inseriamo i dati nel software per generare un modello tridimensionale. Questo modello si aggiorna dinamicamente al variare dei parametri, mantenendo la coerenza con le relazioni iniziali.

Dunque per parametrico si intende, in questo caso, una modellazione tridimensionale basata sulle relazioni parametri-algoritmi che, grazie all'esperienza del progettista, tende a ricavare un risultato finale non dettato dalla forma ma bensì dalle condizioni progettuali imposte da esso stesso le quali generano la forma.

Il ruolo dell'addetto alla progettazione è di modificare i parametri e trovare la miglior soluzione dettata dal software, che per ogni variazione rielabora una forma adattata ai nuovi parametri inseriti. In sostanza, possiamo indicare che a differenza del processo classico non si parte dalle geometrie della struttura che si vuole realizzare, ma bensì dalle relazioni e regole che vanno a definire il problema. Questo fa sì che in un processo parametrico la principale incognita è la forma, che nel caso classico invece è stabilita a priori.

Quanto detto fin ora ci fa capire quanto i mondi dello sviluppo tecnologico e della progettazione parametrica possano essere connessi tra di loro e solo grazie allo sviluppo dei software si ha la possibilità di risolvere velocemente i problemi di ingegneria e non solo. Questo nuovo modo di approcciare il problema funge da supporto al progettista e i nuovi software ci permettono di affrontare nuove sfide ingegneristiche, sicuramente futuristiche e complesse allo stesso tempo.

2.1 Un software per la progettazione parametrica:

Grasshopper

Ora che abbiamo osservato alcuni aspetti fondamentali della pratica di progettazione digitale, possiamo ora discutere dello strumento che è esploso sulla scena del software per computer negli ultimi anni: il software parametrico. Si tratta di applicazioni che inglobano sia le caratteristiche di strumenti utili al disegno e all'espressione e sia le caratteristiche di altri strumenti finalizzati alla programmazione. In particolare, il software parametrico è un insieme di strumenti di modellazione, costituito da comandi che consentono agli utenti di modellare le

geometrie desiderate. Questa è una capacità già presente nei classici programmi CAD ma in aggiunta nei risolutori parametrici troviamo la capacità di programmazione tramite script. Questi strumenti consentono di combinare l'approccio progettuale integrando operazioni tipiche dei programmatori con la gestione diretta degli script che definiscono le geometrie. In questo modo, i progettisti possono concentrarsi non solo sull'oggetto finito, ma anche sulle relazioni che ne determinano la forma, attraverso la definizione dei parametri.

Il vantaggio primario di questi modelli è che, quando le condizioni di input cambiano, ovvero i parametri variano, le geometrie vanno ad adattarsi automaticamente. In altre parole, il progettista non ha bisogno di intervenire manualmente su tutta la struttura, ma soltanto sui parametri d'interesse. Successivamente a quest'operazione il sistema si adegua in modo dinamico alle variazioni dei parametri consentendo una progettazione più flessibile e reattiva. In breve possiamo definire questa categoria di software come programmi ibridi che gestiscono sia l'aspetto della rappresentazione che quello della programmazione. Questa combinazione di modalità di lavoro, entrambe legate al processo di progettazione, porta il progettista a considerare il risultato del proprio lavoro non come qualcosa di statico, ma come qualcosa di modificabile in base ai vari parametri. In questo modo, le relazioni geometriche tra i parametri diventano un elemento distintivo e di grande rilevanza nel processo di progettazione. In altre parole, il focus si sposta dalla rappresentazione dell'oggetto, che ora funge da verifica intermedia o output del processo, alla scrittura del codice che lo genera. Qui, il progettista deve concentrarsi principalmente sulla definizione delle relazioni geometriche che consentono di modificare in qualunque istante, con rapidità, l'oggetto finito. La selezione delle azioni che il codice eseguirà è seguita dalla fase in cui l'utilizzatore le collega, traducendole in un linguaggio software attraverso l'interfaccia grafica. Durante la scrittura, l'operatore ha la possibilità di confrontare in tempo reale i risultati dimensionali del codice che sta creando attraverso le

dinamiche rappresentative del programma. Il buon funzionamento sta solo nelle abilità tecniche e matematiche dell'utilizzatore che utilizza l'interfaccia e crea un codice corretto e funzionante. L'insieme di operazioni di programmazione sono indispensabili per il raggiungimento dei parametri prefissati, finalizzati agli obiettivi progettuali. Infine, è il codice stesso che, combinando gli input e le operazioni geometriche integrate, definisce automaticamente il risultato del processo.

Negli anni la reperibilità di questi software è cambiata radicalmente in quanto, grazie alla connettività online, è possibile accedere a una vasta gamma di software utilizzati per la programmazione parametrica. Questi strumenti permettono ai progettisti di creare forme sempre più innovative e complesse. Tra le tante alternative di software per il design parametrico ritroviamo **Rhinoceros** e **Grasshopper**.

Rhinoceros è un software complesso utilizzato per la modellazione di superfici NURBS di forma libera, in questo software è possibile creare, modificare e analizzare curve, superfici e solidi. La modellazione non ha limiti, è possibile modellare ogni forma immaginabile con precisione in qualunque campo di design, passando dallo strutturale all'aerospaziale, dal design navale all'automobilistico.

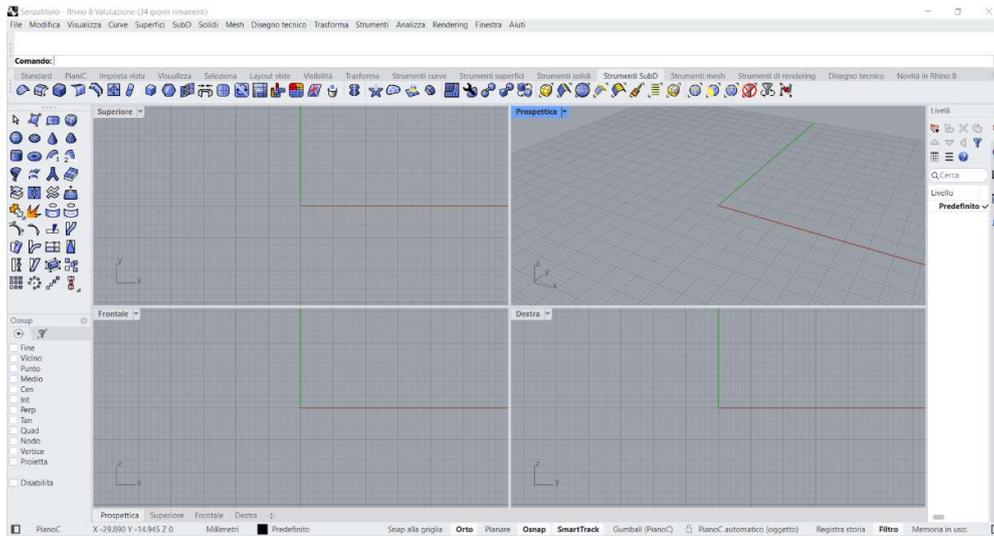


Figura 17: Interfaccia Rhino

All'interno di Rhinoceros è possibile installare molteplici componenti aggiuntive (plug-in), uno dei più importanti è sicuramente Grasshopper, che è stato uno dei primi strumenti a presentare la modellazione basata su superfici NURBS permettendo così la generazione di superfici curve, anche di notevoli complessità, attraverso il controllo matematico. Questa modellazione, passo dopo passo, non obbliga a disegnare manualmente ogni singola componente ma ci consente di generare connessioni matematiche che collegate tra di loro fa sì che il programma ci generi in modo autonomo il modello.

Grazie alle innumerevoli possibilità che Grasshopper offre è possibile creare forme personalizzate nel contempo complesse partendo dalle generatrici matematiche che generano la nostra modellazione parametrica piuttosto che osservare la classica modellazione tradizionale dove la forma è data a priori.

La particolarità di questo plug-in è proprio la sua modalità di utilizzo, questa viene chiamata Visual Scripting. "Il Visual Scripting, o programmazione visuale, è un metodo di scripting che utilizza degli oggetti fisici che contengono uno script funzionale, permettendo agli utenti di formare reti di oggetti che vengono inglobati

in uno script completo ed eseguibile. Utilizzando tali entità fisiche, è possibile gestire più facilmente sezioni di codice grandi e complesse da parte di utenti che non hanno familiarità con il linguaggio di programmazione.”¹⁴

L’insieme degli script genera una connessione tra i codici tale da generare i vari elementi del modello, quest’ultimi saranno poi importati nella parte grafica del software e connessi tra di loro in base alle relazioni matematiche espresse negli script.

Nell’interfaccia del plug-in Grasshopper possiamo distinguere 4 campi distinti:

1. Menu principale;
2. Finestra delle componenti;
3. Canvas Toolbar;
4. Canvas.

¹⁴ FONTE:

https://www.vectorworks.it/2018/VWHelp/HELP_Basic_2018/50_script/Visual_Scripting.htm

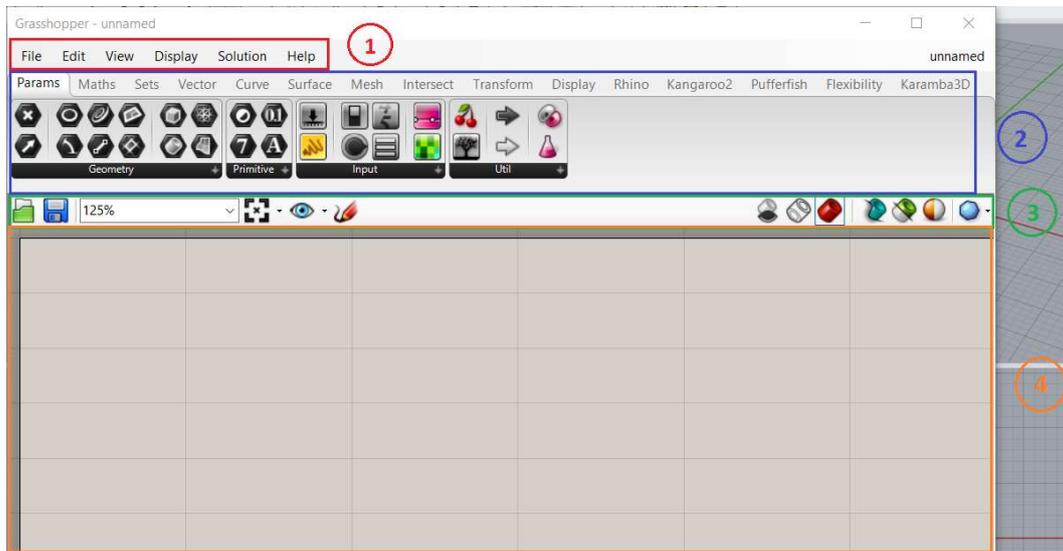


Figura 18: Interfaccia Grasshopper

Partendo dall'alto verso il basso troviamo il punto 1, che mostra il menu principale del software. In questa finestra abbiamo le componenti di setting del programma quali: la vista, il display e la soluzione che vanno a variare il setting automaticamente anche in Rhino. Nel punto 2 abbiamo la finestra delle componenti, all'interno ho diverse categorie quali: Params, Maths, Sets, fino a Kangaroo2. Dall'immagine sopra riportata possiamo notare la presenza di altre 3 categorie: Pufferfish, Flexibility e Karamba3D. Queste ultime sono dei plug-in aggiuntivi che sono stati utilizzati per la costruzione del modello in esame del ponte Musmeci. Ogni categoria è divisa a sua volta in sottocategorie, ad esempio della categoria Maths troviamo le sottocategorie: Dominio, Matrici, Operazioni, Script.



Figura 19: Esempio di Sottocategorie

Nella terza parte dell'interfaccia è presente la Canvas Toolbar, essa è molto utile in fase operativa in quanto ritroviamo accessi facilitati per il salvataggio, lo zoom e le

Tipologie di vista che sono molto efficaci quando si vuole variare rapidamente lo stile del modello. In ultimo (punto 4) troviamo il vero campo di lavoro Grasshopper chiamato Canvas, in questo riquadro verranno costruiti graficamente gli algoritmi.

2.2 Un plug-in per l'analisi strutturale dei modelli parametrici: Karamba3D

Karamba3D è uno strumento ingegneristico parametrico e interattivo che permette di sviluppare le analisi agli elementi finiti in modo rapido e accurato attraverso l'utilizzo degli script. Questo strumento è integrato nell'ambiente di lavoro Rhino come plug-in nel software Grasshopper. La sua concezione di lavoro associata a Grasshopper rende facile la combinazione di modelli geometrici parametrici, calcoli agli elementi finiti a algoritmi di ottimizzazione come Galapagos.

Tra le molteplici caratteristiche ritroviamo:

- Interattività: Ottenendo feedback immediati con risultati animati delle prestazioni strutturali;
- Parametricità: Possibilità di adattamento in breve tempo per adattare in modo flessibile il modello;
- Ottimizzazione: Adibito al risparmio di materiale sia per una riduzione di costi che una riduzione di impatto ambientale.

La sua particolarità, a differenza dei molteplici programmi (FEM), risiede nella capacità di comprensione dei linguaggi in codice utilizzati in Grasshopper come input, nella elaborazione dei dati tramite FEA e nella decodifica di codice per rendere il contenuto visibile ed accessibile.



Figura 20: Funzioni Karamba3D

Uno degli aspetti importanti di questo programma è la modalità di utilizzo, infatti:

- bisogna prestare attenzione alle unità di misura in quanto Karamba3D ha le sue unità di misura, quindi in caso di modelli Grasshopper con unità di misura diverse bisogna preventivamente concordarle con Karamba3D;
- Il modello generato è solo funzione del codice Grasshopper;
- le superfici devono essere scomposte in Mesh.

Nel caso particolare di oggetti tridimensionali (come nel caso in esame “vedi capitolo 3”) gli oggetti possono rappresentarsi o con curve e superfici NURBS¹⁵ o Mesh poligonali, questo sarà trattato nel punto 3.1.

L'utilizzo del programma è condizionato molto dall'esperienza dell'utilizzatore, ma in generale i punti chiave per effettuare un'analisi FEM sono:

1. Disporre in primis di un modello Grasshopper della struttura da analizzare;
2. Convertire la geometria in elementi trave, lastra, piastra o guscio;
3. Definire i materiali della struttura, il tipo di sezione e i supporti;
4. Analizzare e assegnare i carichi agenti;
5. Collegare gli elementi geometrici della struttura e procedere con la soluzione del modello;
6. Osservare i diagrammi ottenuti e nel caso non sia stata eseguita un'analisi accurata, modificare i parametri desiderati e rieseguire la soluzione del modello;
7. Modificare eventualmente modalità di visualizzazione e colorazione dei grafici;

¹⁵ NURBS: Non Uniform Rational B-Spline, è una rappresentazione usata dai software per definire accuratamente una forma.

8. Inserire tabelle con i valori di interesse.

La completa osservazione di questi punti nel caso in esame è trattata nel paragrafo 3.1.

2.3 Algoritmi genetici

L'algoritmo è un concetto fondamentale che può essere visto come un metodo basato su obiettivi per eseguire determinate attività. In parole povere, un algoritmo è un insieme di regole o istruzioni da seguire in modo sistematico. Tra gli aspetti chiave abbiamo:

1. Sequenza di operazioni: Un algoritmo è costituito da una sequenza di operazioni. Inizia da un punto di start impostato da noi o banalmente da zero.
2. Corpo di elaborazione: L'algoritmo ha un corpo di elaborazione, ossia un insieme finito e definito di regole, esse indicano in modo preciso i passaggi per elaborare i dati di input.
3. Generazione dell'output: Effettuati tutti gli steps iniziali, il sistema è in grado di generarci l'output richiesto, esso è determinato sempre secondo le precise istruzioni dell'algoritmo.

In sintesi, un algoritmo è come un'attrezzatura astratta che segue una serie di istruzioni per risolvere un problema o raggiungere un obiettivo specifico. Il suo utilizzo richiede logica e calcolo formali, ed è uno strumento essenziale in molti campi, soprattutto in quello ingegneristico.

Il suo utilizzo combinato con elementi di progettazione crea un approccio innovativo che va oltre la semplice creazione di forme estetiche. Questa sinergia

mira a sistematizzare processi e sezionare i problemi di progettazione in più parti, così da creare un sistema più gestibile.

Nella pratica applicativa l'algoritmo è spesso utilizzato in combinazione con software di modellazione 3D e CAD, così da poter incrementare i limiti della progettazione tradizionale. Le capacità degli algoritmi sono pressoché illimitate, ma nel campo costruttivo possiamo sezionare 3 principali campi:

1. Strutture logiche interconnesse: Gli algoritmi consentono di definire delle strutture logiche che hanno la capacità di interconnettersi tra di loro, ciò consente di creare differenti relazioni tra varie parti di un progetto, generando così una maggiore flessibilità di progettazione;
2. Geometria e spazio tridimensionale: L'algoritmo permette di sviluppare geometrie tutt'altro che semplici;
3. Ottimizzazione e generazione di forme: Gli algoritmi possono essere utilizzati per ottimizzare prestazioni strutturali in molteplici aspetti, quali forma, materiali, geometrie. Ad esempio si può generare una famiglia di possibili sezioni trasversali e materiali e far valutare all'algoritmo la migliore soluzione in base ai parametri scelti dai progettisti come uno spostamento o dei punti di intersezione obbligati della forma.

Le ultime frontiere sullo studio degli algoritmi ha portato l'interesse per i processi di evoluzione presenti in natura considerando l'idea di poter simulare tali processi in modo da sviluppare metodi e algoritmi che possano risolvere i problemi di ricerca e ottimizzazione.

Gli algoritmi genetici (GA) sono algoritmi euristici adibiti a risolvere problemi di ottimizzazione, il termine "genetico" è riferito al principio della selezione naturale ed evoluzione biologica sostenuto da Charles Darwin nel 1859. Gli algoritmi genetici,

infatti attuano dei meccanismi concettualmente simili a quelli della biologia genetica.

In modo analogo al modello darwiniano, gli algoritmi genetici combinano soluzioni di partenza attraverso la riproduzione e l'introduzione di elementi in totale confusione per ricavare nuove soluzioni. In altre parole, l'algoritmo genetico è una tecnica di ottimizzazione che procede in modo iterativo valutando soluzioni di partenza per un problema e attraverso incroci riproduttivi associati a elementi di disordine evolve in modo autonomo verso una soluzione ottimale.

Il processo iterativo di ottimizzazione effettuato dall'algoritmo genetico è suddiviso in varie fasi:

1. Creazione della popolazione iniziale: La prima fase è la creazione della popolazione attraverso un campionamento che può essere casuale, uniforme oppure si può sezionare metà del problema e generare metà degli elementi mentre la restante parte in modo complementare. Ciò che si vuole in questa parte è una popolazione molto ampia in modo da ricavare una soluzione soddisfacente.
2. Valutazione della fitness: La seconda fase prevede la scelta della funzione fitness, anche detta funzione obiettivo, che si vuole ottimizzare. Questa funzione ci fornisce un valore numerico per tutti gli elementi della popolazione rispetto alla correttezza della soluzione in modo da confrontare e selezionare tutti i vari elementi che mi generano la migliore soluzione.
3. Selezione di elementi: Fatta la valutazione della fitness per tutti gli elementi della popolazione si esegue una selezione di un sotto campionamento della popolazione iniziale per ricavare nuove soluzioni. Questo viene fatto sui migliori elementi e viene rifatto per ogni ciclo di iterazione dell'algoritmo,

in modo tale da poter evolvere la popolazione fino a un risultato soddisfacente.

4. Ricombinazione: Una volta eseguiti le fasi precedenti si procede con una ricombinazione degli elementi andando a scambiare e ricombinare la loro genetica. In sostanza si “copia” la natura riproduttiva genetica per ricavare elementi con codice genetico ricombinato tra differenti elementi. Il nuovo elemento della popolazione ricavato presenterà le informazioni di doppie di individui, selezionati in modo Random, per osservare uno spazio di ricerca differente.
5. Mutazione: Dalla ricombinazione può avvenire il caso in cui gli elementi ricombinati, dopo un numero di iterazioni, presentino valori analoghi agli elementi sotto campionati (ovvero gli elementi adibiti a generare il nuovo elemento). Per aggirare questo problema l’algoritmo genetico esegue una nuova mutazione.
6. Soluzione o nuova selezione: Al termine di tutto il processo, adibito a ricercare soluzioni ottimali, il sistema ricerca la convergenza delle soluzioni. Seguiti i vari steps, il sistema ricava una prima generazione di soluzione. Dopo questa soluzione il processo si itera partendo dal risultato della prima generazione e tornando a valutare una nuova fitness, effettuando la selezione, la ricombinazione e la mutazione. Così facendo si arriva alla nuova generazione del secondo step, e così via. Il sistema non cessa mai di generare nuove generazioni e per questo l’utilizzo di questo algoritmo è basato molto sull’esperienza dell’utilizzatore, infatti il sistema solitamente viene stoppato quando: i valori si stabilizzano, dopo aver effettuato un numero di cicli elevato, dopo un determinato tempo di analisi oppure dopo il raggiungimento di nessun miglioramento nella funzione obiettivo.

3 CASO DI STUDIO: IL DESIGN PARAMETRICO

L'obiettivo che il lavoro di tesi si pone riguarda la realizzazione di un modello parametrico del Ponte sulle rive del Basento progettato da Musmeci che rispecchi il ponte effettivamente realizzato. Tale modello sarà poi adattato al modello teorico, attraverso il cambiamento di alcuni parametri in codice, e confrontato nei suoi aspetti geometrici. Infine, verrà eseguita sul modello un'analisi FEM per osservare le differenze tecniche riscontrate.

Il processo di costruzione del modello è stato suddiviso in due parti:

1. Ricerca delle geometrie effettive;
2. Scrittura del codice Grasshopper.

La creazione di un modello basato solo sui punti di appoggio e sommità ha portato molte complicazioni nella fase realizzativa, in quanto le curvature della volta non rispecchiavano le curvature reali del ponte. La membrana a doppia curvatura presenta notevoli variazioni dell'asse medio generando una forma in completa compressione, questo comportamento fa sì che il conglomerato cementizio utilizzato lavori al pieno delle sue capacità. Questo tipo di pensiero oltre a generare uno sfruttamento massimo delle capacità meccaniche del materiale, crea una condizione per cui la quantità di materiale utilizzata è minore che in casi di strutture ad asse rettilineo, riducendo notevolmente sia le quantità che l'impatto ambientale dell'opera.

Per risolvere questo problema si è pervenuto di partire osservando un rilievo di alta precisione effettuato da Prof. Marmo (Fig. 21-22-23) durante uno studio sulle forme strutturali dei ponti.

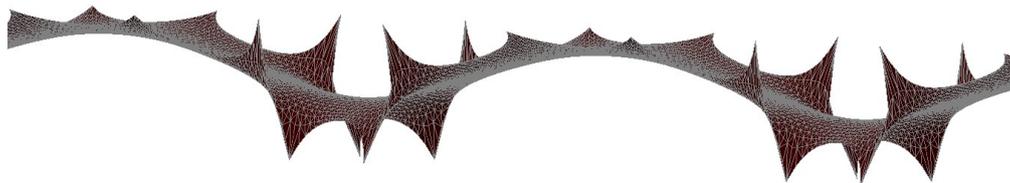


Figura 21: Rilievo ponte Musmeci¹⁶



Figura 22: sezione Trasversale

¹⁶ Fonte: Marmo, F., Demartino, C., Sulpizio, C., Candela, G., Briseghella, B., Spagnuolo, R., ... & Rosati, L. (2018, July). Shape and structure in RC bridges: the Musmeci bridge. In Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2018, No. 12, pp. 1-4). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). Marmo, F., Demartino, C., Sulpizio, C., Candela, G., Briseghella, B., Spagnuolo, R., ... & Rosati, L. (2018, July). Shape and structure in RC bridges: the Musmeci bridge. In Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2018, No. 12, pp. 1-4). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

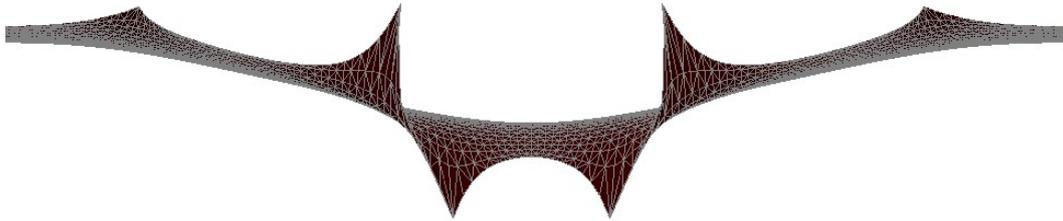


Figura 23: Prospetto longitudinale

Dalle fonti storiche fornite, sia dal Comune di Potenza che dal Consorzio Sviluppo Industriale di Potenza in liquidazione, si è stato in grado di ottenere tutte le informazioni necessarie per comprendere a pieno l'opera di Sergio Musmeci.

3.1 Codice Grasshopper

La creazione della forma della volta è iniziata partendo dalle curve di riferimento del modello sopra citato, nella scrittura dello script si è posto l'attenzione a replicare con accuratezza la linea d'asse a doppia curvatura. La scrittura del codice verterà soltanto sulla creazione di una campata, ipotizzando un moto rigido si potrà specchiare la sezione ricreando l'intera struttura.

La prima fase di scrittura del codice identifica le curve di referenza del modello del ponte reale:

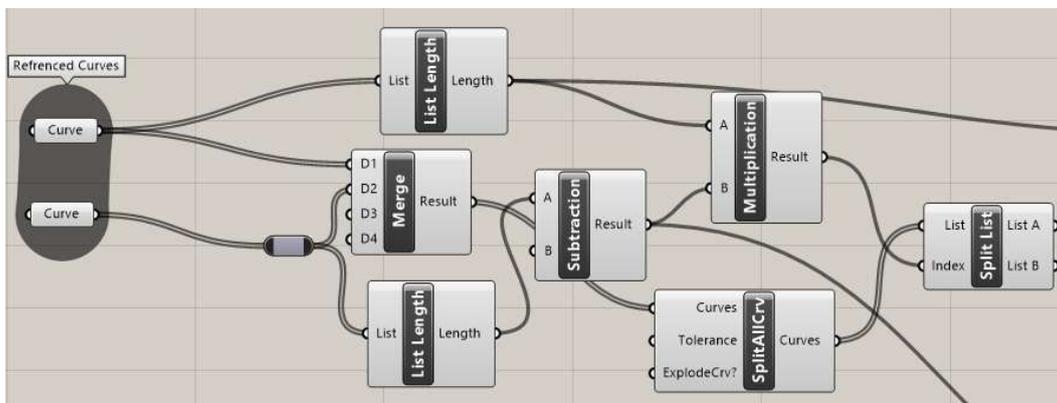


Figura 24: Differenziazione delle curve

Creata la lista delle curve (riferite a curve di sviluppo longitudinale e curve di sviluppo trasversale lungo le curvature della forma) si esegue una distinzione delle curve attraverso decostruzione e partizione dei punti:

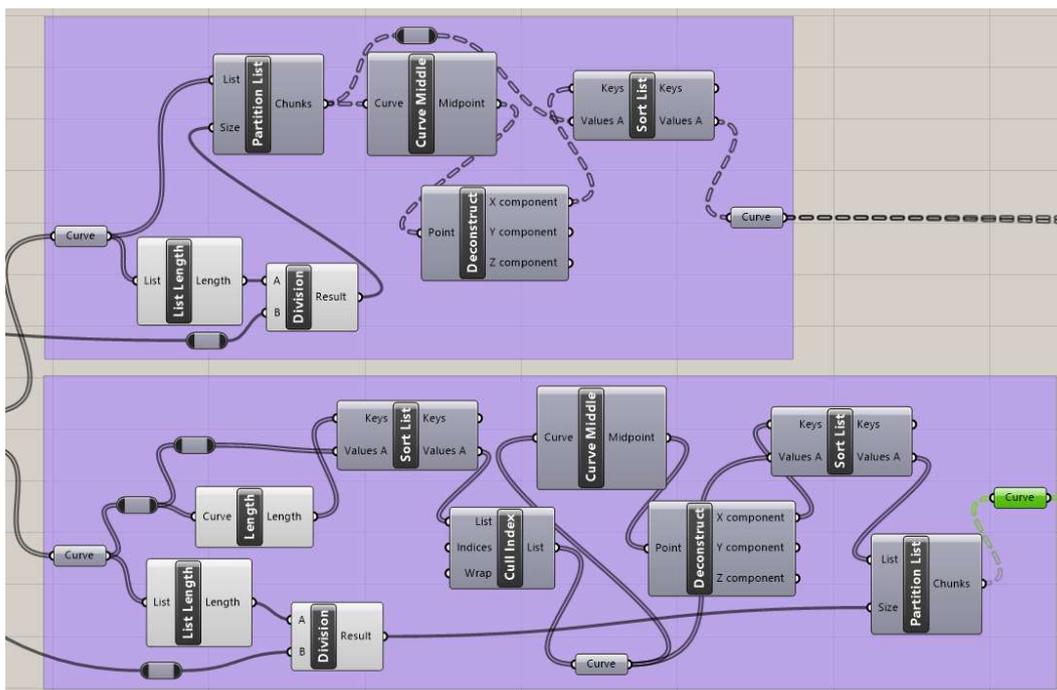


Figura 25: Decostruzione delle curve

Fatto ciò si racchiude il tutto in liste in modo da poter prendere in riferimento i punti chiave della struttura.

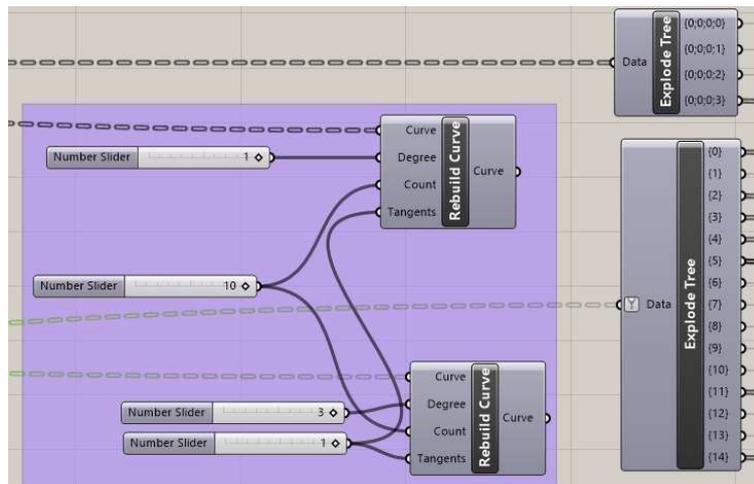


Figura 26: Raccolta dei dati

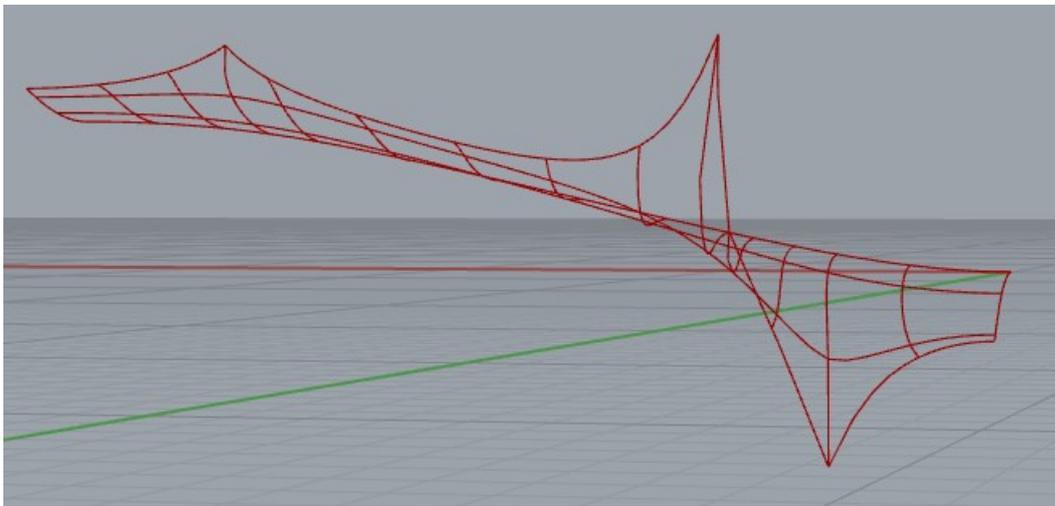


Figura 27: Risultato della costruzione delle curve del modello

Si è optata la costruzione di $\frac{1}{4}$ della campata (Fig. 27) in quanto ho simmetria lungo x e y, successivamente il modello verrà specchiato in entrambe le direzioni fornendoci la campata completa.

Costruite le curvature principali si vanno a definire i punti di interesse (Fig. 28) quali: il punto 1 alla base (punto di fondazione), i punti 0 e 2 di estremità superiore (punti di appoggio dell'impalcato), il punto 4 nella mezzeria dell'arco tra le fondazioni e il punto 3 nella parte finale dell'arco.

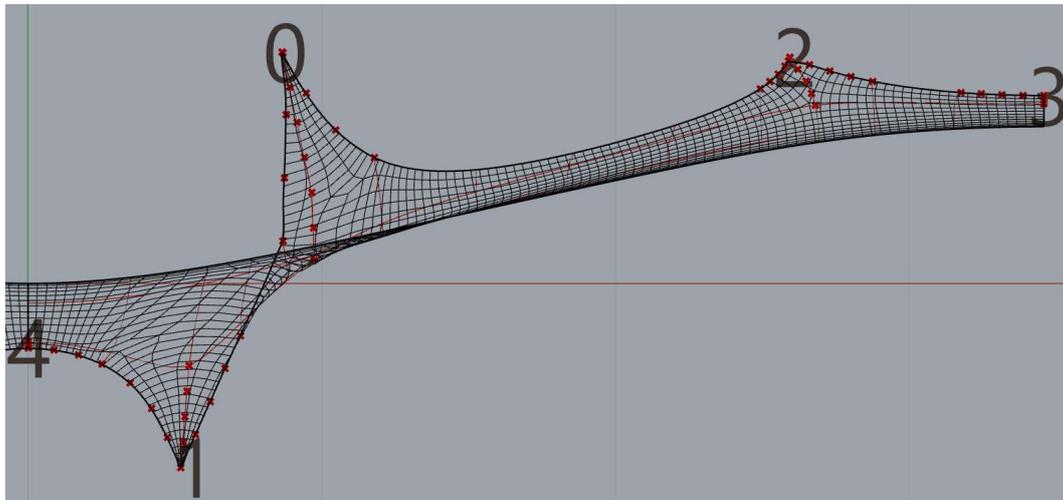


Figura 28: Punti parametrici di riferimento

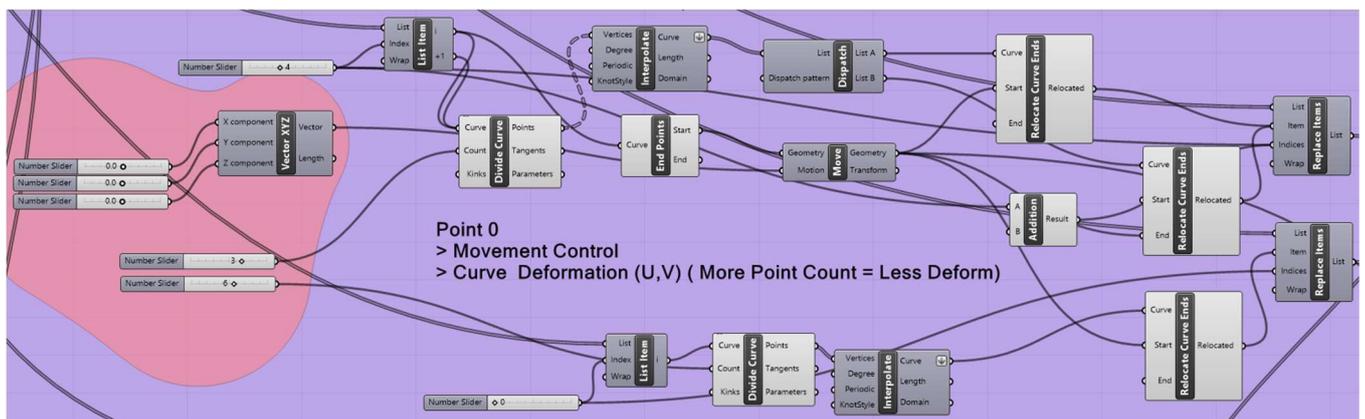


Figura 29: Costruzione del punto di controllo 0

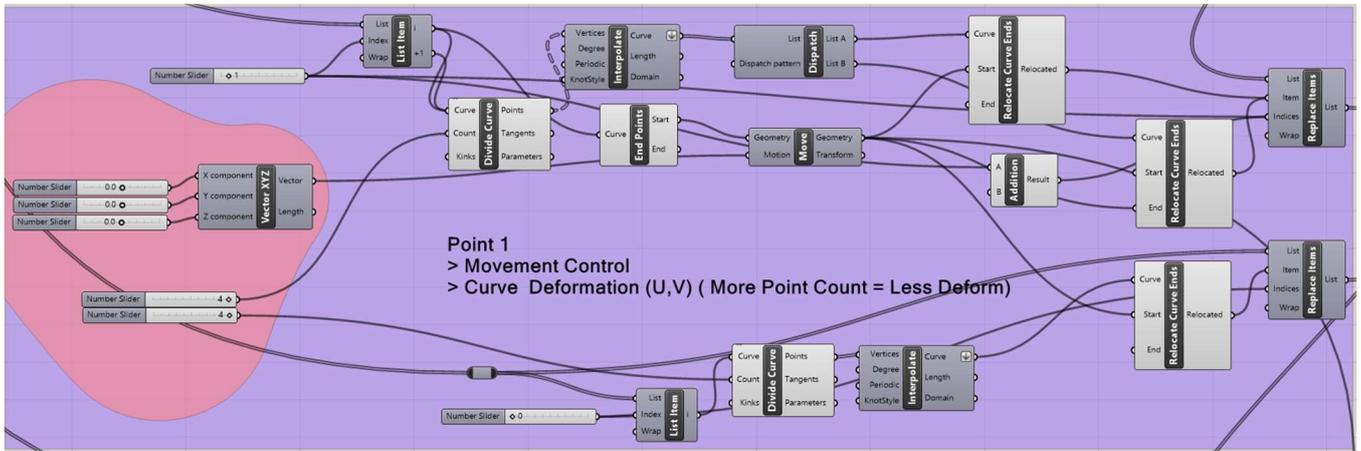


Figura 31: Costruzione del punto di controllo 1

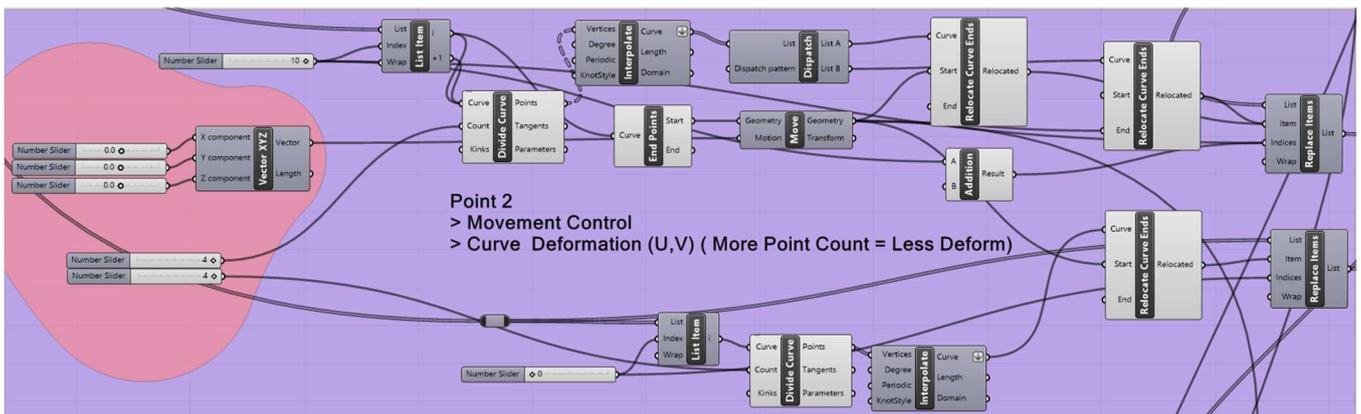


Figura 30: Costruzione del punto di controllo 2

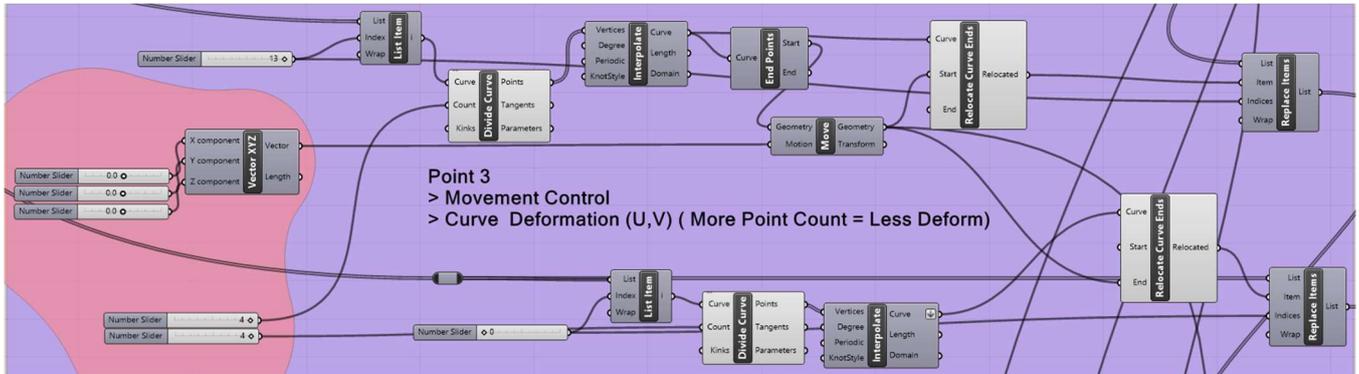


Figura 32: Costruzione del punto di controllo 3

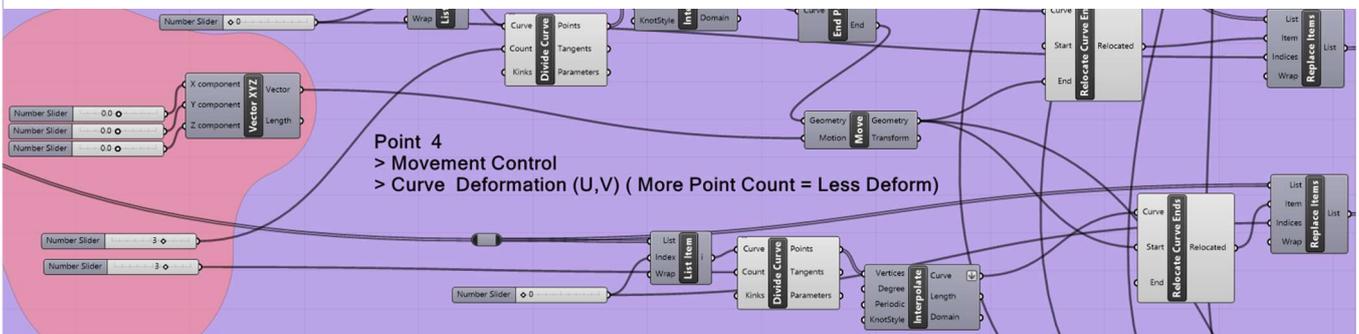


Figura 33: Costruzione del punto di controllo 4

Insieme alla determinazione dei punti sopra citati, si è convenuto collegare le liste delle traiettorie di curvatura, create precedentemente, per caratterizzare più punti tra linee di intersezione. Questo è stato creato attraverso l'interpolazione delle curve presenti in lista e quelle di bordo, in modo tale da poter variare più componenti in un secondo momento. Questa è la praticità della modellazione parametrica, e grazie a questa modalità di progettazione saremo in grado di variare questi parametri per adattare questo modello al modello progettato da Musmeci.

Infine i dati vengono raggruppati tramite il classico comando “Merge”:

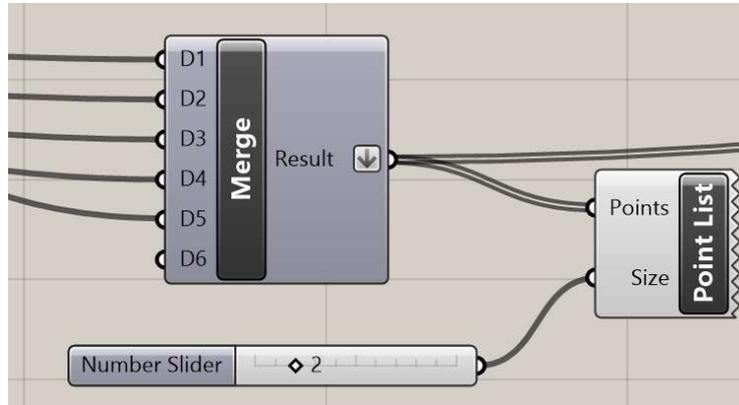


Figura 34: Lista punti di controllo

A questo punto abbiamo definito la forma in termini di curve (divise in curve di forma longitudinale e trasversale).

La fase successiva prevede la creazione di una superficie di sviluppo delle nostre linee d’asse curvilinee.

Per fare ciò si va a raggruppare gli elementi creati fin ora, ovvero le curve di sviluppo longitudinali, le curve di sviluppo trasversali, le curve di sviluppo interpolate tra i punti d’interesse (sia longitudinali che trasversali) e i punti di interesse per poi collegarli in un insieme curva e generare una superficie in modo automatico.

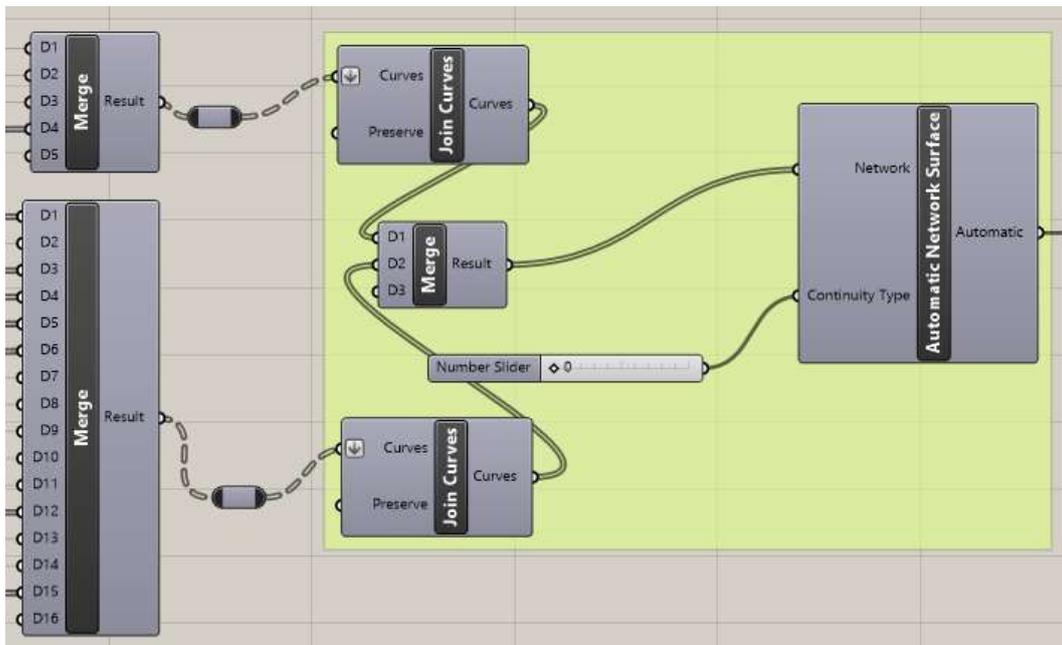


Figura 35: Creazione della superficie

Definita la superficie si va a dividerla in maglie lungo U e V attraverso l'inserimento di uno Slider e si collega al codice di creazione della Mesh:

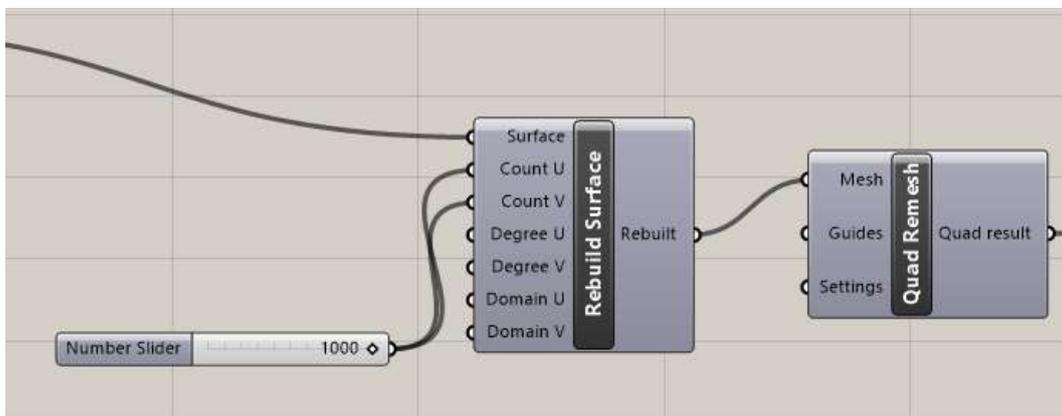


Figura 36: Costruzione della maglia della superficie e mesh

Parte di questa Mesh sarà decostruita per modellare i punti di appoggio (punto 1 in fondazione e punti 0 e 2 in appoggio impalcato):

Un ulteriore script viene scritto per eliminare la distorsione che si genera tra le intersezioni della Mesh:

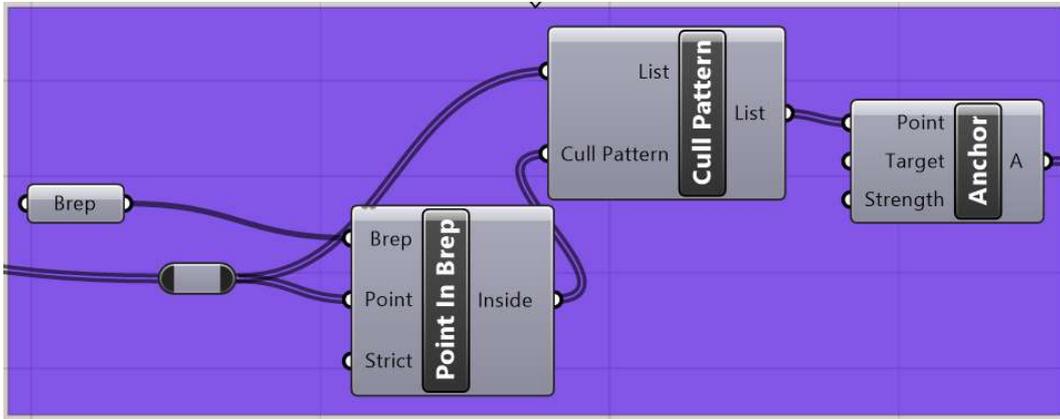


Figura 39: Eliminazione delle distorsioni

Una volta modificata la Mesh nei punti di interesse si collettivizza il risultato della Mesh completa:

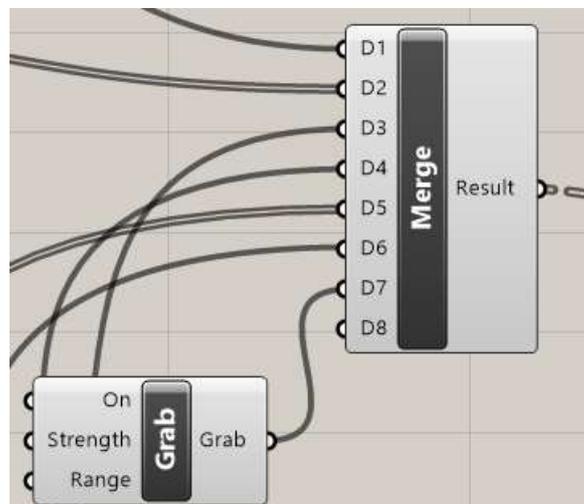


Figura 40: Lista completa delle mesh

A questo punto l'unica cosa che rimane da fare per completare il modello è la risoluzione del codice.

Come accennato inizialmente il modello viene concepito su $\frac{1}{4}$ della struttura, quindi per generare l'intera campata i risultati ottenuti vanno specchiati lungo i piani XZ e YZ.

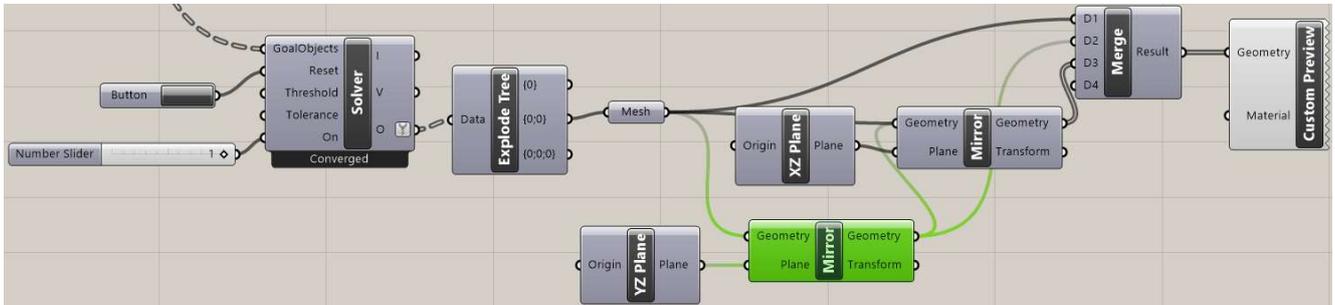


Figura 41: Soluzione del modello

La costruzione del modello Grasshopper ha portato ad un risultato ottimale dello stato attuale della membrana. Il modello in questione è stato costruito sulla seconda campata, questo viene sottolineato in quanto l'idea iniziale poneva la condizione di un moto rigido del ponte, mentre dal punto di vista pratico alcune campate non sono semplicemente ruotate, ma alzate di alcuni centimetri per consentire una pendenza longitudinale del ponte. Questa caratteristica non produce variazioni nel nostro modello, in quanto l'analisi è effettuata su una sola campata e non su tutta la membrana.

Al termine della scrittura del codice i risultati ottenuti sono stati i seguenti:

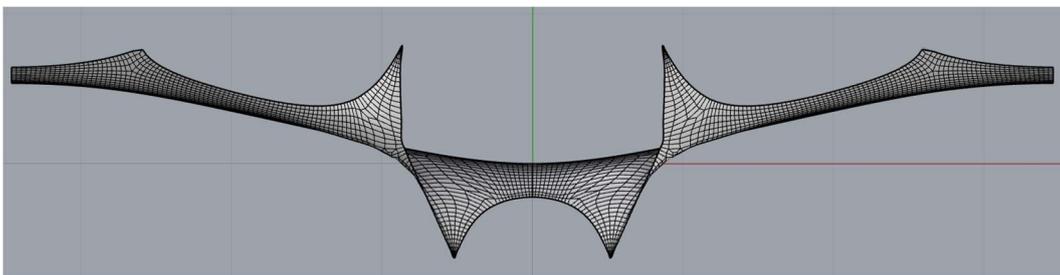


Figura 42: Vista Frontale

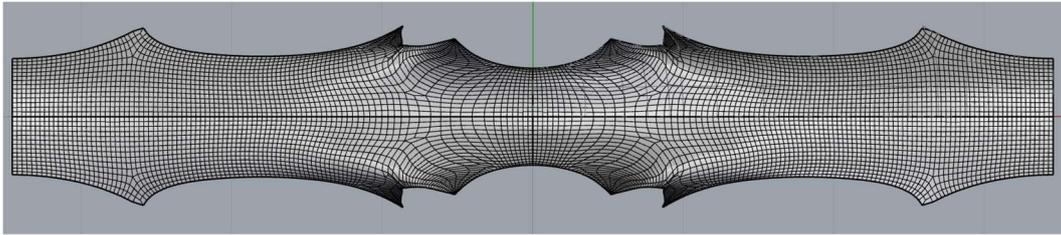


Figura 43: Vista dall'alto

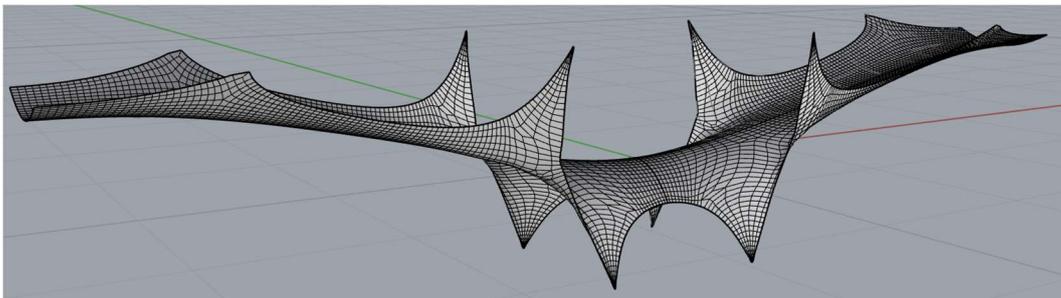


Figura 44: Vista in prospettiva

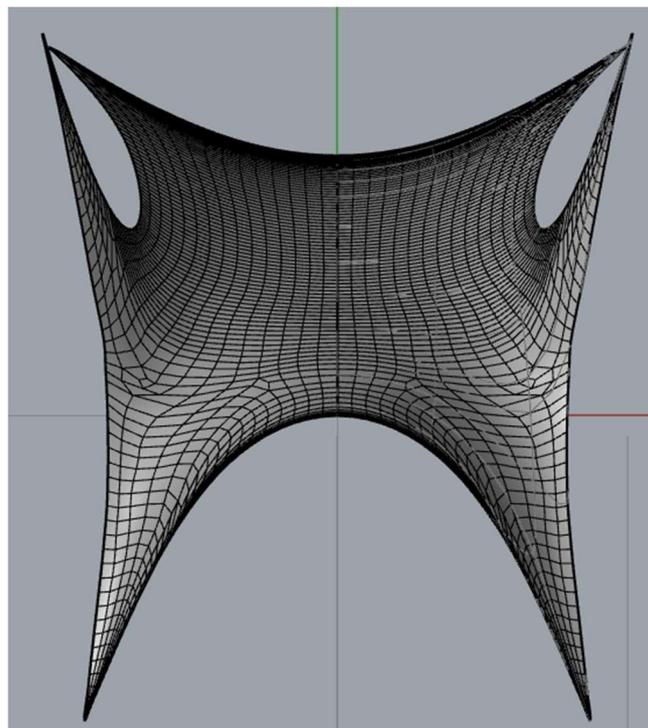


Figura 45: Vista laterale

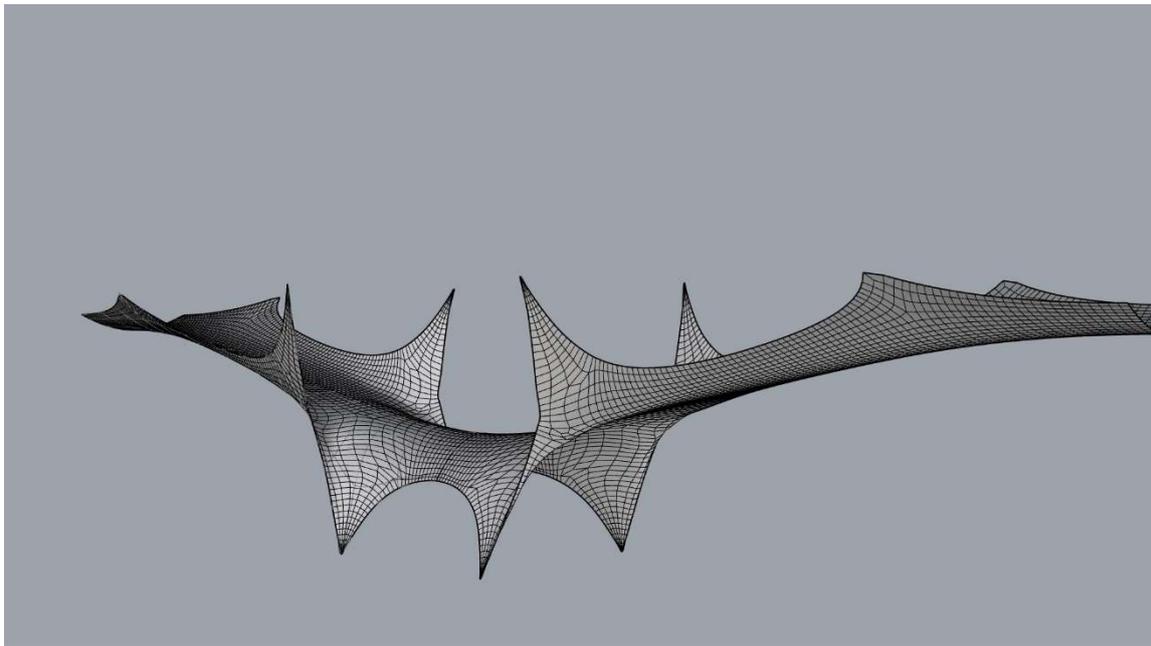


Figura 46: Render Vista prospettica

Grazie all'analisi parametrica ora siamo in grado di ricercare ulteriori forme della membrana, a tal punto lo scopo della tesi prevede un confronto tra il costruito e il progettato. Tramite la modifica dei punti di controllo (punti: 0, 1, 2, 3, 4) definiti precedentemente, siamo in grado di replicare la forma che si voleva costruire teoricamente. La fonte su cui ci baseremo per questa variazione del modello sono le tavole di progettazione originali prodotte prima della realizzazione, in particolar modo sulla sezione longitudinale, fornite dal Consorzio dello Sviluppo Industriale della Provincia di Potenza (Fig.47).

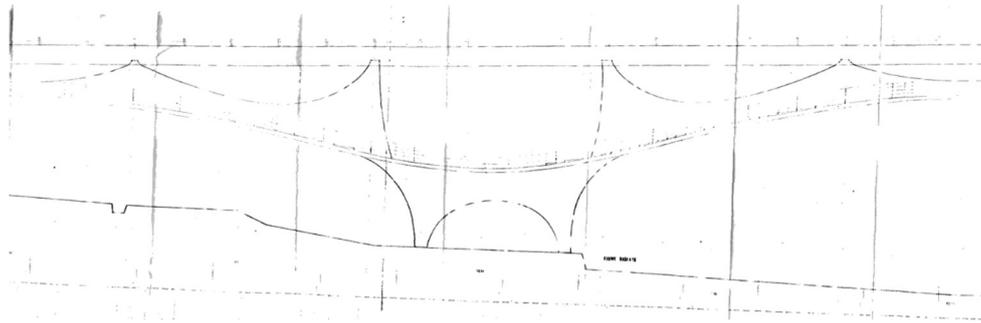


Figura 47: "Sezione longitudinale"¹⁷

Come si poteva prevedere dal confronto tra i modelli (Fig. 48), riscontriamo leggere differenze in termini di curvatura, i punti di sospensione di appoggio dell'impalcato (punto 0 e punto 2) e il punto in fondazione (punto 1) risultano perfettamente collocati, mentre i punti 3 e 4 che variano la curvatura intermedia della volta sono stati leggermente spostati per ottenere il modello teorico. Possiamo vedere dal confronto dei modelli le differenze strutturali (discusse nel capitolo 4).

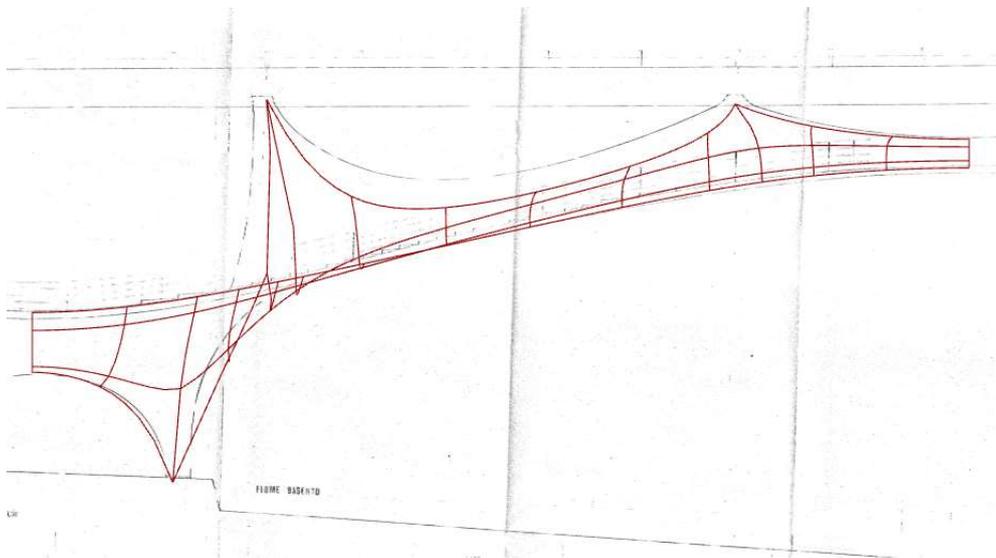


Figura 48: Confronto tra i modelli; in rosso Modello reale, sul fondo il profilo longitudinale del modello teorico

¹⁷ Fonte: Documento ufficiale fornito dal Consorzio Sviluppo Industriale di Potenza in liquidazione, Sezione longitudinale Progetto: Arch. Zenaide Zanini Musmeci (Scala 1:50)

3.2 Analisi FEM

Una volta determinata la geometria si è proceduto con l'analisi FEM attraverso la scrittura in codice tramite Karamba3D. Per l'utilizzo di questo plug-in la prima cosa da eseguire è fissare la Mesh costruita nel modello Grasshopper e definire il materiale della nostra struttura. Da documenti forniti dal Comune di Potenza si è riscontrato che, tramite carotaggi, prove in situ e laboratorio, il calcestruzzo risulta essere di classe C25/30.

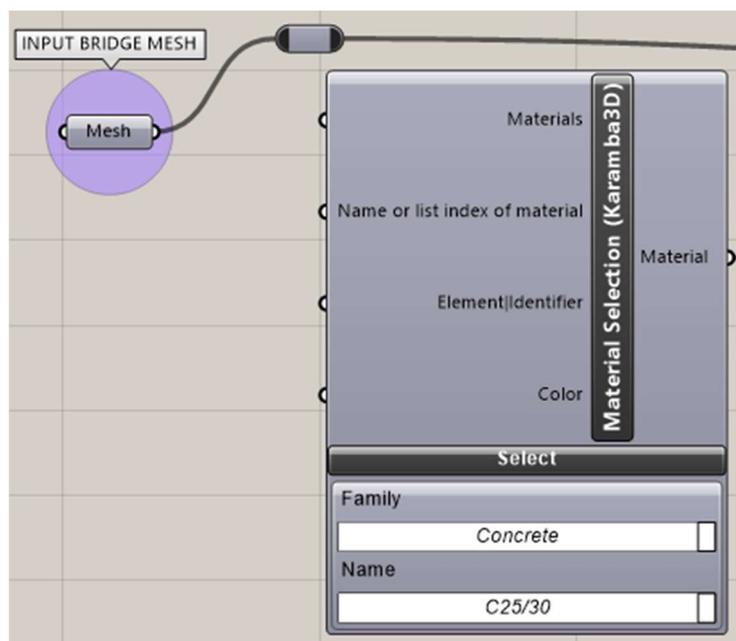


Figura 49: Inserimento dei materiali sulla mesh

Introdotta il materiale bisogna definire la sezione della struttura, in questo modello si è introdotto uno spessore uniforme di 30 cm, nel modello reale la membrana si allarga nei punti d'appoggio per una migliore distribuzione delle forze tangenziali.

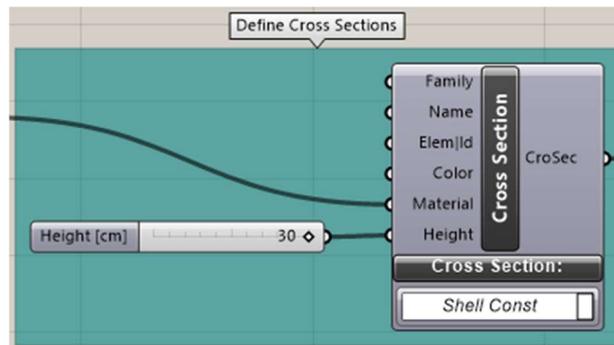


Figura 50: Definizione della sezione

Fatto ciò, si va a collegare le caratteristiche sopra riportate con la Mesh:

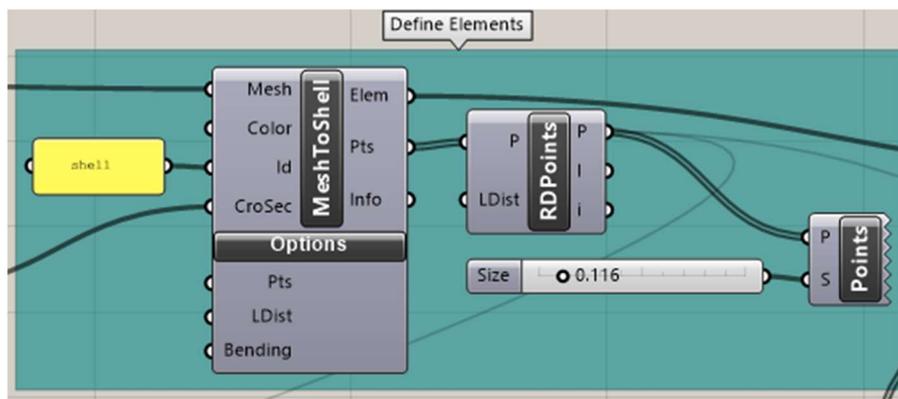


Figura 51: Identificazione generale della mesh

Il secondo passaggio è la definizione dei supporti:

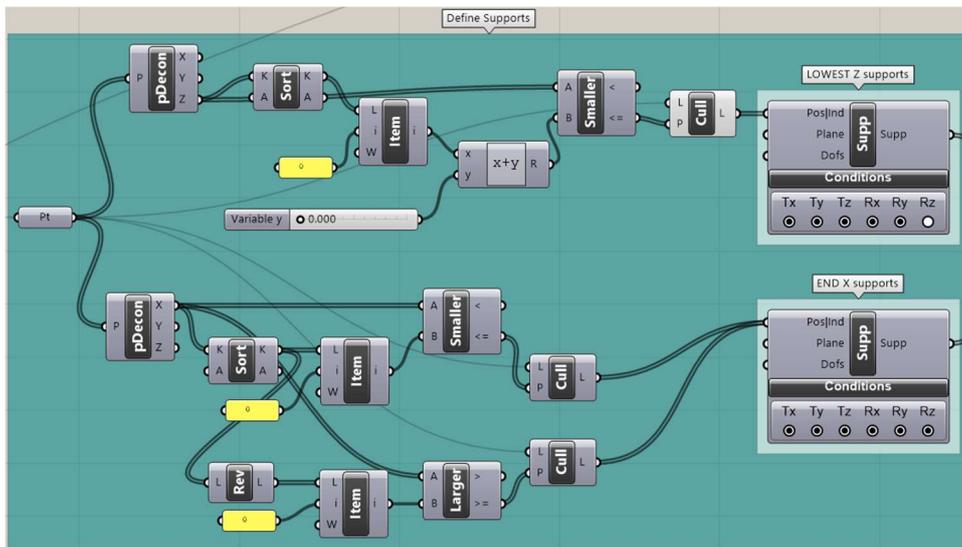


Figura 52: Definizione dei supporti

A tal proposito, si separano i punti in due sezioni di supporto, lungo x e z. L'introduzione della definizione dei carichi viene fatta in accordo con i segni del programma, indicando in modo negativo i carichi rivolti verso il basso.

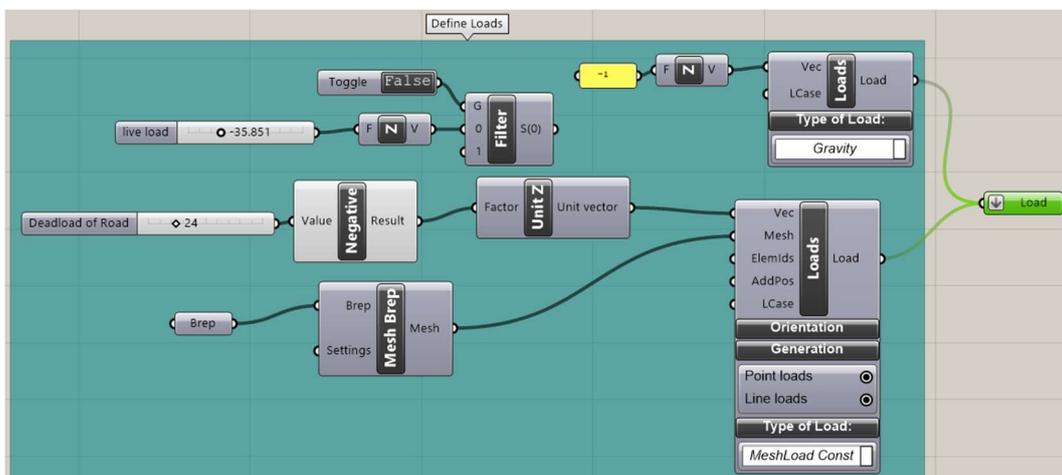


Figura 53: Definizione dei carichi

Definiti gli elementi, il materiale, i supporti e i carichi si vanno ad assemblare e analizzare:

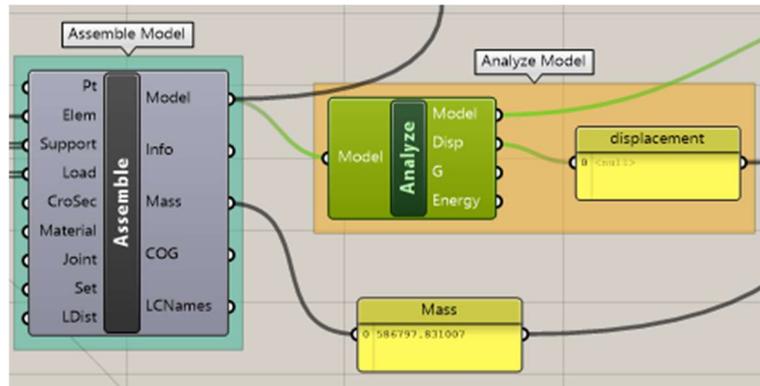


Figura 54: Analisi del modello

Successivamente viene curato l'aspetto visivo della restituzione grafica e le caratteristiche tecniche che si vogliono vedere del modello.

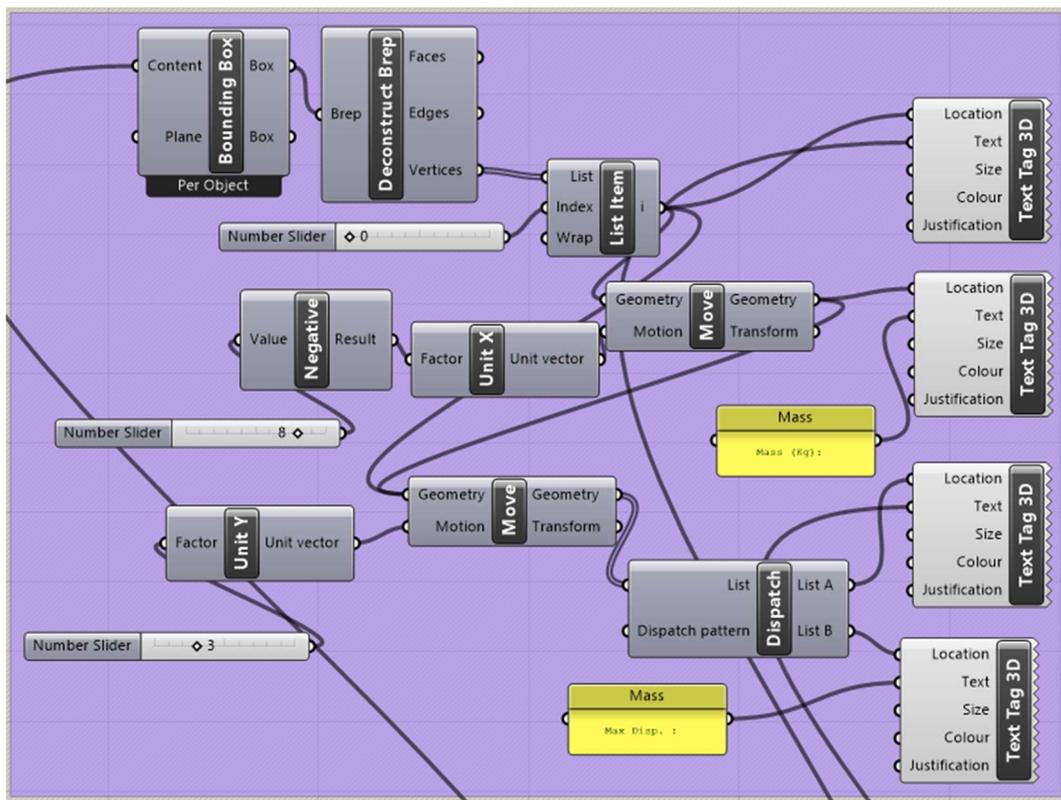


Figura 55: Caratteristiche di restituzione grafica

La parte conclusiva dell'analisi è l'editing. Questo viene fatto tramite i comandi ModelView associato a ShellView che ci permettono di scegliere la soluzione che vogliamo osservare in Rhino, impostando valori di scala opportuni per la deformazione, le reazioni, i carichi, i supporti e gli assi. Oltre questo possiamo introdurre eventuali note ed eventualmente inserire dei limiti per i valori osservati. Infine aggiungiamo una legenda che permette di vedere numericamente i risultati del modello che saranno visibili anche in base alla loro colorazione. Ad ogni valore numerico riportato nella tabella è associato un colore differente, così da poter intuire subito un cambiamento sul modello. I diagrammi ottenuti saranno esposti ed analizzati nel capitolo successivo (RISULTATI E DISCUSSIONE).

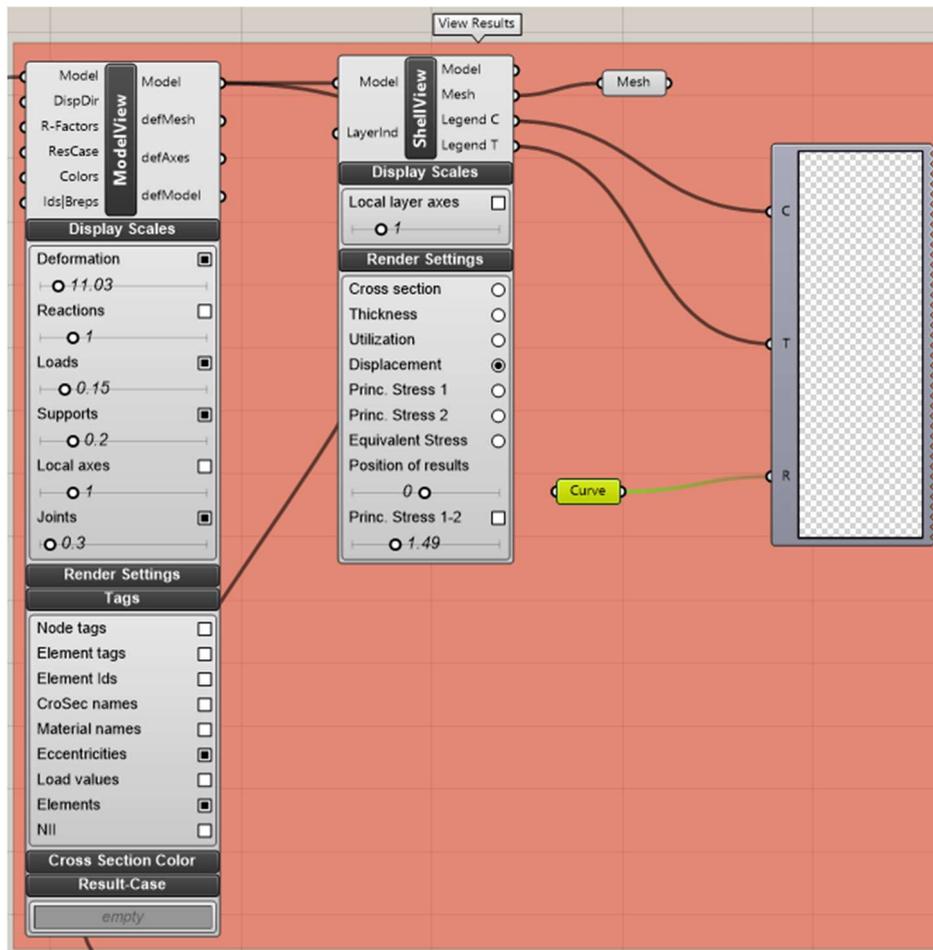


Figura 56: Visualizzazione dei risultati

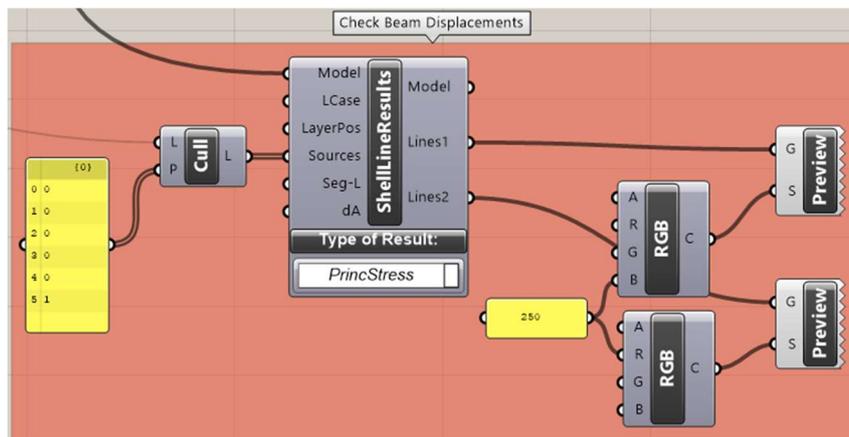


Figura 57: Visualizzazione abbassamenti

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

Dall'analisi precedentemente svolta sono emerse due principali differenze tra il modello costruito e il modello teorico studiato e progettato da Musmeci:

1. Curvature della Volta;
2. Comportamento tensionale.

La curvatura della volta è rispecchiata in modo fedele nella parte d'arco tra le fondazioni (curva con concavità verso il basso, parte di sinistra della figura 58), mentre per la curva con concavità verso l'alto abbiamo differenze sostanziali.

Un primo confronto viene fatto dal diagramma di studio della volta fatto da Musmeci.

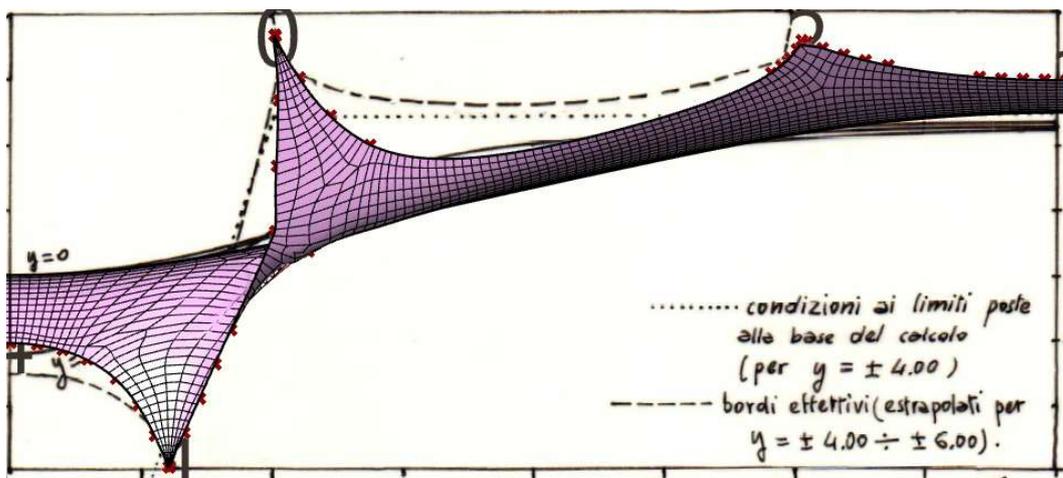


Figura 58: Confronto Modello realizzato con il diagramma ottenuto dall'analisi matematica di Musmeci

La linea d'asse ($y=0$ nelle equazioni di Musmeci) è seguita in grandi linee dal modello costruito. Invece, la parte sovrastante della volta non è pienamente in accordo con il modello. Trattandosi di un disegno cartaceo (probabilmente non in scala), sicuramente non si ha una corretta lettura del quadro generale.

Un'analisi più dettagliata può essere sicuramente fatta sul profilo longitudinale, consegnato da Musmeci al Comune di Potenza.

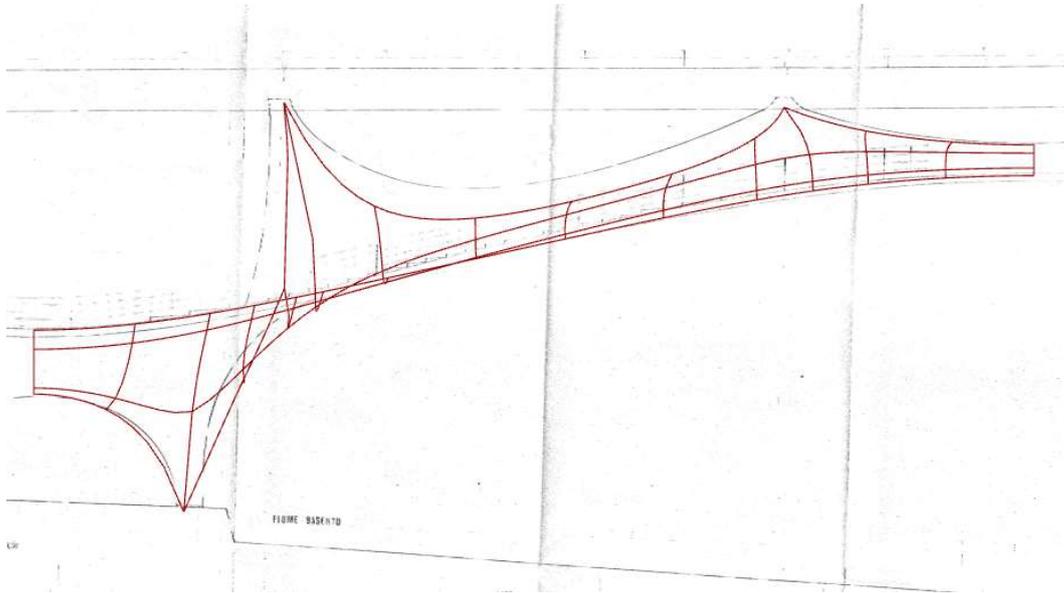


Figura 59: Confronto modello con la sezione longitudinale disegnata prima della realizzazione

Come precedentemente chiarito i punti noti del progetto (punto in fondazione e punti di appoggio dell'impalcato) non hanno subito variazioni dal progettato al costruito. Le differenze principali possiamo osservarle sulle curvature tra i punti d'appoggio dell'impalcato, si attenuano verso i punti d'appoggio e si incrementano progressivamente in modo non lineare. Il valore massimo di differenza tra i modelli in questa zona raggiunge 1,1 m. Dal punto di vista strutturale questa variazione potrà comportare la nascita di componenti tensionali di trazione, causando un comportamento anomalo della volta, in quanto progettata per lavorare in compressione totale.

Infine, possiamo vedere un'ulteriore differenza sull'asse di sviluppo longitudinale. Posizionando infatti il modello in asse sulla mezzeria della fondazione risulta uno sfasamento sulla parte finale della campata (parte destra dell'immagine) di circa 7 cm. Questa piccola variazione, come rimportato nello studio di Musmeci, è tenuta

in considerazione già in fase di progetto e non porta a cambiamenti sostanziali della struttura in termini di sollecitazioni.

La seconda differenza tra progettato e costruito è stata riscontrata mediante l'analisi FEM. Il carico preso in considerazione nel modello è esclusivamente il peso proprio, dall'analisi è emerso un cambiamento dello stato tensionale di progetto rispetto a quello che doveva essere l'andamento teorico.

Come abbiamo discusso nel paragrafo 1.2 e 1.3, la creazione della forma della volta non è stata imposta a priori, ma bensì è stato imposto lo stato tensionale. Dall'analisi si voleva creare una forma che lavorasse in compressione, evitando comportamenti flessionali della volta. In fase costruttiva tutti gli edifici subiscono delle variazioni dovute a problemi di cantiere o problemi logistici ed economici. Nel caso in esame queste variazioni generano zone in trazione che scaturiscono un comportamento flessionale inizialmente non considerato.

Variando il modello parametrico costruito, adattandolo al modello teorico di Musmeci, abbiamo ritrovato un comportamento di pura compressione in tutta la volta, così come ci si poteva aspettare.

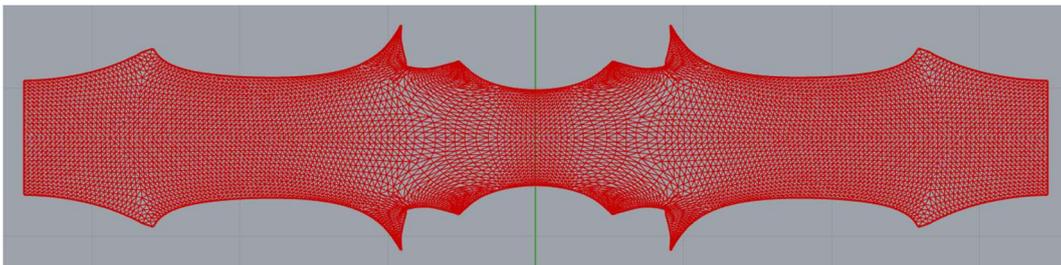


Figura 60: Stato tensionale del Modello teorico

Come possiamo vedere nel modello (Fig.60) non sono evidenziate zone in trazione (designate con colore blu), tutta la volta risulta essere in compressione (designate con colore rosso) e i valori osservati rispecchiano in pieno quelli dell'analisi di Musmeci. I valori aumentano nelle zone di appoggio dove Musmeci ha previsto un

aumento della sezione e diminuiscono allontanandosi da queste zone. Gli spessori della volta variano da 30 cm in mezzeria (zona di cambio del segno della curvatura) fino a valori maggiori del doppio della sezione media sugli appoggi in fondazione e dell'impalcato. Nel modello è stata ipotizzato uno spessore di 30 cm per tutta la volta, questo comporta delle variazioni numeriche nelle zone d'appoggio.

Andando però ad analizzare il modello reale possiamo vedere alcune zone non conformi a quanto detto precedentemente:

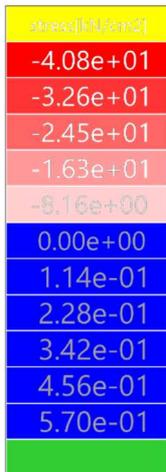
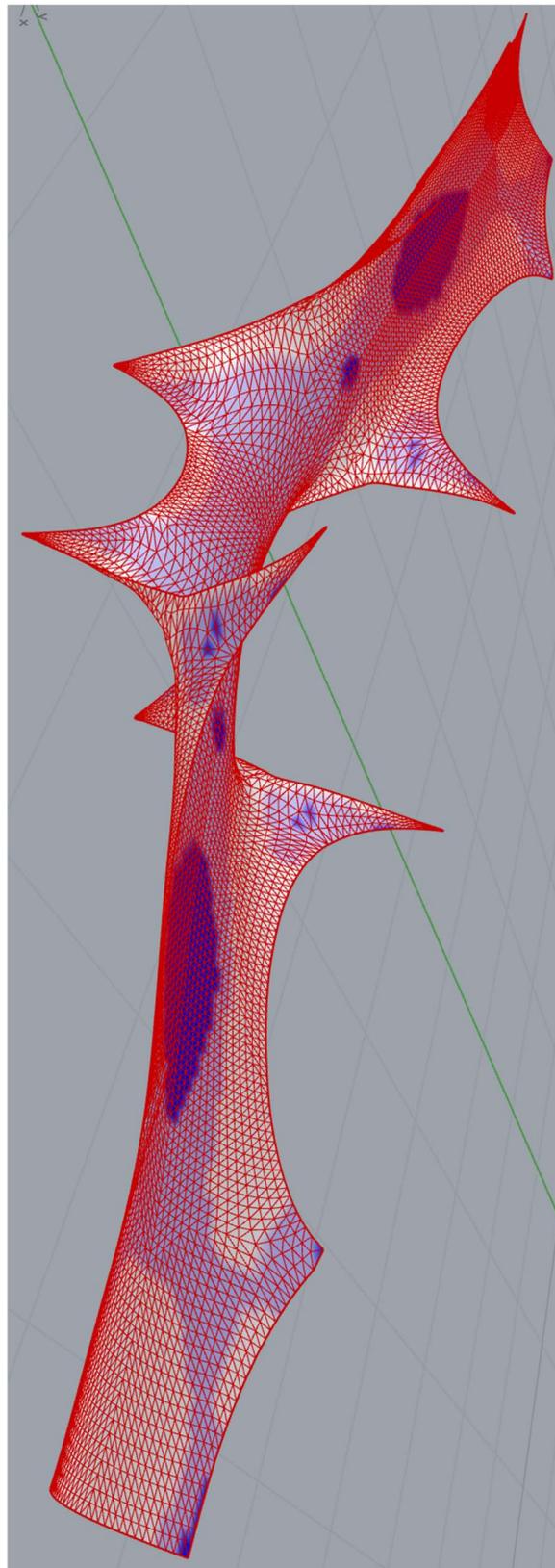


Figura 61: Risultati grafici in termini tensionali del modello Costruito



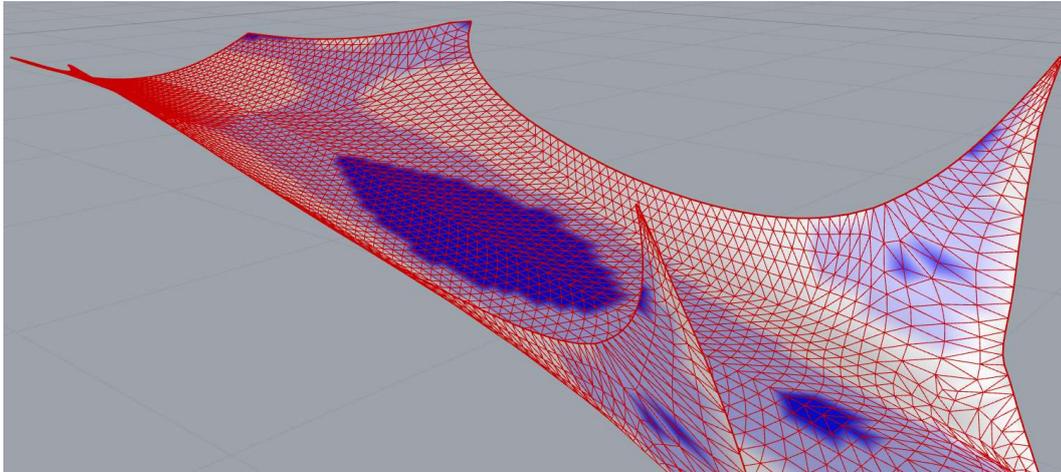


Figura 62: Zone di massima variazione delle tensioni

Le zone con colorazione blu mostrano parti della membrana soggetti a trazione, questi instaurano un comportamento flessionale in alcune zone. Analizzando i valori di queste zone si evince che la struttura non ha un notevole cambiamento, in quando i valori sono molto contenuti. Questo risultato si è ottenuto considerando esclusivamente i pesi propri della volta, andando a trascurare i carichi dovuti all'impalcato e i carichi variabili.

L'introduzione dei carichi variabili e del peso dell'impalcato potrebbe generare un comportamento strutturale non voluto, provocando fessurazioni nell'estradosso della volta. La sezione variabile della volta presenta armature minime adibite all'assorbimento delle componenti tensionali di trazione, ma seppur presenti non sono state concepite per assorbire sforzi elevati.

Un'ulteriore conferma ci viene data dall'analisi degli spostamenti:

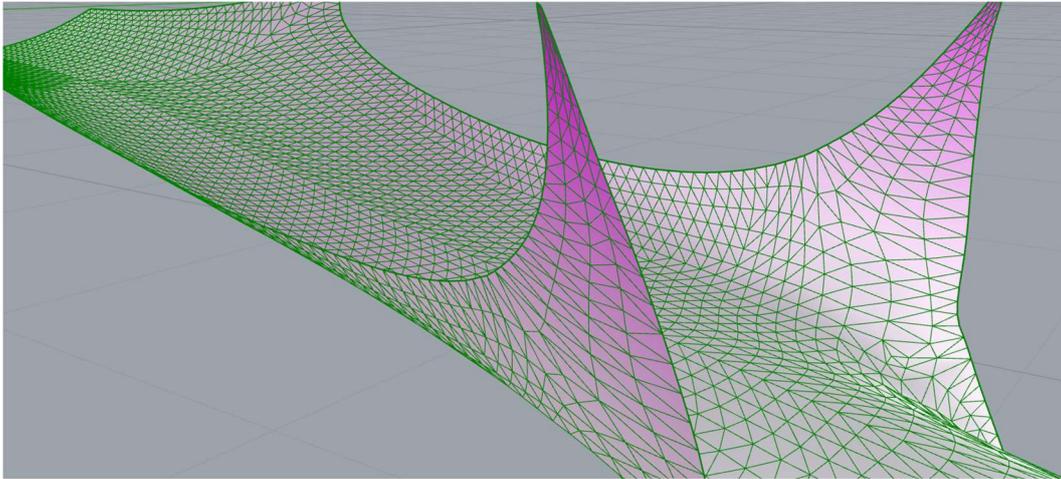


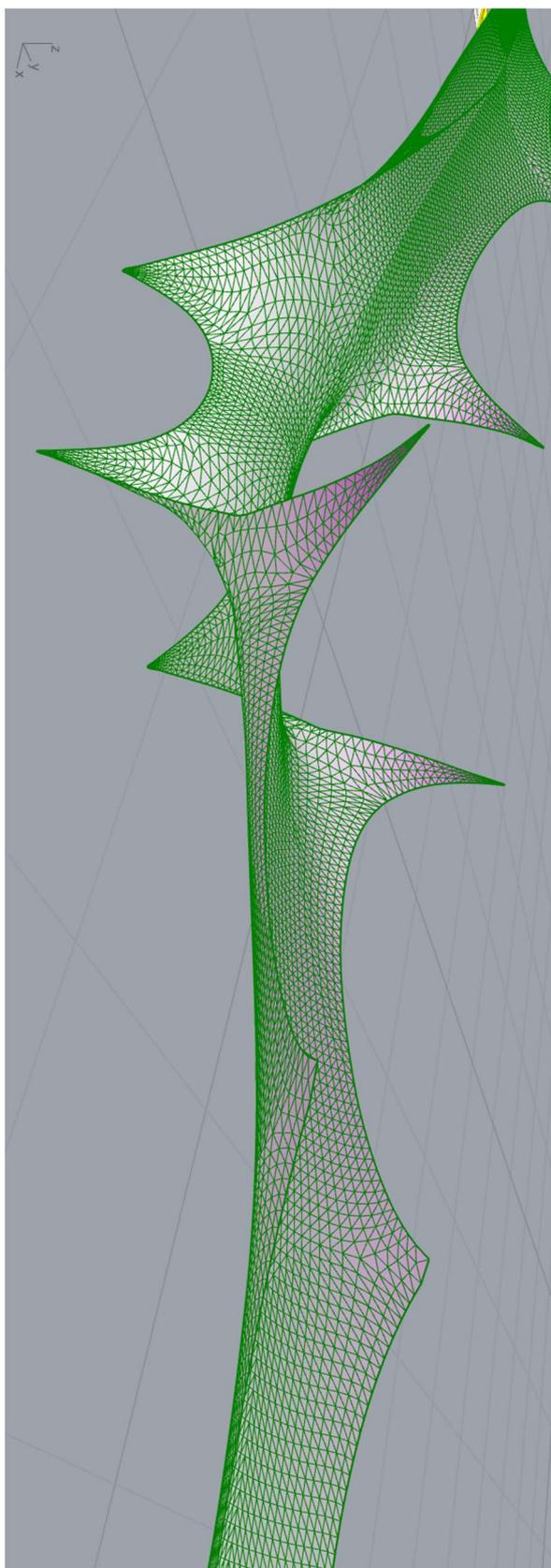
Figura 63: Zona di dettaglio massimi spostamenti

Il modello presenta uno spostamento massimo di 15 cm e rispecchia i risultati del modello licenziato iniziale. Questi spostamenti sono sempre riscontrati su condizioni di carico di solo peso proprio della volta, l'aggiunta di carichi può aumentare lo spostamento nei punti più critici della struttura.

Una struttura progettata in compressione totale fa sì che il conglomerato cementizio lavori al massimo delle sue capacità, ma introducendo zone in trazione viene meno questa affermazione. In queste zone la distribuzione delle tensioni è affidata all'acciaio che redistribuisce queste forze sulla struttura. Una valutazione errata nella quantità di armatura potrebbe comportare lesioni gravi sulla struttura e deformazioni non accettabili.

res.disp.[cm]
0.00e+00
1.55e+00
3.10e+00
4.66e+00
6.21e+00
7.76e+00
9.31e+00
1.09e+01
1.24e+01
1.40e+01
1.55e+01

Figura 64: Risultati grafici in termini di spostamento modello Costruito



5 CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati ottenuti possiamo dire che nonostante il modello iniziale di Musmeci presentasse un comportamento ideale di compressione uniforme, durante la costruzione sono state apportate delle modifiche in termini di curvatura probabilmente causate da difficoltà cantieristiche dell'epoca nel creare una struttura molto complicata dal punto di vista architettonico. La modifica più importante è sicuramente una variazione di 1,1 m (punto di massimo) nella linea d'arco tra gli appoggi dell'impalcato, mentre la linea d'asse longitudinale del ponte rispecchia il progettato con piccole variazioni fino a 7 cm. Va precisato che tali differenze vengono riscontrate non solo nell'opera di Musmeci ma nella maggior parte di tutte le strutture create in epoche passate e non.

L'opera d'arte di Musmeci, nonostante le variazioni osservate precedentemente, ha riscontrato uno stato di spostamenti analogo a quanto da egli riportato nei documenti storici. Mentre lo stato di compressione su tutta volta è venuta a mancare in alcuni punti, generando così zone interessate da comportamenti flessionali. Questi risultati sono stati generati attraverso la sola presenza dei pesi propri e non considerando l'allargamento di sezione nelle zone di appoggio. Questo non porta a una variazione dell'analisi in quanto la sezione di interesse sta nella zona di concavità positiva dove lo spessore è valutato correttamente. In questa sezione i valori delle componenti di trazione rimangono comunque moderati, ma va precisato nuovamente che l'analisi si è svolta soltanto per il peso proprio della campata e non con altre condizioni di carico. Inoltre va ricordato che la campata analizzata è la seconda (in direzione centro città).

L'analisi basata solo sul peso proprio della volta ha riscontrato la nascita di zone di trazione pressoché moderate e tollerate dalla struttura, l'inserimento dei restanti carichi, quali peso proprio dell'impalcato e i carichi variabili e permanenti sulla struttura, possono generare una crescita numerica dei valori degli sforzi di trazione provocando fessurazioni longitudinali dovute al comportamento flessionale locale.

Tutto lo scopo della trattazione è concentrato a osservare quali fossero le differenze tra il progettato e il costruito e con questo possiamo concludere nel dire che nonostante la ricerca della forma da parte di Musmeci sia stata impeccabile, dal punto di vista di cantiere invece anche quest'opera ha subito delle variazioni che hanno leggermente variato il comportamento strutturale.

*Dal progetto alla realizzazione:
Analisi tra forma e struttura del ponte
sul fiume Basento a Potenza di Sergio Musmeci*

Andrea Becce

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[1] Musmeci's Basento Bridge, 1967-75 [Archivio di Sergio Musmeci e Zenaide Zanini, MAXXI Roma].

[2] Sergio Musmeci, il ponte e la città Sergio Musmeci a Potenza, Gangemi editore (Maggio 2004).

[3] Musmeci S., Ponte sul Basento a Potenza. L'Industria Italiana del Cemento, 1977; 2; 77-98.

[4]https://www.researchgate.net/publication/355368947_A_proposal_for_the_structural_preservation_of_Musmeci%27s_Basento_Bridge_in_Potenza/figures?lo=1

[5] Documenti storici comunali, Comune di Potenza

[6] <https://concorsiawn.it/restauro-ponte-musmeci/documenti>

[7] La Ricerca della Forma. Il genio di Sergio Musmeci, effenove slrs, 2020.

[8] Alessandro Licari, "IL DESIGN PARAMETRICO PER L'OTTIMIZZAZIONE DI UNA COPERTURA RETICOLARE", Politecnico di Torino, 2021.

[9] AAD, Algorithms-aided design: parametric strategies using Grasshopper, Arturo Tedeschi, Le Penseur, Publisher, 2014.

[10] A. Tedeschi, "Architettura parametrica. Introduzione a Grasshopper: il plug-in per la modellazione generativa in Rhino", IIa edizione, Brienza (PT): Le Penseur, 2010.

[11] Martini, K., "Optimization and parametric modelling to support conceptual structural design", International Journal of Architectural Computing, 2011.

[12] https://www.vectorworks.it/2018/VWHelp/HELP_Basic_2018/50_script/Visual_Scripting.htm

[13] Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt, "Practical genetic algorithms", Wiley Interscience, 2004.

[14] Zubin Khabazi, "Algoritmi Generativi con Grasshopper", 2010.

[15] Valerio Lacagnina, "Algoritmi genetici", Università di Palermo, 2003.

[16] S.N.Sivanandam and S.N Deepa, "Introduction to Genetic Algorithms". Springer, 2008.

[17] Marco Salamina, "Field-Driven Optimization of an aggregated Free Form Structure", Politecnico di Torino, 2020.

[18] Marmo, F., Demartino, C., Sulpizio, C., Candela, G., Briseghella, B., Spagnuolo, R., ... & Rosati, L. (2018, July). Shape and structure in RC bridges: the Musmeci bridge. In Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2018, No. 12, pp. 1-4). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). Marmo, F., Demartino, C., Sulpizio, C., Candela, G., Briseghella, B., Spagnuolo, R., ... & Rosati, L. (2018, July). Shape and structure in RC bridges: the Musmeci bridge. In Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2018, No. 12, pp. 1-4). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

[19] Documentazione storica Originale, presso Consorzio Sviluppo Industriale di Potenza in liquidazione