



Costruzioni metalliche e ingegneria strutturale

Metal constructions and structural engineering

Prof. Ing. Alfredo SOLLAZZO^(*)

1. Premessa

La *Rivoluzione industriale*, sviluppatasi nel corso del XIX Secolo, promosse lo sviluppo dell'*industria siderurgica* cui conseguì la diffusione delle *costruzioni metalliche* e, in particolare, dei *ponti* posti a servizio delle linee ferroviarie in Europa e negli Stati Uniti d'America. Le esigenze progettuali che così si determinarono fecero sì che, dai principi della Scienza del costruire già affermatasi nei primi decenni dell'Ottocento, fossero dedotti i concetti, i procedimenti, i metodi di calcolo che dettero luogo alla moderna *Ingegneria strutturale*. Nel suo ambito ebbero grande rilievo, fino a tutta la prima metà del Novecento, i metodi *grafici* di calcolo, impiegati da diverse generazioni di tecnici e ancor oggi dotati, in qualche caso, di una certa validità e utilità.

2. Considerazioni introduttive

In uno scritto [24] di qualche anno fa si è trattato del cammino che l'*Arte del costruire* ha idealmente percorso nel trasformarsi in una moderna disciplina matematica, rilevando come l'evoluzione sia passata attraverso tre periodi di lunghezza peraltro molto diversi tra loro. Il *primo*, esteso dalle origini della civiltà alla fine del XV Secolo, fu caratterizzato dall'assenza di conoscenze scientifiche specifiche relative alla *Resistenza dei materiali* come oggi intesa, e nel suo corso, pur in presenza di molte felici intuizioni, le costruzioni furono realizzate sostanzialmente sulla base delle esperienze gradualmente acquisite e della pratica di cantiere. Nel *secondo*, comprendente i Secoli XVI, XVII e XVIII, a seguito dello sviluppo della Matematica e della Fisica, fu possibile ottenere su basi razionali la soluzione di singoli problemi connessi con la statica delle costruzioni. Il *terzo*, infine, esteso dall'inizio del XIX Secolo ai nostri giorni, comincia nel decennio 1820/30, quando fu ideato il *modello matematico* su cui venne fondata la moderna *Scienza del costruire* che riunifica in una teoria unitaria vecchi e nuovi risultati di rilevanza ingegneristica, da convalidare sperimentalmente e da mettere alla prova nella pratica costruttiva.

^(*) Professore emerito del Politecnico di Bari.

1. Introduction

The Industrial Revolution, developed during the nineteenth century, promoted the development of the steel industry that was followed by the spread of metal constructions and, in particular, of bridges placed at the service of railway lines in Europe and the United States. The design requirements thus determined made it so that the concepts, processes, methods of calculation that gave rise to modern structural engineering were inferred from the principles of Science of building already established in the first decades of the nineteenth century. The graphic calculation methods employed by several generations of technicians and provided even today with certain validity and utility, in some cases had great importance in the field, until the entire first half of the twentieth century.

2. Introductory remarks

In a paper [24] a few years ago, the path that the Art of building has ideally run was dealt with turning into a modern mathematical discipline, noting how evolution has passed through three periods with a very different length from each other. The first, extended from the origins of civilisation in the late fifteenth century, was characterised by the absence of specific scientific knowledge about the Strength of materials as now understood, and in its course, despite the many happy intuitions, buildings were built essentially on the basis of experience gradually acquired and construction practice. In the second, including the XVI, XVII and XVIII Centuries, following the development of Mathematics and Physics, it was possible to obtain the solution of individual problems associated with construction statics on a rational basis. Finally, the third, that extended from the beginning of the nineteenth century to the present day, begins in the 1820/30 decade, when the mathematical model was created on which the modern Science of building was built that unifies old and new results of engineering importance in a single theory, to be validated experimentally and to test in construction practice.

^(*) Professor emeritus, Politecnico di Bari.

OSSERVATORIO

Il presente lavoro ha lo scopo di approfondire quanto avvenne nel *terzo* dei periodi appena ricordati e in particolare nel segmento temporale esteso alla seconda metà dell'Ottocento, quando si sviluppò nei paesi più progrediti l'*Ingegneria strutturale*. Questa disciplina ebbe la funzione di adattare alle esigenze dei tecnici i risultati teorici prodotti da matematici e accademici e di avviare così a soluzione i problemi sempre più complessi che lo sviluppo della società andava ponendo ai costruttori in quegli anni di grande progresso economico e sociale. Con essa il costruire assunse la dignità di una scienza che si sarebbe affermata ed evoluta nel corso del Novecento fino ai nostri tempi.

Tutto ciò fu possibile per effetto della *Rivoluzione industriale* che si ebbe in Europa, e più precisamente in Inghilterra, già negli ultimi decenni del XVIII Secolo per poi diffondersi nelle regioni più evolute del Continente, specialmente nella seconda metà del XIX. Tra l'altro essa comportò lo sviluppo dell'*industria siderurgica* da cui derivò l'impiego dei metalli nelle costruzioni. L'affermazione delle strutture metalliche pose ai tecnici problemi assolutamente nuovi e richiese l'elaborazione di metodi di calcolo innovativi, sconosciuti ai realizzatori delle costruzioni in muratura, fino ad allora pressoché egemoni nell'ambito dell'ingegneria civile. Nacque così la nuova scienza che sviluppò tra l'altro i metodi della *Statica grafica*, molto usati dai progettisti dell'Ottocento e ancor oggi significativi, talvolta utili in un mondo ormai prepotentemente dominato dal calcolo automatico; essi costituiscono un bagaglio culturale importante nella storia del costruire sulla cui rilevanza può ancora essere opportuno riflettere.

3. Rivoluzione industriale e industria siderurgica

La *Rivoluzione industriale* si determinò, a partire dagli ultimi decenni del XVIII Secolo, per effetto della trasformazione delle strutture produttive ed industriali delle regioni europee più evolute a seguito dell'affermarsi di nuove tecnologie. È consuetudine distinguere una *prima rivoluzione*, nata appunto e sviluppatasi nel Settecento in Inghilterra, che interessò in una certa misura anche il Belgio e parti della Francia e della Germania; ed una *seconda rivoluzione*, che, dopo circa un secolo, nella seconda metà dell'Ottocento, si estese a diversi altri Paesi europei e agli Stati Uniti d'America [17], [18].

Il fenomeno ebbe inizio con le importanti invenzioni che si ebbero appunto tra il 1770 e il 1780 e provocarono un vero e proprio salto di qualità per le tecnologie industriali. Uno dei settori trainanti fu certamente quello delle industrie tessili che si giovarono tra l'altro del miglioramento delle macchine filatrici e dell'impiego dei telai meccanici. Ma fu fondamentale soprattutto la macchina a vapore che consentì progressi nei settori produttivi più svariati, dall'agricoltura all'industria, ai trasporti. Nel secondo decennio dell'Ottocento si ebbe la prima nave a vapore, cui seguirono la prima locomotiva e le

This paper aims to investigate what happened in the third of the periods just mentioned and in particular in the time segment extended to the second half of the nineteenth century, when Structural Engineering developed in the more advanced countries. This discipline had the function of adapting theoretical results produced by mathematicians and academics to the needs of technicians and to start solving the increasingly complex problems that the development of society was posing to manufacturers in those years of great economic and social progress. With it, construction took on the dignity of a science that would be established and developed in the twentieth century to the present day.

All this was possible due to the Industrial Revolution that took place in Europe, and more specifically in England, already in the last decades of the eighteenth century that then spread in the most advanced regions of the continent, especially in the second half of the nineteenth century. Among other things it entailed the development of the steel industry from which the use of metals in construction derived. The success of metal structures posed absolutely new problems to technicians and required the development of innovative methods of calculation, unknown to makers of masonry construction, hitherto almost hegemonic in civil engineering. Thus the new Graphic statics science that developed among other methods was born, which are widely used by designers of the nineteenth century and are important even today, sometimes useful in a world now overwhelmingly dominated by automatic calculation; they are an important cultural heritage in the history of construction on the importance of which it can still be useful to ponder.

3. Industrial Revolution and steel industry

The Industrial Revolution was determined, since the last decades of the eighteenth century, due to the transformation of the productive and industrial structures of the most advanced European regions following the emergence of new technologies. It is customary to distinguish a first revolution, in fact born and developed in the eighteenth century in England, which affected to a certain extent Belgium and parts of France and Germany; and a second revolution, that after almost a century, spread to several other European countries and the United States, in the second half of the nineteenth century [17], [18].

The phenomenon began with the important inventions that occurred precisely between 1770 and 1780 and caused a real quantum leap for industrial technology. One of the leading sectors was certainly that of the textile industries that profited among other of the improvement of spinning machines and the use of mechanical looms. But the steam machine was especially crucial that allowed progress in various productive sectors, from agriculture to industry, to transport. In the second decade of the nineteenth century there was the first steamship, which was followed by the first locomotive and the first railway lines, first in England (1825) and then throughout Europe, including Italy

OSSERVATORIO

prime linee ferroviarie, dapprima in Inghilterra (1825) e poi in tutt'Europa, Italia compresa (1839). Importanza fondamentale per l'ingegneria delle costruzioni ebbe l'*industria siderurgica*, il cui sviluppo, a partire dagli inizi del Settecento, fu essenziale per la produzione dei materiali metallici da usare nelle nuove tipologie strutturali [12].

Come ben noto il ferro allo stato puro è termicamente instabile e non ha applicazioni nella tecnica costruttiva; è molto diffuso sotto forma di minerali come ossidi (Ematite, Limonite, Magnetite), solfuri (Pirite), carbonati (Siderite), ed è utilizzato sotto forma di leghe, le più importanti delle quali sono quelle ferro-carbonio con modeste quantità di altri elementi. È il carbonio perciò che influenza in modo essenziale le caratteristiche dei prodotti al variare della percentuale con cui è presente nella lega.

Sin dai tempi più antichi l'uomo produceva materiali ferrosi partendo dai minerali. L'elemento riducente, e cioè il carbonio, era fornito probabilmente dal carbone di legna ed è pensabile che in origine, sul fondo dei primitivi forni, cosiddetti a *basso fuoco*, si raccogliesse il minerale di ferro, che, mediante violenta battitura, veniva poi liberato dalle scorie. Questa operazione, eseguita con martelli rudimentali, si perfezionò durante il Medioevo in quanto fu sostituita da un'azione meccanica prodotta da magli azionate da ruote idrauliche. Il prodotto (*ferro fucinato o forgiato*) veniva usato generalmente per la produzione di armi, di attrezzi agricoli, di utensili domestici, e, in tempi più evoluti, anche per la realizzazione di ferri battuti artistici aventi funzione di abbellimento. Qualche volta si usavano elementi in ferro all'interno delle muraure per dotare queste di un minimo di duttilità; oppure per realizzare piccoli elementi resistenti presenti nei manufatti, quali tiranti, catene, cravatte, ecc., quasi sempre in associazione con il legno.

All'inizio del XVIII Secolo i primi altiforni vennero utilizzati per passare dai minerali alla *ghisa*, peraltro già nota da tempo, in quanto prodotta, con sistemi primitivi, sin dal 1300. Fu usata dapprima come materiale da costruzione essa stessa, successivamente come materia prima per la produzione del ferro e dell'acciaio. Quest'operazione si eseguiva procedendo all'affinazione attraverso la sottrazione degli elementi non desiderati usando come combustibile ancora il carbone di legna, con la conseguenza, mano a mano che le necessità si accrescevano, di produrre una forte riduzione del patrimonio boschivo dei paesi a maggiore sviluppo industriale. Un salto di qualità per l'industria siderurgica si ebbe ad opera di Abraham DARBY che, intorno al 1730, ricavò per distillazione dal carbon fossile (litantrace), molto abbondante in Inghilterra, il coke, ottimo sostituto del precedente combustibile. La ghisa, caratterizzata da un elevato tenore di carbonio, oscillante all'incirca tra l'2% e il 6%, non è né malleabile, né fucinabile, presentando, tra i materiali ferrosi, la più bassa temperatura di fusione (1600-1700°C). Dotata di una resistenza a trazione assai minore che a compressione, fu il primo materiale metallico ad essere impiegato nelle costruzioni, anche

(1839). *The steel industry was of fundamental importance for construction engineering the development of which, since the beginning of the eighteenth century, was essential for the production of metal materials for use in new structural types [12].*

As is well-known pure iron is thermally unstable and has no application in construction technique; it is very widespread in the form of minerals such as oxides (Hematite, Limonite, Magnetite), sulphides (Pyrite), carbonates (Siderite), and is used in the form of alloys, the most important of which are iron-carbon with small amounts of other elements. Therefore carbon influences to a very great extent the characteristics of the products as the percentage with which it is present in the alloy varies.

Since ancient times, man was producing ferrous materials starting from minerals. The reducing element, namely carbon, was probably provided by charcoal and it is thinkable that originally, on the bottom of the so-called low heat primitive furnaces, iron ore gathered, which, by means of violent beating, was then freed from the dross. This operation, carried out with rudimentary hammers, was perfected during the Middle Ages as it was replaced by a mechanical action produced by hammers driven by water wheels. The product (forged iron) was generally used for the production of arms, of agricultural tools, household utensils, and, in more advanced times, also for the production of artistic wrought irons having an embellishment function. Sometimes iron elements were used inside masonry to equip these with minimum ductility; or to create small resistant elements in the manufactured articles, such as tie rods, chains, ties, etc., almost always in combination with wood.

At the beginning of the eighteenth century the first blast furnaces were used passing from minerals to cast iron, which was already known for some time, as it was produced with primitive systems since 1300. It was first used as construction material itself, subsequently as raw material for the production of iron and steel. This operation was performed by refining through the removal of unwanted items still using charcoal as fuel, with the result, as needs increased, of producing a sharp reduction in the forests of countries with fastest industrial development. A quantum leap for the steel industry came at the hands of Abraham DARBY who, around 1730, obtained coke, by distillation from coal (bituminous coal), very abundant in England, an excellent substitute of the previous fuel. Cast iron, characterised by high carbon content, oscillating roughly between 2% and 6%, is neither malleable nor forgeable, with the lowest melting temperature (1600-1700° C) among ferrous materials. With a much lower resistance to traction than compression, it was the first metallic material to be used in construction, although with many limitations, because poorly suited to achieve inter alia inflected tie rods and beams.

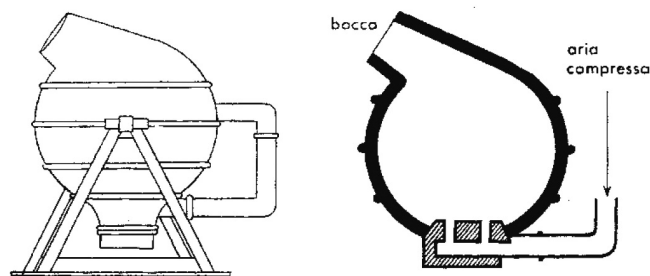
Cast iron passed to forged iron operating decarburisation still using low heat flame, fuelled with blown air on coal embers. But around 1784 a new process was developed that was later perfected so as to derive the so-called puddled or

OSSERVATORIO

se con molte limitazioni, in quanto poco adatta a realizzare tra l'altro tiranti e travi inflesse.

Dalla ghisa si passò al ferro forgiato operando la decarburazione ancora con impiego della fiamma al basso fuoco, alimentata con aria soffiata su brace di carbone. Ma intorno al 1784 fu ideato un nuovo procedimento che si andò successivamente perfezionando sì da ricavare il cosiddetto *ferro puddellato* o *agglomerato* o *saldato*. La ghisa veniva fusa in forni a riverbero con suola di ematite, rimescolando continuamente il bagno con spranghe metalliche (*puddellaggio*) fino a trasformarlo in una pasta e poi in un materiale solido. Formatisi così dei blocchi spugnosi, questi venivano ripetutamente foggiate sotto il maglio e passati al laminatoio fino ad eliminare le scorie liquide rimaste. Questo materiale fu molto migliorato nelle sue qualità e ampiamente utilizzato nelle costruzioni dell'Ottocento; era di uso comune ancora all'inizio del Novecento quando era ammesso il suo impiego anche per i tondini di armatura del cemento armato. Presentava una bassa percentuale di carbonio (0,05%-0,16%) ed era perfettamente lavorabile sì da poter essere largamente usato nella carpenteria metallica. Per buona parte del XIX Secolo coesistettero comunque, specie nei paesi industrialmente meno evoluti, sia i *bassi fuochi*, sia gli *altiforni per ghisa*, sia i *forni di puddellaggio*.

Un salto di qualità si determinò nella siderurgia quando, ottenute temperature negli altiforni molto più elevate, si potette procedere all'affinazione della ghisa liquida producendo il *ferro colato* o *acciaio*. Ciò avvenne negli anni 1854/56 con l'ideazione del convertitore (fig. 1) che consentì la produzione dell'acciaio detto *Bessemer* dal nome del suo inventore. La ghisa fusa veniva versata in un apposito recipiente a forma di pera, girevole intorno al proprio asse, rivestito internamente di refrattari, generalmente di natura silicica; dal basso, nel recipiente posto dapprima in posizione orizzontale e poi via via portato in posizione verticale, veniva soffiata nella massa una forte corrente di aria calda in pressione. Le scorie di elementi combustibili contenuti nella ghisa, quali il silicio e il carbonio, bruciavano mantenendo la massa in fusione: inoltre, galleggiando, esse potevano essere eliminate. Il ferro così ottenuto allo stato fluido, colato in recipienti di forma prismatica, dava luogo ai cosiddetti *lingotti* da avviare ai laminatoi.



(Fonte - Source: C. GIZZI, "Chimica e mineralogia", Ed. La Scuola, Brescia, 1976, pagg. 339 e 340).

Fig. 1 - Convertitore Bessemer a forma di pera.
Fig. 1 - Bessemer pear shaped converter.

agglomerate or welded iron. Cast iron was melted in reverberatory furnaces with hematite sole, stirring the bath constantly with metal bars (puddling) until turning it into a paste and then in solid material. Once spongy blocks formed, these were repeatedly moulded under the hammer, and milled to eliminate the remaining liquid waste. This material was much improved in its quality and widely used in nineteenth century buildings; it was of common use even at the beginning of the twentieth century when its use was permitted also for reinforced concrete reinforcing rods. It had low carbon content (0.05%-0.16%) and was perfectly workable so as to be widely used in steel structure work. For much of the nineteenth century however, especially in the industrially less developed countries, both low fires, and blast furnaces for cast iron, and puddling furnaces coexisted.

A quantum leap in the steel industry was determined when refining of hot metal could be performed producing cast iron or steel, after obtaining much higher temperatures in the blast furnaces. This took place in the years 1854/56 with the design of the converter (fig. 1) that allowed the production of steel called Bessemer named after its inventor. The molten iron was poured into a suitable pear-shaped container, rotatable around its axis, internally lined with refractory material, generally of silicic nature; from below, in the container placed first in a horizontal position and then gradually brought to the upright position, a strong current of hot air under pressure was blown into the mass. The waste of fuel elements contained in the cast iron, such as silicon and carbon, burned while keeping the mass in fusion: moreover, floating, they could be eliminated. The iron thus obtained in the fluid status, cast in the prism shaped containers, gave rise to the so-called ingots to be sent to the rolling mills.

The process devised by S. G. THOMAS, introduced towards the late 70s, was preferred compared to the previous one in that, while being very similar to it, it was characterised by the change of the converter lining with the use of basic materials (calcined dolomite). This way full dephosphorisation of the cast iron was reached and good quality iron was obtained even in the presence of strongly phosphorous cast irons. In these processes, the reactions that were determined in the converters were very rapid and it was not possible to make sufficient samples during the processing of cast iron, with the result that the castings were not always homogeneous.

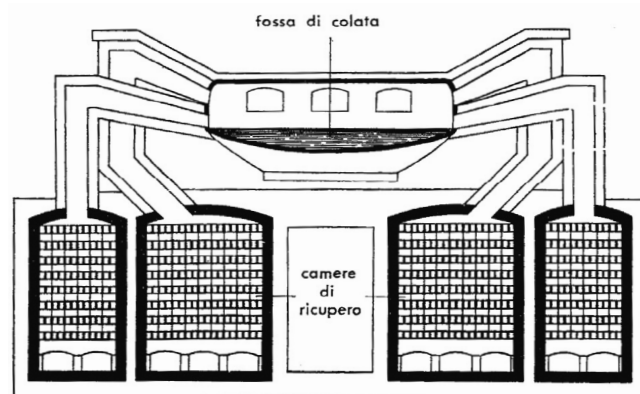
The Martin-Siemens process also linked to the names of its inventors (fig. 2), also in the second half of the nineteenth century, determined the most marked progress in improving the product, making the recovery of scrap also possible. The furnace, built with refractory bricks, with reverberatory operation, was provided with a tank in which cast iron and iron ore scrap were introduced, with an inner acid or basic lining, depending on the lesser or greater phosphorus content of cast iron. Heating performed through a particularly efficient process with a temperature of around 1800° C, took place in several hours during which it was possible to control the process with adequate samples, even

OSSERVATORIO

Il processo ideato da S.G. THOMAS, introdotto verso gli ultimi anni '70, fu preferito rispetto al precedente in quanto, pur essendo assai simile ad esso, era caratterizzato dal cambiamento del rivestimento del convertitore con l'uso di materiali basici (dolomite calcinata). In tal modo si raggiungeva la defosforazione completa della ghisa e si otteneva un ferro di buona qualità pur in presenza di ghise fortemente fosforose. In questi processi le reazioni che si determinavano nei convertitori erano molto rapide e non era possibile fare sufficienti assaggi durante la trasformazione della ghisa in ferro, con la conseguenza che non sempre le colate risultavano omogenee.

Il processo *Martin-Siemens* legato anch'esso ai nomi dei suoi inventori (fig. 2), sempre nella seconda metà del XIX Secolo, determinò il progresso più marcato ai fini del miglioramento del prodotto, rendendo possibile anche il recupero dei rottami. Il forno, costruito con mattoni refrattari, funzionava a riverbero. Esso era provvisto di una vasca in cui si introduceva la ghisa insieme a rottami e minerali di ferro, dotata di un rivestimento interno acido o basico a seconda del minore o maggiore contenuto di fosforo della ghisa. Il riscaldamento eseguito attraverso un processo particolarmente efficiente con temperatura intorno ai 1800 °C, avveniva nello spazio di diverse ore nel corso delle quali era possibile controllare il processo con opportuni prelievi, giovandosi anche di sistemi di recupero del calore. L'eliminazione delle scorie consentiva di ricavare un ferro di notevole purezza cui si aggiungeva in un secondo tempo la quantità di carbonio necessaria per ottenere le varie qualità di acciai.

Le caratteristiche dell'acciaio si dimostrarono subito molto superiori di quelle degli altri materiali ferrosi ai fini strutturali, anche per la sua proprietà di essere sottoponibile a tempera. Dopo una piuttosto lunga coesistenza con il ferro puddellato, l'acciaio divenne perciò il solo ad essere impiegato nelle costruzioni ed ebbe caratteristiche diverse a seconda del tenore di carbonio con cui fu prodotto. Quello con un più basso tenore di carbonio, paragonabile a tal riguardo al ferro puddellato, fu per molto tempo chiamato *ferro dolce* anziché *acciaio dolce*, come sarebbe stato più corretto. Denominazioni varie furono assunte dagli acciai a più elevato tenore, detti *extradolci*, *dolci*, *semiduri*, *duri*, ecc. nei quali, al crescere del tenore di carbonio (il cui limite superiore è pari al 2% ma generalmente non supera lo 0,8%), si eleva la resistenza ma si riducono la saldabilità e la duttilità. Il forte incremento della produzione del ferro e dell'acciaio fece sì che si sviluppasse notevolmente le tecniche di lavorazione. Nel corso dell'Ottocento cominciò la produzione delle lamiere, delle rotaie ferroviarie, dei profili a doppio T, che divennero ben presto essenziali ai fini dello sviluppo della carpenteria metallica in quanto particolarmente adatti a sopportare le sollecitazioni di flessione e taglio. Poi gradualmente furono immessi sul mercato elementi monodimensionali aventi la sezione trasversale delle forme geometriche più varie, come quelle a T semplice, ad L a lati uguali o diseguali, a Z, ecc., in modo da soddisfare le più



(Fonte – Source: C. GIZZI, "Chimica e mineralogia", Ed. La Scuola, Brescia, 1976, pagg. 339 e 340).

Fig. 2 - Schema di forno a riverbero usato nel processo Martin-Siemens.

Fig. 2 - Diagram of a reverberatory furnace used in the Martin-Siemens process.

with the help of the heat recovery systems. The elimination of waste allowed obtaining a remarkable purity iron to which the amount of carbon required to achieve the different qualities of steel was added at a later time.

The steel characteristics for structural purposes proved to be much higher now than other ferrous materials, even for its amenable hardening property. After a rather long co-existence with puddled iron, steel therefore became the only one to be used in constructions and had different characteristics depending on the carbon content with which it was produced. The one with lower carbon content, comparable in this respect to puddled iron, was for a long time called soft iron rather than mild steel, as it would have been more correct. Steel with higher standards took various denominations, namely extra soft, soft, semi-hard, hard, etc. in which, as the carbon content increases (whose upper limit is equal to 2% but generally does not exceed 0.8%), the resistance increases but solderability and ductility decrease. The sharp increase in the production of iron and steel made processing techniques develop considerably. During the nineteenth century the production of sheet metal, railway rails, dual T profiles began, that soon became essential for the development of metal structures as they are particularly suited to withstand bending and shear stresses. Gradually one-dimensional elements were placed on the market with cross section of the most different geometric shapes, such as simple T, L shaped ones with equal or unequal sides, Z shaped ones, etc., in order to satisfy the most varied requirements arising from the stress conditions resulting from more and more daring realisations.

4. Metal constructions in the nineteenth century

The first use of metals in construction occurred in England in the last years of the eighteenth century; the true affirmation and diffusion of this constructive system however was determined, as already said, in the following century

OSSERVATORIO

svariate esigenze derivanti dagli stati di sollecitazione conseguenti a realizzazioni sempre più ardite.

4. Le costruzioni metalliche nel XIX Secolo

I primi impieghi dei materiali metallici nelle costruzioni si ebbero in Inghilterra già negli ultimi anni del XVIII Secolo; la vera affermazione e diffusione di questo sistema costruttivo si determinò tuttavia, come già detto, nel secolo successivo e particolarmente nella seconda metà di esso per diretta conseguenza degli sviluppi dell'industria siderurgica. In una prima fase fu impiegata la ghisa; seguì il ferro puddellato al quale si andò via via sostituendo l'acciaio con il risultato che le costruzioni metalliche alla fine dell'Ottocento avevano raggiunto un grado di perfezione tale da renderle assai simili per concezione ed aspetto a quelle odierne.

La prosperità che si ebbe nell'Ottocento in diversi paesi europei, e l'orgoglio per le scoperte tecnologiche che andavano trasformando la società, portò al moltiplicarsi delle esposizioni universali e quindi alla realizzazioni di grandi edifici aventi la funzione di celebrare il progresso; ma sorsero anche strutture di impiego più usuale, di dimensioni molto maggiori che in passato, quali tettoie per mercati coperti e per spazi espositivi, capannoni industriali, grandi stazioni ferroviarie, gallerie cittadine, ed, infine, edifici multipiano per l'edilizia civile. Nei fabbricati in muratura, inoltre, le volte e i solai in legno cominciarono ad essere sostituiti dagli orizzontamenti in ferro; le scale in muratura da scale in ferro e via di seguito. Decisiva ai fini della diffusione delle costruzioni metalliche fu poi il tumultuoso estendersi in Europa e in America delle ferrovie che coprono con una fitta rete i territori dei principali stati: esse richiesero innumerevoli opere d'arte tra le quali ebbero preminenza i ponti, di luci anche rilevanti, realizzati per superare fiumi, avvallamenti, gole montane; la loro costruzione pose i progettisti di fronte ai problemi strutturali più svariati, sicché può tranquillamente affermarsi che furono essi, i ponti ferroviari appunto, i maggiori protagonisti del progresso delle costruzioni e del nascere della moderna ingegneria strutturale.

Un'idea del grado di sviluppo che la costruzione metallica aveva raggiunto anche in Italia alla fine dell'Ottocento può aversi consultando i manuali ad essa dedicati editi all'inizio del Novecento, quando il cemento armato aveva appena mosso i primi passi e l'acciaio dominava incontrastato l'ingegneria delle strutture. Il manuale Hoepli [3], ad esempio, edito a Milano nel 1910 dall'Ing. G. PIZZAMIGLIO intitolato appunto *Costruzioni Metalliche*, sviluppa esaurientemente l'argomento nelle cinque parti, ciascuna comprendente vari capitoli, in cui è suddiviso dopo l'Introduzione. Esso tratta della *Resistenza dei Materiali*, dei *Metalli adoperati nelle costruzioni civili*. Loro proprietà e collegamenti, delle *Costruzioni metalliche*, delle *Fondazioni pneumatiche* e del *Lavoro di deformazione applicato ai sistemi elastici*. Dedicato dall'autore al Prof.

and especially in the second half of it as direct consequence of steel industry developments. In a first stage cast iron was used; it was followed by puddled iron which was gradually replaced by steel with the result that metal constructions in the late nineteenth century had reached a degree of perfection such that they were very similar in design and appearance to those of today.

Prosperity in the nineteenth century in several European countries, and pride in the technological discoveries that were transforming society, led to the multiplication of world fairs and therefore to the construction of large buildings whose function was to celebrate progress; but more customary use structures also arose, far bigger than in the past, such as roofing for indoor markets and exhibition spaces, industrial warehouses, large railway stations, city galleries, and, lastly, multi-storey buildings for civil constructions. Furthermore in masonry buildings, vaults and wooden floors began to be replaced by horizontal structures in iron; masonry stairs by iron stairs, and so forth. The tumultuous spread of railways in Europe and America was decisive for the diffusion of metal structures that covered territories of major countries with a dense network: they demanded countless works of art among which bridges were leaders, also with important spans, made to overcome rivers, valleys, gorges; their construction posed the most diverse structural problems to designers, so it can safely be said that the same railway bridges were in fact the major protagonists of the progress of construction and the birth of modern structural engineering.

An idea of the degree of development that the steel construction had reached in Italy also in the late nineteenth century can be had by consulting the manual dedicated to it published at the beginning of the twentieth century, when concrete had just taken the first steps and steel ruled unchallenged the engineering of structures. The Hoepli manual [3], for example, published in Milan in 1910 by Eng. G. PIZZAMIGLIO appropriately called Metal Constructions, fully develops the topic in five parts, each comprising various chapters into which the Introduction is later divided. It deals with the Strength of Materials, of Metals used in civil construction. Their properties and links, of Metal Constructions, pneumatic foundations and deformation work applied to elastic systems. Dedicated by the author to Prof. Paolo BOUBÉE who, "the first in Italy, had dictated the main knowledge on metal constructions, from the chair of the R. Politecnico of Naples", the manual can be considered the summary of all existing technical and theoretical knowledge on the subject at the time, worthy progenitor of the known handbooks that would see the light in our country during the twentieth century. With regards to Prof. BOUBÉE just recalled, it may be interesting to note that he, together with Eng. Alfredo COTTREAU, was one of the pioneers of metal construction in Italy: both were Neapolitans with a French name. The first is known among other things for having designed the roofing of the Galleria Umberto I in Naples.

Retracing even quickly the evolution of metallic construction in the nineteenth century arouses a deep emotion

OSSERVATORIO

Paolo BOUBÉE, che, “primo in Italia, aveva dettato, dalla cattedra del R. Politecnico di Napoli, le principali cognizioni sulle costruzioni metalliche”, il manuale si può ritenere riassuntivo di tutte le conoscenze teoriche e tecniche esistenti all'epoca sull'argomento, degno progenitore dei noti manuali che avrebbero visto la luce nel nostro Paese nel corso del Novecento. In merito al Prof. BOUBÉE appena ricordato, può essere interessante osservare che egli, insieme all'Ing. Alfredo COTTREAU, fu uno dei pionieri della costruzione metallica in Italia: entrambi erano napoletani dal nome francese. Il primo è noto tra l'altro per aver progettato la copertura della Galleria Umberto I di Napoli.

Il ripercorrere anche velocemente l'evolversi della costruzione metallica nel corso del XIX Secolo suscita una profonda emozione e fa concretamente comprendere l'importanza che, anche nel campo della tecnica, l'Ottocento ha rappresentato per l'umanità. Nel suo corso si andò coagulando, come si è già accennato, quella che sarebbe divenuta l'ingegneria moderna, e si andarono delineando in maniera precisa le regole necessarie per conferire ai manufatti i requisiti di sicurezza che possono derivare solo dalla razionale applicazione delle regole fondamentali della scienza del costruire. L'Ingegnere moderno deve essere conoscitore dei principi scientifici e dei metodi su cui si fonda la sicurezza delle costruzioni; ma contemporaneamente deve possedere quel senso pratico, quella capacità di vedere i problemi prima di risolverli, che ne caratterizza la personalità, rendendola diversa da quella degli altri uomini di cultura che operano nella società. Si realizza in un certo senso quanto Leonardo DA VINCI aveva detto con lungimiranza sin dalla fine del XV Secolo, quando affermava che il valore della scienza non ha senso se non produce risultati confermati dall'esperienza. Coloro che si innamorano viceversa della pratica senza scienza sono come i nocchieri che entrano in un naviglio senza timone e bussola e non hanno perciò certezza di dove vanno.

Le prime applicazioni del ferro nell'edilizia si ebbero, intorno al 1780, con la realizzazione delle colonne di ghisa poste a sostegno dei tetti delle filande inglesi. L'incremento dell'industria tessile e l'aumento dimensionale delle macchine filatrici rendeva necessari negli stabilimenti spazi coperti sempre più ampi; questo risultato si ottenne adoperando un materiale, la ghisa appunto, che aveva una ragguardevole resistenza a compressione e consentiva perciò di aumentare la luce delle campate rispetto a quella conseguibile in precedenza usando ritti di legno.

Alle colonne, che inizialmente avevano sezione quadrata, seguirono dapprima quelle a croce e poi quelle a sezione circolare cava, il cui impiego si protrasse per molti anni. Le travi di ghisa comparvero un po' più tardi ed ebbero sezione a *T* rovescia in accordo con la circostanza che, avendo il materiale una resistenza a trazione piuttosto modesta, era necessario aumentare l'area resistente inferiore, soggetta alle tensioni positive dovute alla flessione.

and makes us understand concretely the importance that the nineteenth century represented for humanity also in the field of technology. In its course, as already mentioned, what would become modern engineering was brought together, and the rules necessary to confer the security requirements to the artefacts, that can only be derived from the rational application of the basic rules of the science of building, were gradually and precisely outlined. A modern engineer must be an expert of the scientific principles and methods on which construction safety is founded; but at the same time it should have the common sense, the ability to see problems before solving them, which characterises the personality thereof, making it different from that of other men of culture that operate in society. In a sense what Leonardo DA VINCI had said with foresight since the end of the fifteenth century is realised, when he said that the value of science is meaningless if it does not produce results confirmed by experience. Those who fall in love conversely of practice without theory, are like helmsmen who enter a ship without a helm and compass and therefore have no assurance of where they go.

The first applications of iron in construction were around 1780, with the construction of cast-iron columns placed in support of the roofs of the English spinning mills. The textile industry increased and the increase in size of spinning machines required increasingly wider covered spaces in the establishments; this result was obtained using a material, cast iron, which had considerable resistance to compression and therefore allowed increasing the light of the spans compared to the one previously achievable using wooden uprights.

Columns, which were initially square, were followed first by cross-shaped ones and then by circular hollow section ones, the use of which lasted for many years. Cast-iron beams appeared a little later and had an upside-down T shape section in agreement with the fact that, having the material a rather modest tensile strength, it was necessary to increase the lower resistant area, subject to positive strains due to bending.

Around 1830 double T sections appeared with the lower wing larger than the upper one (fig. 3a); and an interesting variant followed later when, in 1847, P.W. BARLOW thought of introducing an iron area in the cast iron of the lower wing, thus creating an armed heterogeneous section, which exploited the principle on which reinforced concrete would be based fifty years later (fig. 3b) [11]. One of the most famous among the first industrial buildings was that of the Philip & Lee workshop built in 1801 in Manchester: 42 m long and 14 m wide it had seven stories in height and used cast iron coupled to the bricks.

Cast iron was used for the construction of the first metal bridges, which will be explained in a later chapter specifically dedicated to these important structures. It replaced columns and the stone architraves of almost all industrial buildings at the beginning of the nineteenth century; in them the beam-column connection was such that the two elements mutually transmitted only vertical actions as fully

OSSERVATORIO

Intorno al 1830 comparve la sezione a doppio *T* con l'ala inferiore di dimensioni maggiori di quella superiore (fig. 3a); e un'interessante variante si ebbe successivamente quando, nel 1847, P.W. BARLOW pensò di inserire un'area di ferro nella ghisa dell'ala inferiore, realizzando così una sezione eterogenea armata, che sfruttava il principio su cui cinquanta anni dopo si sarebbe basato il cemento armato (fig. 3b) [11]. Uno dei più celebri tra i primi edifici industriali fu quello dell'*officina Philip & Lee* costruita nel 1801 a Manchester: lungo 42 m e largo 14 m esso presentava sette piani in altezza ed impiegava la ghisa accoppiata ai mattoni.

La ghisa ebbe impiego nella realizzazione dei primi ponti metallici, dei quali si dirà in un successivo capitolo dedicato espressamente a queste importanti strutture. Si sostituì all'inizio dell'Ottocento alle colonne e agli architravi in pietra di quasi tutti gli edifici industriali; in essi il collegamento trave-colonna era tale che i due elementi si trasmettevano solo azioni verticali in quanto completamente immersi nella compagine muraria che fungeva da controventamento. Un criterio costruttivo di tal genere fu adottato per il *Padiglione reale di Brighton* in cui la ghisa ebbe anche funzioni decorative. Il *Crystal Palace* (fig. 4), costruito a Londra in occasione dell'Esposizione Universale del 1851, si può considerare il primo edificio metallico realizzato secondo lo schema delle strutture intelaiate, in cui i vari elementi portanti non sono indipendenti uno dall'altro ma sono collegati in modo da costituire un unico complesso resistente. Gli elementi verticali sono rappresentati da colonne di ghisa cave, di sezione a spessore variabile, proporzionate in base al carico da sopportare; le travi di collegamento sono dei tralicci alti un metro, collegati alle colonne mediante un particolare elemento di ghisa, coassiale ad esse e munito lateralmente di appendici atte ad immorsare le travi. Si realizzarono così dei veri e propri nodi-incastro irrigiditi da controventi ai quali era affidato il comportamento statico dell'intero imponente edificio, lungo oltre 600 m, la cui elevazione avvenne montando i vari elementi arrivati dalla fabbrica a piè d'opera. In queste realizzazioni è sempre la colonna di ghisa l'elemento più interessante: essa è molto snella rispetto agli elementi verticali portanti tradizionali, possiede certamente un grande significato simbolico e continua, in genere, ad essere caratterizzata da decorazioni di tipo tradizionale come i capitelli degli stili più vari, le basi e il fusto scanalato [9].

L'uso del ferro puddellato e successivamente dell'acciaio fece fare un decisivo passo avanti alle costruzioni metalliche non fosse altro che per la maggiore facilità con cui si potevano realizzare i collegamenti. Tra le grandi coperture che videro la luce negli anni 1850/70 si ricordano quelle delle stazioni di *Birmingham* e di *Paddington* a Londra; e poi ancora il *Palazzo dell'Industria* dell'Esposizione parigina del 1855 in cui venne ancor parzialmente utilizzata la ghisa e la *Sala forni* della Società del Gas di Berlino del 1863 in cui fu impiegato, quale struttura portante, l'arco a tre cerniere. Fu comunque in occasione dell'Esposizione

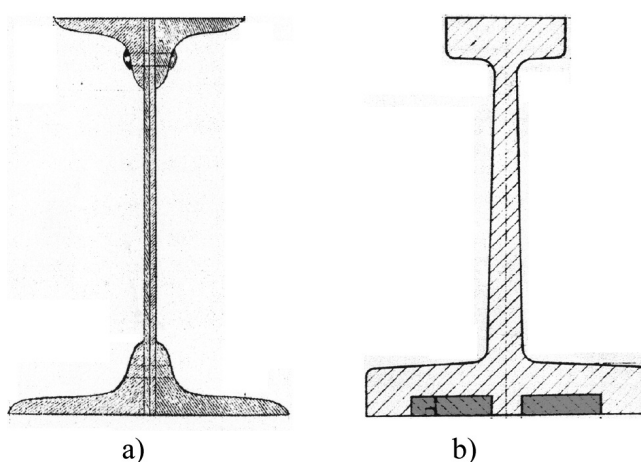


Fig. 3 - Sezioni di travi di ghisa: a) a doppio T; b) a doppio T armata (da [11], pag. 18).

Fig. 3 - Sections of cast iron beams: a) double-T; b) armed double-T (from [11], page 18).

immersed in the masonry structure which served as bracing. A construction criterion of this kind was adopted for the Royal Brighton Pavilion in which cast iron also had decorative functions. Crystal Palace (fig. 4), built in London for the Universal Exhibition of 1851, can be considered the first metal building designed according to the scheme of framed structures, in which the various bearing elements are not independent of each other but are connected to form a single resistant complex.

The vertical elements are represented by hollow cast iron columns, of variable thickness section, proportionate according to the load to bear; the connecting beams are one metre high pylons, connected to the columns by means of a special cast iron element, coaxial thereto and provided laterally with tailpieces designed to clamp the beams. Real-interlocking connections stiffened by braces were made which was entrusted with the static behaviour of the whole impressive building, over 600 metres long, whose elevation was performed by mounting the various elements arrived from the factory to the construction site. The cast iron column is always the most interesting element in these realisations: it is very slim compared to traditional vertical bearing elements, it certainly has a great symbolic meaning and in general, it continues to be characterised by traditional decorations such as capitals of various styles, bases and fluted shaft [9].

The use of puddled iron and subsequently steel allowed metal constructions to take a decisive step forward if only for the ease with which connections could be made. Among the large roofing that emerged in the years 1850/70 the stations of Birmingham and Paddington in London can be recalled; and then again the Industry Palace of the 1855 Paris Exhibition in which iron was still partially used and Furnace room of the Berlin Gas Company of 1863 where a three-hinged arch was employed as supporting structure. However, on the occasion of the 1889 Universal Exhibition,

OSSERVATORIO

sizione universale del 1889, celebrativa del centenario della presa della Bastiglia, che furono realizzati nella Capitale francese edifici famosi come la *Galerie des Machines* (fig. 5) e la *Tour Eiffel*, da ritenere tra le più impegnative opere in ferro mai edificate in precedenza, di grande rilievo sia sul piano strutturale che architettonico. La prima (poi demolita) consisteva in un ambiente di dimensioni 115 per 420 m, sostenuto da archi a tre cerniere; la seconda, opera notissima, è divenuta addirittura uno dei simboli di Parigi. Per la sua realizzazione furono impiegati 4800 t di ferro; la base quadrata ha 115 m di lato, l'altezza è di 300 m. È costituita da quattro piloni di angolo a sezione quadrata a profilo diritto secondo gli spigoli di un tronco di piramide fino al primo piano e a profilo curvo per il resto. Ciascun pilone è ancorato a una fondazione fatta con un blocco di muratura di pietra alto 6 m, sovrastante a un blocco di calcestruzzo di 4 m di altezza e 81 m² di superficie. Tre piani si trovano rispettivamente a 57,63 m, 115,63 m e 276,13 m dal suolo. In alto l'opera è completata da un faro sostenuto da archi ellittici [9].

Un po' più in ritardo si andarono affermando gli edifici in acciaio a scheletro indipendente a destinazione abitativa o a quest'ultima assimilabile. Il nuovo sistema costruttivo si era diffuso, fino al 1870 circa, nell'ambito delle costruzioni industriali oltre che dei ponti, delle grandi coperture e degli edifici da esposizione. Mancavano all'appello gli edifici tradizionali che continuavano ad essere realizzati per lo più in muratura. Questa circostanza può essere spiegata osservando che l'edilizia abitativa è sempre stata conservatrice e poco incline alle radicali innovazioni. Le costruzioni metalliche erano divenute il campo di attività degli ingegneri data la prevalenza che nella loro ideazione avevano gli aspetti tecnici e data la notevole complessità dei problemi statici che esse mettevano in evidenza. L'edilizia abitativa continuava invece ad essere appannaggio degli architetti, i quali, poco propensi a adeguare la propria preparazione a quella fisico-matematica richiesta dall'arditezza delle nuove opere, continuavano a fare riferimento al sistema costruttivo tradizionale. Il primo edificio rilevante totalmente in carpenteria in acciaio fu la *Ciocolateria Menier* a Noisel-sur-Marne presso Parigi del 1872. Successivamente edifici di grande rilievo si andarono diffondendo in Europa e negli Stati Uniti. Ci si limita a ricordare tra gli altri il *Monadnock Building* di sedici piani, con pareti portanti trasversali in opera muraria nelle quali erano inseriti telai metallici (fig. 6) e il *Reliance Building* (fig. 7), previsto dapprima di soli cinque piani e successivamente sopraelevato di altri dieci. Entrambi furono edificati a Chicago nell'ultimo decennio del XIX Secolo.

Ai fini di tracciare un quadro completo della diffusione del ferro nelle costruzioni nel corso della seconda metà dell'Ottocento, non può farsi a meno di ricordare, come già accennato in precedenza, che esso, non diversamente da quanto sarebbe successo nel Novecento per il cemento armato, fu ampiamente usato per realizzare alcuni elementi strutturali nell'ambito degli organismi mu-

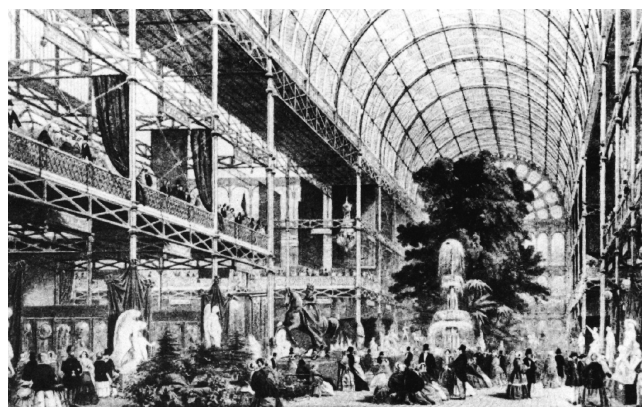


Fig. 4 - Il Crystal Palace, Londra, 1851 (da [9], pag. 45).
Fig. 4 - Crystal Palace, London, 1851 (from [9], page 45).

celebrating the centenary of the storming of the Bastille, famous buildings were built in the French capital like the Galerie des Machines (fig. 5) and the Tour Eiffel, to be considered among the most challenging iron works ever built before, very important both structurally and architecturally.

The first (later demolished) consisted of a 115 to 420 m in size environment, supported by three-hinged arches; the second, well-known work, has become even one of the symbols of Paris. 4800 t of iron were used for its construction; the side of the square base is 115 m, and it is 300 m high. It consists of four angle pylons with a square section straight profile according to the edges of a pyramid trunk up to the first floor and with a curved profile from thereon. Each pylon is anchored to a foundation made with a 6 m high block of masonry stone, overlying a concrete block of 4 m in height and 81 square metre surface. Three floors are at 57.63 m, 115.63 m and 276.13 m respectively, above the ground. At the top, a light supported by elliptical arches completes the work [9].

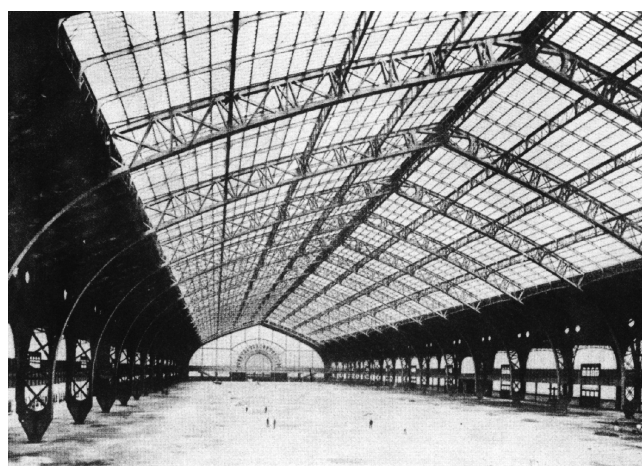
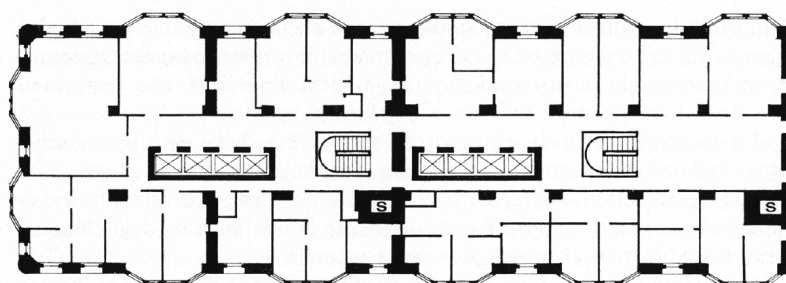


Fig. 5 - La Galerie des Machines, Parigi, 1889 (da [9], pag. 50).

Fig. 5 - The Galerie des Machines, Paris, 1889 (from [9], page 50).

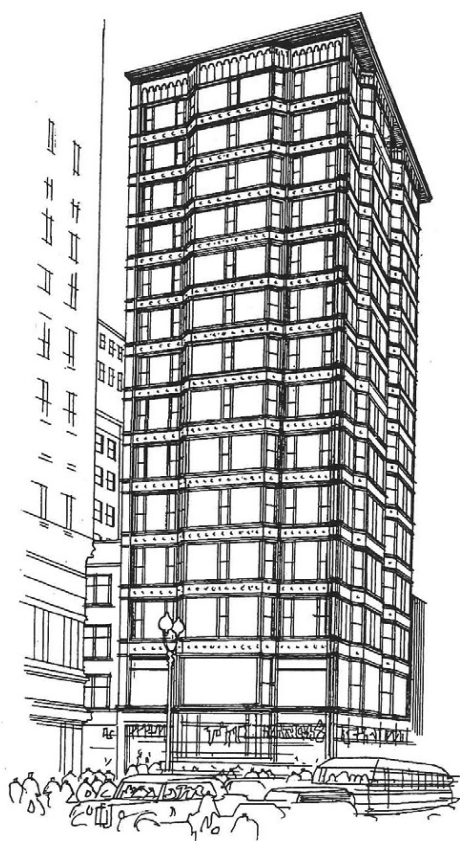
OSSERVATORIO



(Fonte – Source: G. PIZZETTI – A.M. ZORGNO TRISCIUOGGIO, “Principi statici e forme strutturali”, UTET, Torino, 1880, pag. 687).

Fig. 6 - Il Monadnock Building, Chicago, 1891.

Fig. 6 - The Monadnock Building, Chicago, 1891.



(Fonte – Source: F. HART, “Le strutture in acciaio e l’architettura”, in “Architettura acciaio. Edifici civili”, di F. HART, W. HENN, H. SONTAG, Edizione Italsider in lingua italiana, 1979, pag. 12).

Fig. 7 - Il Reliance Building, Chicago, 1894.

Fig. 7 - The Reliance Building, Chicago, 1894.

A little later independent-frame steel buildings for housing or assimilated to the latter affirmed themselves. Up to about 1870, the new construction system had spread, within industrial buildings as well as bridges, large roofs and exhibition buildings. Traditional buildings that continued to be built for the most part in masonry were missing. This may be explained by noting that residential construction has always been conservative and not inclined to radical innovations. Metal buildings had become the field of engineering activities given the prevalence that the technical aspects had in their conception and, given the considerable complexity of the structural problems that they highlighted. Residential housing instead continued to be the prerogative of architects, who continued to refer to the traditional construction system, unwilling to adapt their preparation to the physical-mathematical one required by the hardihood of the new works. The first significant building totally in steel was the Chocolate Menier in Noisel-sur-Marne near Paris in 1872. Later major buildings spread in Europe and the United States. We will simply point out, among others, the sixteen-storey Monadnock Building, with transverse load-bearing masonry walls in which metal frames were inserted (fig. 6) and the Reliance Building (fig. 7), provided first with only five floors and subsequently raised to another ten floors. Both were built in Chicago in the last decade of the nineteenth century.

In order to draw a complete picture of the spread of iron in construction during the second half of the nineteenth century, we cannot but remember, as already mentioned earlier, that, not unlike what would have happened in the twentieth century for reinforced concrete, it was widely used to build some structural elements in the context of traditional masonry bodies. First of all reference is made to

OSSERVATORIO

rari tradizionali. Ci si riferisce innanzi tutto agli orizzontamenti per i quali si andarono diffondendo i *solai* costituiti da voltine in laterizio sostenute da travi in ferro, con impiego dapprima di mattoni pieni, poi, sempre più frequentemente, di forati. Questa tipologia strutturale fu usata con successo in sostituzione delle volte in muratura e dei solai in legno che si erano impiegati nei secoli precedenti. Nei confronti delle prime presentavano il vantaggio di richiedere un'altezza minore e di utilizzare perciò meglio la dimensione verticale disponibile del fabbricato; ed inoltre di non esercitare azioni spingenti sulle murature d'ambito. Nei confronti dei secondi essi consentivano, a parità di spessore, il superamento di luci più rilevanti e, se ben realizzati, di essere meno sensibili a fenomeni di deterioramento. Le travi erano rappresentate da poutrelles con sezione a doppio T, ma talvolta si usavano anche rotaie ferroviarie di scarto. Successivamente si passò dalle voltine alle volterrane, costituite da elementi di laterizio che funzionavano come conci di una struttura spingente poggiante sugli elementi portanti in acciaio, in modo da realizzare un intradosso piano, esteticamente più soddisfacente (fig. 8).

Anche le *scale* in ferro a servizio di edifici in muratura portante ebbero una notevole diffusione in quello stesso periodo, trattandosi spesso di strutture in cui gli scalini, in pietra da taglio, erano incastrati ad un'estremità nella muratura d'ambito mentre dall'altra poggiavano su una trave metallica. Essi avevano sezione a forma di triangolo rettangolo la cui ipotenusa aveva la stessa inclinazione della trave porta rampa; questa era costituita in genere da vari pezzi collegati, laddove le rampe si incontravano, mediante coprighiunti chiodati. Ma esistevano anche schemi più complessi in cui scalini e pianerottoli erano portati da volte impostate su travi in ferro a doppio T; ed altri in cui si utilizzavano colonne verticali di ghisa il cui impiego richiedeva l'ideazione di sofisticati sistemi di collegamento (fig. 9).

Grande diffusione ebbero in quegli anni le coperture di edifici, anche di piccole dimensioni, realizzate con impiego di *capriate* o *incavallature* in ferro, derivate dalle strutture in legno aventi il medesimo schema statico, già usate ben prima che si diffondesse la costruzione metallica. Di origine incerta, le capriate lignee avevano avuto una notevole diffusione quali coperture delle chiese paleocristiane. Frequenti durante il Medioevo, furono impiegate anche durante il Rinascimento e disegnate in maniera razionale da Andrea PALLADIO nel corso del Cinquecento. Nel XIX Secolo si diffusero incavallature in ferro a una falda nel caso di piccole costruzioni, a due falde per coperture di maggior rilievo, o, ancora, a centina curva, tal-

the horizontal elements for which floors constituted by vaults in brick supported by iron girders started spreading, first using solid bricks, then, more and more frequently, perforated ones. This type of structure was used successfully in place of masonry vaults and wooden floors that were used in previous centuries. In respect of the first, they had the advantage of requiring a lower height and therefore making better use of the available vertical size of the building; and also of not exercising pushing action on the walls. Towards the latter they allowed, for the same thickness, the overcoming of the most important spans and, if well implemented, being less sensitive to deterioration phenomena. The beams were represented by double T-section joists but scrap railway rails were sometimes also used. Subsequently vaults were replaced by filler blocks, consisting of brick elements which functioned as ashlars of a pushing structure resting on the supporting steel elements, so as to create a more aesthetically satisfactory flat intrados (fig. 8).

Iron stairs also serving load-bearing masonry buildings had a remarkable expansion in the same period, being these often structures where the steps, in stone cutting, were wedged at one end of the masonry while they rested on a masonry metal beam on the other. They had a right-angled triangle section whose hypotenuse had the same inclination of the ramp-bearing beam; this generally consisted of several pieces connected, where the ramps met, by means of studded joint covers. But there were also more complex schemes in which steps and landings were borne by vaults set on double T iron beams; and others in which vertical cast iron columns were employed the use of which required the creation of sophisticated connection systems (fig. 9).

In those years the roofs of buildings, also of small dimensions were widespread, implemented using trusses or

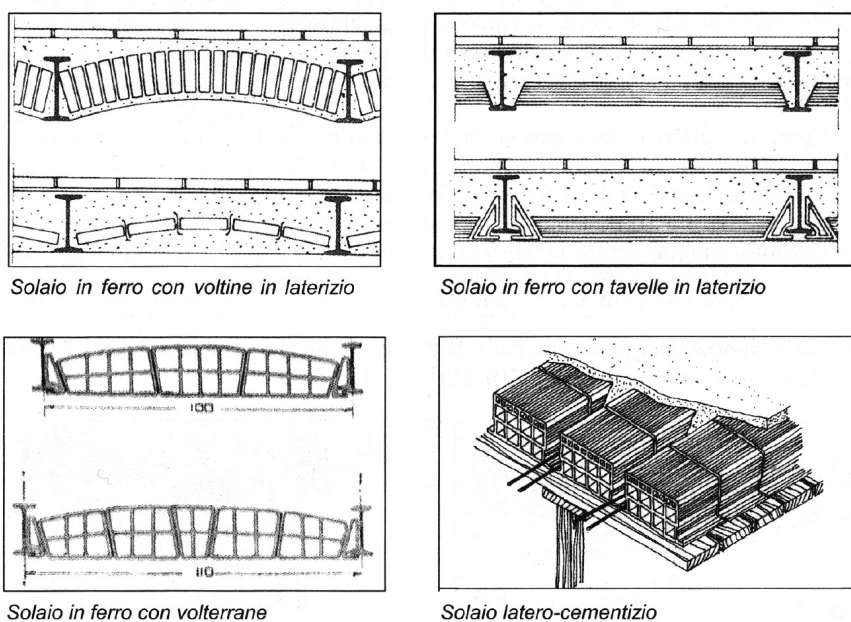


Fig. 8 - Sezioni di solai in ferro (da [21], pag.109).

Fig. 8 - Sections of iron slabs (from [21], page 109).

OSSERVATORIO

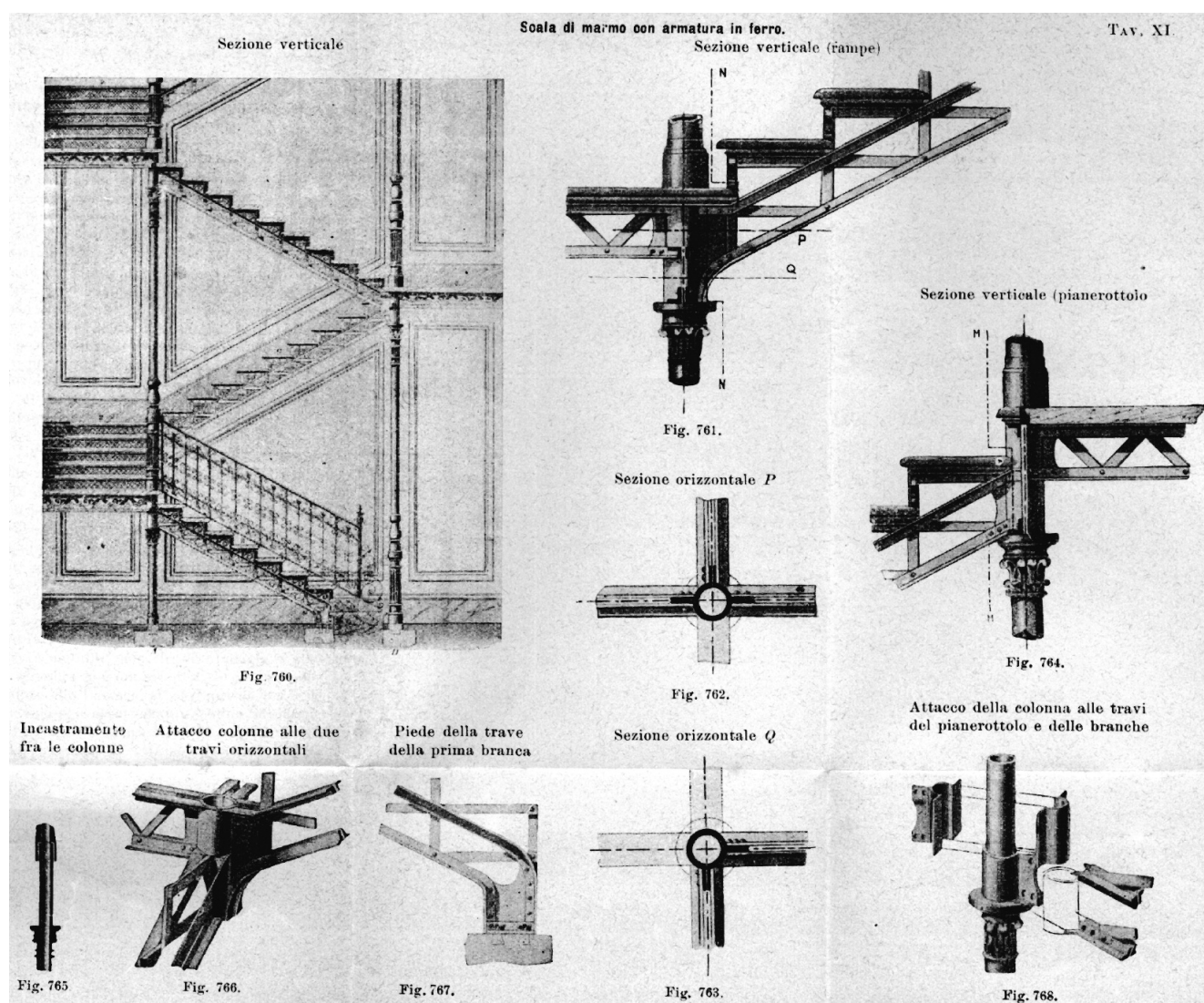


Fig. 9 - Scala metallica con colonne di ghisa (da [3], tav. XI).
Fig. 9 - Metal ladder with cast iron columns (from [3], table XI).

volta con impiego misto di ferro e legno. Queste tipologie strutturali, che hanno d'altronde continuato ad essere usate fino ai nostri giorni, venivano accuratamente studiate riponendo particolare cura alla scelta dei profilati da impiegare per i vari tipi di aste e, soprattutto, alle modalità con cui realizzare i collegamenti ai quali si richiedeva che le rette di azione degli sforzi trasmessi dalle aste convergenti nei nodi passassero per un punto, in modo da assicurare che le membrature fossero tese (tiranti) o compresse (puntoni) e risultassero nulle le sollecitazioni flettenti.

5. I ponti

Si è già accennato, parlando della Rivoluzione industriale, all'importanza che, nei paesi più avanzati, in Europa e in America, ebbero le ferrovie, la cui rete si estese,

iron triangulated beams, derived from wood structures having the same static scheme, already in use well before metal construction spread. Of uncertain origin, the wooden trusses had had a remarkable expansion as roofing of the early Christian churches. Frequent during the Middle Ages, they were also used during the Renaissance and rationally designed by Andrea Palladio during the sixteenth century. In the nineteenth century iron triangulated pitched roof beams spread in the case of small buildings, with two pitches for more important roofs, or even with a curved rib, sometimes with mixed use of iron and wood. These structural types, which have indeed continued to be used until the present day, were carefully studied placing particular attention to the choice of the profiles to be used for different types of beams and, above all, to the way connections were to be made for which it was required that the lines of action of the forces transmitted by the rods converging in the

OSSERVATORIO

nella seconda metà del XIX Secolo, in maniera capillare. Il rivoluzionario sistema di trasporto, consentendo una velocità di spostamento agli uomini e alle merci fino ad allora assolutamente inimmaginabile, ebbe un'influenza fondamentale sullo sviluppo della società e dell'economia e fu celebrato da scrittori e poeti. L'industria siderurgica dovette far fronte alla richiesta del ferro e dell'acciaio necessari per realizzare migliaia di chilometri di rotaie, cui si aggiunse l'ingente richiesta di traversine in legno che provocò estesi disboscamenti. I limiti di pendenza e di curvatura imposti nel tracciamento delle linee, aggiunti alla necessità di superare vallate, fiumi, torrenti, di attraversare in galleria zone montuose, spesso caratterizzate dalla presenza di terreni difficili, e di servire, senza eccessivi aumenti di percorso, i principali centri abitati, richiesero l'edificazione di molteplici opere d'arte e produssero un'evoluzione molto rapida delle tecniche costruttive, contribuendo in maniera decisiva allo sviluppo dell'Ingegneria strutturale.

Un ruolo fondamentale ebbero in questo scenario i ponti e i viadotti [2]: un gran numero di essi furono costruiti in muratura, realizzando talvolta, per superare valli profonde, scenografici sistemi di archi sovrapposti. Ma la vera novità fu rappresentata dalla comparsa dei ponti metallici, propiziati dai progressi della siderurgia che, con l'avvento del ferro e ancor più dell'acciaio, produsse lamiera e una gamma di profilati molto estesa, che era possibile collegare utilizzando chiodatrici automatiche e macchine per il taglio e la foratura [12].

I primi ponti, ancora non ferroviari, furono, a partire dal 1776/79, in ghisa e di luci relativamente modeste. Ma opere più rilevanti furono realizzate in conci prodotti in stabilimento e montate in sito anche in zone lontane dalle fonderie: la prima opera di questo tipo fu il ponte di *Sunderland* in Inghilterra sul fiume Wear, avente 72 m di luce, degli anni 1793/96, composto da sei archi tra loro affiancati. L'uso della ghisa, che si protrasse anche nel secolo successivo, spesso in associazione con il ferro, si andò progressivamente riducendo, anche per effetto del verificarsi di alcuni disastri, fino a praticamente scomparire intorno agli anni Quaranta.

Tra i numerosi manufatti della metà del XIX Secolo, notevole e famoso fu il ponte *Britannia* realizzato nel 1850 da STEPHENSON ed altri nel Galles con l'impiego di laminati e profilati in ferro puddellato. Di quattro luci, di cui le due laterali di 71,80 m e le due centrali di 141,73 m, esso consistette in una grande trave continua tubolare, al cui interno passava la linea, su cinque appoggi, realizzati mediante torri in muratura (fig. 10).

L'impiego dei ponti a parete piena fu interrotto, nella seconda metà del Secolo, dall'avvento dei ponti reticolari che erano molto più leggeri e si prestavano meglio alla lavorazione dei materiali in officina e al loro trasporto a piè d'opera. La loro origine si legava a schemi strutturali ben noti da tempo: essi furono impiegati nei primi attraversamenti ferroviari negli Stati Uniti, usando il legno, talvolta in associazione con il ferro. Erano perfetti sotto il



(Fonte – Source: Wikipedia).

Fig. 10 - Il Ponte Britannia nel Galles, 1850.

Fig. 10 - The Britannia Bridge in Wales, in 1850.

connections would pass through a point, so as to ensure that the frameworks were strained (tie-rods) or compressed (struts) and the bending stresses found to be zero.

5. Bridges

Speaking of the Industrial Revolution, we have already discussed about the importance that railways had, in the most advanced countries in Europe and America, whose network extended in an extensive manner in the second half of the nineteenth century. The revolutionary transportation system, allowing a speed of movement of men and goods hitherto unimaginable, had a fundamental influence on the development of society and economy, and was celebrated by writers and poets. The steel industry had to cope with the demand for iron and steel needed to build thousands of kilometres of track, to which the huge demand for wooden railroad ties was added, which caused extensive deforestation. The slope and curvature limits imposed in tracing the lines, added to the need to overcome valleys, rivers, streams, to cross mountainous areas with tunnels, often characterised by the presence of difficult terrain, and to serve major population centres, without excessive path increases, required the construction of several works of art and produced a very rapid evolution of construction techniques, decisively contributing to the development of structural Engineering.

Bridges and viaducts played a key role in this scenario [2]: a large number of them were built in masonry, sometimes creating scenographic overlapping arch systems to overcome deep valleys. But the real novelty was represented by the appearance of metal bridges, propitiated by the steel industry progress that, with the advent of iron and even more of steel, produced sheet metal and a very extensive range of profiles, that could be connected using automatic nailers and cutting and drilling machines [12].

Starting from 1776/79, the first bridges, still not rail, were of cast iron and with relatively small spans. But the most important works were implemented with ashlar produced in the plant and assembled on site even in areas far

OSSERVATORIO

profilo statico ed estetico, ma, adoperati per realizzare strutture da ponte, presentavano l'inconveniente di conferire a queste ultime un'elevata deformabilità dovuta al basso modulo elastico del legno e al tipo di giunzioni allora realizzabili. Si tentò quindi di aumentarne la rigidità incrementando fortemente il numero delle aste del reticolo, ottenendo un fitto graticcio diagonale incrociato (trave *Town* brevettata nel 1820) ad elevato grado di iperstaticità, il cui comportamento statico all'epoca non era stato peraltro ancora ben chiarito. Quando questi schemi vennero estesi alle travi reticolari in ferro si seguì inizialmente il medesimo criterio nelle travi a graticcio (fig. 11) che si diffusero un po' dovunque in Europa. Solo successivamente ci orientò verso schemi reticolari più semplici, isostatici o a bassa iperstaticità, di più agevole calcolo, più gradevoli sotto il profilo estetico [14].

Un'evoluzione ulteriore della costruzione dei ponti metallici si ebbe con l'impiego delle pile reticolari (fig. 12) che furono adottate per attraversamenti di gole montane e di grandi incisioni del terreno; spesso la loro altezza veniva ridotta usando delle robuste basi in muratura. Il loro impiego portò ad opere di grande arditezza e spettacolarità, specialmente notevoli quando furono impiegate in accoppiamento, per il superamento di grandi luci, a strutture ad arco reticolare. È appena il caso di ricordare le realizzazioni di G. EIFFEL cui sono dovuti il ponte sul Dourò del 1887 e, soprattutto il grande viadotto ad arco di Garabit sul fiume Truyère, realizzato in Francia tra il 1880 e il 1884.

Una tipologia, usata lungo tutto l'Ottocento e oltre, fu quella dei ponti sospesi, largamente utilizzati per superare forti luci e destinati ad attraversamenti stradali e ferroviari. Già comparsi all'inizio del XIX Secolo, essi si andarono gradualmente perfezionando e divennero numerosi intorno agli anni Quaranta e Cinquanta, sia in Europa che in America. L'impalcato di questi ponti, essendo so-



Fig. 11 - Il Ponte ferroviario a graticcio sul fiume Tronto in Italia, 1873 (da [22], pag. 101).

Fig. 11 - The lattice railway bridge on the river Tronto in Italy, 1873 (from [22], page 101).

from the foundries: the first work of this kind in the years 1793/96, was the Sunderland bridge in England over the River Wear, with a 72 m span, composed of six side by side arches. The use of cast iron, which lasted well into the next century, often in combination with iron, progressively reduced, partly due to the occurrence of some disasters, up to virtually disappearing around the forties.

Among the many artefacts of the mid-nineteenth century, the Britannia bridge built in 1850 by STEPHENSON was notable and famous and others in Wales with the use of metal sheets and puddled iron profiles. Of four spans, of which the two side ones measuring 71.80 m and the two central ones measuring 141.73 m, it consisted of a large continuous tubular beam, inside which the line passed, on five bearings, built by means of masonry towers (fig. 10).

The use of solid-walled bridges was interrupted in the second half of the century, with the advent of truss bridges that were much lighter and lent themselves better to the processing of materials in the workshop and their transport to the construction site. Their origin is tied to structural schemes well-known for some time: they were used in the first rail crossings in the United States, using wood, sometimes in combination with iron. They were perfect under the static and aesthetic profile, but, used to build bridge structures, they had the disadvantage of conferring high deformability to the latter due to the low elastic modulus of the wood and the type of joints achievable at the time. An attempt was then made to increase its rigidity by greatly increasing the number of the lattice rods, obtaining a dense diagonal cross latticework (Town beam patented in 1820) with a high degree of hyperstability, whose static behaviour at the time had not, however, yet been well clarified. When these schemes were extended to iron trusses the same criterion was initially followed in the beam latticework (fig. 11) that spread a little everywhere in Europe. Only later one moved towards simpler latticework patterns, isostatic or with low hyperstability, easier to calculate and more agreeable from the aesthetic point of view [14].

A further development of the construction of metal bridges occurred with the use of lattice piers (fig. 12) that were adopted for crossings of gorges and large ground incisions; often their height was reduced using two thick masonry bases. Their use led to spectacular and great hardihood works, especially remarkable when they were used in combination with truss arch structures, for the overcoming of great spans. It is hardly necessary to recall the achievements of G. EIFFEL to whom we owe the Dourò bridge of 1887 and especially the large arched Garabit viaduct on the river Truyère, built in France between 1880 and 1884.

A type, used throughout the nineteenth century and beyond, was that of suspension bridges, widely used to overcome strong spans and intended for road and rail crossings. Appeared already in the early nineteenth century, they were gradually perfected and became numerous both in Europe and in America around the forties and fifties. The deck of these bridges, suspended with special bearing cables, transmitted traction and not pushing actions to the ground

OSSERVATORIO

speso ad appositi cavi portanti, trasmetteva al suolo azioni di trazione e non di spinta come nei ponti tradizionali, superando grandi luci con un'unica o più campate. Si diffusero molto negli Stati Uniti e poi in Inghilterra ed impiegati anche per spettacolari attraversamenti ferroviari. Il ponte sospeso sul *Niagara* ad esempio, che collegava le ferrovie degli Stati Uniti e del Canada, fu costruito negli anni 1851/55. Esso aveva una luce di ben 250 m. e seguì a ben due tentativi falliti relativi agli anni 1830 e 1840; rimase in esercizio per oltre 20 anni prima di essere sostituito. Nei primi tempi, quando non si disponeva di funi di acciaio sufficientemente lunghe ed affidabili, si procedette spesso ad appendere l'impalcato a coppie di catene: così avvenne per il celebre ponte di *Budapest sul Danubio* (fig. 13), costruito tra il 1839 e il 1849, dove le strutture portanti furono appunto realizzate mediante catene i cui anelli erano costituiti da coppie di piastre parallele di ferro unite tra loro all'estremità da un grosso perno. Lungo complessivamente 380 m., fu realizzato con una campata centrale di 202 m e due laterali. Rimase in esercizio fino alla seconda guerra mondiale, dopo la quale, essendo stato fatto saltare dei tedeschi, fu ricostruito identicamente nel 1949, a cento anni esatti dalla sua prima edificazione.



Fig. 1379.

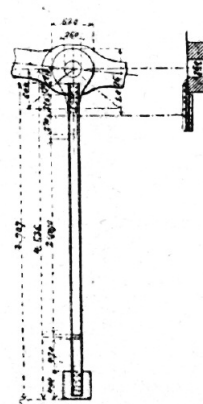


Fig. 1382.

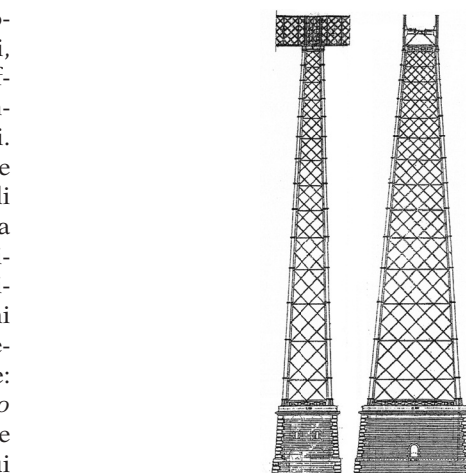


Fig. 12 - Pila reticolare (da [20], pag. 13).

Fig. 12 - Lattice pier (from [20], page 13).

as in traditional bridges, overcoming great lights with one or more spans. They were widespread in the United States and later in England, and were also used for spectacular railway crossings. The bridge suspended over the Niagara

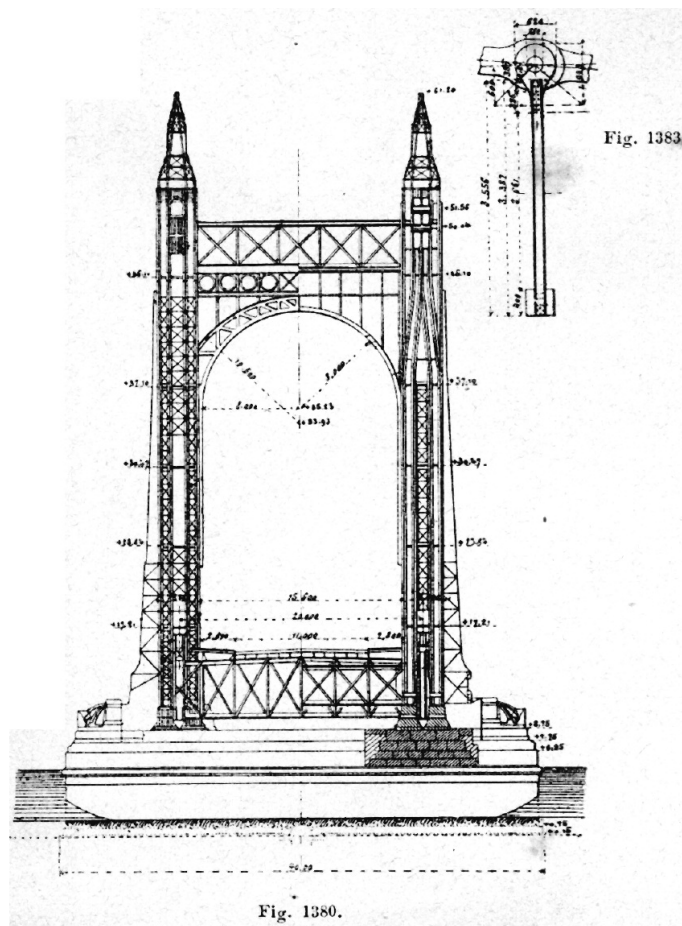


Fig. 1380.

Fig. 13 - Il Ponte sospeso sul Danubio a Budapest, 1839/49 (da [3], tav. XXXV).
Fig. 13 - The Bridge suspended over the Danube in Budapest, 1839/49 (from [3], table XXXV).

OSSERVATORIO

Ponti per così dire *speciali* erano infine piuttosto consueti in quel periodo: si andava dai *ponti girevoli* ai *ponti scorrevoli*, dai *ponti levatoi* ai *ponti sollevabili*, da quelli *ad altalena* a quelli *trasbordatori* o a *navicella*: diffusi in molte regioni d'Europa, essi avevano la funzione di consentire l'attraversamento di canali o di fiumi senza impedire la navigazione. Tutte queste tipologie vengono trattate diffusamente nei manuali dell'epoca con indicazioni delle caratteristiche costruttive dei manufatti, dei metodi di calcolo consigliati, dei meccanismi necessari a produrre il movimento e quindi l'apertura o la chiusura a seconda delle necessità. Un discorso a parte, certamente non secondario, meritano i *ponti galleggianti* a barche di legno o metalliche, dotati di una o più parti mobili per consentire il transito dei battelli. Una particolare categoria dei ponti galleggianti è rappresentata dai *ponti militari*, variamente classificati a seconda della loro importanza, perfezionatisi in misura rilevante sin dai primi decenni dell'Ottocento.

6. I ponti in Italia

Anche l'Italia conobbe, nel corso dell'Ottocento, uno sviluppo notevole delle costruzioni metalliche che, ancor più che altrove, furono legate allo sviluppo delle ferrovie. All'atto dell'Unità esistevano infatti diverse reti ferroviarie interessanti i singoli stati della Penisola ma mancavano completamente i reciproci collegamenti. Il governo unitario si trovò perciò nella necessità di adeguare il Paese agli altri più progrediti realizzando un vasto programma di costruzione che ebbe, quale principale funzione, quella di unificare il territorio. Esso richiese uno sforzo assolutamente notevole, anche per la rapidità con cui fu realizzato e nonostante le grandi difficoltà economiche che inevitabilmente esso presentò. Le prime due tratte erano state la *Napoli-Portici* del 1839 e la *Milano-Monza* del 1840; ma il grosso delle rete fu costruito dopo l'unità. La linea *Ancona-Brindisi-Lecce* fu ad esempio completata in soli tre anni e terminata prima del dicembre 1865. Nel 1861 vi erano in Italia 2273 km di ferrovie, nel 1871 essi erano divenuti 6710, passati a 9506 nel 1881 a 13964 nel 1891, a 16451 nel 1901. L'opera fu tanto più meritoria in quanto, per portarla a termine, si rese necessario affrontare problemi tecnicamente assai rilevanti data la morfologia del nostro territorio e la presenza in molte zone accidentate, specie quelle appenniniche, di terreni assai difficili dal punto di vista ingegneristico [15].

Molti ponti e viadotti vennero costruiti usando la muratura ordinaria, ma altrettanto numerosi furono quelli metallici. Solo pochi di essi sono ancora in esercizio; gli altri sono stati nel corso degli anni demoliti e sostituiti o, in qualche caso, rinforzati e adeguati alle crescenti esigenze del trasporto ferroviario. Per fortuna non mancano documentazioni progettuali e fotografiche ad essi relative che consentono di ripercorrere la storia e l'evoluzione di queste tipologie. Una di queste, del massimo interesse, è per esempio contenuta nel volume [22] dedicato al cele-

for example, connecting the railways of the United States and Canada, was built in the years 1851/55. It had a span of 250 m and followed two failed attempts relating to the years 1830 and 1840; it remained in operation for over 20 years before being replaced. In the early days, when sufficiently long and reliable steel cables were available, the deck was often hung in pairs of chains: this is what happened for the famous bridge of Budapest on the Danube (fig. 13), built between 1839 and 1849, where the supporting structures were precisely achieved by means of chains whose rings consisted of pairs of iron parallel plates joined together at the end by a big pin. A total of 380 m long, it was built with a central span of 202 m and two lateral ones. It remained in operation until the Second World War, after which, having been blown up by the Germans, it was rebuilt identically in 1949, exactly one hundred years since it was first built.

So to speak special bridges were ultimately quite usual at that time: one ranged from swing bridges to sliding bridges, from drawbridges to lifting bridges, from swing ones to reloader ones or basket lifts: widespread in many European regions, they had the function of allowing the crossing of canals or rivers without impeding navigation. All these types are dealt with at length in the era manuals with indications of the constructive characteristics of the manufactured articles, the recommended methods of calculation, the mechanisms necessary to produce the movement and therefore the opening or closing depending on the need. Floating bridges in wooden boats or metal, equipped with one or more movable parts to allow the transit of vessels deserve another certainly not secondary exception. A particular category of floating bridges is represented by military bridges, variously classified according to their importance, that were significantly improved since the early decades of the nineteenth century.

6. Bridges in Italy

Italy also experienced a remarkable development of metal structures during the nineteenth century, which, even more than elsewhere, were linked to the development of railways. At the time of the Union there were in fact several railway networks involving the individual states of the Peninsula but the reciprocal links lacked completely. The unity government, therefore found it necessary to adapt the country to the other more advanced ones creating a vast building programme that had, as its main function, that of unifying the territory. It took an absolutely remarkable effort, also for the speed with which it was implemented and despite the great economic difficulties that it inevitably introduced. The first two sections were the Naples-Portici in 1839 and Milan-Monza in 1840; but most of the network was built after the union. The Ancona-Brindisi-Lecce line for example was completed in just three years and finished before December 1865. In 1861 there were 2273 km of railways in Italy, in 1871 they had become 6710, then 9506 in 1881 to 13964 in 1891, to 16451 in 1901. The work was all

OSSERVATORIO

bre fotografo Achille MAURI, pugliese di nascita, napoletano di adozione, in cui sono raccolte le foto, in gran parte conservate nel repertorio dei Fratelli ALINARI, di numerosi ponti e viadotti ripresi nel corso della loro costruzione: esse costituiscono una preziosa testimonianza per gli storici dell'Ingegneria strutturale.

Le prime costruzioni ferroviarie italiane furono affidate a imprese estere e presentarono caratteristiche analoghe a quelle adottate presso gli altri paesi europei. All'inizio i ponti metallici erano in ghisa; questo materiale fu poi sostituito parzialmente dal ferro puddellato per la realizzazione degli elementi soggetti a trazione. Successivamente, in concomitanza con lo sviluppo dell'industria italiana e l'affrancamento dall'estero, quest'ultimo divenne il materiale più usato in Italia per realizzare travate da ponte dapprima a parete piena e poi reticolari.

Tra gli altri merita di essere ricordato il ponte di *Camaioni* sull'Arno a via inferiore, costruito nel 1848 per le Ferrovie Leopoldine in Toscana, su progetto di R. STEPHENSON, realizzato con due travate paraboliche di ghisa ciascuna composta di 7 conci, per una lunghezza totale di 30 m circa, cui era sospeso l'impalcato. La particolarità più rilevante di quest'opera risiedeva nel fatto che le due travi portanti recavano inferiormente delle barre di ferro ancorate alle testate, composte ciascuna di quattro elementi collegati mediante giunti a cuneo. Esse servivano, mediante una forzatura dei cunei, a determinare una sorta di presollecitazione nelle travi di ghisa in modo da compensare la scarsa resistenza a trazione di quel materiale, spingendo molto in avanti sul piano tecnico il discorso, cui si è accennato in precedenza, di far collaborare ferro e ghisa ai fini di migliorare le prestazioni delle strutture. Precorrendo così in un certo senso quanto nel corso del XX Secolo sarebbe stato fatto con il cemento armato precompresso [15], [16].

Per quanto riguarda i ponti in ferro puddellato, è interessante sul piano storico, osservare che essi, numerosi nel corso dell'Ottocento lungo le linee ferroviarie della Penisola, rimasero a lungo in esercizio e dettero certamente risultati soddisfacenti. Durante il Novecento furono in gran parte sostituiti da nuove strutture, specialmente dopo la seconda guerra mondiale, a seguito di grave danneggiamento o addirittura di distruzione. In tali occasioni furono spesso svolte indagini circa le proprietà meccaniche del materiale a suo tempo adoperato. Il Prof. R. ZOJA, del Politecnico di Milano indagò ad esempio sulle travate di alcuni ponti della linea *Ivrea-Aosta*, che, realizzati prima del 1896, furono ricostruiti negli anni Sessanta del Novecento. L'ampia relazione contenuta in [8], fa rilevare come il ferro agglomerato sottoposto a prove risultasse piuttosto scadente, specie per quanto attiene alla resilienza. Avendo rilevato per contro che, durante gli oltre 70 anni di vita dei manufatti, questi non avevano mai presentato dissesti e non avevano mai dato luogo a preoccupazioni, il Prof. ZOJA si esprimeva dicendo che questa circostanza "costituisce un'evidente dimostrazione della difficoltà di esprimere un giudizio sui materiali del-

the more meritorious because, to complete it, it became necessary to deal with costly and important problems given the morphology of our territory and the presence of very difficult land from an engineering point [15] of view in many rough areas, especially those in the Apennines.

Many bridges and viaducts were built using ordinary masonry, but metal ones were just as many. Only a few of them are still in operation; others have been demolished and replaced over the years or, in some cases, reinforced and adapted to the growing needs of rail transport. Fortunately there is no shortage of design and photographic documentation relating to them that allows tracing the history and evolution of these typologies. One of these, of greatest interest, is for example contained in the book [22] dedicated to the famous photographer Achille MAURI, born in Puglia, of Neapolitan adoption, where images of numerous bridges and viaducts taken during their construction, largely preserved in the repertoire of the ALINARI Brothers are collected: they constitute a valuable record for historians of Structural Engineering.

The first Italian railway constructions were entrusted to foreign companies and had characteristics similar to those adopted in other European countries. At the beginning, metal bridges were made of cast iron; this material was then partially replaced by puddled iron for the realisation of the elements subject to traction. Subsequently, in conjunction with the Italian industrial development and the emancipation from abroad, the latter became the most widely used material in Italy to build first full wall and then lattice bridge girders.

Among others the Camaioni bridge on the lower Arno deserves to be remembered, built in 1848 for the Leopoldine Railways in Tuscany, based on the project by R. STEPHENSON, built with two parabolic girders of cast iron each consisting of 7 ashlar, for a total length of approximately 30 m, from which the deck was suspended. The most important peculiarity of this work lies in the fact that the two bearing beams bore iron bars anchored to the heads at the bottom, each composed of four elements connected by means of wedge joints. They were used, by means of forcing wedges, to determine a kind of pre-stress in the cast iron beams so as to compensate for the poor tensile strength of that material, pushing the argument of making iron and cast iron collaborate greatly forward in order to improve the performance of structures, the technical level. Thus anticipating in a certain sense what would have been done with pre-stressed concrete in the twentieth century [15], [16].

As for puddled iron bridges, it is historically interesting to observe that, along the Peninsula railway lines in the nineteenth century, many long remained in operation and certainly gave satisfactory results. During the twentieth century they were largely replaced by new structures, especially after the Second World War, as a result of severe damage or even destruction. On such occasions investigations were often carried out about the mechanical properties of the material used at the time. Professor R. ZOJA, of the Politecnico di Milano investigated for example on the girders of some

OSSERVATORIO

le prove meccaniche di collaudo ai fini dell'accettazione o del rifiuto del materiale". Migliori furono i risultati ottenuti, in merito alla qualità del ferro, dal Prof. E. LEPORATI del Politecnico di Torino, il quale, intorno al 1990, condusse anch'egli un'indagine [19] sulle proprietà meccaniche del ferro impiegato negli anni immediatamente successivi al 1897 per costruire il ponte sul fiume *Talvera* a Bolzano. Trattavasi di una travata continua (fig. 14) a cinque campate di luci pari a 24 m, 27 m, 30 m, 27 m e 24 m, costituita da tre strutture a traliccio con giunzioni chiodate realizzata dall'impresa Wagner-Birò di Graz, con impalcato in struttura mista di acciaio e voltine in cemento armato, realizzata nel rispetto della legislazione valida nell'Impero austro-ungarico entro i cui confini si trovava all'epoca l'opera. Anche in tal caso risulta comunque evidente l'accentuata eterogeneità del ferro agglomerato, caratterizzato da un basso tenore di carbonio.

Furono particolarmente i ponti sul Po, costruiti tra il 1860 e la fine del Secolo, a caratterizzare la tecnica italiana nell'ambito della carpenteria metallica. Vennero generalmente usate travi rettilinee reticolari, con traliccio a maglie più o meno fitte, a sezione tubolare di forma rettangolare, con pile in muratura e schema statico a trave continua. Alcuni ponti furono progettati da tecnici stranieri e realizzati da imprese estere; altri furono prodotti dall'industria nazionale e progettati da tecnici del nostro Paese. Si affermarono nella loro realizzazione la *Società Nazionale delle Officine di Savigliano* e l'*Impresa Industriale Italiana per le Costruzioni Metalliche*, diretta, la seconda, dall'Ing. A. COTTREAU di Napoli del quale si è già avuto modo di parlare per aver molto contribuito alla diffusione nella costruzione metallica in Italia. Nella fig. 15 è riprodotto il portale del *Ponte di Piacenza*, a graticcio fitto (1865).

Una delle più importanti opere metalliche realizzate in Italia negli anni 1887/89, è il ponte stradale e ferroviario sull'*Adda* a *Paterno*, detto anche ponte *San Michele*. Un'arcata, composta di quattro archi reticolari a due a due accoppiati, avente corda di 150 m e freccia di 37,5 m, fa da sostegno a un impalcato rettilineo di luce complessiva pari a 266 m. È tuttora in esercizio ed è un bene tutelato dalla Soprintendenza per i Beni Ambientali e Architettonici della Regione Lombardia [16].

Tra le opere ferroviarie costruite nel Mezzogiorno spiccano tre grandi viadotti realizzati in struttura reticolare in acciaio lungo la linea Bari-Taranto completata nel 1868, eseguiti anch'essi dall'Impresa Cottreau. Trattasi dei viadotti di *Santo Stefano*, di *Palagianello* e di *Castellana* (fig. 16) che attraversano profonde incisioni carsiche con luci ragguardevoli. Furono realizzati impiegando travi reticolari continue con pile, anch'esse reticolari, poggiati su basamenti in muratura. Del terzo di essi tratta

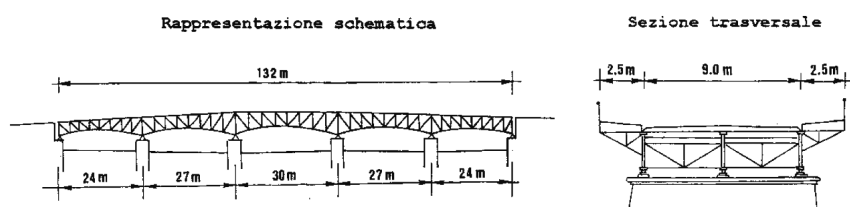


Fig. 14 - Il Ponte Talvera a Bolzano, rappresentazione schematica, 1897 (da [19], pag. 12).

Fig. 14 - The Talvera Bridge in Bolzano, schematic representation, 1897 (from [19], page 12).

bridges of the Ivrea-Aosta lines, built before 1896 that were rebuilt in the sixties of the twentieth century. The comprehensive report contained in [8], points out that the agglomerated iron tested proved to be quite poor, especially with regard to resilience. Having noted, however, that during over 70 years of life of the artefacts, they had never shown disruptions and had never given rise to concerns, Prof. ZOYA expressed this by saying that this circumstance "is a clear demonstration of the difficulty of expressing an opinion on the materials of the mechanical inspection tests for the purposes of acceptance or rejection of the material". Best results were obtained by Prof. E. LEPORATI of the Politecnico

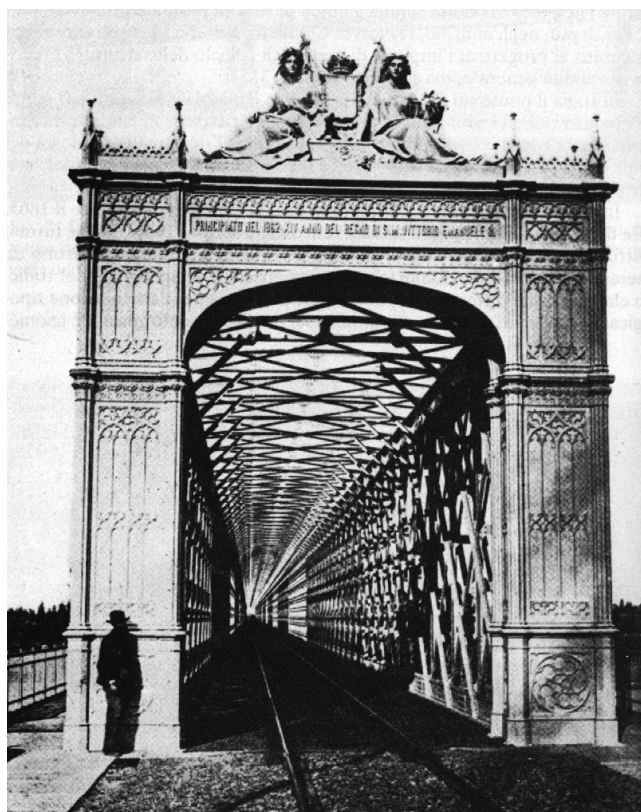


Fig. 15 - Portale del Ponte sul Po a Piacenza, 1862/65 (da [16], pag. 426).

Fig. 15 - Portal of the Bridge over the Po in Piacenza, 1862/65 (from [16], page 426).

OSSERVATORIO

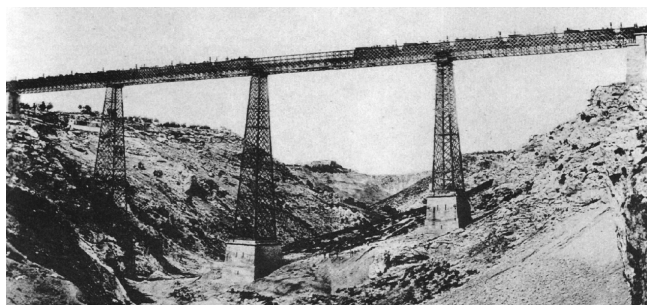


Fig. 16 - Il Ponte sulla Gravina Maggiore di Castellaneta (Ta), 1868 (da [25], pag. 10).

Fig. 16 - The Bridge on Gravina Maggiore di Castellaneta (Ta), 1868 (from [25], page 10).

in maniera esauriente P. MONACO in [20], il quale rileva come i piedritti metallici presentassero il vantaggio, non irrilevante, data la grande altezza, di pesare di meno se paragonati a eventuali strutture in muratura e di essere meno sensibili all'azione del vento, particolarmente intenso in quelle zone. È interessante ricordare come il manufatto di cui si sta dicendo sia stato sostituito nel 1931 da un ponte in muratura, a sua volta dismesso alla fine degli anni Novanta del Novecento nel quadro di un profondo ammodernamento della tratta, e sostituito da un grande ponte ad arco in cemento armato.

Tra i ponti speciali realizzati in Italia nella seconda metà dell'Ottocento merita un cenno particolare il *Ponte girevole di Taranto* (fig. 17) che, per la sua rilevanza, divenne il simbolo della Città Jonica: esso fu realizzato dalla già citata Impresa Industriale di Napoli e inaugurato nel 1887 [1], [3], [25]. Era costituito da un grande arco metallico diviso in due battenti, ciascuno dei quali girevole attorno a un perno disposto sulla corrispondente spalla. Ogni semiarco era costituito da quattro travi reticolari longitudinali a briglie arcuate, simmetriche due a due rispetto all'asse del manufatto; la distanza tra i due centri di rotazione era pari a m. 67,00 e la lunghezza totale del ponte di 89,90 m. Le travi reticolari furono realizzate a traliccio di S. Andrea con brevi tratti a parete piena verso la chiave e sulle fiancate; trasversalmente a distanza di 2,00 m. l'uno dall'altro, furono disposti, dei travicelli sui quali, in direzione longitudinale, furono appoggiati dei correnti di quercia portanti a loro volta trasver-

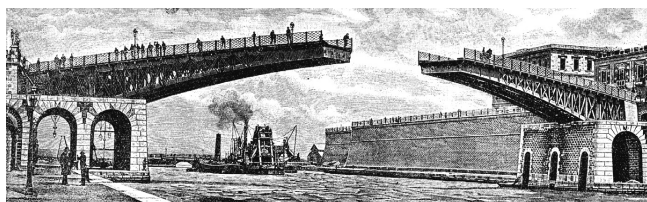


Fig. 17 - Il Ponte girevole di Taranto, 1882, da uno schizzo di fine Ottocento (da [3], tav. XXXVIII).

Fig. 17 - The Taranto Swing Bridge, 1882, from a sketch of the late nineteenth century (from [3], table XXXVIII).

di Torino on the quality of the iron, who, around 1990, also led an investigation [19] on the mechanical properties of the iron used in the years immediately after 1897 to build the bridge over the river Talvera in Bolzano. It involved a continuous girder (fig. 14) in five spans equal to 24 m, 27 m, 30 m, 27 m and 24 m, consisting of three lattice structures with riveted joints built by the Wagner-Birò company of Graz, with deck in a mixed structure of steel and reinforced concrete vaults, built in compliance with the valid legislation within the Austro-Hungarian empire within whose borders the work was at the time. Even in such a case the accentuated heterogeneity of the iron agglomerate was evident, characterised by low carbon content.

The bridges over the Po, built between 1860 and the end of the century, especially characterised the Italian technology in the field of metallic carpentry. Reticular straight beams were generally used, with more or less thick meshes lattice, in rectangular tubular section, with built-in piers and continuous beam static scheme. Some bridges were designed by foreign engineers and built by foreign companies; others were produced by the domestic industry and designed by engineers of our country. The Società Nazionale delle Officine di Savigliano and the Impresa Industriale Italiana per le Costruzioni Metalliche were successful in their realisation, the second one directed by Eng. A. COTTREAU of Naples about whom we have already spoken for having greatly contributed to the spread in metal construction in Italy. Fig. 15 shows the portal of the Piacenza bridge, with dense lattice (1865).

One of the most important metal works created in Italy in the years 1887/89, is the road and railway bridge on the river Adda in Paterno, also called San Michele Bridge. An arch, composed of four reticular arches coupled two by two, with a chord of 150 m and 37.5 m sag, serves as support for a straight deck with overall span equal to 266 m. It is still in operation and is a property protected by the Superintendence for Environmental and Architectural Heritage of the Lombardy Region [16].

Among the railway works implemented in the South are three major viaducts made of steel lattice structure along the Bari-Taranto line completed in 1868, also executed by the Impresa Cottreau. It concerns the viaducts of Santo Stefano, of Palagianello and of Castellaneta (fig. 16) crossing deep karst incisions with considerable spans. They were made using continuous lattice girders with piers, also in lattice, leaning on stone pedestals. P. MONACO in [20] deals comprehensively with the third, pointing out how the metal piers have the not insignificant advantage of weighing less, given the great height, when compared to any masonry structures and of being less sensitive to wind, particularly intense in those areas. It is interesting to remember how the artefact we are talking about was replaced in 1931 by a masonry bridge, in turn decommissioned at the end of the nineties of the twentieth century as part of thorough modernisation of the route, and replaced by a large arched bridge in reinforced concrete.

OSSERVATORIO

salmente i tavoloni, pure di quercia, dello spessore di 75 mm. Superiormente era presente un secondo strato di legname a spina di pesce, inchiodato al primo, per un ulteriore spessore di 50 mm. Opportuni aggetti di 0,60 m, realizzati mediante mensole di ferro fissate ai montanti degli arconi laterali, servivano a sostenere i marciapiedi muniti di ringhiere metalliche; controventi verticali furono disposti tra le travi principali in corrispondenza dei travicelli. Fu svolto all'epoca uno studio molto approfondito per la scelta del sistema di movimentazione dell'opera, vagliando numerose proposte abbondantemente discusse sia dal punto di vista tecnico che economico: prevalse infine l'idea di muovere il ponte usando turbine idrauliche, disposte sotto le due spalle, con l'asse sulla verticale del perno di rotazione di ciascuno dei due battenti costitutivi del manufatto. Le turbine vennero alimentate sfruttando la caduta dell'acqua contenuta in un serbatoio posto sul contiguo Castello aragonese. Il ponte funzionò con le modalità previste in progetto fino agli anni 1957/58, quando fu rimodernato radicalmente ad opera della *Società Nazionale delle Officine di Savigliano* e azionato elettricamente; una manutenzione straordinaria fu ancora eseguita negli anni 1984/85. In entrambe queste circostanze furono realizzati, a servizio della cittadinanza, dei ponti provvisori galleggianti che assicurarono alternativamente, sia il passaggio del traffico cittadino che dei natanti.

Risale infine al 1832 il ponte carrettiero *Real Ferdinando* sul Garigliano (fig. 18), primo ponte sospeso italiano e secondo in Europa dopo il primo di questo tipo realizzato nel 1824 in Inghilterra. Voluto dal Re FRANCESCO I e inaugurato da FERDINANDO II, rappresentò un primato per il Regno delle Due Sicilie, tanto più in quanto, durante la costruzione, fu fatto oggetto di vivaci critiche da parte della stampa britannica che prevedeva per esso una durata molto limitata, date le scarse capacità che si attribuivano ingiustamente alla tecnica borbonica. Progettato dall'Ing. Luigi GIURA con impiego di catene forgiate, l'opera dette invece ottima prova di sé, in quanto ri-



(Fonte – Source: Wikipedia).

Fig. 18 - Il Real Ponte Ferdinando sul Garigliano, 1832.
Fig. 18 - The Real Ferdinando Bridge on the Garigliano, 1832.

Among the special bridges built in Italy in the second half of the nineteenth century the Taranto swing bridge (fig. 17) deserves a special mention that, because of its relevance, became the symbol of the Ionian city: it was built by the mentioned Impresa Industriale di Napoli and inaugurated in 1887 [1], [3] and [25]. It was made of a large metal arch divided into two leaves, each of which rotates around a pivot arranged on the corresponding abutment. Each semi-arch was formed by four longitudinal lattice trusses with arched bridles, symmetrical two by two with respect to the axis of the artefact; the distance between the two centres of rotation was equal to 67.00 m and the total length of the bridge was 89.90 m. The lattice trusses were built half-timbered with short full wall stretches towards the key and on the sides; transversely with a distance of 2.00 m from each other; rafters were arranged on which supporting cross-pieces of oak were placed longitudinally and in turn planks, also of oak, with a thickness of 75 mm were placed transversely. Above this was a second layer of timber in a herringbone pattern, nailed to the first, for a further thickness of 50 mm. Appropriate projections of 0.60 m, made of iron brackets fixed to the uprights of the side arches, were used to support the pavements with metal railings; vertical bracings were arranged between the main beams at the rafters. At the time an in-depth study was carried out for the selection of the work handling system, considering numerous proposals thoroughly discussed both from a technical and economic point of view: finally the idea of moving the bridge using hydraulic turbines prevailed, arranged under the two uprights, with the axis on the vertical of the pivot pin of each of the two constituent leaves of the artefact. The turbines were powered by exploiting the fall of the water contained in a tank located on the neighbouring Aragonese Castle. The bridge worked in the manner provided in the project up to the years 1957-58, when it was radically modernised by the Società Nazionale delle Officine di Savigliano and electrically operated; extraordinary maintenance was still performed in the years 1984/85. In both of these circumstances temporary floating bridges were created, serving citizens, that secured alternately, both the passage of the city traffic and that of the boats.

Finally the Real Ferdinando wagon bridge on the Garigliano (fig. 18) dates back to 1832, the first Italian suspension bridge and the second in Europe after the first of its kind built in 1824 in England. Wanted by King FRANCIS I and inaugurated by FERDINAND II, it represented a record for the Kingdom of Two Sicilies, the more so since, during construction, it was the subject of intense criticism from the British press, which envisaged a very limited duration of it, given the limited abilities that were unjustly attributed to the Bourbon technique. Designed by Eng. Luigi GIURA using forged chains, the work however gave good account of itself, as it remained in service until October 14, 1943, and hence for more than a century, before the Germans blew it up, after using it to withdraw towards the north.

OSSERVATORIO

mase in esercizio fino al 14 ottobre 1943, e quindi per oltre un secolo, prima che i tedeschi, dopo averlo utilizzato per ritirarsi verso il Nord, lo facessero saltare.

7. Meccanica delle strutture ed Ingegneria strutturale

Quanto si è finora sommariamente detto circa lo sviluppo delle costruzioni nel XIX Secolo e in particolare nella seconda metà di esso, è sufficiente per comprendere quale fosse l'ambiente culturale nel quale si andò coagulando quella che è stata chiamata *Ingegneria strutturale*, che si potrebbe forse più significativamente indicare come *Meccanica delle strutture*. Essa assunse i caratteri di una disciplina direttamente derivata dai principi che la Scienza del costruire veniva elaborando sin dall'inizio dell'Ottocento e fu applicata al calcolo e alla verifica degli elementi resistenti; di corpi continui cioè o di insiemi di corpi, prevalentemente monodimensionali, connessi tra loro e opportunamente vincolati, in grado di trasferire, con un adeguato margine di sicurezza, le sollecitazioni cui sono sottoposti.

Per realizzare gli elementi costitutivi delle membrature metalliche non era più sufficiente una progettazione basata sull'istinto e sull'esperienza, che, anche se rispettosa delle leggi fondamentali della statica, non comportasse un vero e proprio calcolo. Ci si rese conto cioè, non senza difficoltà e contrasti, della necessità di istituire metodi scientificamente validati, indirizzati al dimensionamento e alla verifica di costruzioni a scheletro indipendente quali erano le costruzioni metalliche, e quali, dagli inizi del Novecento, sarebbero state quelle in cemento armato. Questo modo di procedere fu inizialmente orientato allo studio di strutture come travi e sistemi di travi, ma, successivamente si sarebbe esteso a ogni tipo di progettazione: oggi non è più concepibile infatti che, a monte di un qualsiasi organismo da realizzare, che abbia un minimo di rilevanza, non vi sia un calcolo basato su rigorosi presupposti teorici.

Eppure, nel periodo iniziale di sviluppo e diffusione delle strutture metalliche, gli ingegneri, prevalentemente inglesi e francesi che di esse si occupavano, non ricorrevano che in misura assai modesta alle conoscenze teoriche, che pure all'epoca erano già esistenti, circa il comportamento dei materiali e la loro attitudine a resistere alle sollecitazioni. Essi si affidavano piuttosto, come già detto, oltre che all'istinto e all'esperienza, anche, in molti casi, alle sperimentazioni su modelli. Non esistevano del resto norme tecniche che li potessero guidare, né, da un punto di vista giuridico erano esattamente delineati il loro ruolo e le loro responsabilità nei confronti della società. Godevano insomma di una certa libertà e non erano sottoposti a controlli da parte dello Stato del quale tendevano a contestare ogni intervento che limitasse la loro libertà operativa e si opponesse alle loro decisioni. Nonostante i loro indubbi meriti essi erano spesso soggetti a critiche da parte degli studiosi e giudicati poco

7. Structural mechanics and structural engineering

As has so far briefly been said about the development of constructions in the nineteenth century and especially in the second half of it, it is enough to understand what the cultural environment was in which what has been called structural engineering was formed, that could perhaps be more significantly indicated as Structural mechanics. It assumed the character of a discipline directly derived from the principles that the Science of building was developing since the beginning of the nineteenth century and it was applied to the calculation and verification of the resistant elements; of continuous bodies or groups of bodies, mainly one-dimensional, connected to each other and suitably constrained, able to transfer the stresses to which they are subjected, with an adequate safety margin.

To create the building blocks of the metal components a design based on intuition and experience was no longer sufficient, which, though respectful of the fundamental laws of statics, did not involve a real calculation. It was realized that, not without difficulty and debate, there was the need to establish scientifically validated methods, directed to sizing and the verification of constructions with framed structures, as were the metal structures, and which those in reinforced concrete would have been, from the beginning of the twentieth century. This approach was initially oriented to the study of structures such as beams and beam systems, but it would later be extended to all types of design: in fact, today it is no longer conceivable that there is no calculation based on strict theoretical assumptions, upstream of anybody to be built, with minimum importance.

Yet, in the initial period of development and diffusion of metal structures, engineers, mainly British and French involved in the same, resorted only to a very small extent to theoretical knowledge, that already existed at the time, about the behaviour of materials and their ability to withstand stresses. They rather relied, as already mentioned, as well as on intuition and experience, also, in many cases, on experiments on models. There were indeed no technical standards that could guide them, nor, from a legal point of view were their role and responsibilities to society exactly outlined. In short, they enjoyed a certain freedom and were not controlled by the state to which they tended to challenge any action that would limit their operational freedom and that objected to their decisions. Despite their undoubted merits, they were often subject to criticism by researchers and judged poorly prepared in the fundamental disciplines, such as mathematics and physics, to be placed at the basis of structural analysis.

But soon things changed because, as the works to be carried out increased in importance, the problems related to them also increased and collapses and even major disasters increasingly occurred: there were quite a few cases of railway bridges that collapsed during operation for apparently incomprehensible reasons, sometimes leading to many casualties and extensive impact on public opinion. It was realised that the mathematical model devised by CAUCHY in

OSSERVATORIO

preparati nelle discipline fondamentali, quali la matematica e la fisica, da porre alla base dell'analisi strutturale.

Ma ben presto le cose cambiarono in quanto, mano a mano che le opere da realizzare aumentavano di importanza, aumentavano anche le problematiche ad esse connesse e sempre più si verificavano crolli e disastri anche di grande rilievo: non furono pochi i casi di ponti ferroviari che cedettero durante l'esercizio per ragioni apparentemente incomprensibili, provocando talvolta molte vittime e vasta risonanza nell'opinione pubblica. Si cominciò così a comprendere che il modello matematico ideato da CAUCHY nei primi decenni del Secolo, ben si adattava a studiare il comportamento degli elementi resistenti che si usavano nelle costruzioni. Il ferro, e soprattutto l'acciaio, erano dotati in maniera sufficiente dei requisiti di omogeneità e di isotropia necessari per applicare ad essi senza troppe difficoltà le teorie elaborate dalla Scienza delle costruzioni e ciò veniva confermato dalle sempre più frequenti verifiche sperimentali.

Tra il 1850 e il 1890 furono conseguiti tutta una serie di risultati che rappresentarono l'indispensabile premessa al calcolo strutturale: per un ingegnere moderno essi sono divenuti assolutamente familiari ed è difficile convincersi che siano stati concretamente formulati in tempi non tanto lontani dai nostri. Molte volte si tratta di deduzioni, di razionalizzazioni e di utilizzazioni tecniche di cognizioni già note dai secoli precedenti e in special modo dal Settecento, delle quali, fino ai tempi cui ci si sta riferendo, non era stata intesa l'importanza sul piano applicativo. Una puntuale esposizione, anche sommaria, di tutto ciò risulterebbe particolarmente difficile: ci si limiterà quindi a parlare di alcune delle conquiste della meccanica strutturale ottocentesca senza assolutamente avere la pretesa di trattare con un minimo di completezza la materia e senza nemmeno voler formulare una gerarchia, anche solo temporale, dei pochi concetti esposti [10], [23].

La suddivisione delle travi in *isostatiche* e *iperstatiche* è un concetto fondamentale, assolutamente familiare a un tecnico di oggi, indispensabile premessa allo studio di queste strutture. Le isostatiche infatti possono essere esternamente risolte come sistemi rigidi in quanto le sole equazioni cardinali della statica bastano a valutare le reazioni vincolari e, note queste ultime, a studiare la distribuzione delle caratteristiche della sollecitazione, sezione per sezione, lungo l'intero sviluppo della trave. Nelle seconde il problema, se affrontato allo stesso modo, appare indeterminato e può essere risolto solo nel quadro più generale della statica dei solidi deformabili e, più in particolare, elastici. In merito si sviluppò nel corso dell'Ottocento una grande disputa: e fu B.P.E. CLAPEYRON (1799-1864), scienziato e ingegnere, che, in una memoria del 1857, scrisse per primo *l'equazione dei tre momenti*. Egli impose la congruenza alla rotazione in ciascuna delle sezioni di appoggio intermedie di una *trave continua*, rendendo così possibile lo studio, con il cosiddetto *metodo delle forze*, di questo importante schema di trave iperstatica, frequente nelle strutture da ponte che si andavano realizzando in quegli anni.

the early decades of the century, well suited the study of the behaviour of resistant elements that were used in construction. Iron, and above all steel, were sufficiently provided with the requirements of homogeneity and isotropy necessary to apply the theories developed by the Science of construction to them without too much difficulty and this was confirmed by the increasingly frequent experimental verifications.

Between 1850 and 1890 a number of results that represented the indispensable premise for structural calculation were achieved: for a modern engineer they became totally familiar and it is hard to believe that they have been concretely formulated in the not too distant future. Many times it comes to deductions, rationalisations and uses of technical knowledge already known from previous centuries, and especially since the eighteenth century, of which, up to the time to which we are referring, the importance for their implementation was not understood. An accurate, even concise, presentation of everything would be too difficult: we will just talk about some of the achievements of the nineteenth century structural mechanics without absolutely no claim to address the matter with a minimum of completeness and without even wanting to formulate a hierarchy, even temporal, of the few concepts expressed [10], [23].

The division of isostatic and hyperstatic beams is a fundamental concept, absolutely familiar to a technician today, an indispensable premise for the study of these structures. Isostatics can in fact be solved externally as rigid systems as the only cardinal equations of statics are sufficient to evaluate the constraint reactions and, knowing the latter, to study the distribution of the stress characteristics, section by section, along the full length of the beam. In the second the problem, if approached in the same way, appears indeterminate and can be solved only in the more general framework of the statics of deformable solids and, more particularly, elastic ones. In this regard a great controversy developed during the nineteenth century: and it was B.P.E. CLAPEYRON (1799-1864), scientist and engineer, who, in a paper of 1857, was the first to write the equation of three moments. He imposed congruence to the rotation in each of the intermediate support sections of a continuous beam, thus making the study of this important hyperstatic beam pattern possible, with the so-called method of forces, common in bridge structures that were being built in those years.

An interesting contribution on these issues was achieved in Italy by the Savoy officer L.F. MENABREA (1809-1896), who was also a politician and held the post of Prime Minister of the Italian Government between 1867 and 1869; but above all studies and the applications of the Piedmont engineer A. CASTIGLIANO (1847-1884) were very important, which gave the elastic problem an energy setting, showing among other things how balance and consistency together are achieved in a structural body when a certain functional, linked to the stress and strain condition, becomes minimum, identifying itself, in this situation, with the so-called total potential energy. This approach led to fruitful application results, paving the way to the study of structural sys-

OSSERVATORIO

Un interessante contributo in merito a queste questioni fu conseguito in Italia ad opera dell'ufficiale sabaudo L.F. MENABREA (1809-1896), che fu anche uomo politico e ricoprì tra il 1867 e il 1869, la carica di primo ministro del Governo italiano; ma soprattutto furono rilevanti gli studi e le applicazioni dell'ingegnere piemontese A. CASTIGLIANO (1847-1884) che dettero al problema elastico un'impostazione energetica mostrando tra l'altro come equilibrio e congruenza insieme si realizzino in un organismo strutturale quando un certo funzionale, legato allo stato tensionale e deformativo, diviene minimo, identificandosi, in tale situazione, con la cosiddetta *energia potenziale totale*. Questa impostazione portò a fecondi risultati applicativi, aprendo la via allo studio dei sistemi strutturali con i cosiddetti *metodi energetici*; negli stessi anni a tale finalità si andarono orientando, non senza vivaci contrapposizioni, le applicazioni del più generale *teorema dei lavori virtuali*, diffuse magistralmente da H.F.B. MULLER-BRESLAU (1851-1921) sul finire del XIX Secolo. Un'impostazione in un certo senso duale del metodo delle forze, si ebbe, sempre nella seconda metà del Secolo, ad opera di R.F.A. CLEBSCH (1833-1872) il quale, nel 1862, mise le basi del cosiddetto *metodo degli spostamenti* che poco successo ebbe all'epoca sul piano applicativo ma sarebbe stato posto, in tempi successivi, alla base del calcolo dei telai e poi dell'analisi delle strutture eseguita con l'ausilio del calcolo automatico.

Sempre a proposito delle travi, si può ritenere che già Galileo GALILEI avesse intuito, nel formulare il suo celebre problema, contenuto nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* del 1638, il funzionamento del solido monodimensionale e introdotto il concetto di azioni interne la cui generalizzazione avrebbe in seguito portato a definire le caratteristiche della sollecitazione, rappresentative, sezione per sezione, del cimento cui la struttura è sottoposta. Negli anni Settanta del Settecento L. EULERO (1707-1783) aveva stabilito le equazioni dell'equilibrio elastico della trave, coinvolgenti, attraverso legami differenziali, il carico, lo sforzo normale, il taglio e il momento flettente e inoltre aveva formulato l'equazione differenziale della linea elastica atta a studiare il regime elastico di una trave piana. In pieno Ottocento O. MOHR (1835-1918) riprese il problema della linea elastica e, sfruttando l'analogia formale tra l'equazione differenziale della linea elastica e quella che esprime il legame tra momento e carico flettente, pervenne al suo celebre *corollario* che consente di ricavare abbassamenti e rotazioni come momenti e tagli rispettivamente della cosiddetta *trave ausiliaria*, caricata con il diagramma delle curvature. Ma MOHR va ricordato anche per aver introdotto nel 1868 il concetto di *linea di influenza*, fondamentale per lo studio delle strutture da ponte che, per loro natura, sono soggette a carichi mobili. Essa in estrema sintesi fornisce la legge con cui una certa grandezza varia, nella sezione cui è riferita, al modificarsi della posizione assunta da un carico supposto unitario che percorra l'intera struttura.

tems with the so-called energy methods; in the same years applications of the more general theorem of virtual works, spread masterfully by H.F.B. MULLER-BRESLAU (1851-1921) in the late nineteenth century was orienting to that purpose, not without lively opposition. A setting in a dual sense of the flexibility method, there was always in the second half of the century, the work of R.F.A. CLEBSCH (1833-1872) who, in 1862, laid the foundations of the so-called displacement method that had little success at the time on the application level but would be placed, at successive times, at the base of the calculation of the frames and later of the analysis of the structures performed with the aid of automatic calculation.

Speaking of the beams, it can be assumed that already in formulating his famous problem, contained in Lectures and mathematical illustration of two new sciences of 1638, Galileo GALILEI had guessed the operation of the one-dimensional solid and introduced the concept of internal forces whose generalisation would have later led us to define the characteristics of the solicitation, representative, section by section, of the endeavour to which the structure is subjected. In the seventies of the eighteenth century L. EULERO (1707-1783) had established the elastic equilibrium equations of the beam, engaging, through differential relations, the load, the normal stress, the cutting and the bending moment and had also formulated the differential equation of the elastic line designed to study the elastic scheme of a flat beam. In the nineteenth century O. MOHR (1835-1918) took up the issue of the elastic line and, using the formal analogy between the differential equation of the elastic line and the one that expresses the relationship between bending load and moment, he came to his famous corollary that allows inferring sags and rotations as moments and cuts respectively of the so-called auxiliary beam, loaded with the diagram of the curvatures. But MOHR should also be remembered for having introduced the concept of influence line in 1868, fundamental for the study of bridge structures that, by their nature, are subject to moving loads. In a nutshell it provides the law with which a certain magnitude ranges, in the section it refers to, as the position taken by an assumed load unit that travels the entire structure changes.

A. BARRÉ DE SAINT VENANT (1797-1886), a French engineer and scientist, is credited with the merit of having set and solved the problem of the cylindrical solid elastic balance that bears his name, making an essential contribution to the static-strain study of the beam. Already known results are taken from him and generalised while others are achieved for the first time. Also based on his well-known postulate, he treats the particular cases of normal stress, simple bending (straight or deviated), twist, composed bending (commonly called bending and shear) in a systematic way: his dissertations allowed the stress and deformation analysis of the constituent one-dimensional components of independent-frame bodies and had great importance in structural Engineering. Simultaneously, D.J. JOURAWSKI (1821-1891) devised the famous approximate shear stress theory and toward the end of the century R.

OSSERVATORIO

Ad A. BARRÉ DE SAINT VENANT (1797-1886), ingegnere e scienziato francese, va il merito di aver impostato e risolto il problema dell'equilibrio elastico del solido cilindrico che porta il suo nome, dando un contributo fondamentale allo studio statico-deformativo della trave. Vengono da lui ripresi e generalizzati risultati già noti mentre altri sono conseguiti per la prima volta. Basandosi anche sul suo ben noto *postulato*, egli tratta in maniera sistematica i casi particolari dello *sforzo normale*, della *flessione semplice* (*retta o deviata*), della *torsione*, della *flessione composta* (detta comunemente *flessione e taglio*): le sue trattazioni consentirono l'analisi tensionale e deformativa delle membrature monodimensionali costitutive degli organismi a scheletro indipendente ed ebbero grande importanza nell'ambito dell'Ingegneria strutturale. Parallelamente D.J. JOURAWSKI (1821-1891) mise a punto la celebre *teoria approssimata del taglio* e R. BREDT, verso la fine del Secolo, propose la teoria, anch'essa approssimata, della *torsione dei cilindri tubolari*: questi ultimi risultati, entrambi ottenuti imponendo l'equilibrio e ignorando la congruenza, ebbero ricadute applicative della massima importanza nel campo della costruzione metallica.

Un problema nuovo sul piano tecnico si pose ai progettisti delle costruzioni metalliche quando, avendo a che fare con elementi resistenti sempre più snelli in virtù dell'elevata resistenza specifica dei nuovi materiali, essi si imbattono nei fenomeni connessi con l'*instabilità dell'equilibrio* e, in particolare con quello del *carico di punta* nelle aste compresse delle travature reticolari. Si notò ben presto che i puntoni andavano incontro a un fenomeno di sbandamento sotto carichi assiali assai inferiori a quelli che determinavano la crisi nei tiranti. Di fronte a queste evidenze si fu portati in un primo momento a ritenere che il ferro e l'acciaio fossero dotati di una resistenza a compressione minore che a trazione e si cercò di dare di tale circostanza delle interpretazioni assolutamente erranee. In realtà i presupposti teorici per comprendere che il fenomeno in questione fosse analizzabile riconducendolo non alla perdita di equilibrio della struttura, bensì all'analisi dei caratteri dell'equilibrio che sotto particolari carichi tende a trasformarsi da stabile a instabile, esistevano da oltre un secolo. Da quando cioè EULERO aveva risolto nel 1744 il problema dell'asta caricata di punta, pervenendo alla famosa formula che porta il suo nome, ancor oggi utilizzata dai tecnici. Ma quello studio era rimasto assolutamente confinato nel campo delle conoscenze scientifiche in quanto non vi era stata nessuna occasione in cui risultasse necessario prenderlo in considerazione per risolvere problemi di tipo ingegneristico. I grossi piedritti murari usati fino ad allora nelle costruzioni si presentavano infatti assolutamente indenni da fenomeni di tal tipo che non avevano nessuna possibilità di manifestarsi in quanto sempre preceduti dallo schiacciamento, unica causa di possibile crisi di quegli elementi. Nel corso del XIX Secolo i costruttori presero comunque coscienza dei fenomeni di instabilità, recuperando la trattazione di EULERO, procedendo anche ad opportune sue generalizzazioni e fissandone i limiti di applicabilità. Negli ultimi decenni del-

BREDT proposed the theory of twisting of tubular cylinders, which is also approximate: these last results, both obtained by imposing balance and ignoring congruence, had application fall backs of the utmost importance in the field of metal construction.

A new technical problem was posed to the designers of metal structures when, dealing with more and more slender resistant elements by virtue of the high specific resistance of new materials, they ran into the phenomena associated with unstable equilibrium and, in particular with that of buckling in compressed rods of trusses. It was soon observed that the struts were undergoing a sliding phenomenon under axial loads much lower than those that determined the crisis in the tie rods. Faced with this evidence, one was brought at first to believe that iron and steel were provided with less resistance to compression than in traction and one tried giving that fact absolutely erroneous interpretations. Actually, the theoretical basis for understanding that the phenomenon in question could be analysed by attributing it not to the loss of balance of the structure, but to the analysis of the nature of the balance that under particular loads tends to be transformed from stable to unstable, existed for over a century. Ever since EULERO in 1744 had solved the problem of the buckled rod, reaching the famous formula that bears his name, still used by technicians. But that study had been totally confined in the field of scientific knowledge, as there had been no occasion in which it appeared necessary to take it into account to solve engineering problems. The large masonry piers used until then in construction were in fact absolutely free from phenomena of this kind that had no chance of manifesting themselves as they were always preceded by crushing, the only cause of possible crisis of those elements. During the nineteenth century, builders however became aware of the instability phenomena, recovering the dissertation of EULERO also making appropriate generalisations and setting applicability limits. In the last decades of the nineteenth century it was finally understood how the described problem also extended to several fine and more complex structures than the compressed rod, possibly also affecting other structural elements such as arches, high beams, plates, shells, domes, etc.

8. Regulatory requirements

As we have noted earlier, builders of metal constructions of the early nineteenth century had nothing but a small part of the knowledge necessary to design their structures, nor could they have rules or regulations that somehow could guide them in their work. It was only later, especially in relation to railway works, that the first technical documents and first regulations began to appear, in the most advanced countries, not easy to find nowadays, whose purpose was obviously to ensure sufficient security for the operation of networks.

In Italy the first regulations on the qualities required of materials and labour rates to be employed in service appeared in 1887 with the Technical tender documents for

OSSERVATORIO

l'Ottocento si comprese infine come la problematica descritta si estendesse anche a strutture sottili diverse e più complesse della semplice asta compressa, potendo interessare anche altri elementi strutturali come archi, travi alte, lastre, gusci, cupole, ecc.

8. Prescrizioni normative

I realizzatori delle costruzioni metalliche dei primi decenni dell'Ottocento non avevano se non in minima parte, come si è osservato in precedenza, le cognizioni necessarie per progettare le loro strutture, né potevano disporre di norme o di regolamenti che in qualche modo potessero guidarli nel loro operare. Fu solo successivamente che, specialmente con riferimento alle opere ferroviarie, cominciarono a comparire, nei paesi più avanzati, i primi capitoli e le prime normative, oggi di non facile reperimento, il cui scopo era ovviamente quello di garantire una sufficiente sicurezza all'esercizio delle reti.

In Italia le prime prescrizioni sulle qualità richieste ai materiali e sui tassi di lavoro da adoperare in esercizio comparvero nel 1887 con il *Capitolato tecnico d'appalto per le costruzioni delle strade ferrate da costruirsi nell'interesse dello Stato*, pubblicato a cura del Ministero dei Lavori Pubblici. Nella letteratura tecnica è data notizia che, successivamente, nel 1893, fu nominata una commissione presieduta dall'Ing. SACCARDO per la compilazione di un definitivo regolamento; essa tuttavia si sciolse avendo fatto solo delle proposte in merito alla necessità di aumentare il peso per asse delle locomotive da adottare nei calcoli: proposte che furono effettivamente prese in considerazione nei progetti degli anni immediatamente successivi.

Nella fig. 19a) sono rappresentati la locomotiva-tender e il carro merci da considerare per realizzare il *treno tipo*, proposto, appunto nel 1893, per la verifica dei ponti ferroviari. Per le linee più importanti (cat. A), era previsto che si dovessero considerare tre locomotive riunite (e in qualche caso addirittura quattro) seguite da un numero indefinito di carri. Per linee di minor rilievo, (cat. B e C) il carico era meno gravoso: si sarebbe dovuto comunque

the construction of railways to be built in the interest of the Country, published by the Ministry of Public Works. In technical literature news is given that, later, in 1893, a commission headed by Eng. SACCARDO was appointed for the compilation of final regulations; it nevertheless broke up having only made proposals on the need to increase the axle weight of the locomotives to be adopted in calculations: proposals that were actually taken into account in projects in immediately subsequent years.

Fig. 19a represents the tender locomotive and freight car to be considered to achieve a standard train, proposed, precisely in 1893, for the verification of railway bridges. For the most important lines (cat. A), three joined locomotives were to be considered (and in some cases even four) followed by an indefinite number of wagons. For minor lines, (cat. B and C) the load was more moderate: the possibility that, in the near future, the use of heavier engines would be provided would still have to be taken into account. Fig. 19b, the so-called Singl No. 37 locomotive is instead represented schematically, according to which several bridges in Italy had been calculated, evidently before the year indicated, probably according to the 1887 rules. The adoption of uniformly distributed loads was however allowed, deducted so that they would produce maximum stresses not less than those produced by standard trains.

Concentrated loads trains are reported in technical literature also for the calculation of road bridges, so-called carter bridges. Fig. 20a shows the animal-drawn carts to be placed in as many parallel rows as required by the width of the road if very busy; for restricted traffic roads the load of fig. 20b was valid; in special cases it was necessary to take account also of the roller passage represented in fig. 20c. The verification of the artefact under the load of the compact crowd was in any case essential and distributed both on the road and on the sidewalks, equal to 500 kg/sq. m, reducible to 400 kg/sq. m for secondary roads.

In 1897, the Ministry promulgated the General regulation for the construction, surveillance and periodic tests of bridges, viaducts and other metal works in use on the railways of the Kingdom. They are interesting from a his-

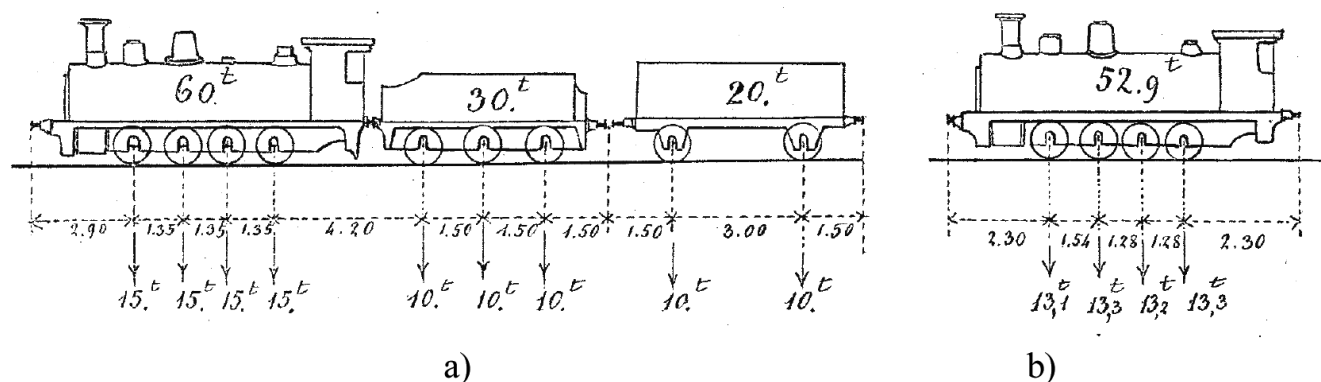


Fig. 19 - Carichi per ponti ferroviari in Italia, 1893 (da [3], pagg. 638-639).
Fig. 19 - Loads for railway bridges in Italy, in 1893 (from [3], pages 638-639).

OSSERVATORIO

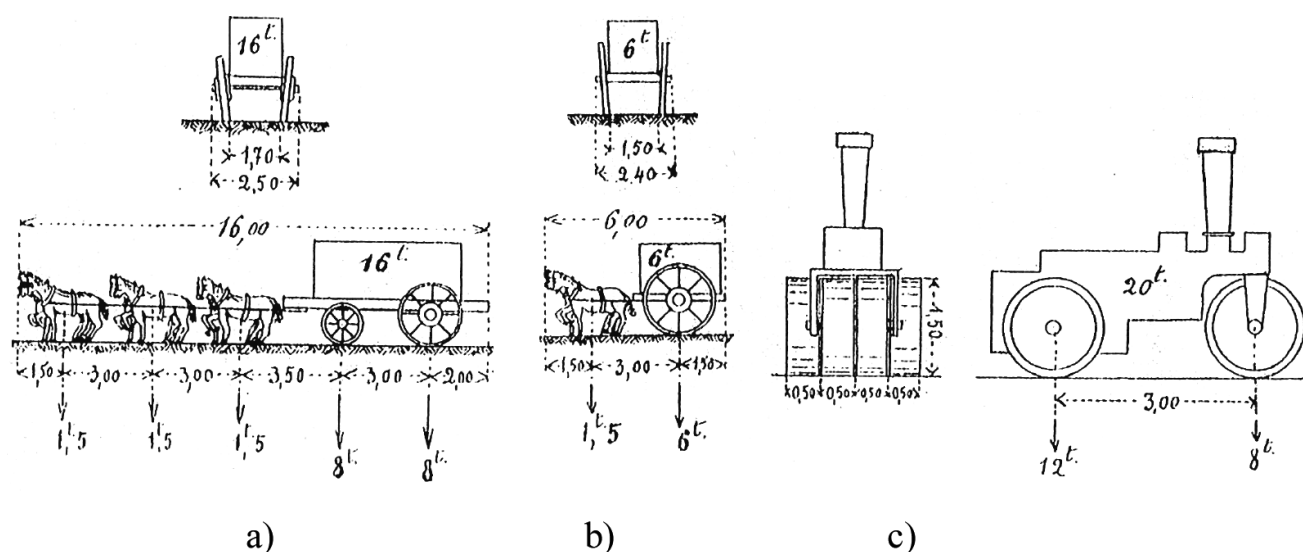


Fig. 20 - Carichi su ponti carrettieri in Italia (da [3], pagg. 636-637).

Fig. 20 - Loads on carter bridges in Italy (from [3], pages 636-637).

tener conto dell'eventualità che, nell'immediato futuro, fosse previsto l'uso di motrici più pesanti. Nella fig. 19b) è invece schematizzata la locomotiva detta *Singl N. 37*, in base alla quale erano stati calcolati parecchi ponti in Italia, prima evidentemente dell'anno indicato, probabilmente in base alle norme del 1887. Era comunque ammessa l'adozione di carichi uniformemente distribuiti, dedotti in modo che producessero sollecitazioni massime non inferiori a quelle prodotte dai treni tipo.

Treni di carichi concentrati sono riportati nella letteratura tecnica anche per il calcolo dei ponti stradali, detti *ponti carrettieri*. In fig. 20a) sono riportati i carri a trazione animale da disporre in tante file parallele quante richieste dalla larghezza della strada se di grande traffico; per strade di traffico limitato valeva il carico di fig. 20b); in casi particolari occorre tener conto anche del passaggio del rullo compressore rappresentato in fig. 20c). Fondamentale in ogni caso era la verifica del manufatto sotto il carico della folla compatta, distribuita, sia sulla carreggiata che sui marciapiedi, pari a 500 kg/mq., riducibili a 400 kg/m² per strade secondarie.

Nel 1897 il Ministero promulgò il *Regolamento generale per la costruzione, la sorveglianza e le prove periodiche dei ponti, viadotti ed altre opere metalliche in uso sulle strade ferrate del Regno*. Esse sono interessanti da un punto di vista storico in quanto tra l'altro indicano quali fossero le proprietà richieste al ferro agglomerato allora di frequente impiego e possono essere confrontate, come osserva il LEPORATI a proposito del ponte sul Talvera di cui si è detto a suo tempo [19], con quelle previste dalle indicazioni contenute in un'ordinanza del Governo austriaco del settembre 1887, sotto la cui giurisdizione si trovavano ancora, alla fine del secolo, alcune regioni che poi sarebbero passate all'Italia.

Con D.M. approvato il 29 febbraio 1908 furono pro-

torical point of view because, inter alia, they indicate what were the properties required from agglomerate iron frequently used at the time and can be compared, as noted by LEPORATI about the bridge over the Talvera river which was mentioned at the time [19], with those provided by the information included in an order of the Austrian Government in September 1887, under whose jurisdiction some regions still were, at the end of the century, that would then pass to Italy.

With Ministerial Decree approved on February 29, 1908 the Rules and conditions for testing and acceptance of ferrous materials were promulgated, that dealt in detail of Mechanical resistance tests, of Technological tests, of complementary verifications and tests and of the Technical conditions to be satisfied by the most common ferrous materials. It is a group of requirements in order to define the minimum characteristics that the metallic materials were to have in order to be used in buildings to protect public safety. They appeared in the years in which the need for appropriate legislation was widely felt; it should not be forgotten inter alia, that in January 1907 the first regulations on the requirements of the hydraulic agglomerates and those relating to reinforced concrete works were issued.

In the appendix of the 1911 [3] Hoepli Manual by Eng. PIZZAMIGLIO, the main provisions contained in the General Regulation of Metal Works affecting railways in Public Operation can be seen, edited by the State Administration in April 1909. It includes the General Provisions and five Titles, each divided into several chapters, that develop the vast area ranging from the rules governing the design of new works and the strengthening of existing ones, to the required properties of the metals, the tests on the same, the test inspections, etc. More advanced regulations than those previously mentioned appeared in the years 1914 and 1916, always in the field of railway construction, but now out of the field of interest of this presentation.

OSSERVATORIO

mulgate le *Norme e condizioni per le prove e l'accettazione dei materiali ferrosi*, che trattavano particolareggiatamente di *Prove meccaniche di resistenza*, di *Prove tecnologiche*, di *Verifiche e prove complementari* e delle *Condizioni tecniche alle quali devono soddisfare i materiali ferrosi più comuni*. Trattasi di un complesso di prescrizioni atte a definire le caratteristiche minime che i materiali metallici dovevano possedere per poter essere impiegati nelle costruzioni a salvaguardia della pubblica incolumità. Esse comparvero in anni in cui ormai l'esigenza di adeguate normative era sentita diffusamente; non si dimentichi tra l'altro che nel gennaio 1907 erano state emesse le prime prescrizioni sui requisiti degli agglomerati idraulici e quelle relative alle opere in cemento armato.

Nell'appendice del Manuale Hoepli dell'Ing. PIZZAMIGLIO del 1911 [3] si può prendere visione delle principali disposizioni contenute nel *Regolamento Generale delle Opere Metalliche che interessano strade ferrate in Esercizio Pubblico*, edito a cura dell'Amministrazione dello Stato nell'aprile 1909. Esso comprende le Disposizioni Generali e cinque Titoli, ciascuno diviso in più Capi, che sviluppano la vasta materia che va dalle norme che regolano la progettazione delle nuove opere e il rafforzamento di quelle esistenti, alle proprietà richieste per i metalli, alle prove su di essi, alle visite di collaudo, ecc. Normative più evolute rispetto a quelle precedentemente citate, sempre in materia di costruzioni ferroviarie, ma ormai fuori dal campo di interesse di questa esposizione, comparvero negli anni 1914 e 1916.

9. La Statica grafica

9.1 Generalità

La *Statica grafica* è una disciplina che si occupa della risoluzione per via geometrica di svariate problematiche relative alla statica delle costruzioni. Nacque nell'Ottocento e ricevette un grande sviluppo a seguito delle difficoltà che gli operatori incontravano nell'affrontare per via analitica i sempre più complessi problemi prospettati dall'Ingegneria strutturale applicata alle costruzioni metalliche, in assenza di efficaci strumentazioni di calcolo [4].

Essa utilizzò in una prima fase il calcolo grafico associato alla *geometria proiettiva* o *geometria di posizione* ed ebbe tra i maggiori cultori J.V. PONCELET (1788-1867), K.G.C. STAUDT (1798-1867) e soprattutto da K. CULMANN (1821-1881) che ne stabilì con rigore i principi informativi e studiò molte importanti applicazioni. Fu sviluppata da numerosi studiosi di meccanica delle strutture, alcuni dei quali, pur ispirandosi all'impostazione di CULMANN, la semplificarono impiegando un linguaggio geometricamente più semplice. Tra gli italiani che fornirono un notevole apporto a questi studi è d'obbligo ricordare L. CREMONA (1830-1903), che legò il suo nome al *diagramma cremoniano* per la determinazione degli sforzi nelle travi reticolari, C. SAVIOTTI (1845-1928), noto tra l'altro per gli studi sulla linea elastica e diversi altri ricercatori che in-

9. Graphic statics

9.1. General information

Static graphics is a discipline that deals with the geometric solution of various issues related to construction statics. It was born in the nineteenth century and was greatly developed as a result of the difficulties that operators encountered in dealing analytically with the increasingly complex problems envisaged from structural Engineering applied to steel structures, in the absence of effective computational tools [4].

In a first phase it used the graphic calculation associated with projective geometry or geometry of position and had among its greatest lovers J.V. PONCELET (1788-1867), K.G.C. STAUDT (1798-1867) and especially K. CULMANN (1821-1881), who established the guiding principles with rigour and studied many important applications. It was developed by a number of researchers of mechanical structures, some of which, while based on the setting of CULMANN, simplified it by using a geometrically simpler language. Among Italians that provided a significant contribution to these studies, one must remember L. CREMONA (1830-1903), who linked his name to the cremona diagram for the determination of the efforts in the lattice girders, C. SAVIOTTI (1845-1928), known among other things for his studies on the elastic line and several other researchers who taught the subject at the School of Engineering of our country until the entire first half of the twentieth century. The graphic calculation was provided with a more than sufficient precision in engineering applications and was very successful for the immediacy of the results and for the physical evidence with which they were achieved, as well as for control and verification that it allowed to operators. All this meant that graphic statics were long taught and, despite the emergence of processes and numerical methods that went gradually diminishing the importance, continued to have their validity, and in some cases still continue today, especially to verify the order of magnitude of the results achieved through automatic calculation.

Some of the contributions that graphic statics provide are mentioned rapidly below with no pretence of rigour and completeness of presentation and therefore more than anything else by way of example: this will serve to recall to the memory of the older technicians, concepts and procedures that are part of their cultural heritage and to provide other useful information, important perhaps not only on the historical level.

9.2. Graphic operations on scalar magnitudes

Operations on scalar magnitudes found in Physics and Mathematics can be performed by taking advantage of the so-called graphic calculation, consisting of representing the magnitudes in question by means of segments that represent the values thereof, in a pre-set unit. Algebraic operations are thus converted into operations on the segments

OSSERVATORIO

segnarono la disciplina presso le Scuole di Ingegneria del nostro Paese fino a tutta la prima metà del XX Secolo. Il calcolo grafico era dotato di una precisione più che sufficiente nelle applicazioni ingegneristiche ed ebbe molto successo per l'immediatezza dei risultati e per l'evidenza fisica con cui essi venivano conseguiti, oltre che per le possibilità di controllo e di verifica che consentiva agli operatori. Tutto ciò fece sì che la Statica grafica fosse insegnata a lungo e, nonostante l'affermarsi dei procedimenti e dei metodi numerici che andarono diminuendone via via l'importanza, continuò, e in qualche caso continua ancor oggi, ad avere una sua validità, specialmente per verificare l'ordine di grandezza dei risultati conseguiti attraverso il calcolo automatico.

In quanto segue si accenna rapidamente, senza pretese di rigore e di completezza espositiva, e quindi più che altro a titolo esemplificativo, ad alcuni degli apporti che la Statica grafica fornisce: ciò servirà a richiamare alla memoria dei tecnici meno giovani, concetti e procedimenti che fanno parte del loro bagaglio culturale e a fornire agli altri utili informazioni, importanti forse non solo sul piano storico.

9.2. Operazioni grafiche sulle grandezze scalari

Le operazioni sulle grandezze scalari che si incontrano in Fisica e in Matematica si possono eseguire usufruendo del cosiddetto *calcolo grafico*, consistente nel rappresentare le grandezze in parola mediante segmenti che, in un'unità prefissata, ne rappresentino i valori. Le operazioni algebriche vengono così trasformate in operazioni, talvolta usuali, talvolta più complesse, sui segmenti e sulle aree; di esse non ci si occupa in questa sede anche perché molte di esse sono ben note; si accenna brevemente solo all'*integrazione grafica*, operazione utile per risolvere, graficamente appunto, diversi problemi di statica di strutture monodimensionali [6].

and areas, sometimes customary, sometimes more complex; they are not dealt with here because many of them are well-known; we will briefly mention only graphics integration, a useful operation to graphically solve, several static problems of one-dimensional structures [6].

Fig. 21a shows a plane curve C representative, in the Cartesian plane $O(x, y)$ of a function $y = f(x)$, defined in the interval $a-b$. A curve with the following properties is defined as integral curve I of C , the difference of its ordinates relating to two any x -axis contained in the range of definition, measures the integral of the function between the two and that is the hatched area of the trapezoid limited by curve C between the x -axis considered.

The integral curves are infinite: one of them I can be identified by requiring it to pass through a predetermined point, for example through the origin abscissa a of the interval. A graphics integration is the operation that allows inferring I from C the latter also being known only through its graphic representation: one of the processes suitable for this purpose is called the connection beam.

Fig. 21b in fact shows the construction of the I integral of the plane curve C , based on the replacement of the latter with a diagram in steps. The effective pattern is divided in differential graphics through appropriate recall straight lines that intersect the x -axis of the abscissa in a dotted line; the average ordinate is identified for each element and that is the distance, always from the x -axis, of the compensation horizontal of the corresponding arch. The average ordinates are shown in a dotted line on the axis of the ordinates and these are projected from a P pole, with polar distance H , chosen for example on the extension of the axis of the abscissas. Thus the connection bundle is created: the parallels to its sides, resting on successive separation verticals, provide the integral curve I , whose ordinate, read on the i -th vertical, measures, at less than the polar distance H chosen, the area enclosed below the C , between the vertical for the source and the i -th considered.

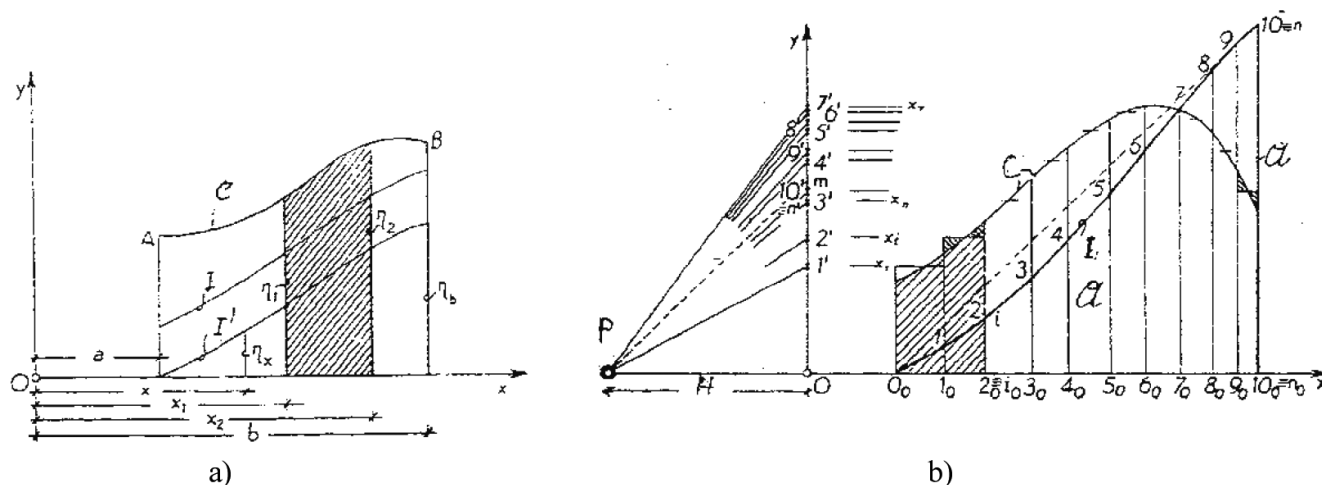


Fig. 21 - Integrazione grafica (da [6], vol. I, pagg. 59 e 65).
Fig. 21 - Graphic integration (from [6], vol. I, pages 39 and 65).

OSSERVATORIO

La fig. 21 a) mostra una curva piana C rappresentativa, nel piano cartesiano $O(x,y)$ di una funzione $y = f(x)$, definita nell'intervallo $a-b$. Si definisce curva integrale I di C una curva che goda della proprietà seguente: la differenza delle sue ordinate relative a due ascisse qualsiasi contenute nell'intervallo di definizione, misura l'integrale della funzione tra le due e cioè l'area tratteggiata del trapezoide limitato dalla curva C tra le ascisse considerate. Le curve integrali sono infinite: una di esse I' si può individuare imponendole di passare per un punto prefissato, ad esempio per l'ascissa origine a dell'intervallo. Si dice *integrazione grafica* l'operazione che consente di ricavare I da C nota essendo quest'ultima anche solo attraverso la sua rappresentazione grafica: uno dei procedimenti atti a tale scopo è quello detto del *fascio di connessione*.

La fig. 21b) mostra appunto la costruzione dell'integrale I della curva piana C , basata sulla sostituzione di quest'ultima con un diagramma a gradinata. Si suddivide il diagramma effettivo in differenziali grafici mediante opportune rette di richiamo che intersecano l'asse x delle ascisse in una punteggiata; si individua per ciascun elemento l'ordinata media e cioè la distanza, sempre dall'asse x , dell'orizzontale di compenso del corrispondente archetto. Si riportano le ordinate medie in una punteggiata sull'asse delle ordinate e le si proietta da un polo P , con distanza polare H , scelto ad esempio sul prolungamento dell'asse delle ascisse. Si realizza così il fascio di connessione: le parallele ai suoi lati, appoggiate alle successive verticali di separazione, forniscono la curva integrale I , la cui ordinata, letta sulla verticale iesima, misura, a meno della distanza polare H prescelta, l'area racchiusa al di sotto della C , tra la verticale per l'origine e quella iesima considerata. L'approssimazione del risultato conseguito è tanto maggiore quanto più fitta risulti la suddivisione in strisce del diagramma.

9.3. Il poligono funicolare

La rappresentazione di un vettore applicato mediante un *segmento orientato* fornito di freccia, che è in grado di definirne gli elementi caratterizzanti (direzione intensità e verso) e la ben nota *regola del parallelogramma* di composizione di due vettori sono alla base delle operazioni grafiche eseguibili sfruttando la *poligonale dei vettori* e il *poligono funicolare* che ad essa si può associare. Le prime nozioni relative a tali enti geometrici si possono far risalire ad S. STEVIN (1548-1620) e a P. VARIGNON (1654-1722): a quest'ultimo si collega peraltro la versione del poligono con cui si opera oggi, che mostra come la prima utilità di questi procedimenti grafici consista nel consentire la composizione di più vettori giacenti in un piano mediante una sola costruzione che si sostituisca all'impiego in cascata della regola del parallelogramma, applicata successivamente per comporli due a due [6], [13].

Premesso che le operazioni grafiche di cui si dirà presuppongono la scelta di due scale, quella delle lunghezze e quella delle intensità, la fig. 22 mostra per l'appunto in

The approximation of the result achieved is greater as the subdivision of the diagram in strips is denser.

9.3. The funicular polygon

The representation of a vector applied by means of an oriented segment provided with arrow, that is able to define the characteristic elements thereof (intensity and direction) and the well-known rule of the composition parallelogram of two vectors are the basis of graphics operations executable by exploiting the vector polygonal and the funicular polygon that may be associated to it. The first notions relating to these geometric entities can be traced back to S. STEVIN (1548-1620) and P. VARIGNON (1654-1722): the latter is moreover connected to the version of the polygon with which one operates today, which shows how the first utility of these graphics procedures consists in allowing the composition of multiple vectors lying in a plane by means of a single construction that will replace the use in cascade of the parallelogram rule, subsequently applied to compose them two by two [6], [13].

Given that graphics operations which will be discussed presuppose the choice of two scales, that of lengths and that of intensity, in a) fig. 22 shows precisely a generic system of vectors associated with the funicular polygon, built on the basis of the polygon represented on the right. The vertices of the latter are projected by the P pole, not lying on it. The sides of the polygon are parallel in the order to the projecting ones; the first and the last of its sides, along which the two carriers $P-0$ and $4-P$ act equivalent to the entire system, meet in a point Ω of the central axis through which the resulting equivalent R passes, whose direction and intensity are defined by the closing side $0-4$ of the polygonal.

Fig. 23 shows the same construction presented if the vectors are parallel to each other, while fig. 24 relates to the case in which the assigned vector system has zero result (that is, when 0 coincides with 4) and is therefore equivalent to a pair represented by two parallel vectors to $P-0$ and $4-P$, with equal module and in the opposite direction. Where, as finally shown in fig. 25, the far ends of the funicular polygon, paral-

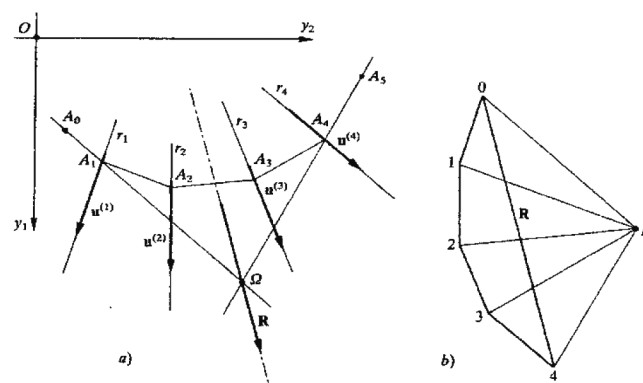


Fig. 22 - Composizione di vettori nel piano (da [13], pag. 26).

Fig. 22 - Composition of vectors in the plane (from [13], page 26).

OSSERVATORIO

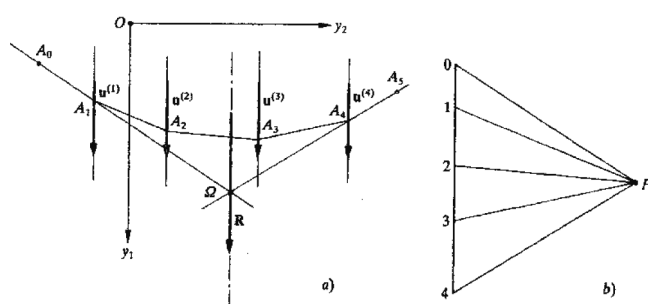


Fig. 23 - Composizione di vettori paralleli (da [13], pag. 26).
Fig. 23 - Composition of parallel vectors (from [13], page 26).

a) un sistema generico di vettori connessi con il poligono funicolare, costruito sulla base della poligonale rappresentata a destra. I vertici di quest'ultima sono proiettati dal polo P , non giacente su di essa. I lati del poligono sono paralleli nell'ordine alle proiettanti; il primo e l'ultimo dei suoi lati, lungo i quali agiscono i due vettori $P-0$ e $4-P$ equivalenti all'intero sistema, si incontrano in un punto dell'asse centrale per il quale passa il *risultante equivalente* R , la cui direzione e la cui intensità sono definite dal lato di chiusa $0-4$ della poligonale. La fig. 23 mostra la medesima costruzione quale si presenta se i vettori sono paralleli tra loro, mentre la fig. 24 si riferisce al caso in cui il sistema di vettori assegnato abbia risultante nullo (cioè quando 0 sia coincidente con 4) ed equivalga perciò a una coppia rappresentata da due vettori paralleli a $P-0$ e $4-P$, di uguale modulo e di verso opposto. Qualora, come indicato infine in fig. 25, i lati estremi del poligono funicolare, paralleli a $P-0$ e $4-P$, risultino sovrapposti, la coppia di cui al caso precedente ha momento nullo e il sistema di vettori è a sua volta nullo. Se ne deduce che, da un punto di vista grafico, condizione necessaria e sufficiente perché un sistema di vettori sia equivalente a zero è che siano chiusi sia il poligono funicolare che il poligono delle forze.

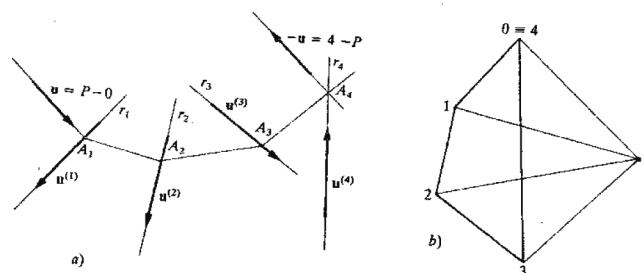
Le applicazioni alla statica delle strutture sono molteplici. Si osserva tra l'altro che, assegnato un sistema di vettori applicati, esiste una triplice infinità di poligoni funicolari con cui esso può essere connesso: imponendo tuttavia una condizione particolare, quale ad esempio il passaggio di un certo lato per un punto determinato o il parallelismo di un lato a una certa direzione, si limita il numero dei poligoni possibili a una duplice infinità. Quando di tali condizioni se ne fissino due, i poligoni ad esse soddisfacenti sono una semplice infinità mentre uno solo è il poligono che si può costruire nel rispetto di tre condizioni. I legami geometrici esistenti tra i poligoni che connettono un prefissato sistema di vettori sono regolati dal *teorema Culmann*.

Ciò premesso, se si considera una struttura staticamente determinata, quale ad esempio è il telaio a tre cerniere rappresentato in fig. 26, soggetto a un generico sistema di forze concentrate, si possono connettere queste ultime, che sono un particolare sistema di vettori applica-

lel a $P-0$ and $4-P$, prove to be superimposed, the couple referred to in the previous case has a null moment and the vector system is in turn null. This suggests that, from a graphical point of view, a necessary and sufficient condition for a vector system to be equivalent to zero is that both the polygon funicular and the polygon of forces are closed.

Applications to the static of structures are manifold. Inter alia it is observed that, given a system of applied vectors, there is a threefold infinity of funicular polygons with which it can be connected: however, imposing a particular condition, such as for example the passage of a certain side through a particular point or parallelism of a side in a certain direction, the number of possible polygons is limited to a dual infinity. When two of these conditions are set, the polygons meeting them are a simple infinity while only one polygon can be built in compliance with three conditions. The existing geometric links between the polygons that connect a set vectors system are disciplined by the Culmann theorem.

Having stated this, if a statically determined structure is considered, as for example is the three-hinge frame shown in fig. 26, subject to a generic system of concentrated forces, the latter can be connected, which are a particular applied vector system, with a polygon obliged to pass with the first side through the centre of hinge A , with the second through C , with the fourth through B . Failing to state the steps necessary to achieve that result, it is observed that in the end support reactions $P-0$ and $3-P$ of the two outer hinges can be obtained, graphically, in intensity, direction and way, respectively, applied in A and B and reaction $P-1 = 1-P$ that, through hinge C the two trunks converged therein are mutually transmitted. Similarly for the frame of fig. 27, also statically determined, the polygon, which provides the graphical solution by connecting the three assigned forces, has the third side coinciding with the axis of the internal pendulum situated in B and the fourth side passing through C . The reactions in A are derived (marked at intervals in the figure) and in C , respectively by means of the oriented segments $P-0$ and $3-P$, and the mutual reaction of the pendulum which is provided in intensity and direction by the oriented segment $P-2$ if it is the action of trunk I on trunk II, by segment $2-P$ if that of trunk II on trunk I. Hav-



(Fonte - Source: O. MAGINI, "Esercizi di Scienza delle Costruzioni", vol. I, terza ed., Colombo Corsi, Pisa, 1948, pag. 138).

Fig. 24 - Sistema di vettori equivalenti a una coppia (da [13], pag. 29).

Fig. 24 - System of vectors equivalent to a pair (from [13], page 29).

OSSERVATORIO

ti, con un poligono obbligato a passare con il primo lato per il centro della cerniera A , con il secondo per C , con il quarto per B . Omettendo di esporre le operazioni necessarie per conseguire tale risultato, si osserva che alla fine si possono ricavare, per via grafica, in intensità, direzioni e versi, le reazioni vincolari $P-0$ e $3-P$ delle due cerniere esterne applicate rispettivamente in A e B e la reazione $P-1 = I-P$ che, attraverso la cerniera C i due tronchi ivi convergenti si trasmettono mutuamente. Analogamente per il telaio, anch'esso staticamente determinato, di fig. 27, il poligono, che ne fornisce la soluzione grafica connettendo le tre forze assegnate, ha il terzo lato coincidente con l'asse del pendolo interno situato in B e il quarto lato passante per C . Se ne ricavano le reazioni in A (segnata a tratti in figura) e in C , rispettivamente mediante i segmenti orientati $P-0$ e $3-P$, e la reazione mutua del pendolo che è fornita in verso e intensità dal segmento orientato $P-2$ se rappresenta l'azione del tronco I sul tronco II, dal segmento $2-P$ se quella del tronco II sul tronco I. Traslata la reazione in A sino a farla passare per il baricentro della sezione incastrata, si ottiene infine il momento di trasporto che si identifica con quello della coppia reattiva del vincolo.

Il procedimento del poligono funicolare per la composizione delle forze concentrate può essere esteso al caso di forze ripartite lungo una linea o, più in particolare, lungo una retta. Facendo riferimento per semplicità a quest'ultimo caso e quindi alla retta $A-B$ di fig. 28, con z ascissa misurata a partire da A , il diagramma di carico di equazione $p(z)$ che su di esso insiste può pensarsi costituito da n carichi concentrati, ciascuno agente su di un tratto elementare Δz , avente intensità proporzionale all'area della porzione di diagramma ad esso corrispondente, applicato nel suo baricentro. Il poligono funicolare si ottiene costruendo la relativa punteggiata delle forze e proiettandola da un polo P : si ricava una spezzata che, al crescere del numero di suddivisioni operate tende ad una curva detta *curva funicolare* o *funicolare del carico*. Per analogia con quanto accade nei poligoni funicolari, in un generico punto R di questa si può pensare agente una for-

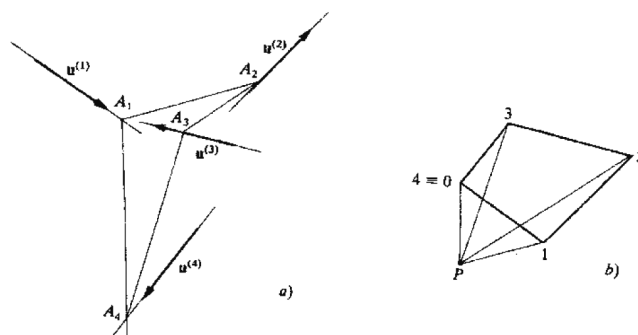


Fig. 25 - Sistema di vettori (da [13], pag. 29).

Fig. 25 - Vectors system (from [13], page 29).

ing transferred the reaction in A up to make it go through the centre of gravity of the wedged section, the transfer moment is finally obtained that is identified with that of the reactive couple of the constraint.

The procedure of the funicular polygon for the composition of the concentrated forces can be extended to the case of forces distributed along a line or, more particularly, along a straight line. Referring for simplicity to the latter case, and hence to the straight line $A-B$ of fig. 28, with z abscissa measured from A , the equation load diagram $p(z)$ that insists on it can be conceived as consisting of n concentrated loads, each acting on an elementary tract Δz , with an intensity proportional to the area of the diagram portion corresponding to it, applied in its centre of gravity. The funicular polygon is obtained by building its dotted forces and projecting it from a pole P : a broken line is obtained that, as the number of subdivisions made grows, tends to a curve called *funicular curve* or *load funicular*. By analogy with what happens in funicular polygons, in a generic point R we can think a T force is acting, measured by the segment between pole P and dotted forces, on the beam parallel to the tangent to the funicular in point R itself, called *stress* in R . If the funicular in R is materially cut, its equilibrium configuration, that is perturbed by proceeding this way, can be restored by applying, according to the tangents

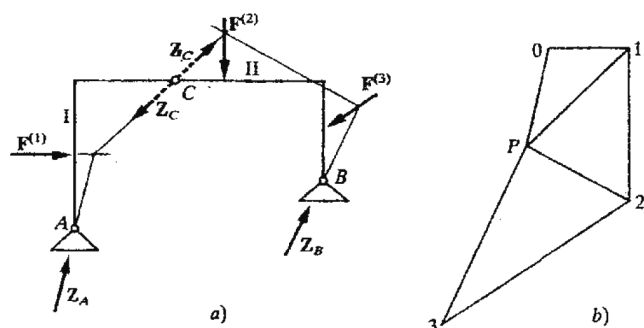


Fig. 26 - Determinazione delle reazioni vincolari per telaio a tre cerniere (da [13], pag. 233).

Fig. 26 - Determination of binding reactions for the frame with three hinges (from [13], page 233).

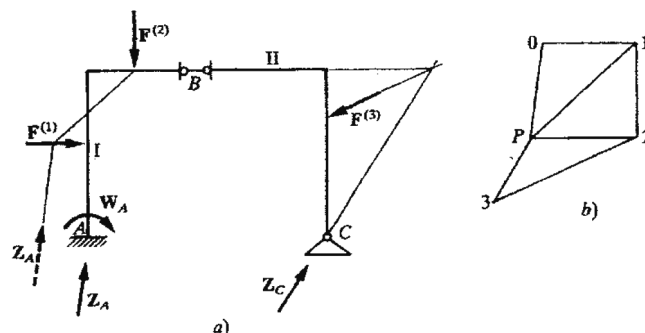


Fig. 27 - Determinazione delle reazioni vincolari per telaio isostatico (da [13], pag. 234).

Fig. 27 - Determination of binding reactions for the isostatic frame (from [13], page 234).

OSSERVATORIO

za T misurata dal segmento compreso tra il polo P e la punteggiata delle forze, sul raggio parallelo alla tangente alla funicolare nel punto R stesso, detta *tensione* in R . Se si taglia materialmente la funicolare in R , la sua configurazione di equilibrio, che così procedendo viene perturbata, può essere ripristinata applicando, secondo le tangenti ai due capi del taglio, due forze uguali e opposte che rappresentano la mutua azione che i due tronchi si trasmettevano prima del taglio. Tutto ciò è mostrato nella già citata fig. 28, da cui si deduce pure che, se si isola un tratto di funicolare compreso tra R ed S , le tensioni T agenti alle sue estremità devono equilibrare il carico totale Q che insiste sul tratto R - S . È facile osservare che la costruzione della funicolare di un carico distribuito coincide sostanzialmente con l'esecuzione, a partire dal diagramma di partenza, di due integrazioni grafiche in cascata.

9.4. La geometria delle masse

Il poligono funicolare presenta interessanti applicazioni in *geometria delle masse* [6], [13]: in quanto segue ci si limita a mostrare, a titolo di esempio, un paio di costruzioni elementari che si possono eseguire con il suo ausilio. Associando (fig. 29) a un sistema di masse concentrate in alcuni punti del piano, un sistema di vettori paralleli ad uno degli assi del riferimento supposto. In generale obliquo, aventi intensità ad esse proporzionali, si può ricavare, mediante un poligono funicolare p , la punteggiata dei *momenti statici* $0'-1'$, $1'-2'$, $2'-3'$, $3'-4'$ delle singole masse rispetto all'asse stesso e, per somma, il momento statico $0'-4'$ dell'intero sistema. Le distanze sono misurate parallelamente all'altro asse e il risultato si consegue a meno della distanza polare H , arbitrariamente assunta, del polo P dalla punteggiata dei vettori $0,1,2,3,4$, distanza anch'essa misurata parallelamente al secondo asse coordinato.

La fig. 30 mostra invece come si determini graficamente il baricentro di un sistema di masse concentrate,

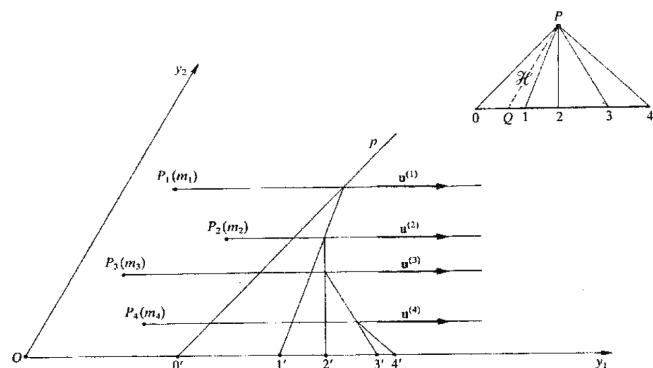


Fig. 29 - Determinazione grafica di momenti statici (da [13], pag. 57).

Fig. 29 - Graphic determination of static moments (from [13], page 57).

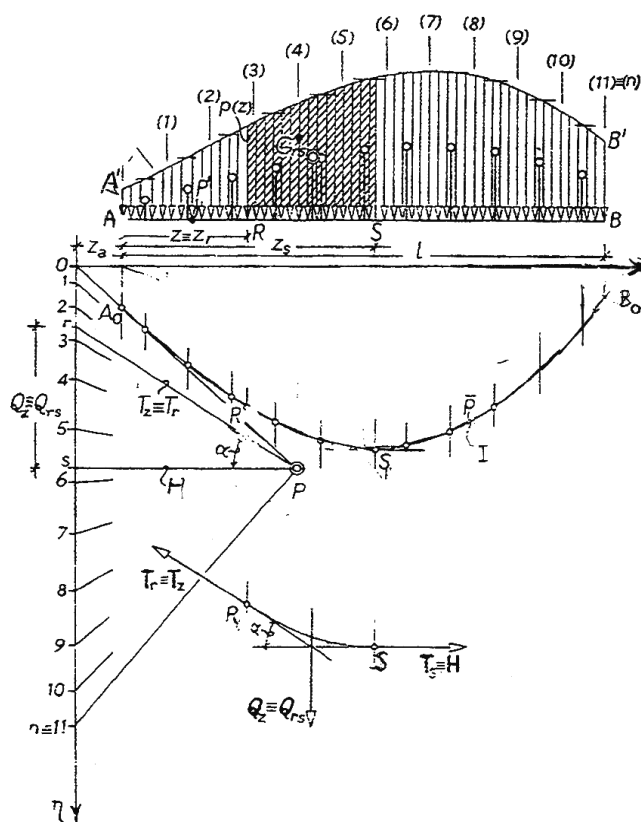


Fig. 28 - Costruzione della funicolare di un carico distribuito (da [6], vol. II, pag. 326).

Fig. 28 - Construction of the funicular of a distributed load (from [6], vol. II, page 326).

at the two ends of the cut, two equal and opposite forces which represent the mutual action that the two trunks transmitted reciprocally before cutting. All this is shown in the aforementioned fig. 28, from which it is also inferred that if a funicular section between R and S is isolated, the stresses T acting at its ends must balance the total load Q that insists on stretch R - S . It is easy to observe that the construction of the funicular of a distributed load substantially coincides with the execution, beginning from the starting diagram, of two graphics integrations in cascade.

9.4. Geometry of the masses

The funicular polygon has interesting applications in the geometry of masses [6], [13]: in what follows we merely show, by way of example, a couple of elementary constructions that can be performed with its aid. By associating (fig. 29) a vector system a parallel to one of the assumed reference axes, to a system of masses concentrated in some points of the plane, generally oblique, having intensity proportional to them, the dotted line of the static moments $0'-1'$, $1'-2'$, $2'-3'$, $3'-4'$ of the individual masses relative to the axis itself may be obtained, by means of a funicular polygon p and, for the sum, the static moment $0'-4'$ of the entire sys-

OSSERVATORIO

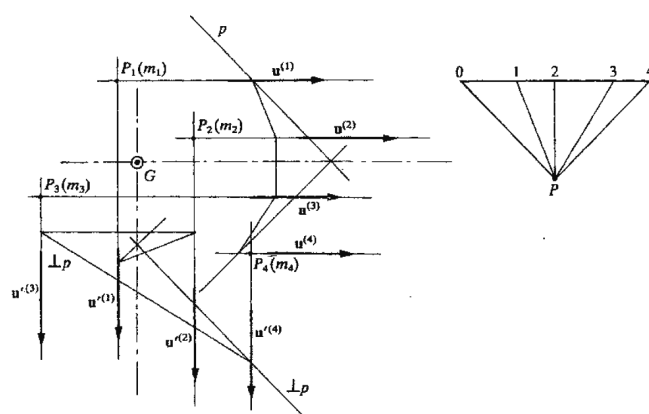


Fig. 30 - Determinazione grafica del baricentro (da [13], pag. 58).

Fig. 30 - Graphical determination of the centre of gravity (from [13], page 58).

associando ad esse due sistemi diversamente orientati di vettori applicati paralleli e costruendo i risultanti equivalenti di entrambi: il punto di intersezione di questi ultimi è per l'appunto il baricentro cercato. Se le direzioni vengono assunte mutuamente ortogonali come in figura, si risparmia la costruzione di una doppia punteggiata delle masse perché il secondo poligono funicolare, detto *normal poligono*, può essere facilmente ottenuto in quanto i suoi lati sono ordinatamente perpendicolari a quelli di p .

Restando in argomento, è appena necessario osservare che i procedimenti ricordati si possono estendere alla valutazione dei *momenti del second'ordine* rispetto ad un asse (*momento di inerzia o assiale*) o a due assi (*momento centrifugo*) di un sistema di masse concentrate. Il risultato si consegue costruendo un secondo poligono che sfrutti in cascata i risultati conseguiti con il primo ed assume, quali masse da concentrare nei punti assegnati, i momenti statici già ottenuti e rappresentati in fig. 29 dalla punteggiata $0', 1', 2', 3', 4'$.

La massa, anziché essere concentrata in un numero finito di punti come finora ipotizzato, può essere distribuita con una certa densità in un insieme continuo di punti disposti lungo linee o superfici piane: in tal caso, e, più in particolare quando la densità in parola sia costante, si può parlare più propriamente di *geometria delle linee* o, più frequentemente, di *geometria delle aree*, alle quali si possono estendere i discorsi e le costruzioni richiamate per i sistemi discreti. Ai sistemi di masse, concentrate o distribuite o dei due tipi, si associa inoltre, come ben noto a chi possiede le nozioni più elementari della Scienza delle costruzioni, il concetto di *ellisse centrale di inerzia* o *ellisse di Culmann*, la cui conoscenza è fondamentale tra l'altro per studiare la distribuzione delle tensioni nel piano della sezione trasversale di una trave variamente sollecitata ed è pertanto della massima importanza per chi si occupi di ingegneria strutturale.

tem. Distanze sono misurate in parallelo all'altra asse, e il risultato si ottiene senza la distanza H , arbitrariamente assunta, di polo P dalla serie di vettori $0, 1, 2, 3, 4$, distanza anch'essa misurata in parallelo all'altra asse.

Fig. 30 invece mostra come il centro di gravità di un sistema di masse concentrate sia graficamente determinato associando a esse due sistemi diversamente orientati di vettori applicati paralleli e costruendo i risultanti equivalenti di entrambi: l'intersezione di questi ultimi è precisamente il centro di gravità cercato. Se le direzioni vengono assunte mutuamente ortogonali come in figura, la costruzione di un doppio funicolare delle masse può essere evitata perché il secondo funicolare, detto *normal poligono*, può essere facilmente ottenuto perché i suoi lati sono metodicamente perpendicolari a quelli di p .

Stando sul tema, è hardly necessario osservare che le procedure menzionate possono essere estese alla valutazione dei *momenti del second'ordine* rispetto ad un asse (*momento di inerzia o assiale*) o a due assi (*momento centrifugo*) di un sistema di masse concentrate. Il risultato si ottiene costruendo un secondo poligono che sfrutti in cascata i risultati ottenuti con il primo e assume, quali masse da concentrare nei punti assegnati, i momenti statici già ottenuti e rappresentati in fig. 29 dalla punteggiata $0', 1', 2', 3', 4'$.

La massa, anziché essere concentrata in un numero finito di punti come precedentemente pensato, può essere distribuita con una certa densità in un insieme continuo di punti disposti lungo linee o superfici piane: in questo caso, e, più in particolare quando la densità è costante, si può parlare più propriamente di geometria delle linee o, più frequentemente, di geometria delle aree, a cui si possono estendere i discorsi e le costruzioni richiamate per i sistemi discreti. Le costruzioni per i sistemi discreti possono essere estese. Il concetto di *ellisse centrale di inerzia* o *ellisse di Culmann*, la cui conoscenza è critica, inter alia, per lo studio della distribuzione delle tensioni nel piano della sezione trasversale di una trave variamente sollecitata e che è di massima importanza per l'ingegneria delle costruzioni, è associato a sistemi di masse, concentrate o distribuite, o di entrambi i tipi, come è ben noto a chi possiede le nozioni più basilari della Scienza delle costruzioni.

Le leggi dei cambiamenti dei momenti del second'ordine rispetto alle linee rette di una trave sono probabilmente riassunte dalla famosa rappresentazione grafica del cerchio di Mohr mostrato in fig. 31. Questa costruzione permette di derivare, graficamente, i momenti di inerzia assiale e centrifugo di un sistema rispetto a due assi mutuamente ortogonali di una trave, che sono noti come gli elementi basilari, e che è da dire che le stesse grandezze con riferimento a una particolare coppia di assi ortogonali presi come assi di riferimento. Il diagramma ha molte applicazioni nella tecnica e può essere usato per costruire l'ellisse centrale di inerzia di qualsiasi sistema.

Utilizzando il cerchio di Mohr, fig. 32 studia una sezione L con lati disuguali di cui si determinano gli assi principali di inerzia, i corrispondenti momenti principali, le conseguenti

OSSERVATORIO

Le leggi di variazione dei *momenti del second'ordine* rispetto alle rette di un fascio proprio sono suscettibili di essere sintetizzate dalla celebre rappresentazione grafica del *cerchio di Mohr* riportata in fig. 31. Questa costruzione consente di ricavare, per via grafica appunto, i momenti d'inerzia *assiali e centrifugo* di un sistema rispetto a due assi mutuamente ortogonali di un fascio proprio, noti che siano i cosiddetti *elementi base*, e cioè le analoghe grandezze rispetto a una coppia particolare di assi ortogonali assunti come assi di riferimento. Il diagramma ha molte utili applicazioni nella tecnica e può essere impiegato anche per costruire l'ellisse centrale d'inerzia di un qualsiasi sistema. In fig. 32 si studia appunto, utilizzando il *cerchio di Mohr*, una sezione ad L a lati diseguali di cui sono evidenziati gli *assi principali d'inerzia*, i corrispondenti *momenti principali*, i conseguenti *raggi di inerzia* e quindi, in definitiva, l'*ellisse centrale*. Nota quest'ultima si può poi tracciare il poligono a cinque lati, annerito in figura, che costituisce il *nocciolo centrale d'inerzia* della sezione [13].

9.5. Studio grafico delle strutture

Le applicazioni dei metodi grafici allo studio delle strutture sono molteplici: di esse non può fornirsi che qualche cenno, atto comunque a mostrare la versatilità e la genialità dei procedimenti usati dagli ingegneri del passato per affrontare problematiche anche complesse [5], [6].

Ci si limita a mostrare alcuni esempi relativi a travi a una campata. Per la trave appoggiata agli estremi di fig. 33, soggetta a un carico distribuito generico, noto solo attraverso il suo diagramma, tre operazioni di integrazione grafica opportunamente condotte servono a costruire i diagrammi dello *sforzo normale*, del *taglio* e del *momento flettente*. È necessario innanzi tutto dedurre dal diagramma di carico assegnato quelli del *carico assiale* e del *carico flettente*; l'integrale del primo porge lo sforzo normale; quello del secondo il taglio. Dall'integrazione grafica di quest'ultimo si deduce poi il diagramma del momento. Ricordando che le curve integrali ottenibili dall'integrazione sono infinite, è necessario fissare opportunamente le fondamentali a partire dalle quali i diagrammi costruiti vanno letti; e questo risultato si può conseguire usufruendo delle condizioni di vincolo che consentono di prevedere i valori delle grandezze in gioco in corrispondenza di particolari sezioni. Nel caso in esame, ad esempio, il diagramma dello sforzo normale si definisce imponendo che la caratteristica in parola sia nulla nella sezione di estremità destra ove è ubicato il carrello; il diagramma del momento va riferito invece alla con-

inertia rays and therefore, ultimately, the central ellipse are highlighted. Knowing the latter the polygon with five sides can then be plotted, blackened in the figure, which constitutes the central core of inertia of the section [13].

9.5. Graphic study of structures

The applications of graphical methods to the study of structures are manifold: some mention about these can be provided, however, suitable to show the versatility and genius of the procedures used by the engineers of the past to deal with even complex issues [5], [6].

We will just show some examples of beams with one span. For the beam resting at the ends of fig. 33, subject to a generic distributed load, known only by its plot, three appropriately conducted graphic integration operations aim to build the diagrams of normal stress, of the shear stress and of the bending moment. We must first deduct from the load diagram those of the assigned axial load and bending load; the integral of the first gives the normal stress; that of the second the shear stress. The moment of the diagram can be inferred from the graphical integration of the latter. Remembering that the integral curves obtainable from the integration are endless, it is necessary to properly set the fundamentals from which the built diagrams should be read; and this result can be achieved by using the constraint conditions that allow predicting the values of the quantities involved at particular sections. In this case, for example, the diagram of the normal stress is defined by requiring that the characteristic in question is null in the right end section where the cart is located; the diagram of the moment should be reported instead of the line joining its intersections with the end verticals, so as to take account of the cancelling of the characteristic in question at the ends of the beam. Working backwards it is then possible to derive the key of the shear stress diagram that intercepts on the vertical ends of the representative segments, in the scale of the forces, of binding forces in A and B.

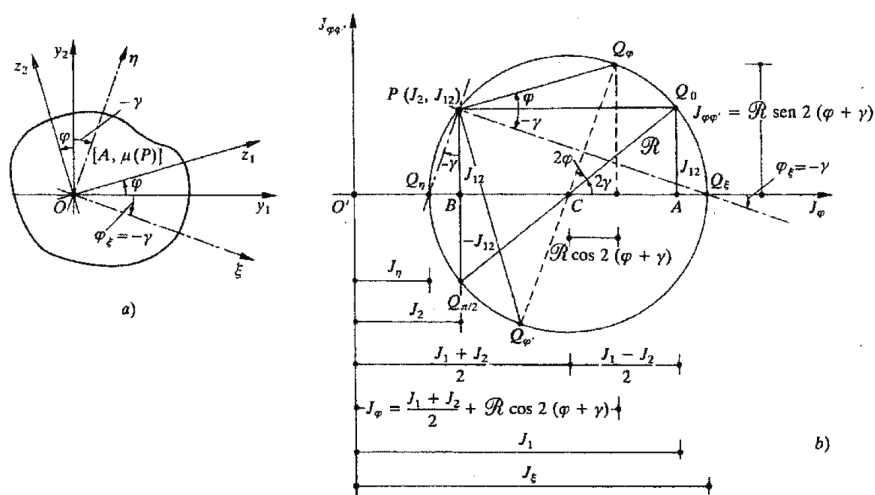


Fig. 31 - Costruzione del cerchio di Mohr (da [13], pag 75).
Fig. 31 - Construction of Mohr's circle (from [13], page 75).

OSSERVATORIO

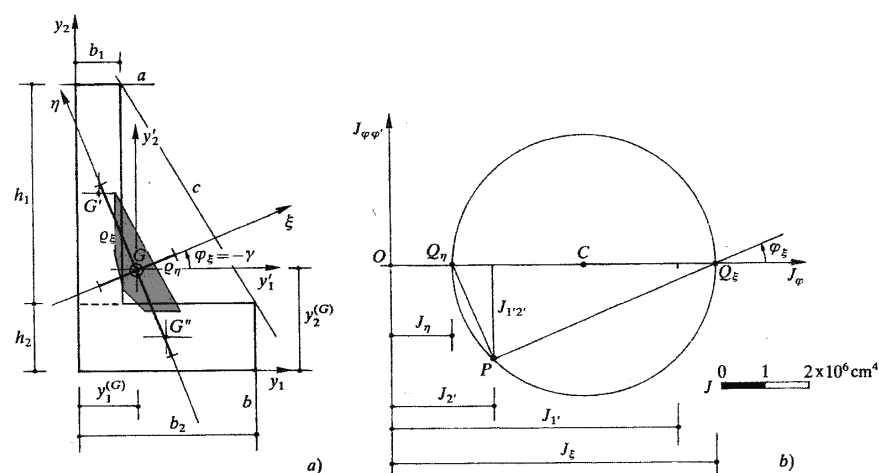


Fig. 32 - Costruzione dell'ellisse e del nocciolo centrale d'inertia di una figura piana (da [13], pag 96).

Fig. 32 - Construction of the ellipse and of the central core of inertia of a plane figure (from [13], page 96).

giungente delle sue intersezioni con le verticali estreme, per tener conto dell'annullarsi della caratteristica in parola alle estremità della trave. Procedendo a ritroso è poi possibile ricavare la fondamentale del diagramma del taglio che intercetta sulle verticali di estremità i segmenti rappresentativi, nella scala delle forze, delle reazioni vincolari in A e B.

Il metodo di Saviotti completa in un certo senso il discorso precedente in quanto si spinge a costruire, sempre per via grafica, mediante due successive integrazioni del diagramma del momento, dapprima il diagramma delle inclinazioni e poi quello degli abbassamenti. Esso si può estendere al caso di travi a sezione variabile, se si corregge, prima della successiva integrazione, il diagramma del momento dividendone le ordinate per la rigidità flessionale EJ e trasformandolo così nel cosiddetto diagramma delle curvature (fig. 34). Lo stesso risultato si ottiene con il metodo di Mohr che differisce dal precedente in quanto, in luogo delle quattro integrazioni successive di cui questo si avvale, usufruisce di due funicolari: quella del diagramma di carico che rappresenta, sempre in opportuna scala, il momento flettente e quella che opera su quest'ultimo, dopo averlo trasformato in diagramma delle curvature. Il risultato dell'ultima operazione è la deformata della trave.

Gli esempi prospettati danno solo un'idea assai parziale delle possibilità che i procedimenti grafici offrono al fine di risolvere strutture più complesse, anche staticamente indeterminate, come le travi incastrate, le travi continue, le strutture ad arco, soggette a carichi sia fissi che mobili. Anche la teoria delle linee di influenza, fondamentale per lo studio dei ponti, si servì ampiamente, specie ai suoi albori, di metodi grafici spesso sofisticati. Né si può fare a meno di citare le implicazioni grafiche che ebbe la teoria dell'ellisse di elasticità, certamente no-

The Saviotti method completes the previous discussion in a certain way as it helps building, always graphically, by means of two successive integrations of the diagram of the moment, first the inclinations diagram and then that of sags. It can be extended to the case of variable section beams, if the diagram of the moment is corrected by dividing the ordinates thereof by the bending stiffness before the subsequent integration, and turning it into the so-called curvature diagram (fig. 34).

The same result is obtained with the Mohr method which differs from the previous one in that, in place of the four successive integrations which this uses, it uses two funiculars: that of the load diagram that it represents, always in an appropriate scale, the bending moment and the one that operates on the latter, after having turned it in curvature diagram. The result of the last operation is the deformed of the beam.

The examples proposed give only a very partial idea of the possibilities that graphics procedures offer in order to solve more complex structures, even statically indeterminate, such as wedged beams, continuous beams, arched structures, subject to both fixed and mobile loads. Even the theory of influence lines, essential for the study of the bridges, used the often sophisticated graphical methods extensively, especially in its early days. Nor can we fail to mention the graphic implications that the theory of ellipse of elasticity had, certainly known to the not so young technicians as it was still used and taught up to over half of the twentieth century. To describe the scale the words used by O. BELLUZZI are certainly very significant at the beginning of the second volume [7] of its *Building Science*: "The ellipse theory of plasticity, devised by CULMANN and then applied systematically by J.W. RITTER (1776-1810), is the most elegant method for the study of the deformation of the beams with the straight line or curved axis and constant or variable section". And again: "This theory brings together in summary all the properties of the beam deformation allowing to quickly determine the rotations and displacements caused by a section caused by given forces and the forces necessary to cause said movements. It also allows to easily and intuitively foresee the qualitative characteristics of the deformation itself. So that often problems that would present sometimes considerable difficulties, if approached in another way, are immediately solved with its use, and with clear visual inspection".

9.6. The cremona diagram

This demo roundup of the most important applications of graphic statics, can only end with a reference to the determination of the efforts in the rods of a truss with canon-

OSSERVATORIO

ta ai tecnici meno giovani in quanto ancora adoperata e insegnata fino ad oltre la metà del XX secolo. Per descriverne la portata sono certamente molto significative le parole usate da O. BELLUZZI all'inizio del secondo volume [7] della sua *Scienza delle Costruzioni*: "La teoria dell'ellisse di elasticità, ideata da CULMANN e applicata poi sistematicamente da J.W. RITTER (1776-1810), costituisce il metodo più elegante per lo studio delle deformazioni delle travi ad asse rettilineo o curvilineo e di sezione costante o variabile". E ancora: "Questa teoria riunisce in sintesi tutte le proprietà della deformazione delle travi consentendo di determinare rapidamente le rotazioni e gli spostamenti di una sezione provocati da date forze e le forze necessarie per provocare detti spostamenti. E consente anche di prevedere facilmente e intuitivamente le caratteristiche qualitative della deformazione stessa. Così che spesso col suo impiego si risolvono in modo immediato, e con evidente controllo visivo, problemi che presenterebbero difficoltà talvolta notevoli, se affrontati per altra via".

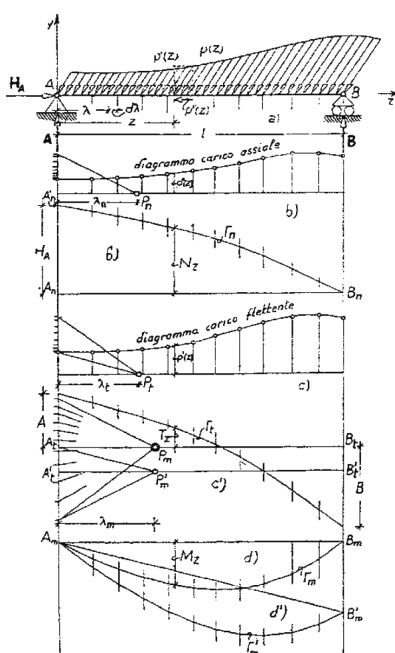


Fig. 33 - Costruzione grafica dei diagrammi dello sforzo normale, del taglio e del momento flettente (da [6], vol. II, pag. 433).

Fig. 33 - Graphic construction of the normal stress, shear stress and bending moment diagrams (from [6], vol II, page 433).

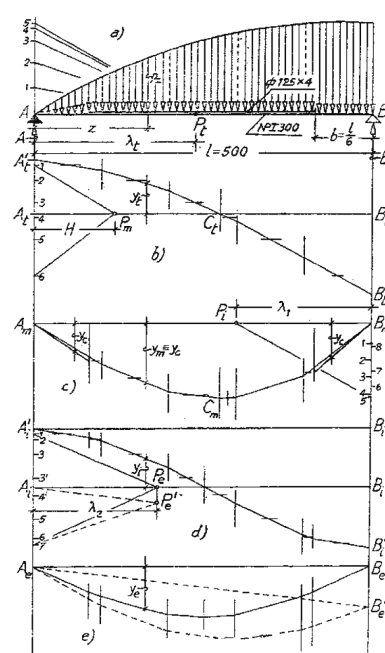


Fig. 34 - Costruzione della deformata di una trave con il metodo del Saviotti. Fig. 34 - Construction of the deformed if a beam with the Saviotti method.

9.6. Il diagramma cremoniano

Questa carrellata dimostrativa delle più importanti applicazioni della Statica grafica, non può che concludersi con un accenno alla determinazione degli sforzi nelle aste di una travatura reticolare a *nodi canonici* e cioè alla costruzione grafica detta del *diagramma reciproco* o *cremoniano*, ideato, come si è già accennato, dallo studioso italiano L. CREMONA [6], [13].

Vale la pena di ricordare preliminarmente che la struttura si ipotizza dotata di nodi articolati a cerniera e che i carichi applicati agiscono in corrispondenza di essi, sì che le caratteristiche incognite siano esclusivamente gli sforzi normali nelle aste, distinte in *puntoni* se compresse e *tiranti* se tese. Se il numero delle aste è pari al minimo richiesto per l'indeformabilità della struttura, e cioè a $2n-3$ con n numero dei nodi, la travatura è isostatica e la sua soluzione si consegue attraverso l'imposizione di sole condizioni di equilibrio. Le incognite infatti, rappresentate dai tre parametri reattivi esterni e dagli sforzi nelle $2n-3$ aste, si possono ricavare imponendo l'equilibrio alla traslazione degli n nodi; e ciò può realizzarsi ricorrendo, in ciascuno di essi, a due equazioni di equilibrio secondo due direzioni arbitrarie mutuamente ortogonali: il problema è cioè ricondotto a un sistema lineare di $2n$ equazioni in $2n$ incognite.

ical joints and that is the graphic construction of the said mutual or cremona diagram, designed, as already mentioned, by the Italian researcher L. CREMONA [6], [13].

It is worthwhile remembering at the outset that the structure is assumed with hinge articulated joints and that the applied loads act in correspondence of the same, so that the unknown characteristics are only the normal stresses in the rods, divided into struts if compressed and rods if strained. If the number of rods is equal to the minimum required for the non-deformability of the structure, namely at $2n-3$ with n number of joints, the truss is isostatic and its solution is achieved through the imposition of equilibrium conditions only. The unknowns in fact, represented by the three external reactive parameters and by the efforts in $2n-3$ rods, can be derived by imposing the equilibrium to the translation of n joints; and this can be achieved by using, in each of them, two equilibrium equations according to two mutually orthogonal arbitrary directions: that is, the problem is brought back to a linear system of $2n$ equations in $2n$ variables.

However, there are a large number of isostatic trusses, for which the problem of determining the three components of the external binding reactions and efforts in $2n-3$ rods is greatly simplified and can be usefully conducted graphically. First of all the binding reactions are assessed, by means of the polygon of forces that involve them with the external

OSSERVATORIO

Esistono tuttavia un gran numero di travature isostatiche, dette a nodi *canonici*, per le quali il problema di determinare le tre componenti delle reazioni vincolari esterne e gli sforzi nelle $2n-3$ aste si semplifica notevolmente e può essere utilmente condotto per via grafica. Si valutano dapprima le reazioni vincolari, mediante il poligono delle forze che le coinvolge con i carichi esterni; si passa quindi a un nodo in cui convergono solo due aste di cui si vogliono determinare gli sforzi e, anche in tal caso, si opera costruendo il relativo poligono di equilibrio; se è possibile individuare un successivo nodo in cui siano incogniti gli sforzi in due sole aste, si prosegue allo stesso modo e si va avanti quindi, a sciogliere, per così dire in cascata, tutti i nodi, completando l'operazione in maniera molto semplice e ripetitiva: per via analitica ciò significa che il sistema di $2n$ equazioni in $2n$ incognite del caso generale si semplifica, per la particolare configurazione del reticolo, in n sistemi lineari, ciascuno di due equazioni in due incognite.

Il discorso svolto si chiarisce meglio se ci si riferisce al caso prospettato in fig. 35a) dove è rappresentata una semplice travatura reticolare a nodi *canonici* composta di 5 nodi e 7 aste, soggetta alla forza orizzontale F applicata al nodo 5. In b) è riportato il poligono di equilibrio dell'intera travatura, considerata come un unico corpo rigido, che serve a valutare le componenti reattive esterne; in c) il poligono di equilibrio del nodo 1 che serve a determinare gli sforzi nelle aste 1-4 e 1-2; in d), e), f) quelli relativi nell'ordine ai successivi nodi 4, 2, 5. Il tutto dopo aver fissata un'opportuna scala di rappresentazione degli sforzi e osservando che, percorrendo ciascun poligono nel verso fissato dagli sforzi noti, le aste, per le quali lo sforzo corrispondente è orientato verso il nodo di cui si è imposto l'equilibrio, sono dei puntoni, mentre quelle per le quali lo sforzo è, per così dire, uscente dal nodo, sono dei tiranti.

L'idea alla base del diagramma cremoniano consiste nel riunire i poligoni di equilibrio dei nodi, in uno con quello che impone l'equilibrio dell'intera struttura, in un'unica figura nella quale ogni forza, attiva o reattiva, compare una sola volta. Determinato cioè, mediante un

loads; then one proceeds to a joint in which only two rods converge of which one wants to determine the efforts and, also in this case, one operates by building the relative equilibrium polygon; if a subsequent joint can be identified in which the efforts in only two rods are unknowns, one continues in the same way and then goes forward, undoing, so to say in cascade, all joints, completing the operation in a very simple and repetitive way: analytically this means that the system of $2n$ equations in $2n$ variables of the general case is simplified, for the particular configuration of the lattice, in n linear systems, each of two equations in two variables.

The above discussion becomes clearer if one refers to the situation envisaged in fig. 35a, where a simple truss with typical joints is represented composed of 5 connections and 7 rods, subject to horizontal force F applied to connection 5. B shows the balance polygon of the entire truss, considered as a single rigid body, which serves to assess external reactive components; in c the balance polygon of connection 1 which is needed to determine the efforts in rods 1-4 and 1-2; in d, e, f those relating to subsequent joints in the order 4, 2, 5. All this after having set an appropriate representation scale of the efforts and noting that, running along each polygon in the direction set by the known efforts, the rods, for which the corresponding effort is oriented towards the joint where the balance is imposed, are of the struts, while those for which the effort is, so to speak, outgoing from the joint, are of the tie rods.

The idea behind the cremona diagram consists in bringing together the balance polygons of joints, in one with that which requires the balance of the entire structure, in a single figure in which all forces, active or reactive, appears only once. Having determined that, by means of a first polygon, the effort at an internal rod, the corresponding representative segment is used, considering it oriented in the opposite direction for those connections to which balance it still contributes.

Of course, the resulting polygonal mesh diagram must be built according to precise methods. The most important of these is that the sides of the polygons of the joints and of the balance of the entire truss, follow one another in a specific cyclic order, which coincides, connection by connection, with the arbitrarily fixed one along the contour of the structure in the numbering of acting forces.

Without going into further details that would lie outside the purely informational purpose that this dissertation proposes, fig. 36 shows the cremona of a beam called Neville, subject to vertical loads acting in the joints of upper part of the truss. Following a traditional custom, the compressed rods are represented in enlarged section, while the strained ones have a fine line: this is both in the diagram and in the structural scheme.

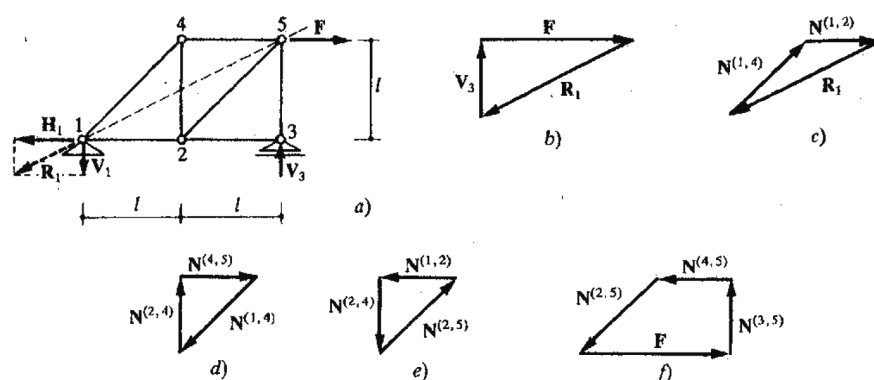


Fig. 35 - Risoluzione di una trave reticolare a nodi canonici (da [13], pag. 273).

Fig. 35 - Nodal Solution of a truss (from [13], page 273).

OSSERVATORIO

primo poligono, lo sforzo in un'asta interna, se ne utilizza il corrispondente segmento rappresentativo, considerandolo orientato nel senso opposto per quei nodi al cui equilibrio esso ancora contribuisce.

Naturalmente il diagramma a maglie poligonali che ne risulta deve essere costruito in base a precise modalità. La più importante di esse è che i lati dei poligoni dei nodi e di quello di equilibrio dell'intera travatura, si succedano in un preciso ordine ciclico, che coincida, nodo per nodo, con quello arbitrariamente prefissato lungo il contorno della struttura nel numerare le forze agenti.

Senza entrare in ulteriori particolari che esulerebbero dagli intenti puramente informativi che quest'esposizione si prefigge, si riporta, in fig. 36, il cremoniano di una trave detta *Neville*, soggetta a carichi verticali agenti nei nodi del corrente superiore. Seguendo una tradizionale consuetudine, le aste compresse sono rappresentate a tratto ingrossato, mentre quelle tese sono a tratto sottile: ciò sia nel diagramma che nello schema strutturale.

In conclusione occorre rilevare che il diagramma cremoniano deve risultare chiuso al termine della sua costruzione: questa sua peculiarità è della massima importanza in quanto rassicura, a operazioni concluse, circa la verifica di tutti gli equilibri imposti e scongiora la presenza di errori sistematici cui talvolta il calcolo automatico può condurre se non accuratamente validato e controllato.

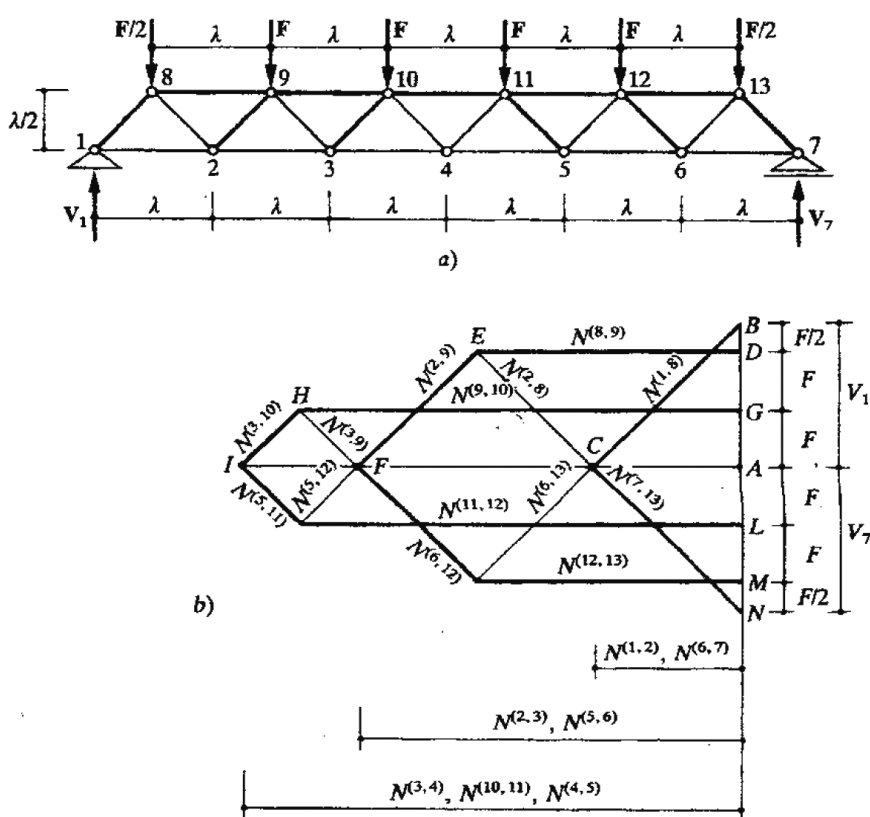


Fig. 36 - Il diagramma cremoniano per una trave Neville (da [13], pag. 274).

Fig. 36 - The cremona diagram for a Neville beam (from [13], page 274).

In conclusion it should be noted that the cremona diagram should be closed at the end of its construction: this peculiarity is of utmost importance as it reassures, upon completion, as regards the verification of all the imposed balances and averts the presence of systematic errors to which automatic calculation can sometimes lead if not thoroughly validated and checked.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] G. MESSINA, "Il Canale Navigabile tra la Rada e il Mar Piccolo di Taranto", Roma, Tipografia e Litografia del Comitato di Artiglieria e Genio, 1888.
- [2] A.F. JORINI, "Costruzione dei ponti", Ulrico Hoepli, Milano 1905.
- [3] G. PIZZAMIGLIO, "Costruzioni metalliche", Milano, Ulrico Hoepli Editore, 1911.
- [4] A. DE NORA, "Il calcolo grafico e le sue applicazioni ai problemi d'ingegneria", Editore Francesco Valsecchi, Milano, 1930.
- [5] L.F. DONATO, "Scienza delle costruzioni, parti prima e seconda", seconda edizione, Colombo Corsi Editore, Pisa, 1949.
- [6] O. MAGINI, "Statica grafica, volumi primo e secondo", quarta edizione, Pisa, Colombo Corsi Editore, 1952.
- [7] O. BELLUZZI, "Scienza delle Costruzioni, volume secondo", Nicola Zanichelli Editore, Bologna, 1956.
- [8] R. ZOJA, "Esame dei materiali ferrosi impiegati nella costruzione delle travate dei ponti della linea ferroviaria Ivrea-Aosta alla fine del secolo scorso", Ingegneria ferroviaria, n. 3, marzo 1965.

OSSERVATORIO

- [9] A. PETRIGNANI, *"Problemi di Architettura"*, in L'acciaio nelle costruzioni moderne, Dedalo Libri, Bari, 1971.
- [10] E. BENVENUTO, *"La Scienza delle Costruzioni e il suo sviluppo storico"*, Manuali Sansoni, Firenze 1981.
- [11] V. NASCÈ, *"La progettazione strutturale e la costruzione metallica dalle origini al periodo 1850-1860"*, in Contributi alla storia della costruzione metallica, coordinatore Vittorio NASCÈ, Alinea Editrice s.r.l., Firenze 1982.
- [12] G.E. RAPPINI, *"L'evoluzione del materiale e dei processi siderurgici dalla ghisa al ferro, all'acciaio"*, in Contributi alla storia della costruzione metallica, coordinatore Vittorio NASCÈ, Alinea Editrice s.r.l., Firenze 1982.
- [13] A. SOLLAZZO, U. RICCIUTI, *"Scienza delle costruzioni I, Statica dei sistemi rigidi"*, UTET, Torino, 1983.
- [14] C. BERTOLINI, *"Culture edilizie regionali della costruzione metallica ottocentesca legata allo sviluppo della rete ferroviaria"*, in Tecnologia scienza e storia per la conservazione del costruito, Fondazione Callisto Pontello, Firenze, Annali, marzo-giugno 1987.
- [15] G. PISTONE, *"Caratteristiche meccaniche della ghisa nelle strutture ottocentesche"*, in Tecnologia scienza e storia per la conservazione del costruito, Fondazione Callisto Pontello, Firenze, Annali, marzo-giugno 1987.
- [16] A.M. ZORGNO, *"Condizioni tecniche e cultura scientifica nella costruzione metallica ottocentesca in Italia"*, in Tecnologia scienza e storia per la conservazione del costruito, Fondazione Callisto Pontello, Firenze, Annali, marzo-giugno 1987.
- [17] T.S. ASHTON, *"La Rivoluzione industriale 1760-1830"*, Editori Laterza, 1987.
- [18] P. MANTOUX, *"La Rivoluzione industriale. Saggio sulle origini della grande industria moderna in Inghilterra"*, Editori Riuniti, Roma, III ed, 1991.
- [19] E. LEPORATI, *"Sul ferro agglomerato costituente i ponti metallici della seconda metà del 1800"*, Atti del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Torino, n. 46, 1995.
- [20] P. MONACO, *"I ponti ferroviari nella Gravina Maggiore di Castellaneta"*, Conferenze sulla storia dell'Ingegneria, Politecnico di Bari, n. 5, 4 dicembre 1997.
- [21] A. SOLLAZZO, C. SGOBBO. *"L'evoluzione del solaio latero-cementizio"*, in Sicurezza e conservazione delle prime costruzioni in cemento armato, a cura di M. MEZZINA, G. UVA, R. GRECO, Città Studi edizioni, De Agostini, Novara, giugno 2008.
- [22] C. GELAO (a cura di), *"Achille MAURI, fotografo di Sua Maestà"*, Pinacoteca Provinciale di Bari, Alinari 24 ore, Firenze, 2009.
- [23] D. CAPECCHI, G. RUTA, *"La Scienza delle costruzioni in Italia nell'Ottocento"*, Springer-Verlag Italia, Milano, 2011.
- [24] A. SOLLAZZO, *"L'Arte del Costruire. Verso una moderna disciplina matematica"*, Mario Adda Editore, Bari 2012.
- [25] A. SOLLAZZO, *"Tradizioni ingegneristiche e realizzazioni in Puglia tra Ottocento e Novecento"*, Tip. Danisi, Bari, aprile 2013.