

Il ponte sul Basento di Sergio Musmeci. Il progetto della forma strutturale prima dell'avvento del calcolo automatico

Il ponte sul Basento (1967-1976)¹, accolto a suo tempo con giudizi contrastanti, ora con entusiasmo, ora con perplessità, segna una discontinuità nello sviluppo dell'ingegneria italiana della seconda metà del Novecento. Mentre sembra preludere a nuove estetiche strutturali, a forme complesse di simbiosi forma-struttura, si pone invece come esemplare punto di arrivo di quella linea di ricerca italiana sui gusci di calcestruzzo che aveva già prodotto alcuni isolati ma significativi risultati.

Sul piano del calcolo chiude l'epoca dell'approccio empirico-sperimentale e analitico su modello continuo mentre annuncia l'avvio di quell'approccio per modelli discreti che, con il supporto insostituibile del calcolatore elettronico, segnerà il definitivo superamento del

'regolo calcolatore'. Il ponte possiede una radice genetica a ffatto singolare: non nasce per affinamento di forme sperimentate e codificate - né si adegua, quindi, alla realtà operativa del cantiere strutturale quale in Italia si era configurato e quale si andava modificando - , ma è l'esito del tentativo di Musmeci di rovesciare il problema strutturale per come è stato impostato storicamente dalla Scienza delle Costruzioni. "Questa è stata essenzialmente concepita come l'insieme di tutte le teorie e metodi di calcolo che consentono la verifica di strutture già progettate. Resta fuori, direi per definizione, la fase creativa della forma strutturale. [...] Resta invece per la Scienza delle Costruzioni un altro compito: quello di mettere in condizioni chi progetta di [...] decidere sul-



Fig. 1 – Vista di tre arcate del ponte

l'utilizzazione strutturale della materia. [...] Per assolverlo è necessario sviluppare una vera e propria teoria delle forme, interamente basata sulle enormi potenzialità di trattamento delle informazioni offerte dai calcolatori elettronici⁷².

Quando Musmeci scrive queste parole -siamo nel 1972- il progetto definitivo del ponte è già stato redatto da più di due anni, il ponte è in costruzione e l'uso dell'elaboratore elettronico nel calcolo strutturale, a parte poche, pionieristiche applicazioni estere, si prospetta solo come una possibilità di là da venire. Il ponte, unico nel suo genere tra quelli costruiti, è composto da una successione di quattro arcate continue di cemento armato che sostengono un impalcato discontinuo a cassone, sempre di cemento armato. Le arcate, di luce netta abbastanza modesta (di soli 58,82 metri), sono concepite come volte a doppia curvatura anticlastica di spessore non sottilissimo (raggiungono un minimo di 29 centimetri lungo l'asse longitudinale), ma comunque tale da poterle considerare strutture a comportamento prevalentemente membranale.

Musmeci, nel progettarle, intraprende un percorso irto di difficoltà e segnato da molte incertezze, servendosi di mezzi che oggi riterremmo inadeguati. E segue approcci di natura diversa: quello empirico -quando studia il comportamento di modelli fisici -; quello analitico su modelli matematici al continuo; quello geometrico basato sulla statica grafica; quello numerico agli elementi finiti. Egli usa questi metodi in modo

interlocutorio, non sequenziale, anche se poi tende a presentare le prove sperimentali come convalida dei calcoli, e, perciò, metodologicamente e cronologicamente successive a questi.

La progettazione obbedisce ad una precisa concezione strutturale che Musmeci persegue con particolare convinzione e tenacia, e cioè che la forma della struttura non sia un *a priori*, una forma data di cui occorra solo verificare i margini di sicurezza, ma che debba essere "dedotta da un processo di ottimizzazione del suo regime statico"⁷³.

Ora, data la superficie di un guscio sottile, attraverso le equazioni differenziali di equilibrio è possibile, in linea teorica, trovare gli sforzi interni. Musmeci, invece, ribalta i termini della questione, osservando che le stesse equazioni consentirebbero, fissato un certo regime di sforzi, di trovare la forma della superficie. Impone allora che gli sforzi siano di compressione uniforme e isotropa, visto che con tale regime sono sfruttate al meglio le proprietà meccaniche del calcestruzzo.

Una superficie a compressione uniforme - che è caratterizzata, tra l'altro, da curvature principali di uguale valore assoluto e di segno opposto - non solo è più facilmente trattabile per via analitica, ma presenta uno sviluppo superficiale minimo per un contorno prefissato: è una 'superficie minimale'⁷⁴. Questa caratteristica fa sì che con superfici di tal genere si ottenga la massima economia di materia⁷⁵. Il loro uso renderebbe, dunque, non solo 'razionale' la soluzione del problema strutturale - così come

è posto da Musmeci - ma svincolerebbe il progettista da ogni responsabilità nella scelta della forma (a parte, ovviamente, la determinazione delle 'condizioni al contorno', che influiscono decisamente sul risultato finale). La forma obbedirebbe così solo alle leggi che generano le figure strutturali degli elementi naturali, uniformandosi ad un principio razionale di economia, che diviene perciò stesso criterio di 'bellezza'. In definitiva per Musmeci la forma strutturale ottima non è da individuare pragmaticamente all'interno delle condizioni contingenti e operative del singolo progetto, ma è da inscrivere in una concezione 'totalitaria' della struttura come rispondente al principio del 'minimo strutturale'.

Tuttavia - e torniamo al caso del ponte - la ricerca rigorosa della superficie minimale non è praticamente perseguibile per via matematica, pur essendo il suo regime internamente isostatico; è invece possibile determinarne la forma per via sperimentale: era noto sin dall'Ottocento che, per un contorno dato, un film liquido dotato di tensione superficiale, per esempio una pellicola di acqua e sapone, si dispone secondo una superficie minimale. Musmeci, per

riuscire a visualizzare la conformazione del ponte, realizza perciò un semplice modellino con un film di soluzione acquosa di sapone e glicerina teso tra un contorno a tratti rigidi (in filo di ferro) e a tratti flessibili (in filo di cotone)⁶. Prima di presentare il progetto di massima, che sarà disegnato tra giugno e ottobre del 1967, Musmeci allestisce un altro modello sperimentale in scala 1:100 da cui trae indicazioni meno vaghe sulla forma del ponte: è un modello in "gomma para" dello stesso genere di quello che aveva già usato in occasione di un progetto del 1959 per un ponte sul Tevere a Roma presso Tor di Quinto.

Il modello è ottenuto da un foglio di gomma, già opportunamente sagomato, spesso 0,8 millimetri, i cui bordi vengono rinforzati mediante strisce larghe 7 millimetri, sempre di gomma, per meglio simulare i necessari irrigidimenti perimetrali. Il modello, che riproduce una pila del ponte e le due semiarcate adiacenti, una volta messo in trazione, si trova in uno stato tensionale molto simile a quello della pellicola di acqua e sapone. Il dispositivo di prova è però congelato in modo da poter modificare la forma del foglio variando la tensione trasversale (che viene regolata intorno ad 1/10 di quella longitudinale). Il rilievo della membrana viene eseguito con un "equipaggio mobile comprendente un'asta graduata e un ago abbassabile fino alla superficie"⁷, in riferimento ad un reticolo a maglia quadrata di 2 centimetri di lato disegnato sul foglio prima della sua sollecitazione. Dato il basso grado di affidabilità

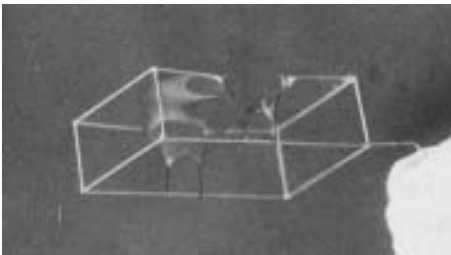


Fig. 2 - Modello in pellicola di acqua e sapone

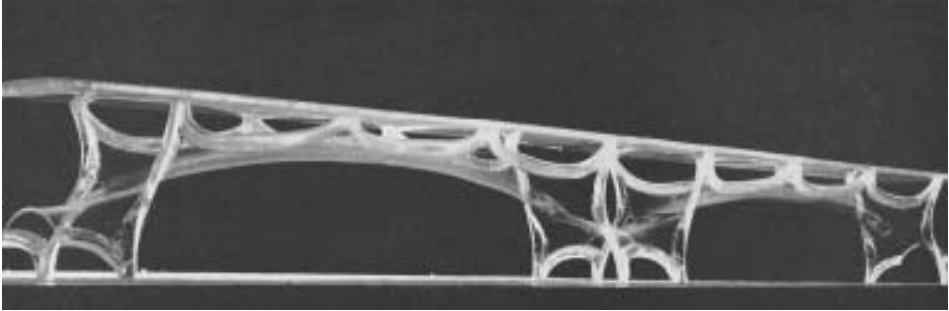


Fig. 4 – Il modello di perspex

prio¹⁰ e l'azione di carichi mobili e asimmetrici (concentrati nei punti di contatto con l'impalcato e con la fondazione), e perché i bordi, di rigidità non nulla e di grande sviluppo lineare, avrebbero provocato inevitabilmente disturbi flessionali non trascurabili.

Prima di affrontare il progetto definitivo del ponte, la cui fattibilità “nelle sue linee generali è [...] garantita dalle verifiche già effettuate”¹¹, Musmeci decide di condurre altri esperimenti questa volta su un modello di perspex per valutare grosso modo l'entità delle perturbazioni al regime di membrana, prevedere le conseguenze degli stati di coazione - quali quelli causati dalle variazioni di temperatura e dai cedimenti delle fondazioni -, controllare infine il comportamento dell'impalcato.

Programma perciò due serie di prove: la prima, l'unica effettuata, su un modello in scala 1:100 di due campate complete costruito presso il Laboratorio di Ricerche su Modelli della facoltà di Ingegneria di Roma; la seconda su un modello in scala 1:50 che si sarebbe dovuto realizzare presso l'Istituto di Tecnica delle Costruzioni della facoltà

di Architettura di Roma.

Il primo modello, lungo 1,40 metri, completo di impalcato e con i bordi rinforzati, viene costruito servendosi di una forma di legno massello e di una controforma di alluminio fuso: il perspex viene piegato a caldo tra le due forme e poi tagliato secondo i disegni. Viene poi sottoposto a diverse condizioni di carico ripartito, misurando le conseguenti deformazioni mediante quattordici estensimetri elettrici. I risultati, pur conformi alle previsioni, non verranno considerati molto attendibili per la scarsa sensibilità della prova. Essa tuttavia rivela una notevole capacità di adattamento della struttura e significative riserve di resistenza.

Come già detto, la seconda serie di prove non verrà eseguita, anche perché nel frattempo Musmeci riesce a determinare con maggiore precisione la forma della superficie media della volta servendosi di un calcolo approssimato della geometria delle pellicole di acqua e sapone pubblicato da Rudolf Trostel già nel 1962¹². Il procedimento di calcolo, che prevede uno sviluppo in serie

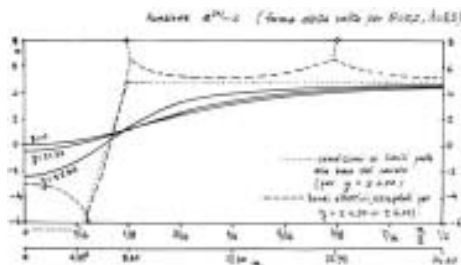


Fig. 5 – Geometria della volta determinata col calcolo approssimato (dai Calcoli statici)

di coseni, viene condotto da Musmeci sotto le condizioni semplificative che la membrana sia priva di peso, a giacitura sub orizzontale, tesa tra bordi rettilinei rigidi, invece che tra bordi liberi¹³, e col solito coefficiente di omotetia trasversale $\epsilon = 3,5$. Queste condizioni, anche a causa dei termini dello sviluppo in serie che sono stati trascurati, permettono di ottenere dati geometrici rappresentativi solo lungo la linea d'asse longitudinale e sempre meno accettabili man mano che ci si sposta verso i bordi. Comunque, almeno lungo l'asse, le differenze geometriche tra la forma così determinata e quella definita a suo tempo col modello di para risultano modeste, con un massimo di 10 centimetri e con un errore medio di circa 5 centimetri.

Fissata la geometria della superficie, Musmeci passa ad esaminare il comportamento statico del ponte nel suo insieme. E qui lo studio viene svolto “riportandosi agli schemi tradizionali dei sistemi monodimensionali piani ad asse rettilineo e curvilineo”¹⁴. La struttura viene scomposta in un insieme di aste dotato di cerniere virtuali collocate nei punti di rigidezza ridotta (vincoli al suo

lo e all'impalcato, sezioni in cui la curvatura trasversale cambia segno). Le cerniere consentono di ridurre a 7 il grado di iperstaticità della campata; grado che diminuisce ulteriormente (fino a 2) a seconda della simmetria o asimmetria dei carichi. Imposti gli enti geometrici della semicampata relativi a nove sezioni trasversali distanziate di 4,325 metri, Musmeci trova per ciascuna di esse le tensioni massime generate dalle quattro condizioni di carico principali¹⁵ e fissa infine l'armatura longitudinale, che sarà di modesta entità e pari allo 0,7% (0,9% in chiave)¹⁶.

Questo passo consente di precisare meglio la geometria della superficie: rispetto alla forma ottenuta col rilievo del modello di para e col calcolo approssimato a membrana, vengono abbassate leggermente, fino ad un massimo di 15 centimetri, le ordinate della volta lungo la linea d'asse longitudinale, in considerazione che “limitati scostamenti dalla forma teorica limite comportano solo un certo allontanamento dalla condizione ideale di compressione uniforme. Questo allontanamento è del resto inevitabile in condizioni di carico dissimetriche”¹⁷.

Dopo questa verifica ‘classica’ non verranno fatti altri calcoli, anche se non era ancora nota la risposta della volta lungo le zone di margine e non era stata valutata appieno l'interferenza tra l'impalcato e le arcate.

Prima di passare alla costruzione, il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, considerata l'eccezionalità della struttura e le incertezze sul suo reale

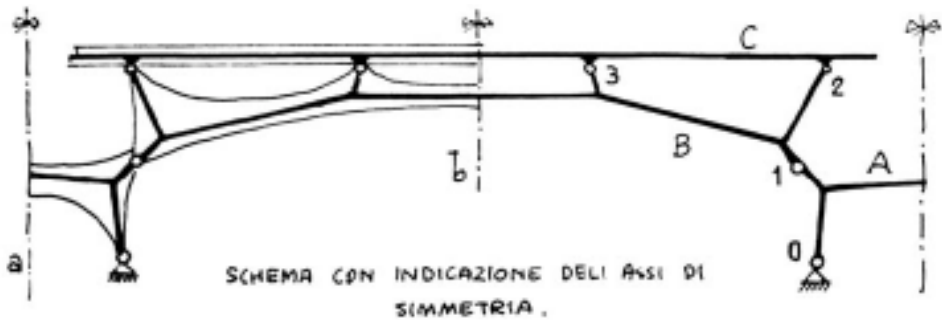


Fig. 6 – Schematizzazione ad elementi monodimensionali (dai Calcoli statici)

comportamento, impone di effettuare verifiche di resistenza su un modello di microcemento, in modo da confermare la validità dei risultati ottenuti con lo schema monodimensionale, il solo che abbia consentito di valutare il reale cimento statico delle volte.

Il modello viene realizzato presso l'Istituto Sperimentale Modelli e Strutture di Bergamo, a spese del committente, il Consorzio per l'area di sviluppo industriale della provincia di Potenza, che aveva già sostenuto le spese del precedente modello di perspex. Il modello, in scala 1:10 e lungo quasi 14 metri, è questa volta la perfetta riproduzione

ne, anche nelle armature, del ponte da costruire⁸. Esso consente, tra l'altro, di materializzare con esattezza la forma della volta, di correggere, quindi, errori di disegno della superficie e di determinare la precisa geometria dei bordi⁹.

Le prime prove in campo elastico rivelano subito un comportamento imprevisto nelle zone di chiave: la nascita di compressioni parassite nell'impalcato e di trazioni nella volta di entità tale da modificare in modo assolutamente non trascurabile il regime degli sforzi. Musmeci trova la soluzione ispessendo notevolmente i bordi della volta nella zona di chiave e frazionando ulterior-



Fig. 7 – Il modello in microcemento allestito presso i laboratori dell'ISMES di Bergamo



Fig. 8 – Cassaforma di gesso utilizzata per realizzare il modello di microcemento

mente l'impalcato in corrispondenza della mezzeria della campata²⁰.

Le accurate prove elastiche che seguono, effettuate sotto varie combinazioni di carico, mostrano che i valori medi delle tensioni longitudinali misurate su cinque sezioni della volta (pari a 70 kg/cmq sotto i carichi permanenti e a 100 kg/cmq a pieno carico) presentano differenze minime, del 5% circa, rispetto ai valori di calcolo; mentre il confronto sezione per sezione mostra scarti decisamente maggiori: di circa il 25%

in più nella sezione di imposta e di circa il 25% in meno nella sezione di sommità. In ultimo il modello viene portato a rottura nel corso di una prova eseguita alla fine di marzo del 1971: il modello mostra un comportamento elastico fino ad un moltiplicatore di carico prossimo a 2, ma non si può procedere oltre poiché al moltiplicatore 2,18 si rompe accidentalmente uno dei blocchi di fondazione di estremità, che non erano stati armati. L'andamento della prova fa comunque stimare un moltiplicatore di collasso almeno pari a 3.

La costruzione, avviata nella seconda metà del 1971, per la parte strutturale si conclude ufficialmente con la prova di carico effettuata il 22 maggio 1975 sotto la direzione di Arrigo Carè; questi, nella sua relazione di collaudo, non fa cenno a verifiche strutturali diverse da quelle appena descritte²¹. Musmeci continuerà tuttavia a fare altre analisi teoriche che non incideranno sull'assetto ormai definito del ponte.

Si tratta di una verifica effettuata con i metodi della statica grafica; di un calcolo 'manuale', necessariamente molto semplificato, alle differenze finite condotto su un reticolo di circa 250 nodi a partire dalla configurazione già progettata; di un calcolo numerico, più preciso, eseguito a ponte già costruito con l'aiuto di un elaboratore elettronico - anche se sotto le condizioni restrittive di compressioni uniformi e di bordi dati, e limitatamente ad un'ampia zona circostante il punto di flesso della linea mediana longitudinale.

Questi due ultimi tentativi sono il

segnale che un nuovo processo si stava avviando nel campo del calcolo strutturale: un processo inarrestabile che avrebbe visto il definitivo, sostanziale superamento dell'approccio analitico-sperimentale a favore del calcolo automatico e della contestuale restituzione grafica.

Di esso Musmeci, dando per scontato l'uso "quantitativo" del calcolatore come strumento per le verifiche statiche, aveva intravisto le straordinarie possibilità come strumento "per la costruzione di una vera e propria teoria delle strutture, capace di contribuire alla scoperta ma anche all'invenzione di

nuove forme strutturali"²². Tuttavia l'ingegnere romano, tra i maggiori della sua generazione per acume scientifico e per capacità inventive, scomparso prematuramente nel 1981, potrà solo immaginare quanto sarebbe stato "utile seguire con immediatezza i cambiamenti [di forma della superficie di un guscio] su un terminale video di un calcolatore opportunamente programmato; [...] disegnare con una penna a luce su uno schermo «sketchpad» [...] la forma dei bordi e osservare subito la forma che ne consegue per il guscio; ridisegnare i bordi e osservare la forma che si modifica, sotto i nostri occhi"²³.

¹ Tra i contributi più recenti sul progetto e sulla costruzione del ponte segnalò innanzitutto la tesi di Alessandro Tursi, "La tensostruttura rovesciata. Il guscio membranale di Sergio Musmeci dal *formfinding* alla costruzione del ponte sul Basento", dottorato di ricerca "Ingegneria edile: architettura e costruzione", XV ciclo, Università di Roma 'Tor Vergata'. Segnalò poi il libro curato da Margherita Guccione, *Il ponte e la città. Sergio Musmeci a Potenza*, Gangemi Editore, Roma 2004², e il mio articolo *Il ponte sul Basento, ovvero l'invenzione di una forma "ancora senza nome"*, «Casabella», 739-740, 2005-2006, pp. 12-19. Ringrazio la Direzione generale per l'architettura e l'arte contemporanea del Ministero per i Beni e le Attività Culturali per avermi consentito di consultare il Fondo archivistico Sergio Musmeci; ringrazio in particolare Margherita Guccione ed Erilde Terenzoni.

² S. MUSMECI, *Il calcolo elettronico e la creazione di nuove forme strutturali*, in *Architettura & Computer*, a cura di M. Zevi, Roma, Bulzoni Editore, 1972, pp. 147-166.

³ S. MUSMECI, *Ponte sul Basento*, «L'Industria Italiana del Cemento», 2, 1977, pp. 77-98.

⁴ "Le superfici minimali sono, per certi riguardi, le equivalenti bidimensionali delle linee rette, che presentano lunghezza minima tra due punti assegnati, ed anche equivalenti nello spazio alle linee geodetiche sulle superfici". A. LIVADIOTTI, S. MUSMECI, "Viadotto sul fiume Basento - I stralcio. Ponte in c.a. - Calcoli statici", s. d., pp. 34 e 35. L'ingegnere Aldo Livadiotti, incaricato inizialmente del progetto, si occuperà in poi solo della progettazione generale e del coordinamento tecnico, lasciando a Musmeci la responsabilità del progetto strutturale.

⁵ In sostanza Musmeci generalizza quanto già ampiamente noto nel caso dei sistemi monodimensionali, ove il problema di determinare una forma semplicemente compressa è risolvibile facendo coincidere, tramite l'analogia di Hooke, la linea d'asse col poligono funicolare delle forze assegnate.

⁶ In questa fase preliminare di studio la volta era ancora immaginata come vincolata rigidamente per lunghi tratti rettilinei all'impalcato; in ciò riprendendo una soluzione già studiata per il progetto del ponte sul fiume Lao del 1964.

⁷ A. LIVADIOTTI, S. MUSMECI, "Viadotto... Calcoli statici", cit., p. 52.

⁸ Nella relazione di calcolo Musmeci sostiene senza riserve che "non è necessariamente questa la condizione migliore della volta". A. LIVADIOTTI, S. MUSMECI, "Viadotto... Calcoli statici", cit., p. 4.

⁹ *Ibidem*, p. 29.

¹⁰ Sul momento Musmeci considera trascurabile il peso proprio della volta; questo è stimato pari al 25% dei carichi totali, il resto dei quali verrebbe trasmesso dall'impalcato e dagli appoggi di fondazione alla volta tramite i bordi liberi, così come accade per la pellicola saponata.

¹¹ A. LIVADIOTTI, S. MUSMECI, "Viadotto sul fiume Basento - Elaborati generali (variante) Relazione tecnica illustrativa, quadro economico generale", s. d., p. 12.

¹² Musmeci individua questo procedimento nell'edizione in inglese, del 1967, del noto libro di Frei Otto sulle tensostrutture (vol. I). R. TROSTEL, *Calculation of membranes* (vedi il cap. 12 -*Soap films*, pp. 290-297), in F. OTTO, *Tensile structures*, 2 vol., Cambridge - London, MIT Press, 1967, vol. I, pp. 170-297.

¹³ I bordi erano posti su piani verticali longitudinali distanti 8 metri. La larghezza massima della volta in proiezione orizzontale era, al momento di questi calcoli, di 14 metri, poi ri-

dotta nella versione definitiva a 12,5 metri.

¹⁴ A. LIVADIOTTI, S. MUSMECI, "Viadotto... Calcoli statici", cit., p. 59. Si tratta di uno schema di calcolo collaudato che Musmeci aveva già impiegato, ad esempio, nel calcolo del ponte sull'Astico del 1956.

¹⁵ In ciascuna delle nove sezioni le tensioni massime assolute variano tra 89 e 105 kg/cmq, con una media di 97 kg/cmq che si riduce a 95 tenendo conto dell'assestamento plastico.

¹⁶ Si fa notare che nell'opera realizzata, a causa dell'aumento della sezione resistente in chiave, la percentuale di armatura longitudinale risulterà, qui, ulteriormente ridotta allo 0,45%, valore inferiore a quello consentito dalle norme.

¹⁷ A. LIVADIOTTI, S. MUSMECI, "Viadotto... Calcoli statici", cit., p. 47.

¹⁸ La forma del ponte era stata nel frattempo leggermente modificata, sia per ragioni funzionali che per migliorarne visivamente la sagoma.

¹⁹ I bordi, per poter risultare solo compressi, devono essere tracciati secondo linee sghembe di curvatura normale nulla: linee di difficile individuazione servendosi di disegni in proiezione ortogonale.

²⁰ Giunti a seggiola interrompevamo già la continuità dell'impalcato in corrispondenza delle pile per assecondare le deformazioni di origine termica.

²¹ A. CARÈ, "Viadotto sul Basento. Collaudo statico - Relazione di collaudo", 25 settembre 1981, p. 3.

²² S. MUSMECI, *Il calcolo...*, cit., p. 159.

²³ *Ibidem*, p. 161.