

# Il ponte sul Basento tra calcoli e filosofia

di Roberto Spagnuolo \*

\* Amministratore unico della Softing Srl

## Introduzione storico aneddotica

E' necessario, oltre che, per me, un piacevole revival, che io introduca il mio rapporto con Sergio Musmeci. Mi laureai con lui nel 1976 ed egli di punto in bianco mi chiese se volevo fare lo "addetto alle esercitazioni" per il suo corso di Ponti e Grandi Strutture, cosa che ho fatto fino ad un anno dopo la sua morte per poi ritirarmi in silenzio, "cacciato" da un decreto "Pedini" che annullava la mia precaria posizione e ebbi il rimborso spese commisurate al costo del trasporto pari al biglietto del tram andata e ritorno per sei anni. Tornato a casa con il gruzzoletto che ammontava, se ben ricordo a 120 mila lire dell'82, cancellai l'università dalla mia mente e mi rimboccai le maniche per recuperare il tempo perduto.

Pertanto sono scomparso dalla scena e quindi non sono coinvolto in leggende consolidate nel mondo accademico. Divertente, questa mia reentré nel mondo di trent'anni fa, ed è una storia a parte che andrebbe raccontata: si deve ad un timbro posto casualmente su una mia dispensa e ritrovato dal bravo Arch. Alessandro Brodini che con paziente ricerca ha saputo rintracciarmi.

Perché mi arrogo il diritto di conoscere bene la parte più interessante dell'ingegno di Musmeci? perché casualmente avevo i suoi stessi interessi intellettuali: incapace di vedere scissa l'architettura dall'ingegneria, cercavo un sogno di poliedricità rinascimentale che è la stessa che inseguiva Musmeci.

Eravamo simili anche nella timidezza. Credo di aver preso due caffè in cinque anni con lui in un silenzio imbarazzante. Aneddoto ancora più gustoso: io a 18 anni mi ero costruito un grande telescopio riflettore. Parlando anni dopo con il costruttore dello specchio, il Prof. Marcon di San Donà di Piave per farlo alluminare, egli mi dice: ma sa che ho fornito uno specchio a un professore di Roma? Era Musmeci che aveva un telescopio simile al mio nella sua villa di Formello, ma non ci eravamo mai detti questa comune passione.

Pertanto l'aspetto vitale e saliente di Musmeci è stato quello di tentare continuamente di sintetizzare varie componenti, con una visione che posso dire rinascimentale, per dare, forse unico esempio contemporaneo, una espressione ingegneristica e costruttiva alle sue concezioni direi "filosofiche". In questo molto simile a Gaudì anche se di questi non aveva la passionalità ma una sorta invece di autoimposta "freddezza" che celava, ne sono sempre stato convinto, la sua forte timidezza.

Da una parte le teorie puramente matematiche di C. Maxwell e di A. G. M. Michell sulle strutture ottimali, dall'altra osservazioni sul modo di operare della natura tramite minimo impegno che sono ottimamente rappresentate in "Crescita e Forma" di Thomson D'Arcy, la sintesi è stata, a mio avviso, tra i pochissimi esempi, il ponte sul Basento.

Quello che spicca in Musmeci è questa sua intima e sofferta ricerca quasi mistica di una riconciliazione con la forma che deve divenire centrale e mai gratuita. In effetti egli, anche se sommessamente, denuncia a mio avviso l'assurdità della separazione dei ruoli dell'architettura e dell'ingegneria strutturale e vede un ruolo unico che non a caso è quello dell'architetto rinascimentale. E questo lo fa insegnando in una facoltà di architettura in un'epoca di imperante

confuso post-modernismo dove la ricerca di motivazioni “assolute” era completamente disciolta nel brodino di rimasticamenti linguistici dell'architettura.

A riprova di questo suo ruolo che poteva essere rivoluzionario, e al quale personalmente rimprovero solo la mancanza di coraggio, vi è il mio personale straniamento, alla sua morte, nella ricerca di una ricollocazione nella facoltà. Mi sentivo fuori posto dappertutto: corsi di composizione dove non vi era alcun controllo sulla “architettura” ma solo sull'aspetto linguistico e formale, corsi tecnici che ignoravano le finalità cui erano preposti e si perdevano in un loro esclusivo linguaggio sacerdotale: la più totale mancanza di una comprensione sempre unitaria dei fenomeni.

Poiché allora mi occupai molto di ottimizzazione strutturale, notai come le teorie di Maxwell e di Mitchell fossero studiate e ripubblicate soprattutto nell'ambito dell'ingegneria aeronautica (Aeronautical Research Council, The College of Aeronautics, Cranfield) probabilmente perché è l'ambito più naturale per problemi di minimo peso e quindi mi sento di proporre che proprio la seconda laurea di Musmeci, appunto in ingegneria aeronautica, gli abbia dato accesso a queste teorie sulle quali ha trovato un fondamento scientifico alla sua (filosofica) ricerca sulla forma.

Per dare un'idea dell'ambiente culturale che abbiamo perso e che infondo richiama quella poliedricità che era in Musmeci, citando Maxwell occorre citare la sua poesia Poppinga, della quale trascrivo la traduzione della prima strofa:

La mia anima è un nodo riflessibile,  
allacciato su un vortice liquido  
dall'Intelletto che abita l'Invisibile,  
mentre tu siedi come un collegiale  
con un attrezzo intento a scioglierlo,  
solo per trovare la mia nodità costante;  
perché tutti gli attrezzi per slegarmi  
giacciono nello spazio quadridimensionale  
dove sparge giocosa l'immaginazione  
interi viali di universi,  
dove Klein e Clifford riempiono il vuoto  
con uno sciolto, finito, spazio piano,  
dove l'infinito è distrutto senza speranza.

Sempre riportando esperienze personali, a quei tempi scrivevo i primi programmi per l'ottimizzazione strutturale sull'UNIVAC del centro di calcolo interfacoltà quindi ho un'idea piuttosto precisa del rapporto tra Musmeci e il calcolo elettronico. Musmeci, da uomo, come ho detto, interessato a tutto, aveva un HP 85 nel 1980, cioè un elaboratore da tavolo potentissimo per quei tempi ma da quel che so non poteva vederlo come uno strumento di ricerca sulla forma per un fatto culturale che sfugge a molti: l'espressione più “poetica” della fisica è il calcolo differenziale. Non certo l'algebra è il linguaggio di Dio - quando qualcuno dice lo sia la matematica - ma è innegabile la poesia sconcertante del calcolo differenziale o “infinitesimale”, come si diceva un tempo. Il calcolatore invece opera su quantità discrete e ciò “distrugge” quel fascino del continuo che fu oggetto di ricerche filosofiche fino alla fine dell'800. Solo alcuni anni dopo, la soluzione di sistemi di equazioni differenziali per via numerica ha raggiunto la potenza e la versatilità tale da ritrovare una sua speciale “poesia” (si pensi al metodo degli elementi finiti quali strabilianti simulazioni consente oggi), ma ai tempi di Musmeci, a mio avviso, questa discrasia esisteva e rendeva arida e poco affascinante la soluzione numerica per problemi di forma.

A riprova di ciò, ricordo che Musmeci con grande ironia mostrò in aula un metodo che gli informatici chiamano di “forza bruta” per affrontare con il calcolatore il problema della forma

ottimale: si dava un reticolo e si provavano tutte le connessioni possibili. Musmeci commentò: roba da americani, quelli usano sempre troppi mezzi. Cioè era un metodo inelegante, e non posso che essere in tal caso d'accordo con lui, ridemmo tutti, quella volta.

Qui mi piace ricordare un aneddoto riferitomi dall'amico Ing. Massimo Calda. Giovane laureato, racconta, convince Nervi, nello studio dove aveva iniziato a far praticantato, di studiare non ricordo più quale struttura usando i servizi di calcolo della IBM. Tornato in studio, dopo settimane di perforazione di schede con un pacco enorme di tabulati, gli viene richiesto di sintetizzare i risultati. Orgoglioso si presenta al professore il quale tira fuori un foglietto dove aveva i suoi appunti e gli dice: hai sbagliato solo del cinque per cento, bravo: aveva già fatto tutto senza uso del calcolatore. Questo aneddoto è prezioso perché non solo racconta la situazione del calcolo automatico a quei tempi ma anche come oggi stesso occorrerebbe un uso più ponderato del calcolo automatico ed una maggior "sensibilità" strutturale.

Musmeci era un gran divulgatore ma in effetti le sue concezioni sulla forma meritavano molto più spazio e molta più notorietà. Del ponte sul Basento, che ritengo l'unica sua opera ove abbia espresso le sue più profonde concezioni, si diceva che era costato troppo per via delle casseforme e che il risparmio di materiale era stato inessenziale. Si usava cioè un metro di giudizio malignamente parziale. Non si riusciva a capire il concetto unitario della concezione. E' vero che un ponte ha dei vincoli funzionali non facili da risolversi in senso formale ma questa possibilità egli ha avuto, e ritengo l'abbia molto ben sfruttata.

Tornando al Musmeci divulgatore, il meglio di se stesso lo dava in aula quando ritrovava una spontanea possibilità di esprimersi con dei ragazzi che se ne fregavano delle giustificazioni formali. Dava una sintesi tra espressione matematica e significato formale che le rendeva ad un tempo digeribili entrambe. Era il vero cocktail che si chiama architettura. Penso, ad esempio, alla bellezza di trasformare una caratteristica del materiale difficilmente poco percepibile, come la resistenza, in una percepibilissima come la lunghezza, intesa come l'altezza della "torre" più alta che si possa costruire supportando solo il suo stesso peso. Questa immagine condensa il potere del modello matematico con una previsione formale che farebbe capire ed amare entrambe a chiunque.

Quando era già malato mi disse: ora mi pento di non aver formato una "scuola". E' vero, ci sarebbe voluto un seguito a quel pensiero unificatore e un po' fuori dalle righe di quella specializzazione che anche io vedo come un male non necessario e utile solo a coloro i quali non sanno avere una visione "culturale" del loro ruolo. Ma quella riservatezza un po' snob di Sergio Musmeci non gli avrebbe mai permesso di "aprirsi" e riversarsi in una scuola. Resta un lupo solitario, come così spesso capita ai migliori.

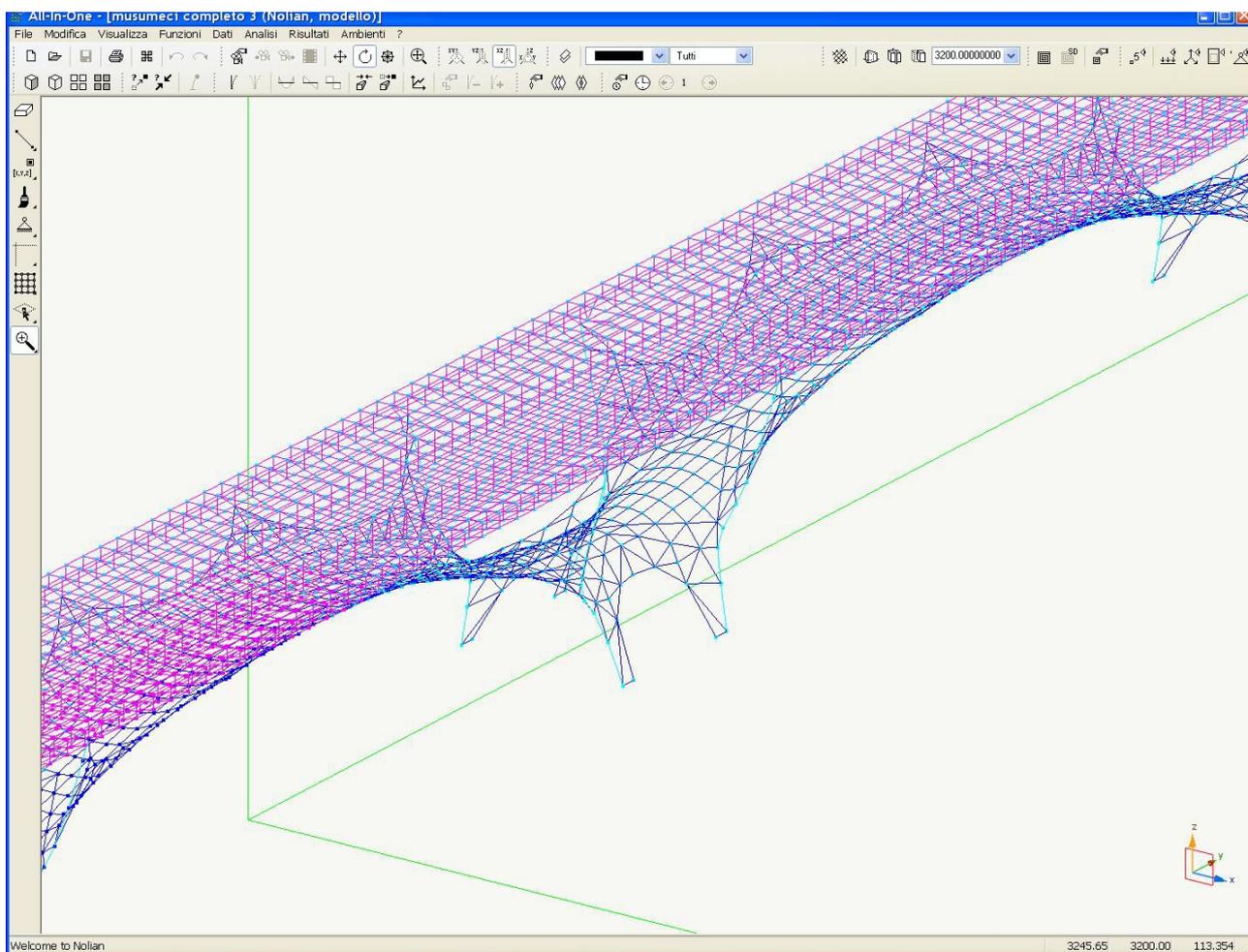
Oggi è possibile eseguire con facilità un'analisi ad elementi finiti del Ponte sul Basento per verificare se le premesse di Musmeci sulla forma si siano poi realizzate. Non so se questa indagine ha un senso. Io ho smesso da tempo di credere che la ricerca di una forma, sotto qualsiasi criterio, naturale trovi in questo la giustificazione di una scelta. Più che altro quello che personalmente mi interessa è chiudere (definitivamente?) quel cerchio che parte dalla stanzetta della facoltà di via Gramsci dove si perforavano le schede, al mio tavolo di oggi dove il mio mestiere appunto di progettare codici di calcolo per l'ingegneria, mi fa chiedere se l'iter progettuale di quei tempi trovi nei mezzi di calcolo di oggi una rassicurazione, una nuova via, una riduzione del costo di progetto o cosa altro? Credo però che se ci fosse Musmeci dietro le mie spalle mentre presento questi risultati, sarebbe curiosissimo, mi farebbe cento domande secche e intelligenti ma poi tornerebbe alle sue formulazioni progettuali che non straniavano con un'astrazione lacerante la mano di chi costruisce dall'oggetto che si sogna di costruire.

Sostanzialmente Musmeci non rappresenta affatto, a mio avviso, quel progettista che basava sul

“calcolo” le sue scelte formali, come oggi qualcuno afferma, ma egli usava il calcolo in modo diverso dai soli scopi di “verifica” ma come uno strumento – esattamente come i suoi modelli – e non come una ragione profonda di ricerca formale.

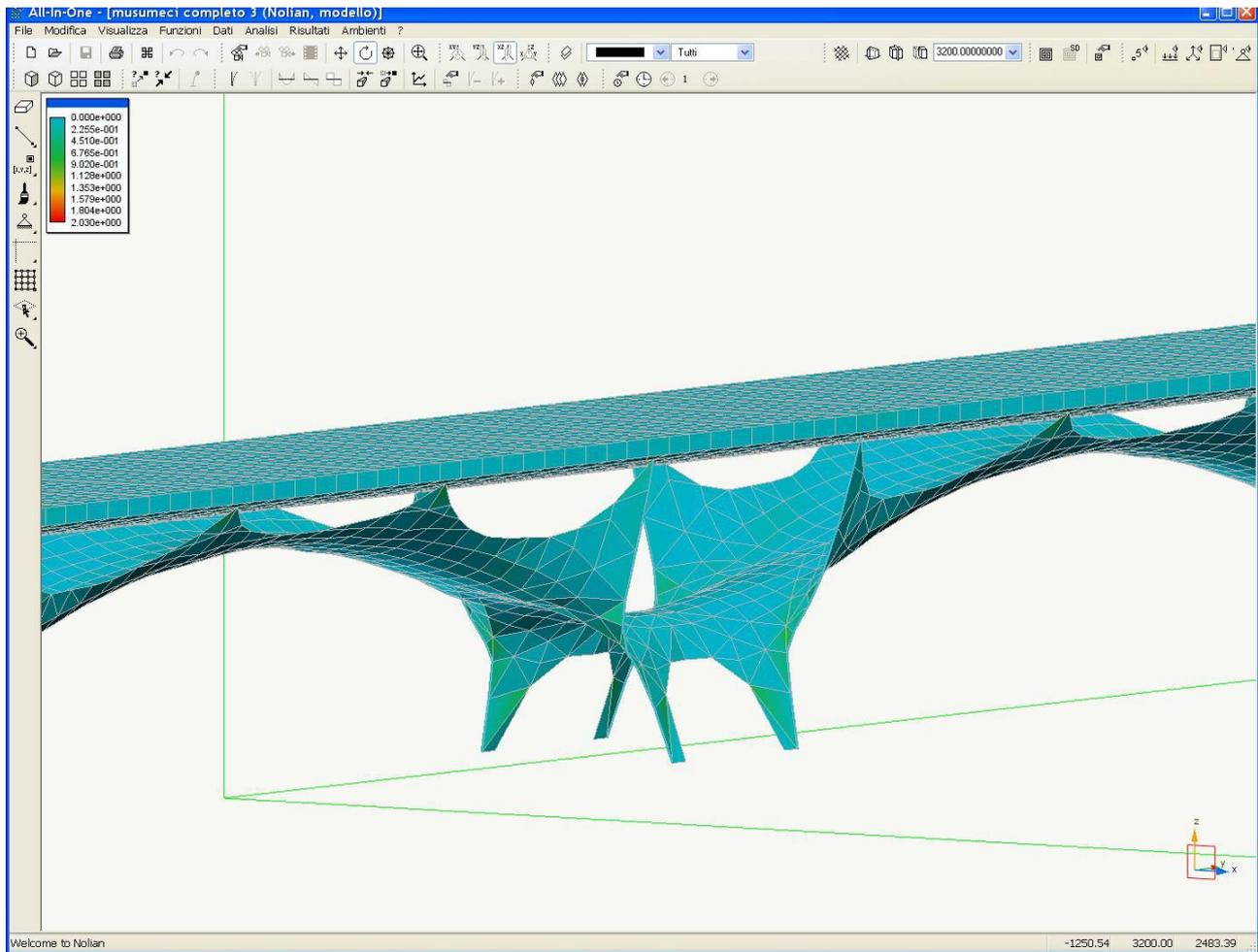
## L'analisi FEM

Ritrovati insieme al prode e paziente Brodini gli esecutivi del ponte custoditi nell'archivio del MAXXI e ottenutane la riproduzione fotografica, ci siamo messi all'opera. Il modello e l'analisi sono opera del mio collaboratore Ing. Giuseppe Pascucci che ha pazientemente costruito una valida mesh di elementi finiti della forma non semplice del ponte. Il programma di calcolo impiegato è stato Nòlian della Softing srl, società che appunto ho fondato nel 1983 e che da allora amministro.



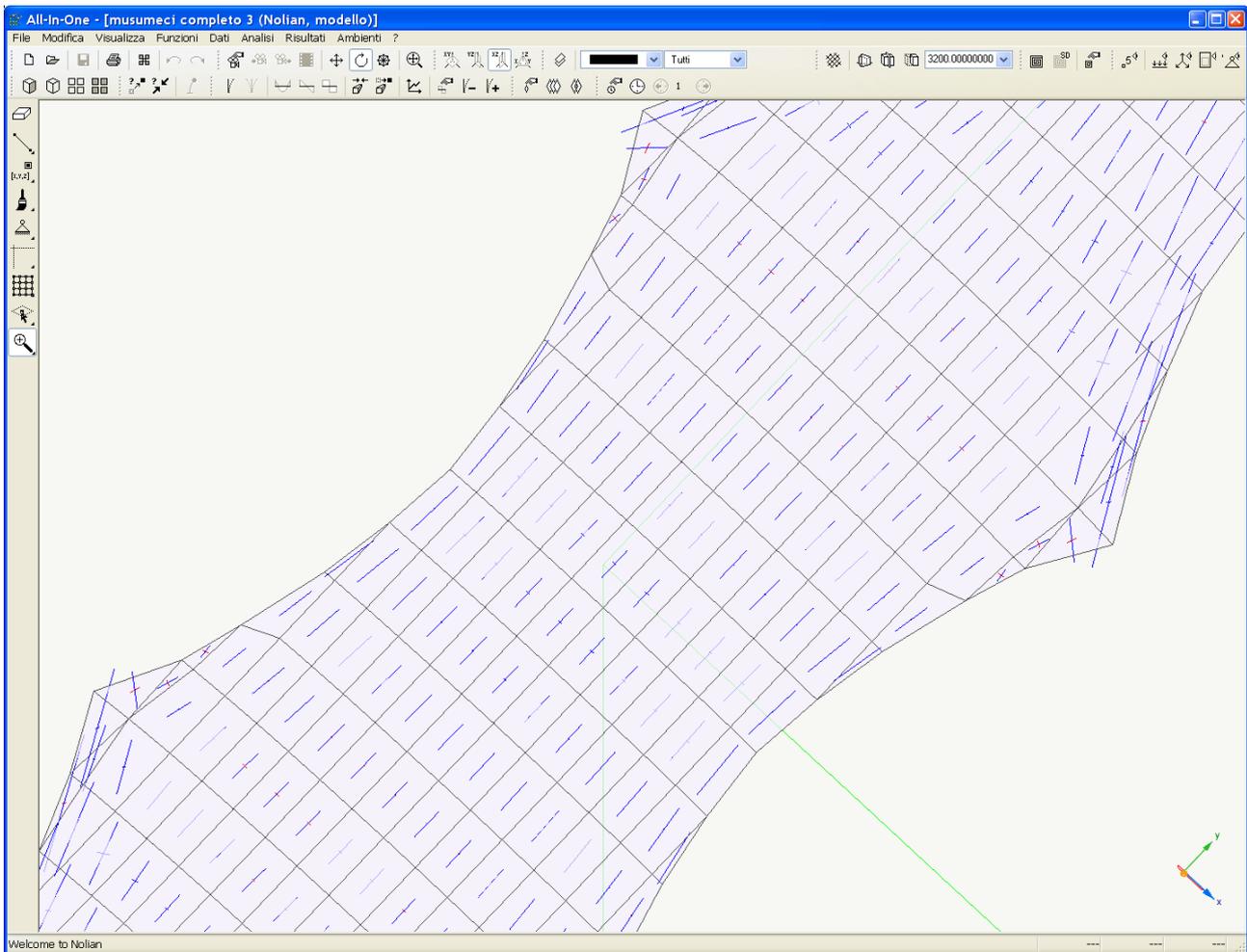
*La mesh ad elementi finiti del ponte sul Basento realizzata con il programma Nòlian della Softing*

Una specifica funzione che calcola la qualità della mesh ci ha confortato sul fatto che nonostante prevedibili concentrazioni di tensioni in punti di difficile meschiatura, la qualità ottenuta è migliore dell'1%.



*Rappresentazione a mappa di colori della qualità della mesh*

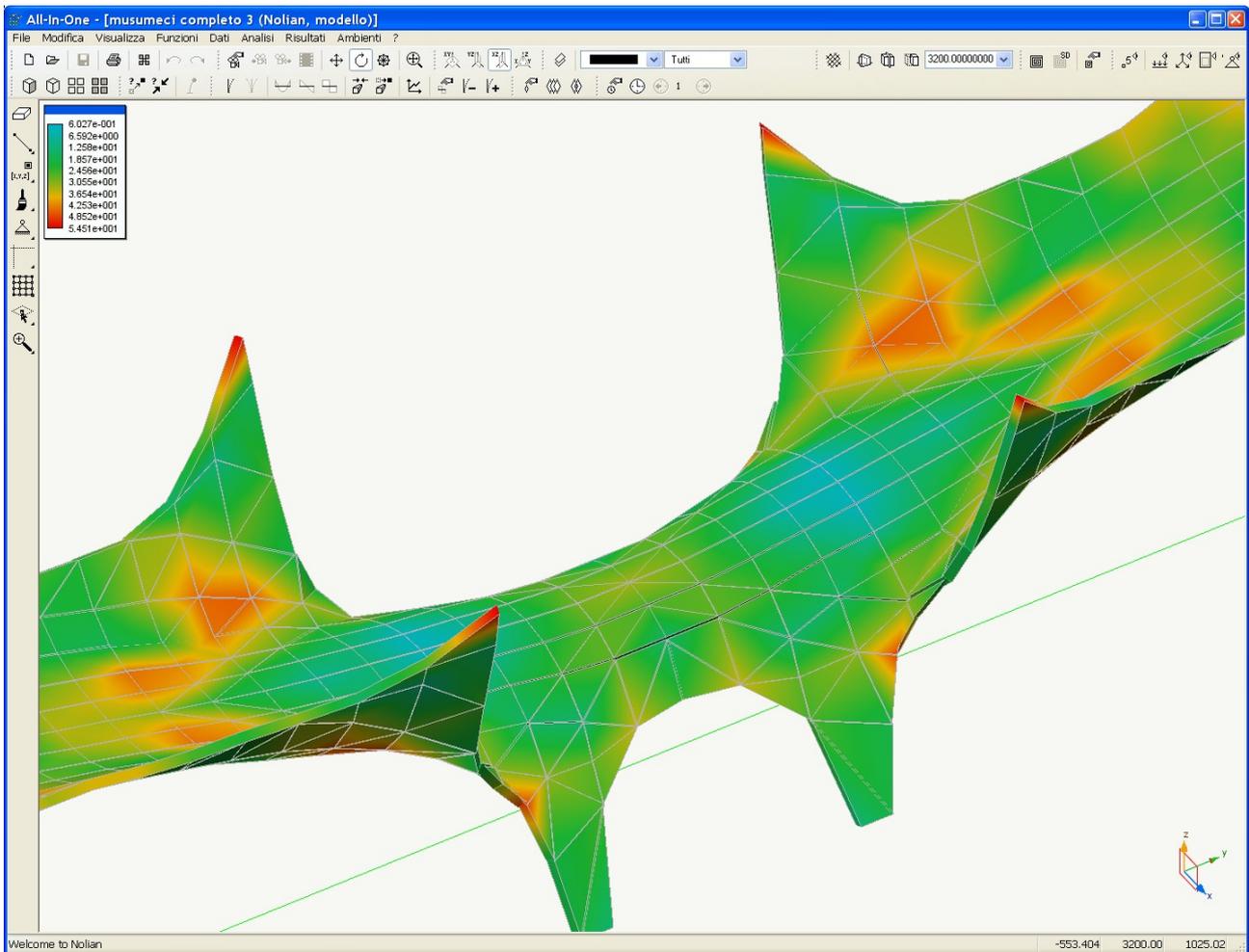
Ciò fatto non abbiamo resistito a eseguire subito un'analisi applicando il peso proprio prima, ed un carico uniforme sull'impalcato poi. Il nostro obiettivo era quello di determinare se in effetti lo stato tensionale fosse prevalentemente membranale, e questo si è verificato puntualmente, sotto queste condizioni di carico, manifestandosi, per gli effetti flessionali, solo un incremento di tensioni nella “vela” sottostante l'impalcato – supposto omogeneo il materiale – di un massimo di  $25 \text{ kg/cm}^2$ , ma questo solo in alcuni punti localizzati che si trovano soprattutto nella sella dove le vele confluiscono a terra. Non siamo in grado però di escludere che, vista la complessità della forma in quei punti, ciò non sia dovuto alla difficoltà, nel costruire il modello, di interpolare la forma dalle sezioni a nostra disposizione.



*Tensore degli sforzi membranali dove si può notare la uniformità delle tensioni di compressione accompagnate però da forte anisotropia.*

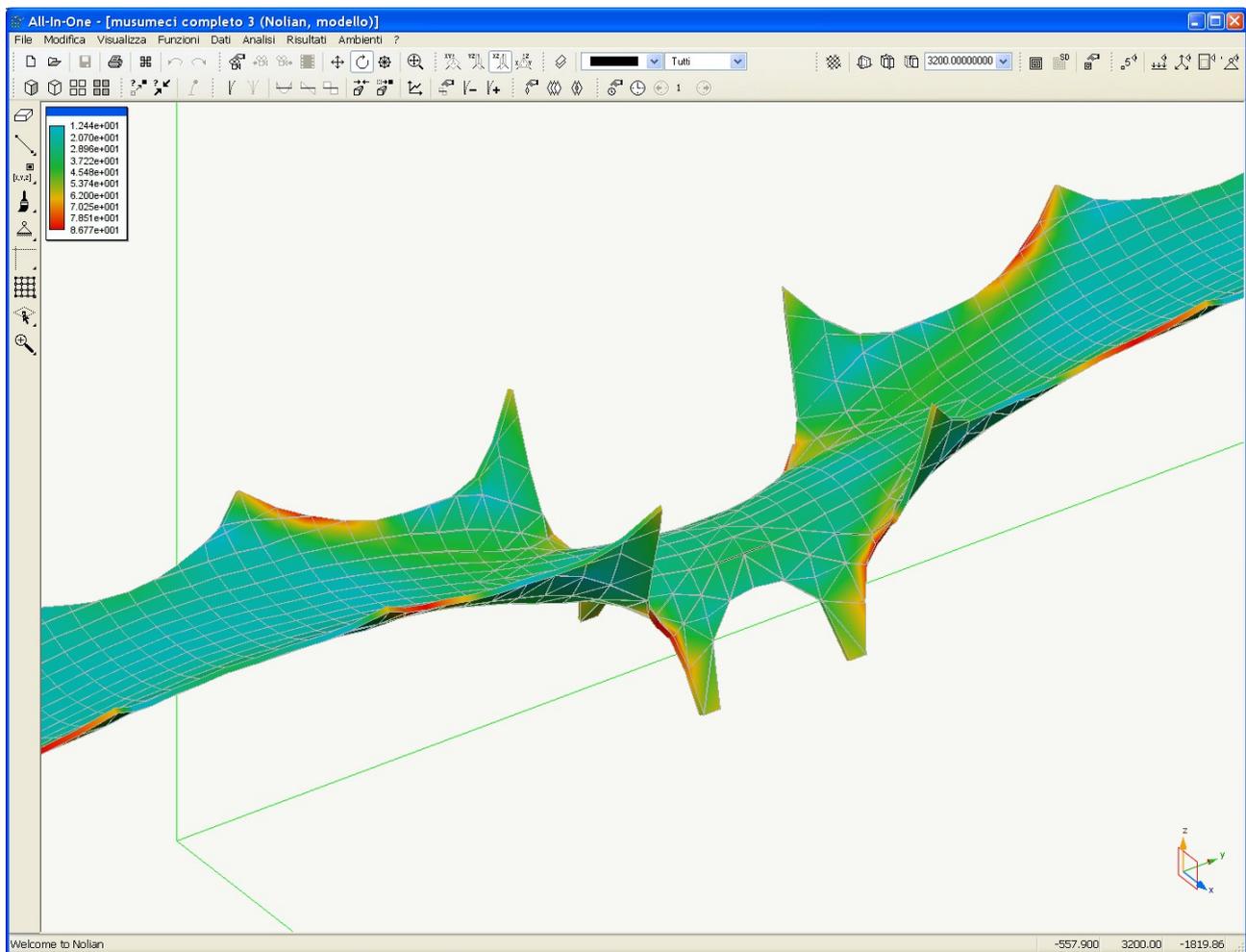
Il regime membranale raggiunge tensioni massime di compressione in direzione longitudinale di  $86 \text{ kg/cm}^2$  leggermente superiori a quelle ottenute sperimentalmente con il modello in microcalcestruzzo all'ISMES ( $78 \text{ kg/cm}^2$ ). Si conferma anche che il comportamento tensionale non è isotropo, condizione necessaria per le superfici di minimo. La differenza, peraltro contenuta, rispetto ai dati del modello la attribuiamo al fatto che noi, in questa analisi, non abbiamo ritenuto necessario modellare anche le armature ed eseguire un'analisi non lineare. Oltre ciò, la modellazione dello spessore variabile non è così rigorosa nel modello come si sarebbe voluto. Ho usato le “vecchie” unità di misura per essere congruente con i tempi cui ci riferiamo.

A questo punto abbiamo voluto sperimentare un fenomeno che si era verificato nel modello sperimentale ove si era manifestata una rottura che aveva imposto di ispessire i bordi della membrana. Abbiamo dunque rimosso tali ingrossamenti ed abbiamo in effetti riscontrato un aumento delle tensioni di compressione ai bordi dove hanno raggiunto i  $146 \text{ kg/cm}^2$ .



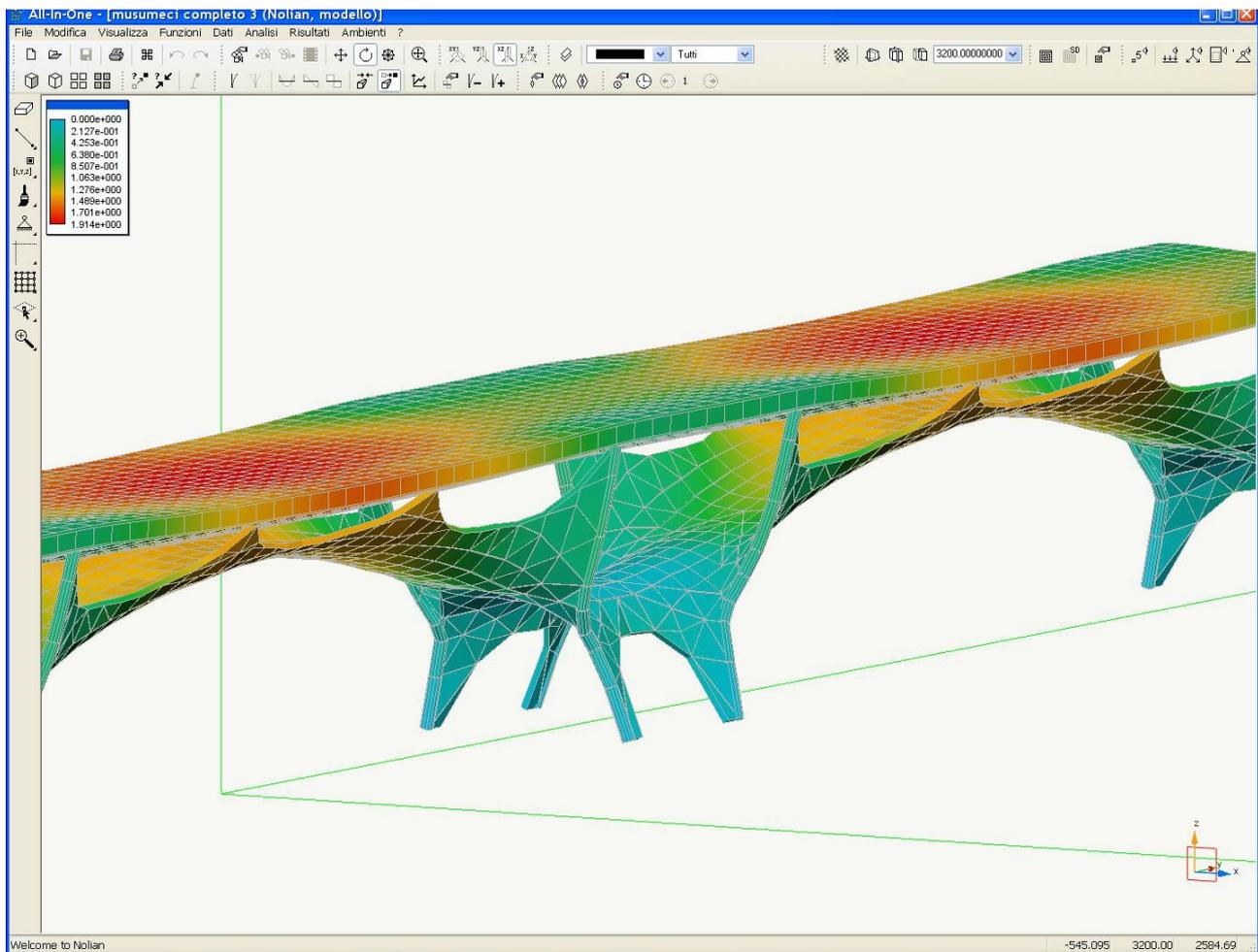
*Le sollecitazioni flessionali, benché di scarsa entità si concentrano nella sella tra due vele. Non è certo che non siano artefatti legati alla incertezza della forma modellata in considerazione della forma complessa delle zone ove si manifestano. La simmetria esclude però errori grossolani di modellazione.*

In sintesi, quello che sicuramente emerge è che il costo del modello sperimentato all'ISMES oggi si potrebbe risparmiare ma, benché vi siano programmi per la ricerca della forma, l'idea di fondo del progettista è sempre quella che domina la scena.



*Le tensioni di compressioni ai bordi nel modello privo ringrossi si manifestano esattamente come si è verificato nel primo modello sperimentale in microcalcestruzzo all'ISMES:*

Abbiamo provato anche con carichi diversamente distribuiti, ma la rigidezza dell'impalcato, il notevole peso proprio e le luci in ballo, non di così esasperata entità, ci son parse non modificare il concetto di fondo – cosa per altro ben chiara a Musmeci e pertanto qui inessenziale - per cui ci sentiamo di poter affermare che la “vela” è effettivamente sollecitata prevalentemente a compressione e da una compressione uniforme benché non isotropa.



*Deformata del ponte sotto il peso proprio*

Ricordiamo che, benché almeno a nostra conoscenza, non vi è per i gusci un teorema del “minimo strutturale” come per le strutture reticolari per cui la equi-compressione non è garanzia di minimo, ma condizione necessaria sì, dall'analisi abbiamo riscontrato una oscillazione di valori di compressione di circa il 10% che è un ottimo, forse il più significativo, indice che la forma risponde al concetto di base (lo stesso scarto è stato riscontrato nel modello, come riporta Rinaldo Capomolla nel suo: Il ponte su Basento di Sergio Musmeci, il progetto della forma strutturale prima dell'avvento del calcolo automatico, dal quale articolo ho preso i valori del modello).

### **Bibliografia essenziale**

Una bibliografia che ritraesse lo spirito di quei tempi nel settore dell'ottimizzazione strutturale è sterminata e soprattutto stimolata dalla diffusione del calcolo numerico che pareva offrire nuovi orizzonti al progetto strutturale. Però i riferimenti basati su formulazioni analitiche sono illuminanti e quindi indispensabili sono gli articoli “fondanti”:

Clerk Maxwell, (1890) Scientific Papers II, p. 175, Cambridge University Press

Riporta il basilare teorema dell'invariante strutturale ripreso poi da Musmeci sotto il nome di “azione strutturale”.

Antony G. M. Michell, (1904) “The limit of economy of material in frame structures”, Phil. Mag., 8, (4)

Inoltre nell'ormai classico:

William S. Hemp “Optimum structures”, Clarendon Press, Oxford 1973

vi è una bibliografia delle opere significative dell'epoca. Questo libro Musmeci lo scoperse in un suo viaggio a Londra vedendo con meraviglia in copertina il suo “occhio”, cioè la forma strutturale da lui pubblicata in “La statica e le strutture” nel 1971.

## **Ringraziamenti**

Ringrazio affettuosamente e non formalmente il Prof. Mark Pogovic per avermi dato questa nostalgica opportunità e per la sua cortesia che mi ha spinto a portare avanti questo piccolo percorso all'indietro.

Ringrazio l'Arch. Alessandro Brodini per la paziente ed amabile assistenza nel reperire i dati e soprattutto per aver... reperito me.

Un ringraziamento alla competente opera dell'Ing. Giuseppe Pascucci per la formazione del modello di calcolo che ha consentito i risultati qui esposti.