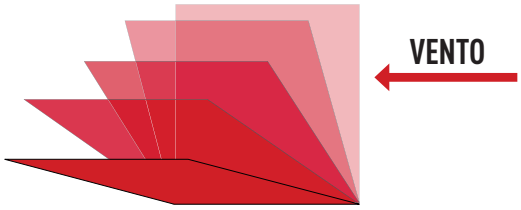
FONDAZIONE GROSSMAN

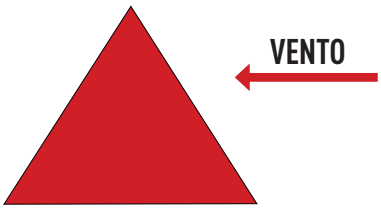
QUANDO LA RAGIONE SI FA SCUOLA

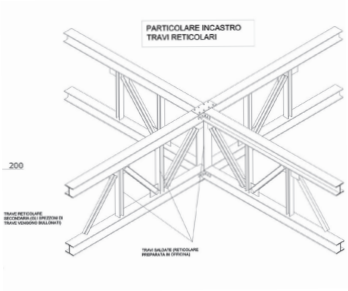
Il problema che gli architetti dovettero affrontare era quale fosse la **forma ideale** per la torre.
Le ipotesi di base erano due:

RETTANGOLARE
scartata a priori perché gli angoli possono variare

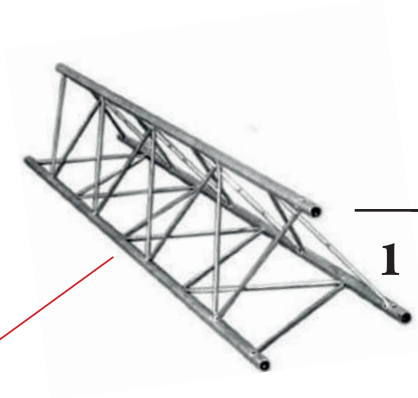
TRIANGOLARE
è la forma più stabile poiché indeformabile







Si opta quindi per **una piramide retta a sezione quadrata** che è più leggera rispetto a un parallelepipedo avente la stessa base.
Questo principio di stabilità si ripete lungo tutta la torre attraverso la successione di piccoli triangoli di aste complanari vincolate ai nodi in modo da costituire un elemento resistente e indeformabile: questa struttura è detta **reticolare**.

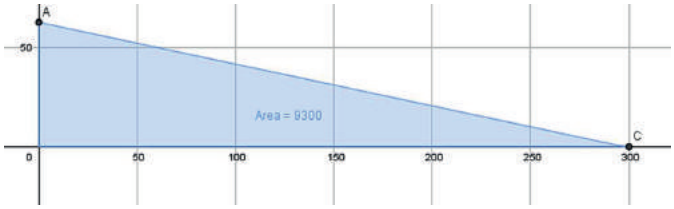


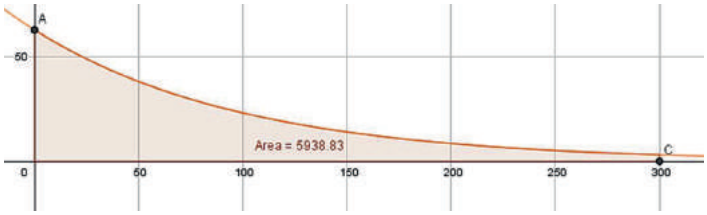
1

struttura e forma

problema del peso

Un ulteriore problema da risolvere era quello del peso.
Si decise quindi di **ridurre la superficie laterale e il volume usando una curva esponenziale**.





La struttura reticolare ha agevolato la soluzione di questo problema.

CALCOLI:

- Peso specifico del ferro = 7.85 kg/dm^3
- Lato quadrato della superficie di base = 125 m
- Altezza della torre = 300 m

PIRAMIDE PIENA

Volume = S_b x h/3 = 1.56 x 10^9 dm^3
Peso = V x P_s = 12.24 x 10^6 T
Pressione media = Forza peso / S_b =
= 12.24 x 10^6 T / 1.56 x 10^4 m^2 = 7.84 T/m^2
cioè 7.84 x 10^3 Kg/dm^2

CURVA ESPONENZIALE

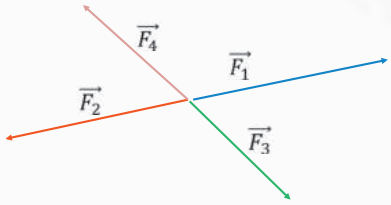
Peso= 7000 T
Pressione media = 7000 T / 1252 m^2 cioè 4.5 Kg/dm^2

condizioni di equilibrio

Dal punto di vista fisico, devono essere soddisfatte **due condizioni** per mantenere l'equilibrio statico della struttura della Torre Eiffel.

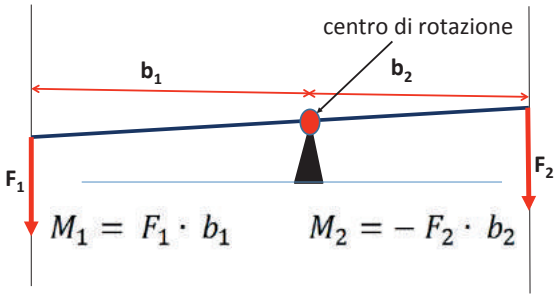
1

La prima condizione richiede che la **somma vettoriale delle forze che agiscono sul corpo sia pari a zero**



$$\vec{F_1} + \vec{F_2} + \vec{F_3} + \vec{F_4} = 0$$

2

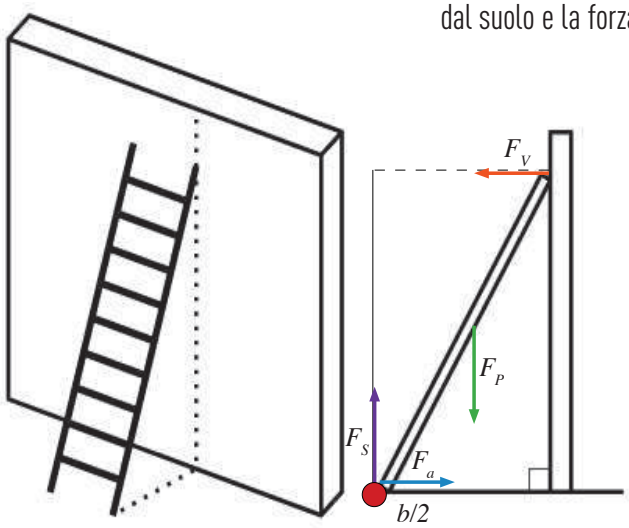


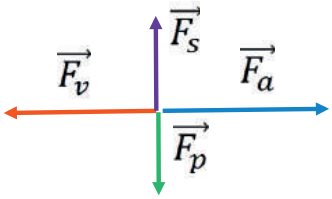
$$M_1 = F_1 \cdot b_1 \qquad M_2 = -F_2 \cdot b_2$$

$$\vec{M_1} + \vec{M_2} = 0$$

La seconda condizione richiede che la **somma algebrica dei momenti rotatori sia pari a zero**: il momento è una grandezza vettoriale data dal prodotto tra una forza e la distanza tra il punto di applicazione della forza e il punto scelto come riferimento, detta braccio

Prendiamo in considerazione l'esempio di una scala appoggiata a un muro: le forze che agiscono su di essa sono la forza peso, la forza d'attrito, la forza esercitata dal suolo e la forza vincolare del muro

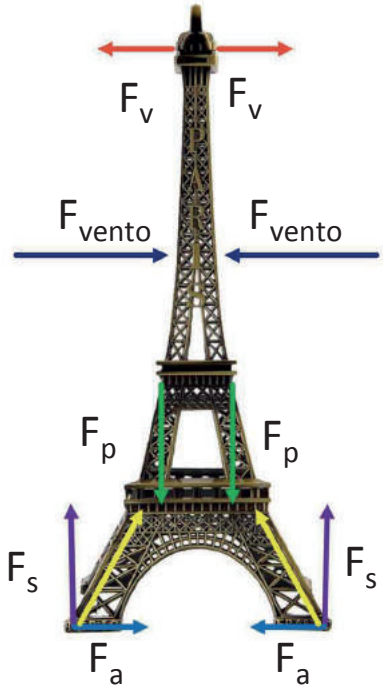




$$\vec{F_p} + \vec{F_v} + \vec{F_s} + \vec{F_a} = 0$$

$$\overrightarrow{M_{F_p}} + \overrightarrow{M_{F_v}} + \overrightarrow{M_{F_s}} + \overrightarrow{M_{F_a}} = 0$$

$$F_p \cdot \frac{b}{2} - F_v \cdot \frac{h}{2} + F_s \cdot 0 + F_a \cdot 0 = 0F$$

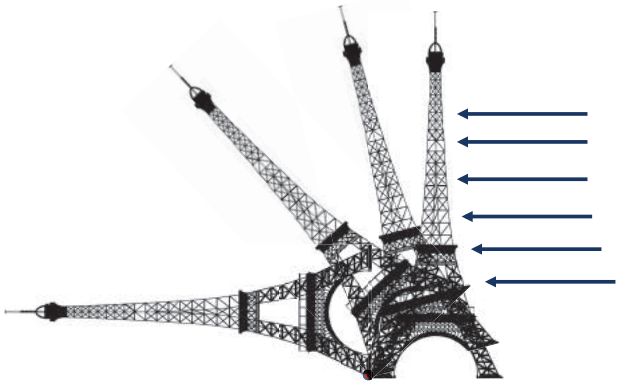


Le condizioni di equilibrio sono soddisfatte anche nel caso della Torre Eiffel. Dal punto di vista delle forze la somma di queste è pari a zero.

$$\overrightarrow{F_a} + \overrightarrow{F_v} + \overrightarrow{F_p} + \overrightarrow{F_s} = 0$$

Per quanto riguarda lo studio dei momenti, è necessario considerare l'azione del **vento.**

Il vento è la problematica principale affrontata dall'ingegner Eiffel, che ne studiò le caratteristiche per mantenere l'equilibrio della torre. La forza del vento, che agisce sul baricentro della torre, è definita dal prodotto tra la pressione che esercita sulla superficie e la superficie stessa. La pressione a sua volta è data dalla formula $P = \frac{1}{2} \cdot p \cdot V^2$, in cui p è la densità dell'aria e consideriamo una velocità di 160 km/h



$$\overrightarrow{M_v} = \overrightarrow{F_v} \cdot b_v = \overrightarrow{P_v} \cdot S \cdot b_v$$

$$P_v = 4{,}9 \cdot 10^3 \, {}^{N}/_{m^2}$$

$$S = 11{,}8 \cdot 10^3 \, m^2$$

$$b_v = \frac{1}{3} h = 100 \, m$$

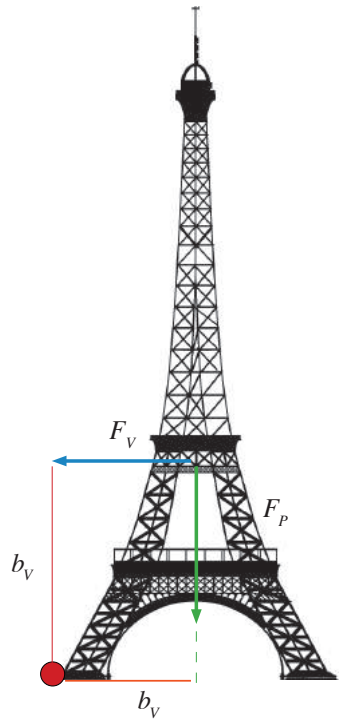
$$M_v = 5{,}78 \cdot 10^9 N \, m$$

$$\overrightarrow{M_p} = \overrightarrow{F_p} \cdot b_p$$

$$F_p = 7 \cdot 10^7 N$$

$$b_p = 62{,}5 \, m$$

$$M_p = 4{,}4 \cdot 10^9 \, N \, m$$

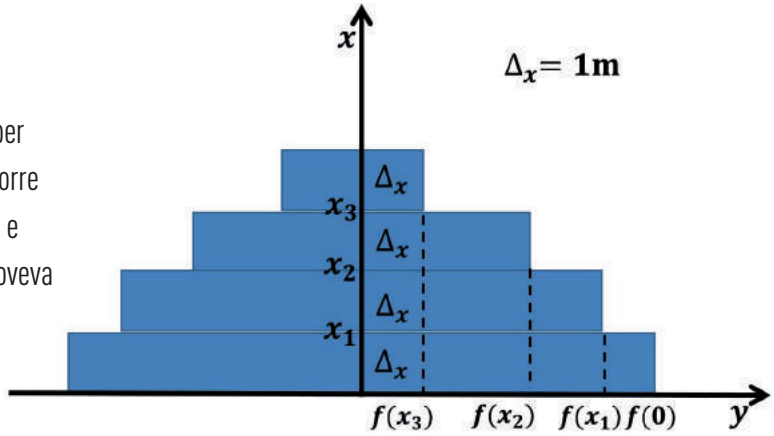


Il momento del vento è leggermente maggiore del momento del peso, quindi la torre dovrebbe cadere. Ciò non accade in realtà perchè la superficie considerata è piena e non reticolata come la Torre.

la torre più alta del mondo

ESPONENZIALE

Eiffel voleva costruire la torre più alta del mondo per questo chiese a dei matematici di progettare una torre che salisse fino all'infinito avendo però un volume, e quindi un peso, limitato. La larghezza della torre doveva quindi regolarmente diminuire ogni metro dell'1%. Cioè:



$$f(0) = 62{,}5\ m;$$
$$f(x_1) = f(0) - \frac{f(0)}{100} = \frac{99}{100} f(0);$$
$$f(x_2) = f(x_1) - \frac{f(x_1)}{100} = \frac{99}{100} f(0) - \frac{1}{100}\left(\frac{99}{100} f(0)\right) = \left(\frac{99}{100}\right)^2 f(0);$$
$$\vdots$$
$$\boxed{f(x_i) = \left(\frac{99}{100}\right)^i f(0);} \rightarrow \text{FUNZIONE ESPONENZIALE}$$

sappiamo che il volume si calcola:

$$V_n = \sum_{i=0}^{n} V_i = \sum_{i=0}^{n} \Delta x \cdot [2f(x_i)]^2 = \Delta x \cdot 4 \sum_{i=0}^{n} f^2(x_i);$$

$$V_\infty = \Delta x \cdot 4 \sum_{i=0}^{\infty} f^2(x_i);$$

facciamo i conti:

$$\sum_{i=0}^{n} f^2(x_i) = \sum_{i=0}^{n} \left(\left(\frac{99}{100}\right)^i f(0)\right)^2 = \sum_{i=0}^{n} \left(\frac{99^2}{100^2}\right)^i f^2(0) = f^2(0) \cdot \left(1 + \frac{99^2}{100^2} + \left(\frac{99^2}{100^2}\right)^2 + \cdots\right.$$
$$= f^2(0) \cdot \left(1 + \frac{99^2}{100^2} + \left(\frac{99^2}{100^2}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{99^2}{100^2}\right)^n - \frac{99^2}{100^2} - \left(\frac{99^2}{100^2}\right)^2 - \cdots - \left(\frac{99^2}{100^2}\right)^{n+1}\right.$$
$$= f^2(0) \cdot \frac{100^2}{100^2 - 99^2} \cdot \left(1 - \left(\frac{99^2}{100^2}\right)^{n+1}\right)$$

quindi passando all'infinito:

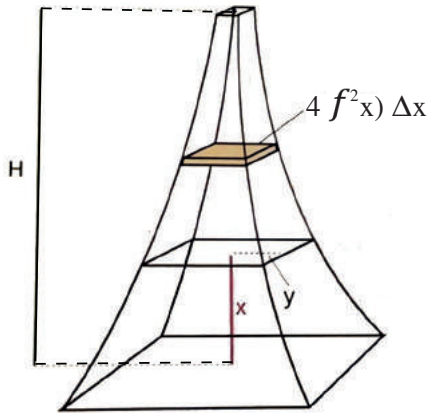
$$\sum_{i=0}^{\infty} f^2(x_i) = \lim_{n\to\infty}\left[f^2(0) \cdot \frac{100^2}{100^2 - 99^2} \cdot \left(1 - \left(\frac{99^2}{100^2}\right)^{n+1}\right)\right] = \frac{100^2}{100^2 - 99^2} f^2(0)$$

di conseguenza il volume è:

$$\boxed{V_\infty = \Delta x \cdot 4 \cdot \frac{100^2}{100^2 - 99^2} f^2(0) = 7{,}85 \times 10^5 m^3}$$

di conseguenza il peso è:

$$peso = V_\infty \cdot peso\ specifico\ ferro = 6{,}12 \cdot 10^9 kg$$



problema del vento

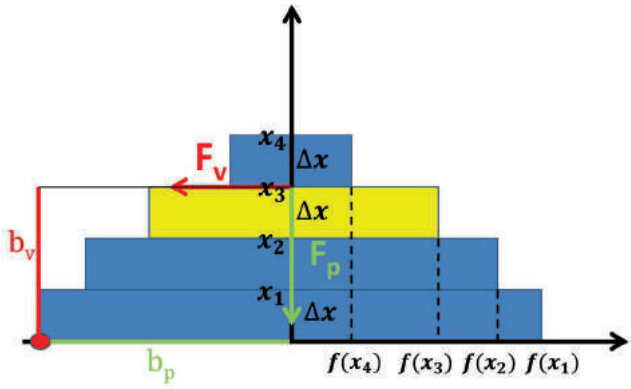
FUNZIONE ALGEBRICA

Il problema più grande che dovette affrontare Eiffel fu il problema del vento. Chiese perciò ai fisici di calcolare la forma migliore che doveva avere la torre per resistere al vento. Essi impostarono il problema in modo tale che **per ogni 'piano' della torre il momento delle forze (peso e vento) risulta zero**

$$\overrightarrow{M_p} = \overrightarrow{M_v}$$

$$p(x_n) \cdot \Delta x \cdot f(x_n) \cdot x_n = 4g\rho \cdot \Delta x \cdot f^2(x_n) \cdot f(0) - C \cdot \Delta x$$

- p è la pressione del vento che varia col variare dell'altezza
- C è una costante usata per migliorare l'approssimazione
- ρ è il peso specifico del ferro



Si ottiene quindi un'equazione di secondo grado con incognita f

$$f^2(x_n) \cdot f(0) \cdot 4g\rho - f(x_n) \cdot 2x_n \cdot p(x_n) - C = 0$$

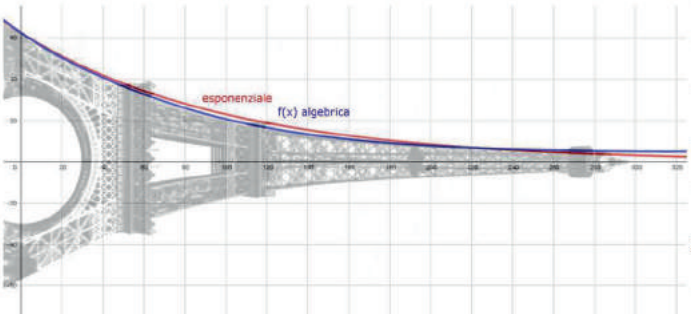
La cui soluzione è:

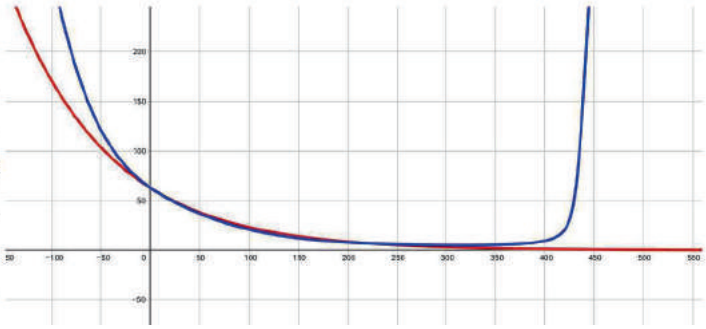
$$f(x_n) = \frac{x_n \cdot p(x_n) \pm \sqrt{x_n^2 \cdot p^2(x_n) + C \cdot f(0) \cdot 4g\rho}}{f(0) \cdot 4g\rho}$$

in cui:

$$P(x_n) = (2 \cdot 10^{-3}x + 0{,}7) \cdot 4g\rho \cdot f(0) \qquad C = \frac{f^2(0)}{2}$$

$$\boxed{f(x) = 2 \cdot 10^{-3}x^2 + 0{,}7x - \sqrt{4 \cdot 10^{-6}x^4 + 0{,}49x^2 + 2{,}8 \cdot 10^{-3}x^3 + 6{,}3 \cdot 10^{-6}}} \rightarrow \text{FUNZIONE ALGEBRICA}$$





FUNZIONE ALGEBRICA FUNZIONE ESPONENZIALE

il lessico dell'ingegnere

controvento: elemento strutturale utile a contrastare le forze spingenti laterali. Tali elementi possono essere posti in piani orizzontali o verticali. Nelle carpenterie metalliche o di legno collegano tra loro gli elementi delle strutture principali, rendendole resistenti al vento.

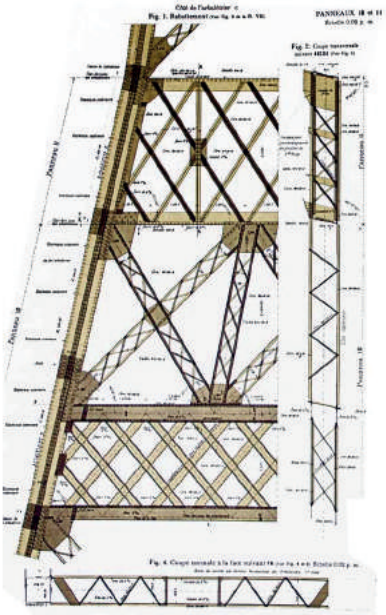
statica: Parte della meccanica che studia l'equilibrio dei corpi sotto l'azione di determinate sollecitazioni; In particolare, nella **scienza delle costruzioni**, la parte che studia le condizioni di equilibrio delle strutture.

poligono funicolare: metodo fondamentale della statica grafica è quello del poligono funicolare, metodo sistematico di riduzione di sistemi piani di vettori applicati, che, come tale, può essere appunto utilizzato per la risoluzione di problemi statici.

La particolarità delle **strutture isostatiche** è che i vincoli sono appena sufficienti per l'equilibrio statico. Se per una qualunque ragione un vincolo non dovesse funzionare, la struttura diventerebbe labile, ovvero suscettibile di movimento, con conseguente rischio di collasso.

trave reticolare: struttura composta da un insieme di aste complanari, vincolate ai nodi in modo da costituire un elemento resistente e indeformabile.

Un **sistema reticolare** formato da una serie di triangoli contigui, in cui ogni triangolo ha comune col precedente un lato e due nodi, si dice rete triangolare. Le aste che formano il contorno del traliccio si dicono aste di contorno o **briglie o correnti**, e quelle che restano entro la figura definita dal contorno, si chiamano **montanti**, se sono verticali, e **diagonali**, se sono inclinate.



Il **carico di rottura** di un materiale è il carico massimo che esso può sopportare senza rompersi.

Quando un materiale è sollecitato sotto un carico minore del suo **carico di snervamento**, si deforma in misura proporzionale al carico, e ritorna alla sua forma originale quando il carico è rimosso. Se caricato oltre il suo carico di snervamento, allora il materiale si deforma in proporzione maggiore rispetto al carico, e non torna più alla sua forma iniziale quando il carico è rimosso.

svergolamento: deformazione per torsione di una sbarra o di una superficie piana.

inviluppo: la curva tangente a ciascun membro della famiglia in almeno un punto. Poligono Funicolare: costruzione grafica che permette di ricavare risultante, direzione e verso di un sistema di forze (vettori).

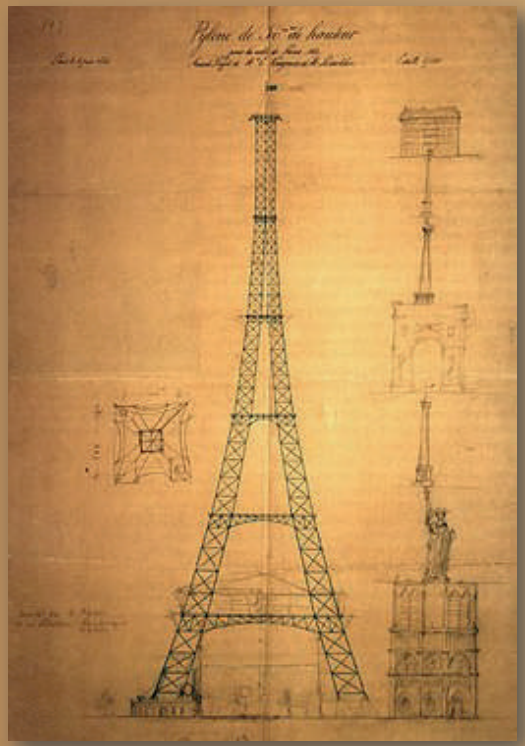
dilatazione termica: fenomeno fisico che si realizza quando un corpo aumenta di volume all'aumentare della temperatura. Tale aumento è causato dalla variazione dell'oscillazione degli atomi attorno al punto di equilibrio, che normalmente viene identificato con la lunghezza di legame.

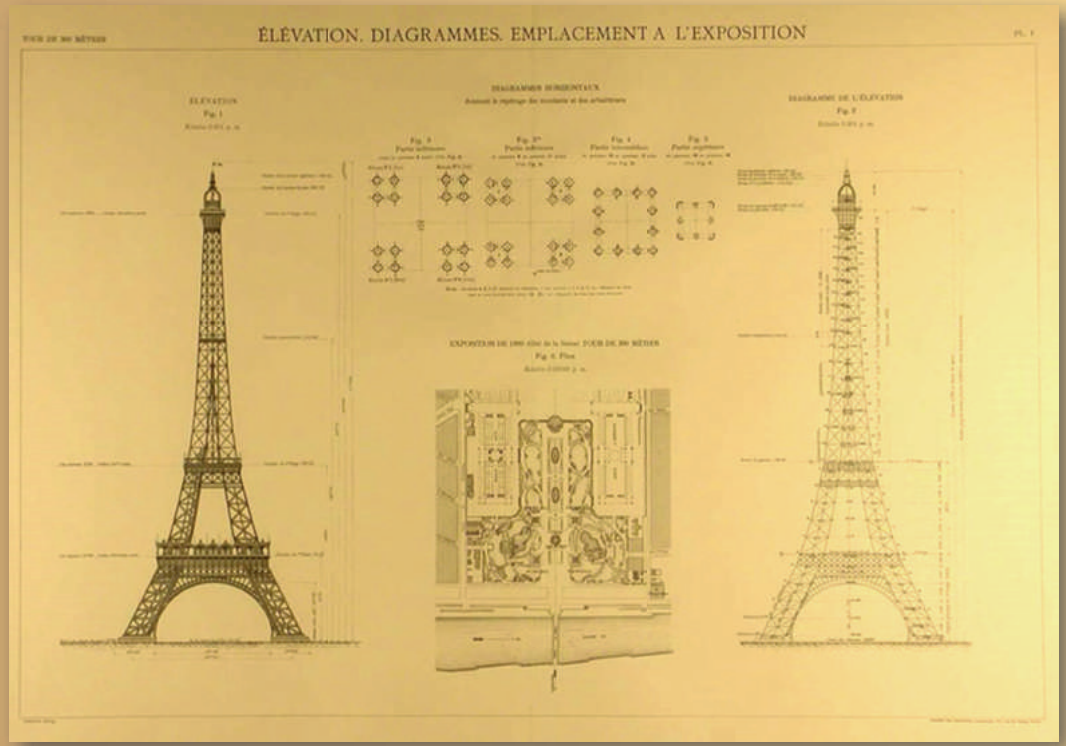
Il **rivetto** (chiamato anche ribattino) è un giunto meccanico non smontabile utilizzato per la giunzione di due o più parti metalliche tra le quali non è possibile realizzare saldature ma solo giunzioni meccaniche o incollaggi. L'accoppiamento meccanico è definitivo e può essere disassemblato solo distruggendo il rivetto stesso.

giunto strutturale: nell'ambito dell'ingegneria civile è l'interruzione della continuità di un'opera.

FONDAZIONE GROSSMAN

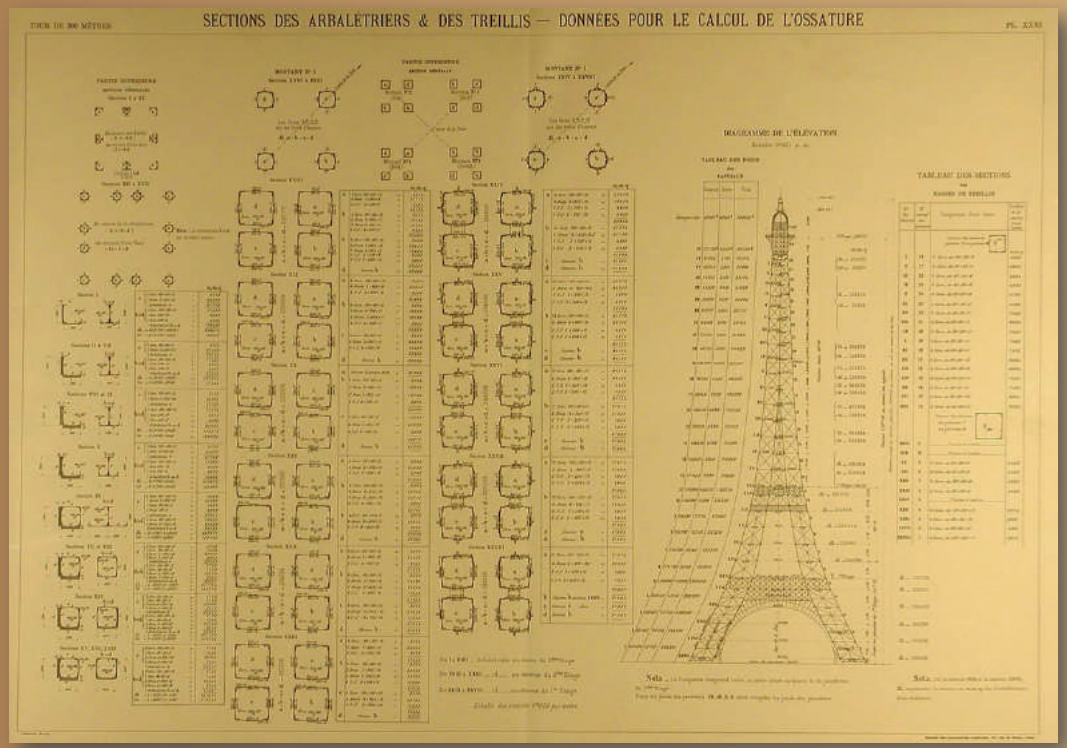
QUANDO LA RAGIONE SI FA SCUOLA

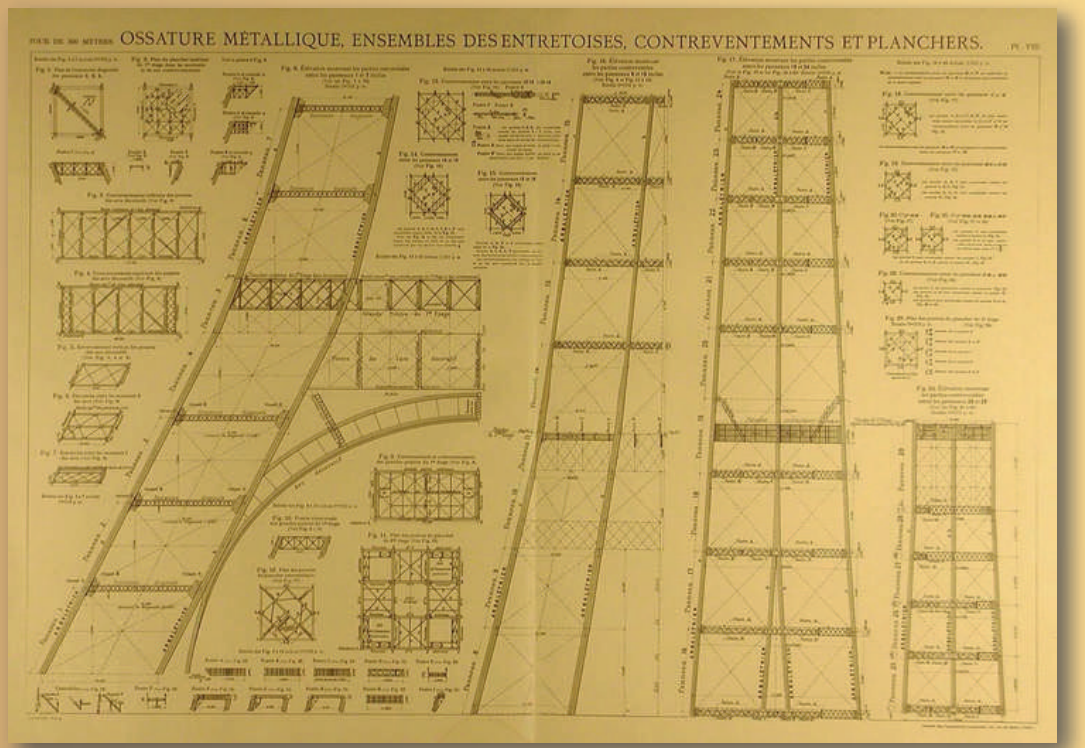




FONDAZIONE GROSSMAN

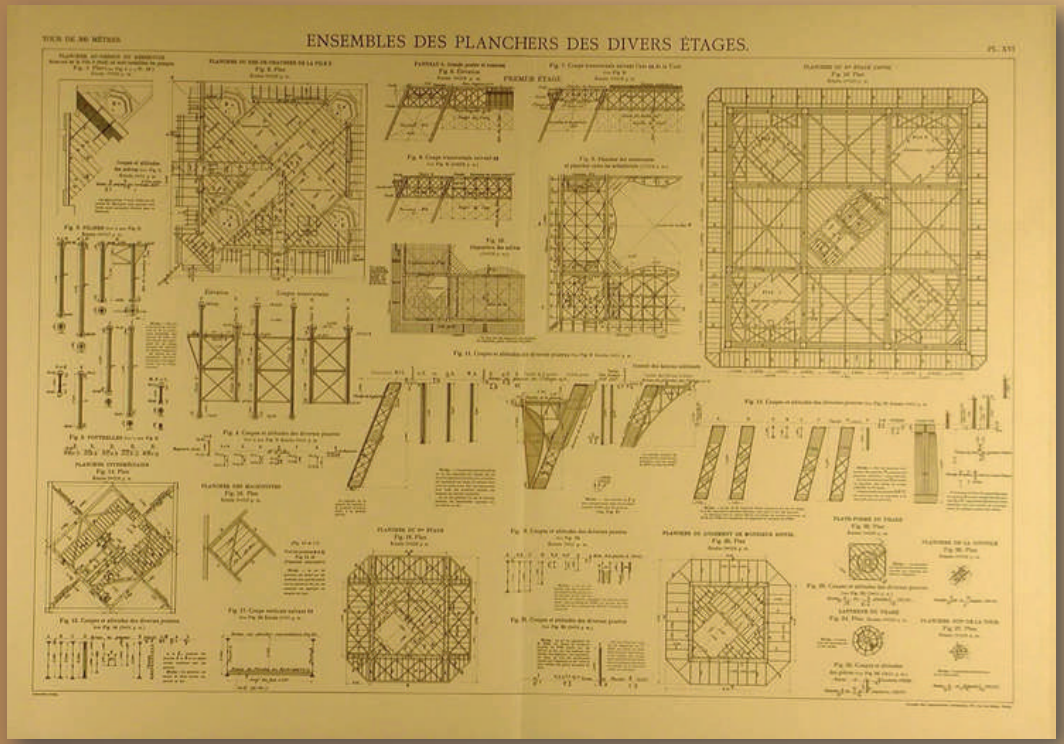
QUANDO LA RAGIONE SI FA SCUOLA

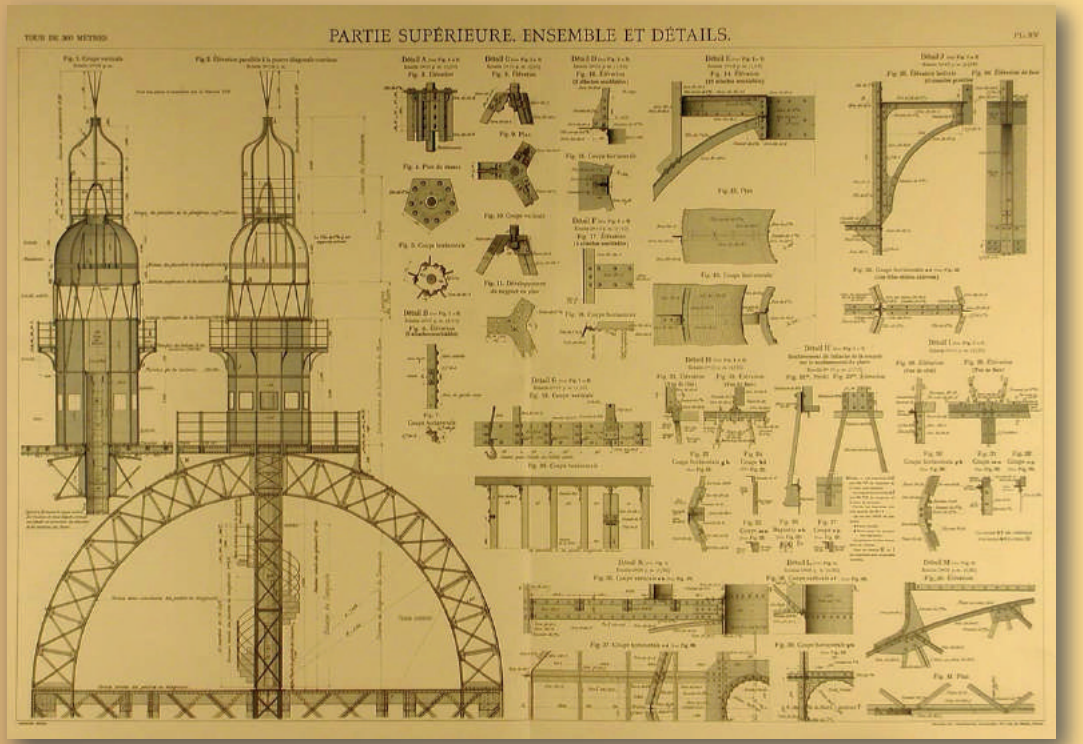




FONDAZIONE GROSSMAN

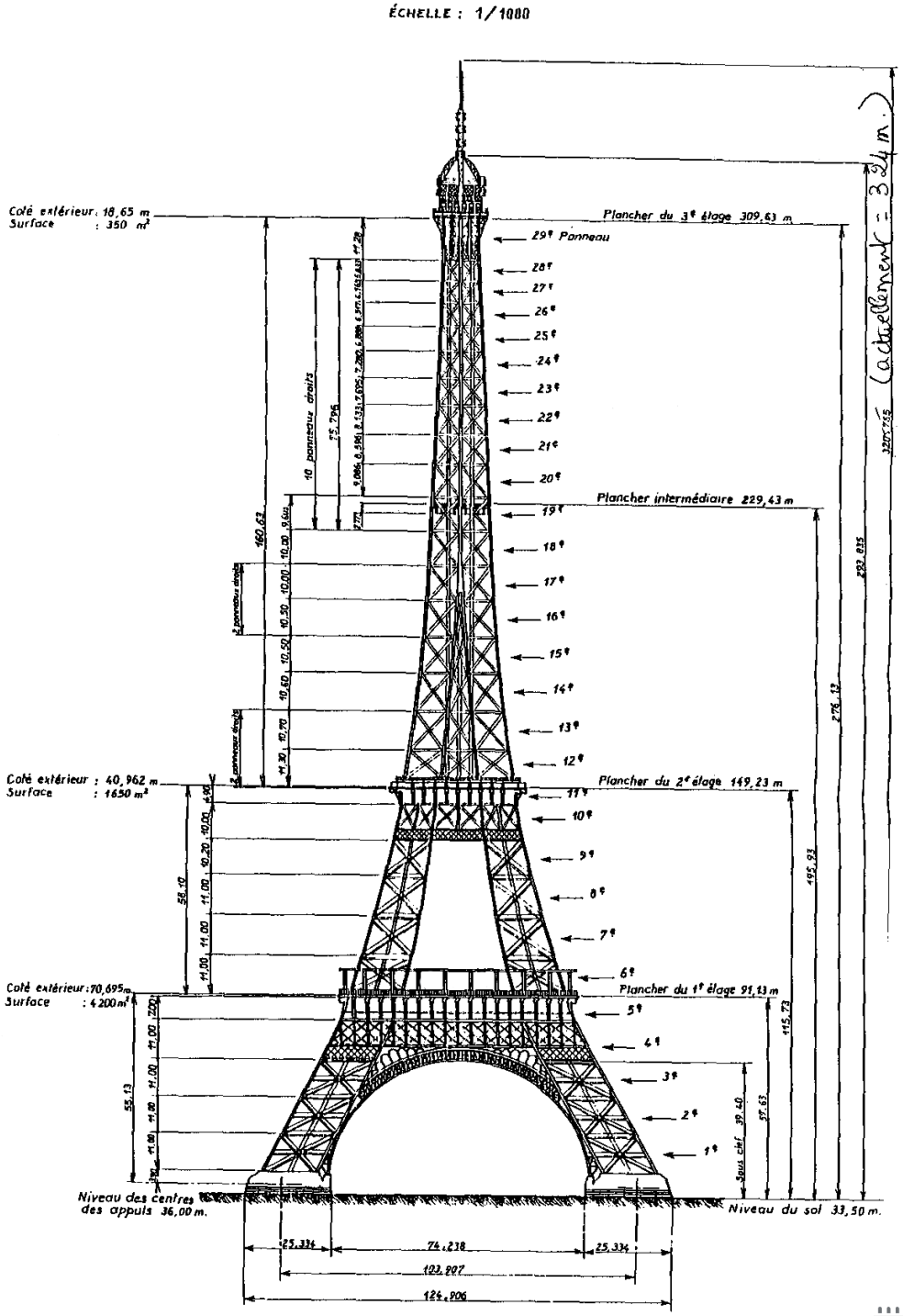
QUANDO LA RAGIONE SI FA SCUOLA





OPEN DAY LICEO ALEXIS CARRELL 11.11.2017

il progetto della **Tour Eiffel**



dati del progetto

Progettista: Gustave Eiffel (1832-1923)
Inizio cantiere: 26 gennaio 1887
Inaugurazione: 31 marzo 1889
Localizzazione: Champ de Mars, Parigi
Composizione: 18.038 elementi metallici e 2.500.000 rivetti
Peso totale: 10.100 tonnellate
Peso della carpenteria in metallo: 7.300 tonnellate
Costo totale: 7.800.000 franchi-oro
Numero di visitatori: oltre 200 milioni dal 1889.
Numero di gradini: 1665 a partire dal suolo
Passo tra i pilastri alla base: 124,90 metri
Distanza tra i pilastri: 72,25 metri
Larghezza dei pilastri: 26,08 metri

primo piano

Altezza della piattaforma: 57,63 metri
Facciata esterna: 70,69 metri
Superficie della piattaforma: 4200 metri quadrati
Portata massima della piattaforma: 3000 persone

secondo piano

Altezza della piattaforma: 115,88 metri
Facciata esterna: 40,96 metri
Superficie della piattaforma: 1650 metri quadrati
Portata massima della piattaforma: 1600 persone

terzo piano

Altezza complessiva nel 1889 (dal suolo alla bandiera): 312,27 metri
Altezza complessiva odierna: 324 metri
Altezza sopra il livello del mare: 352,20 metri
Altezza della piattaforma: 276,13 metri
Facciata esterna: 18,65 metri
Superficie della piattaforma: 350 metri quadrati
Portata massima della piattaforma: 400 persone

spostamento della vetta

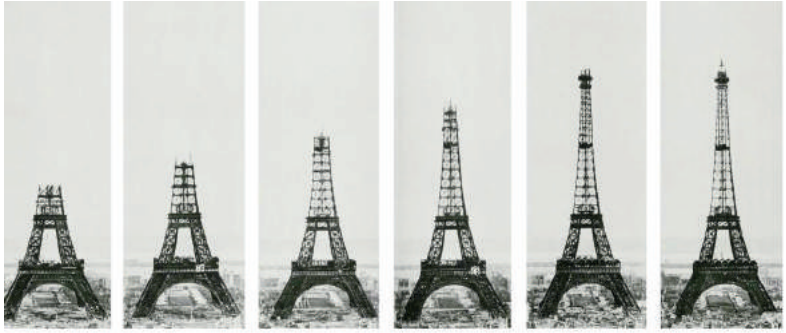
Sotto l'azione del calore: fino a 18 centimetri
Sotto l'azione del vento: fino a 7 centimetri

visitatori

1889: 1.896.987
1930: 580.075
1884: 4.183.857
2012: 6.180.000

FONDAZIONE GROSSMAN
QUANDO LA RAGIONE SI FA SCUOLA

La Tour Eiffel est le symbole de la France et de sa capitale, Paris, où elle se trouve. Elle a été conçu et construite par l'ingénieur Gustave Eiffel pour l'Exposition universelle de 1889, à Paris.



bellezza estetica?

il valore iconico della Tour Eiffel

La Tour Eiffel è un monumento dallo straordinario potere immaginifico. Fin dalla sua costruzione, il suo profilo sollecita la creatività di numerosi artisti. Anche oggi proliferano le rappresentazioni dettagliate e stilizzate: **conosciamo bene la Tour Eiffel ben prima di andarla a visitare**. Da un lato la sovraesposizione mediatica a cui siamo sottoposti alimenta una conoscenza superficiale e decontestualizzata dell'opera, dall'altro la portata rivoluzionaria del progetto permette una risonanza amplificata della sua immagine. Le rappresentazioni della Tour Eiffel incarnano l'interesse, la meraviglia e lo stupore che ancora oggi tale ritrovato di ingegneria ci suscita. La sua forma non è determinata dall'estro del progettista nè da considerazioni compositive di tipo estetico: essa dipende piuttosto da necessità strutturali. **La funzione determina la forma**. Prima nel suo genere e senza eguali la Torur Eiffel si comprende nella definizione delle nuove tipologie architettoniche che si vanno a definire nel XIX secolo.

La Tour Eiffel sorge negli Champs de Mars, area verde usata per scopi militari fin dal regno di Luigi XV: qui si esercitano le truppe francesi della vicina École Militaire, ubicata in un complesso di edifici in stile neoclassico. Luogo simbolico della collettività parigina, gli Champs de Mars sono il luogo deputato all'organizzazione di parate militari, comizi politici e manifestazioni a cui la Tour Eiffel fa da sfondo.

Il tessuto urbano di questa parte della città è stato fortemente rimodellato dal **progetto urbanistico del barone Georges Eugène Haussmann** fra il 1854 e il 1879 su incarico di Napoleone III. Ampi viali alberati (boulevards) e raccordi monumentali vengono disegnati sul tessuto minuto dei vicoli medievali. Sventrati i vecchi quartieri la città viene ripensata dall'alto in maniera razionale e pragmatica per **provvedere**

alle esigenze della vita moderna e garantire il controllo sociale.

Scrive lo stesso Haussmann nelle sue Memorie:

> "Assicurare la tranquillità pubblica con la creazione di imponenti boulevards che lascino circolare non solo l'aria e la luce, ma anche le truppe; con tale ingegnoso connubio, migliorare le condizioni del popolo rendendolo meno incline alla rivolta".

Nuovi eleganti palazzi dalle facciate austere, dove si insediò la ricca borghesia, adornano i lati dei boulevard. E' la Parigi della Belle Epoque ritratta nelle opere degli impressionisti, che vive una grande prosperità economica, un rinnovato fermento culturale e scientifico.

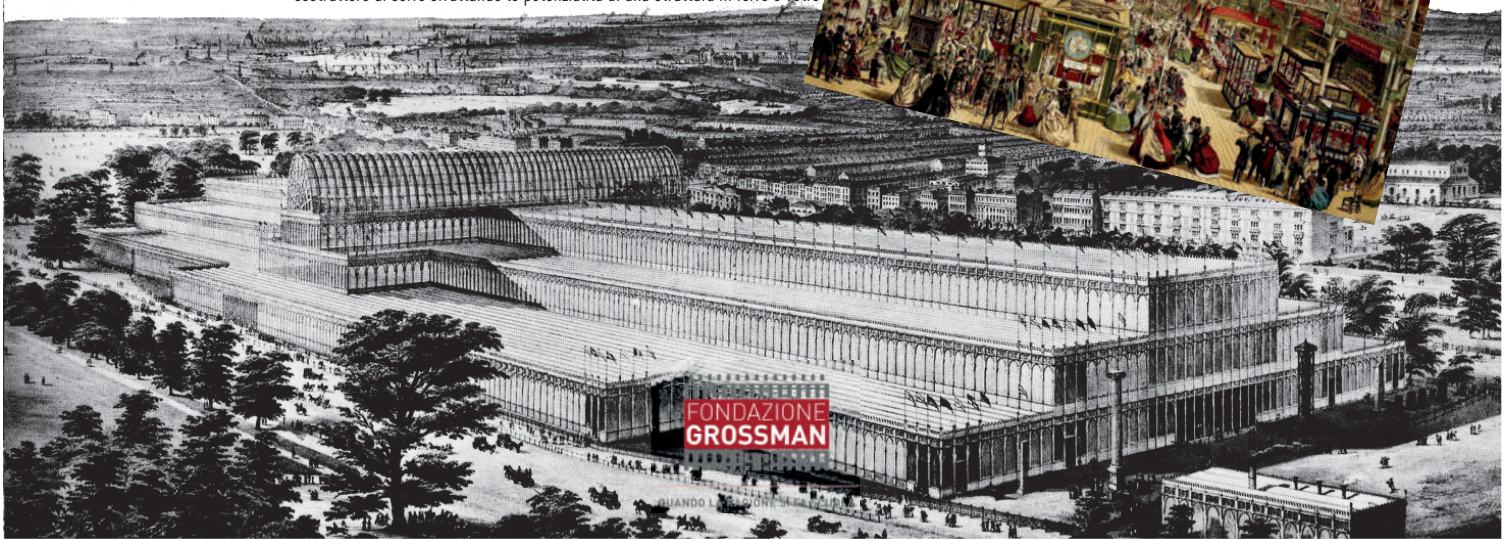
contesto urbano

exposition universelle

Il clou dell'Esposizione Universale di Parigi del 1889, organizzata in occasione del centenario della Rivoluzione, fu la Tour Eiffel, a cui il pubblico manifestò un interesse contrastante. Ai piedi della torre furono costruiti allestimenti temporanei dai temi più svariati: templi egizi, mercati arabi e la galleria delle macchine con le invenzioni scientifiche.

Nella seconda metà dell'Ottocento, a partire dalla Grande Esposizione di Londra del 1851, le Esposizioni Universali vengono organizzate in tutte le più importanti città del tempo -Parigi, Vienna, New York, Philadelphia, Chicago- e accompagnano passo passo lo sviluppo industriale del secolo, diventando la maggior vetrina mondiale delle innovazioni tecnologiche. In questo periodo storico **le esposizioni universali vanno intese come fiere commerciali e mostre scientifico-culturali**. Fino al primo conflitto mondiale tale ciclo di manifestazioni esprime la fiducia nel progresso scientifico e nelle possibilità della tecnica.

L'edificio per l'Esposizione Universale di Londra del 1851 fu costruito da Joseph Paxton, costruttore di serre sfruttando le potenzialità di una struttura in ferro e vetro



FONDAZIONE GROSSMAN

Burton, Turner, Merin, Palm House, Kew Gardens, 1848

Pomerancev, Suchov, Magazzini GUM, Mosca, 1890-1893

architettura di ferro

La tipologia architettonica della Tour Eiffel trova i suoi antecedenti nell'architettura in ferro e vetro che si sviluppa in Europa nel XIX sec. I grandi progressi scientifico-tecnologici della Rivoluzione Industriale modificarono notevolmente i processi di costruzione e le tecniche architettoniche. La definizione di nuove tipologie architettoniche si deve alla diffusione dei **nuovi materiali da costruzione** quali ghisa, ferro forgiato e acciaio, all'introduzione della **prefabbricazione di elementi prodotti in serie** e alla necessità di spazi adeguati ai **mutati bisogni sociali** quali ponti, stazioni ferroviarie, esposizioni, giardini botanici, mercati coperti. Modularità, flessibilità e montaggio caratterizzano il cantiere edile.

In questo contesto si affermarono figure professionali specifiche come quella dell'ingegnere, fornito di competenze tecnico-scientifiche e matematiche necessarie a risolvere i problemi derivanti dalla complessità delle strutture progettate. Il lavoro degli ingegneri è meno condizionato dalla tradizione artistica e architettonica, e si caratterizza per un approccio pragmatico e uno stile basato sul recupero e la contaminazione tra elementi storici di epoche differenti.

L'architettura di ferro presenta pertanto un'**ossatura metallica portante a vista** di esiguo spessore combinata con il **vetro come rivestimento**: la massa dell'edificio si dissolve con un effetto di assoluta leggerezza e trasparenza, lo spazio è inondato di luce chiara e diffusa, i confini fra l'interno e l'esterno sono labili. Si affina perciò una nuova sensibilità estetica legata agli edifici pubblici di grandi dimensioni: la Palmenhaus del Burggarten di Vienna (1823-1826), la Palm House dei Kew Gardens a Londra (1848), l'atrio della stazione ferroviaria di Atocha a Madrid (1888-1892), la Galleria Vittorio Emanule a Milano (1865-1878), la copertura dei Magazzini GUM di Mosca (1890-1893), il Mercato Centrale di Budapest (1894-1897) sono alcuni esempi di queste costruzioni.

Derby, Severn Iron Bridge, 1775-1779

1814: Fraunhofer e le righe nello spettro
1828: Brown e il moto
1831: Henry e l'induzione elettromagnetica
1855: Maxwell e le equazioni
1871: Darwin e l'evoluzione
1879: Edison e la lampadina
1881: Otto e il motore a scoppio
1882: Koch e i batteri
1888: Hertz e le onde elettromagnetiche
1897: Marie Curie e le radiazioni
1905: Einstein e la relatività
1910 Planck e il corpo nero
1911: Rutherford e l'atomo

il mito del progresso

L'Amour pour principe et l'Ordre pour base, le Progrès pour but (Comte, 1852)

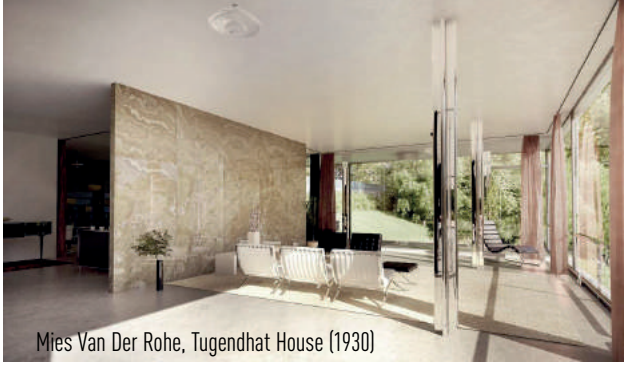
La costruzione della Torre Eiffel avviene in un clima culturale fortemente influenzato dalla **sensibilità positivista** nell'alveo della sostanziale stabilità politica e sociale di fine Ottocento, in assenza di gravi conflitti nel periodo fra tra il 1870 e l'inizio della Prima Guerra Mondiale. Le numerose invenzioni tecniche che si registrano in questi anni contribuiscono a sedimentare nelle coscienze l'idea di un **progresso inesauribile** e una **fiducia incondizionata nella scienza e nella ragione umana**.

L'emergere di tale nuova mentalità si fonda sulla scienza, sapere perfetto e definitivo, e sul sapere fenomenico scientificamente verificabile. Affondando le sue radici nell'Illuminismo, il Positivismo si basa sull'opera di Henri de Saint-Simon, che lo usò per la prima volta nell'opera "Catechismo degli industriali" (1823-1824) e di Auguste Comte con l'opera "Corso di filosofia positiva" (1830).

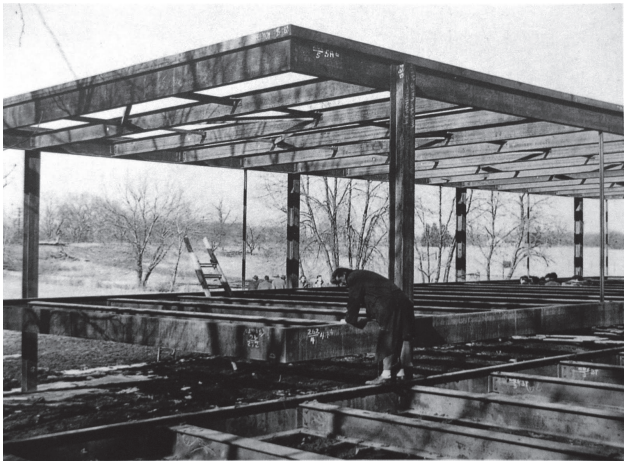
Nella seconda metà dell'Ottocento il Positivismo rappresenta l'elaborazione ideologica di una borghesia industriale e progressista, e si caratterizza per la fiducia nel progresso scientifico e per il tentativo di **applicare il metodo scientifico a tutte le sfere della conoscenza e della vita umana**.

La scienza è la forma di sapere superiore e definitiva cui l'umanità deve giungere abbandonando l'ingenuità e la superstizione primitiva. Nella Legge dei Tre Stadi di Comte la storia si sviluppa dagli stadi teologico e metafisico, che spiegano i fenomeni naturali con agenti soprannaturali, allo stadio positivo, in cui la ragione umana rinuncia ad indagare sull'origine e sul destino dell'universo e mira a scoprire le leggi effettive dei fenomeni.

Mappa frenologica del XIX secolo



Mies Van Der Rohe, Tugendhat House (1930)



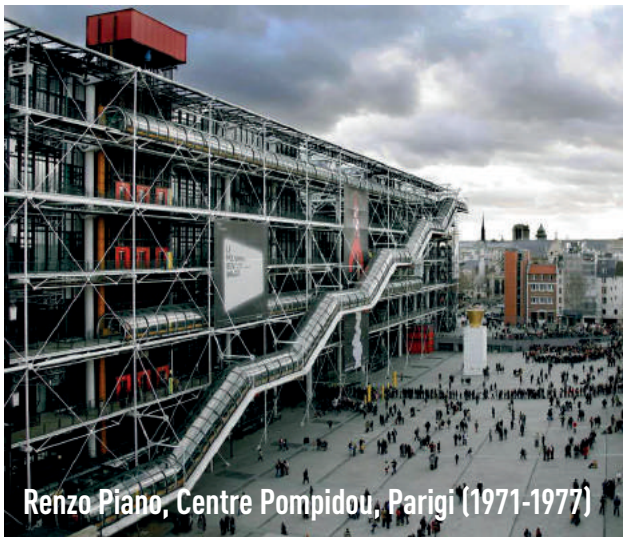
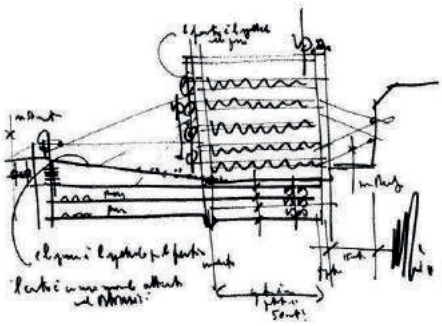
Mies Van Der Rohe, Farnsworth House (1951)

less is more

In un contesto post-bellico di forte espanzione del settore delle costruzioni, e grazie ai progressi nelle tecnologie dei materiali l'architetto Mies Van Der Rohe (1886-1969) disegna in Europa e negli Stati Uniti spazi abitativi essenziali, luminosi, eleganti. Nel caso della Farnsworth House (1951) l'involucro dell'edificio è costituito da **elementi strutturali a vista** (travi e pilastri in acciaio) e da grandi vetrate che mettono in comunicazione interno e esterno. La disposizione planimetrica, libera da pareti portanti, offre uno spazio fluido e continuo. Alla **purezza delle geometrie** e alla **chiarezza strutturale** si accompagna un'attenzione estrema all'eleganza dei materiali: l'acciaio della struttura, verniciato o satinato, si accompagna a travertino, onice, marmo, vetro.

Il Centre Pompidou di Renzo Piano a Parigi (1971-1977) è un esempio di **architettura polifunzionale** di estrema flessibilità pensata per ospitare opere d'arte contemporanee e eventi culturali. Grazie all'articolazione strutturale basata su gigantesche travi reticolari gli spazi interni sono privi di sostegni intermedi. Impianti elettrici, idraulici, meccanici e termici sono incapsulati in grossi tubi colorati: **gli elementi funzionali**, curati nel disegno e bene in vista, **sono anche elementi estetici**.

dettaglio poetico



Renzo Piano, Centre Pompidou, Parigi (1971-1977)