

Elementi strutturali metallici

La materia dell'opera
d'arte plasmata dall'uomo
e dal fuoco.



T. Telford, Ponte a
Craigellachie,
1815.

Docenti: Prof. Giuseppe Alberto Centauro e Prof. Silvio Van Riel

Tutor: Ph.D Arch. Andrea Bacci, Arch. Francesco Masci,
e con la collaborazione di: Arch. Luca Brandini



Caratteristiche dei materiali metallici

I metalli costituiscono una vasta classe di elementi chimici caratterizzati da uniformi e peculiari proprietà fisiche, meccaniche, chimiche ed estetiche.

A queste caratteristiche si associano le seguenti proprietà: elevata conducibilità termica ed elettrica, duttilità, malleabilità, durezza, forte tendenza a perdere elettroni per formare ioni positivi e a combinarsi con l'ossigeno atmosferico, capacità di formare leghe, opacità alle radiazioni luminose e lucentezza, solo per menzionare le caratteristiche principali.



Principale responsabile di tutte le proprietà citate è il tipo di legame esistente fra gli atomi metallici: si tratta di un legame primario, forte, che nasce dalla condivisione degli elettroni più esterni, delocalizzati in forma di una nuvola di carica elettronica negativa intorno ad aggregati di ioni metallici positivi (legame metallico).

Lo slittamento di un piano cristallino su quello adiacente è il meccanismo di deformazione principale di un metallo sottoposto a sforzo.

Per brevi slittamenti la deformazione è proporzionale al carico applicato secondo un fattore di proporzionalità E , detto modulo elastico, ed è completamente reversibile (deformazione elastica).



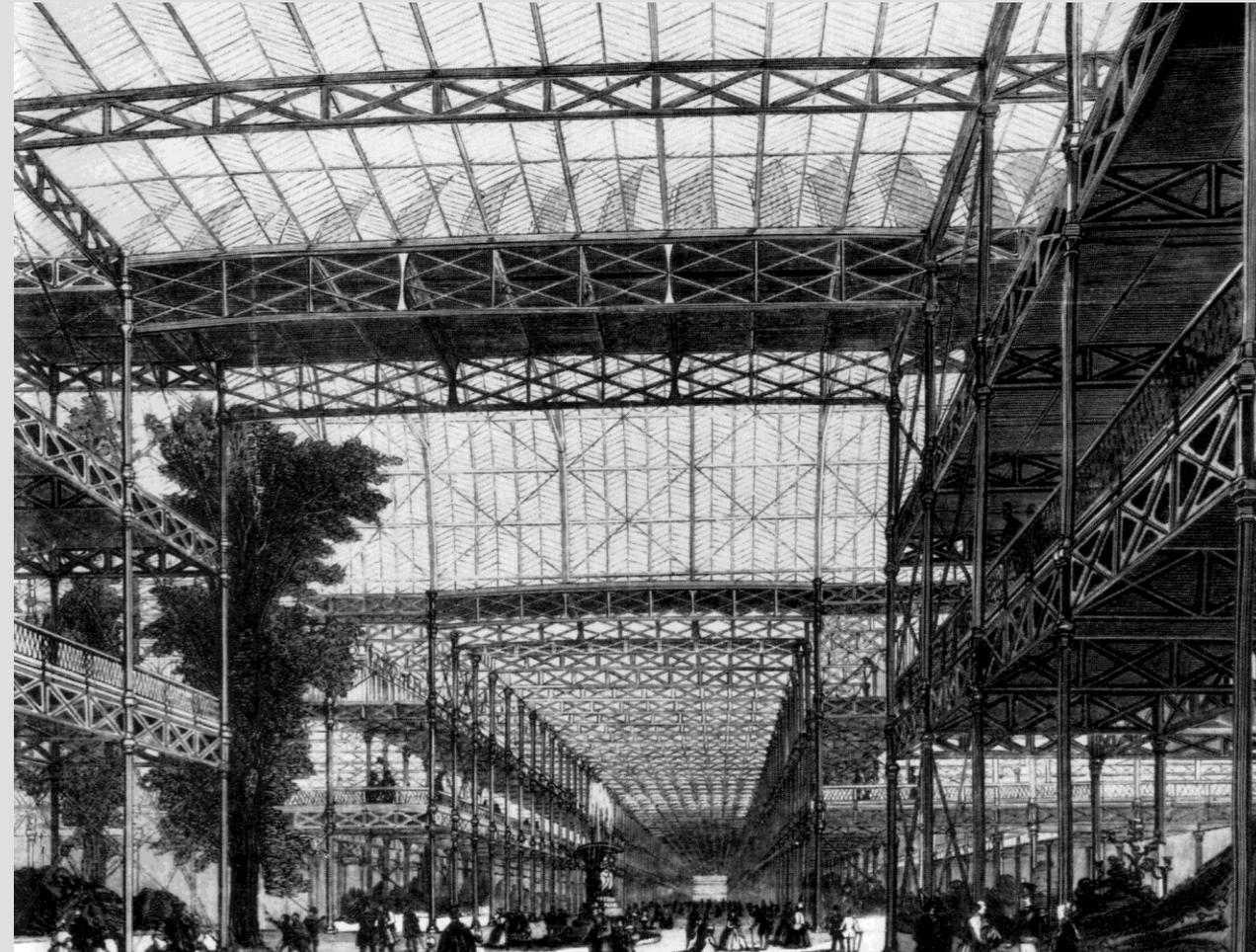
Oltre un certo carico limite, detto carico di snervamento, la deformazione, non più proporzionale allo sforzo applicato, non è più recuperabile, e si parla di deformazione permanente, o plastica.

La diffusione enorme dei metalli in ogni possibile campo di applicazione fin dagli albori della storia della civiltà deve molto alla capacità di questi materiali di miscelarsi tra loro e formare leghe.

L'ottimizzazione metallurgica delle proprietà di un materiale metallico consiste principalmente nella ricerca della composizione più adatta a garantire buone caratteristiche meccaniche accoppiate alla necessaria lavorabilità e alle proprietà fisiche e chimiche richieste dalla singola applicazione.



T. Telford, Ponte a Craigellachie, 1815.

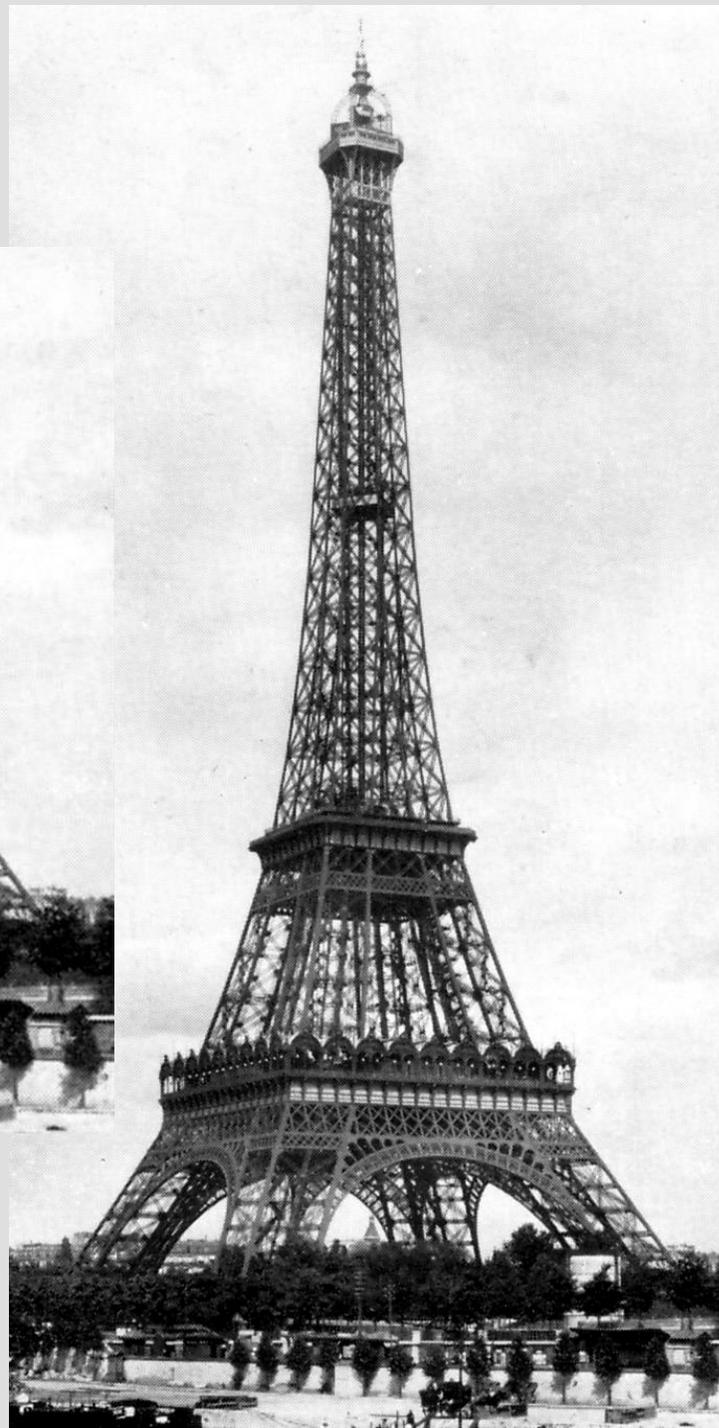


J. Paxton e Fonderia Fox & Henderson, Il Palazzo di Cristallo a Londra, 1850-51.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA



LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I

**Corso di Laurea Magistrale, quinquennale
ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)**

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020



G. Eiffel, Torre Eiffel a Parigi, 1887-87.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

LABORATORIO DI RESTAURO I–RESTORATION WORKSHOP I

Corso di Laurea Magistrale, quinquennale

ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020

L'aggiunta di percentuali anche piccolissime di uno o più elementi leganti può modificare in misura determinante le prestazioni e le proprietà tecnologiche di un metallo, in termini di resistenza meccanica, resistenza alla corrosione in particolari ambienti aggressivi, lavorabilità, colabilità, saldabilità, aspetto estetico, etc. Nella stragrande maggioranza dei casi un metallo viene prodotto a partire dallo stato liquido, portandolo ad una temperatura superiore a quella di fusione, e facendolo successivamente solidificare come semilavorato o direttamente come prodotto finito.



Nel caso più comune le leghe vengono formate attraverso fasi singole o multiple di lavorazione plastica:

laminazione (passaggio fra rulli a distanze via via decrescenti con riduzione successiva dello spessore del metallo e produzione di barre, lamiere e lamierini);

profilatura, o estrusione, (passaggio del semilavorato attraverso matrici che riproducono la sezione del pezzo finale, per la produzione di travi, profilati e tubi);

trafilatura, (produzione di fili per riduzione di sezione per effetto di una forza di trazione);

forgiatura ed imbutitura, (formatura di pezzi per applicazione di forti pressioni mediante pressa o maglio o sagomatura di lamiere) sono le tecniche di formatura per deformazione plastica più comuni.



Taluni di questi processi possono essere eseguiti sia a caldo che a freddo.

Le lavorazioni meccaniche a caldo, ovvero al di sopra della temperatura di ricristallizzazione (pari a circa un terzo della temperatura di fusione) danno prodotti la cui microstruttura è priva di deformazioni e in cui sono assenti tensioni residue.

Le lavorazioni plastiche eseguite a freddo, invece, hanno la caratteristica di modificare la microstruttura del metallo, provocando deformazione permanente della struttura dei grani e irrigidendo la struttura cristallina per accumulo di difetti di reticolo (dislocazioni).



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I

Corso di Laurea Magistrale, quinquennale

ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020

Nella storia delle costruzioni e dell'evoluzione tecnologia, l'uomo ha imparato a servirsi del metallo nella costruzione di edifici e monumenti, con funzioni sia strutturali che decorative.

Sotto il profilo strutturale i metalli infatti costituiscono una classe di materiali dalle caratteristiche speciali, che li rendono particolarmente competitivi, e spesso insostituibili, rispetto ad altri materiali da costruzione, naturali o artificiali.



Storicamente i primi metalli ad essere utilizzati in grandi quantità dall'uomo furono quelli disponibili allo stato naturale, come il rame, l'oro o il ferro di origine meteorica (quello trovato in superficie o estratto in miniera).

Si cominciarono poi a produrre rame e stagno dai loro ossidi, attraverso processi di riduzione tecnologicamente piuttosto semplici, e si diffuse l'uso del bronzo colato.

La riduzione dei minerali ferrosi e quella dei minerali di alluminio, che prevede la conoscenza e la gestione di processi tecnicamente molto più complessi, seguirono solo molto più tardi.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

LABORATORIO DI RESTAURO I–RESTORATION WORKSHOP I

Corso di Laurea Magistrale, quinquennale

ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020

Il ferro rappresenta senza dubbio oggi il metallo più largamente impiegato in architettura, seguito dal rame e dalle sue leghe.

Alluminio e titanio si sono aggiunti solo di recente al panorama dei metalli architettonici, e trovano ora vasta applicazione, principalmente in forma di pannelli ed elementi decorativi.

Il piombo è tradizionalmente impiegato soprattutto per la copertura di tetti e cupole, usato già dall'antichità (Greci e Romani).

Lo zinco è un materiale spesso presente come elemento di lega o utilizzato come rivestimento.



Si riportano nel seguito con maggiore dettaglio alcune informazioni sulla produzione, le proprietà tecnologiche e le caratteristiche delle leghe di maggiore interesse, insieme ad un cenno sulle loro più frequenti applicazioni.

Nella sua forma pura il ferro è un metallo dal peso specifico medio (7870 Kg/m^3 , maggiore di quello di alluminio e titanio ma minore di quello di rame e piombo), di colore grigio, con un punto di fusione di $1538 \text{ }^\circ\text{C}$, relativamente tenero, duttile e malleabile, dotato di buone proprietà di resistenza a trazione; esso è generalmente impiegato in campo architettonico in lega con il carbonio (acciaio).



Il metallo normalmente indicato con il termine *ferro* (ferro lavorato, ferro battuto o fucinato) costituisce in realtà la **lega a minor contenuto di carbonio** (%C < 0.035% in peso), prodotta originariamente per combustione dei minerali di ferro a diretto contatto con il carbone e per eliminazione di carbonio e scorie (silicati di ferro) mediante successivi stadi di riscaldamento e martellamento.

È dotata di buona resistenza a trazione e di ottima elasticità, è facilmente lavorabile a caldo e freddo (per forgiatura, o battitura, all'incudine, laminazione, piegatura) e formabile secondo i disegni più complicati ed intricati.

Risulta, inoltre, idonea ad essere saldata per battitura al calor bianco.



Tanto più intense e prolungate sono le lavorazioni che il ferro subisce, tanto maggiori risultano la sua durezza e la sua resistenza; questo processo però aumenta la sua fragilità, riducendo quindi la sua deformazione elastica.

Oltre ai classici elementi dell'arredo quali inferiate, cancellate e ringhiere, questo materiale è stato usato, fin dall'antichità, per realizzare elementi strutturali come catene (tiranti) e capichiavi a paletto.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA



LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I

Corso di Laurea Magistrale, quinquennale

ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020

G. Michelazzi, Villino Brogi a Firenze,
1911.

Dettaglio della ringhiera in ferro
battuto della scala interna.



La *ghisa*, prodotto primario dell'altoforno, ha un tenore di carbonio molto più elevato, normalmente compreso tra il 2 ed il 5% circa, e contiene percentuali spesso rilevanti di silicio (anche > 2%), manganese, zolfo e fosforo.

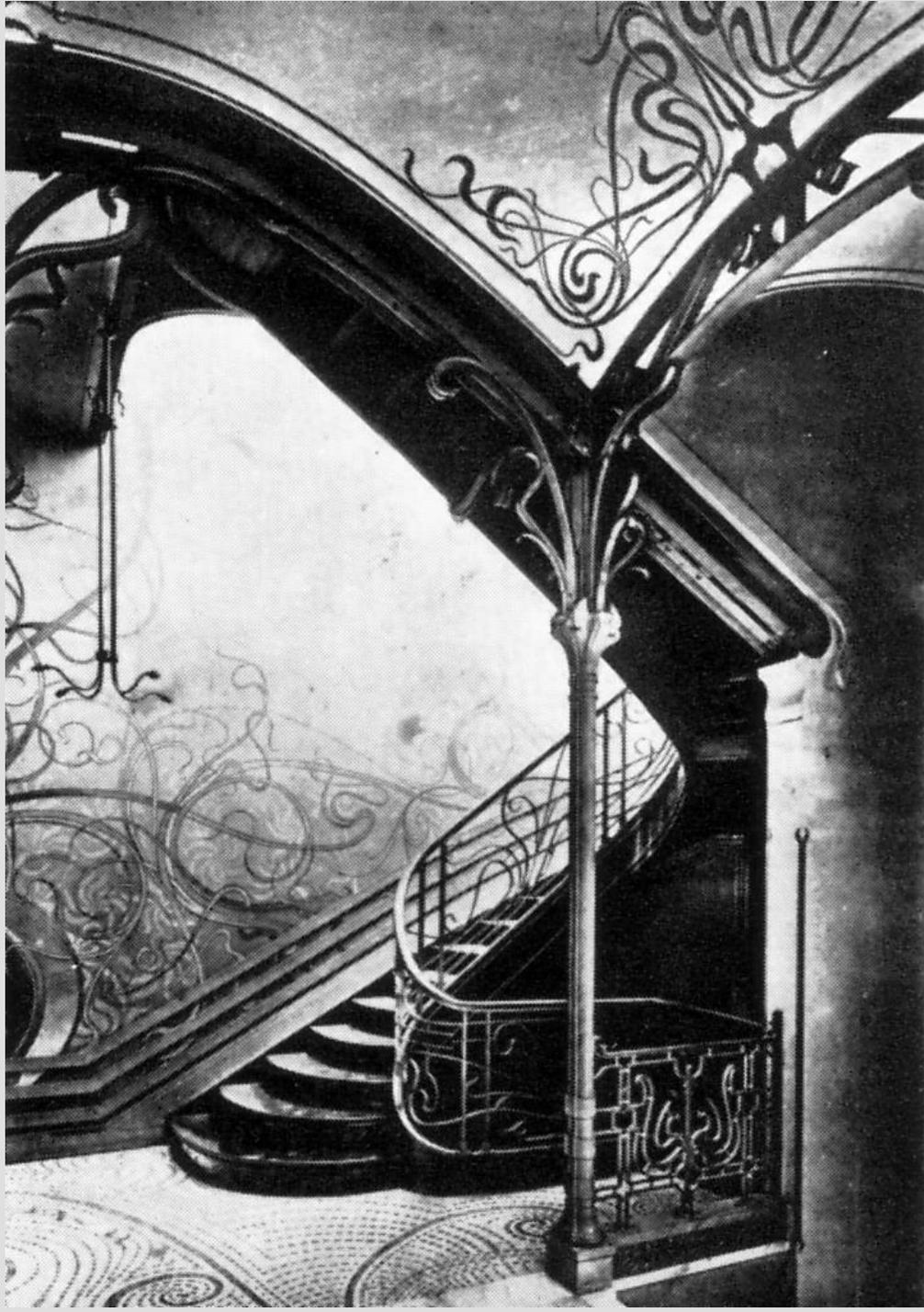
Essa costituisce essenzialmente, grazie alla bassa temperatura di fusione (1150 °C circa) e all'elevata fluidità, la lega di ferro utilizzata maggiormente in fonderia.

Nelle ghise bianche il carbonio è legato al ferro sotto forma di cementite (Fe_3C); nelle più comuni ghise grigie parte del carbonio si separa in forma grafite durante la solidificazione e il raffreddamento,



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA



LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I

**Corso di Laurea Magistrale, quinquennale
ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)**

**Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro
B015351 – a. a. 2019/ 2020**

V. Horta, Casa Tassel a Bruxelles, 1892-93.
Particolare della colonna in ghisa
dell'atrio.



Gli **acciai** sono leghe ferro-carbonio con contenuti di carbonio compresi tra lo 0.1 e l'1% circa.

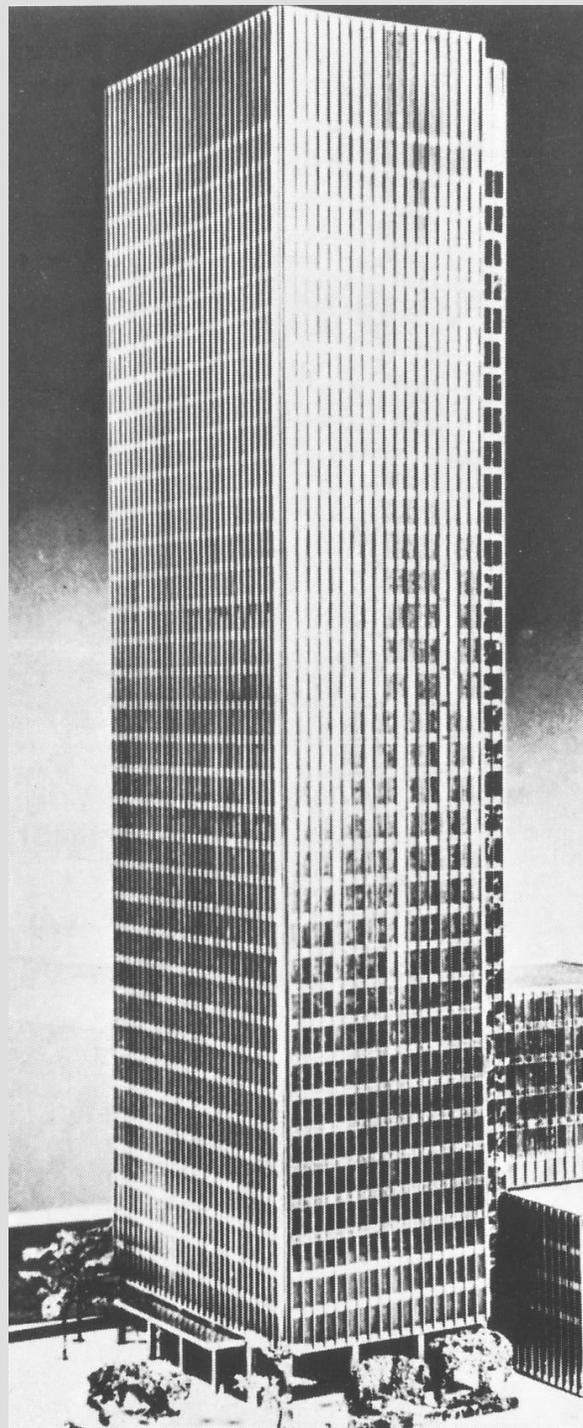
Vengono prodotti a partire dalla ghisa mediante soffiaggio di ossigeno in convertitori o da rottami di ferro in forni elettrici.

All'aumentare della percentuale di carbonio le proprietà meccaniche variano notevolmente, aumentando carico di rottura e durezza a scapito di resilienza ed allungamento a rottura.

Gli acciai comuni utilizzati in edilizia in forma di tondini, fili, lamiere e profilati contengono percentuali di carbonio fino a 0.25-0.3% circa.

Esigenze speciali, quali il miglioramento delle proprietà meccaniche o l'aumento della resistenza alla corrosione, possono essere soddisfatte mediante l'introduzione di aggreganti diversi, quali nichel, cromo, etc.

In particolare per far fronte al degrado dovuto alla corrosione è possibile utilizzare acciai legati al rame, fosforo e cromo (acciai CorTen), adatti all'esposizione ad atmosfere industriali contenenti elevate percentuali di anidride solforosa, e, soprattutto, leghe contenenti elevate percentuali di nichel e cromo, dette acciai inossidabili, utilizzati anche in atmosfere marine.



LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I
Corso di Laurea Magistrale, quinquennale
ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)
Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro
B015351 – a. a. 2019/ 2020

M. van der Rohe, Seagram Building a New York, 1956.
La struttura portante dell'edificio è realizzata in acciaio, mentre le parti metalliche a vista sono di bronzo, le pannellature in marmo lucidato o in vetro rosso.



Queste leghe infatti sono in grado di autoprotettersi in ambiente ossidante (marini e inquinato), formando una sottile patina superficiale di ossidi di cromo, impermeabile agli agenti aggressivi.

Il cromo, presente in quantità superiore all'8% in peso, conferisce inoltre a questo tipo di acciai eccellenti proprietà di durezza e resistenza meccanica e formidabili qualità estetiche di lucentezza. Qualità queste che ne hanno fatto, negli ultimi decenni, il materiale di elezione per la costruzione di strutture metalliche di concezione profondamente innovativa, come dimostrato dai più recenti esempi di architettura.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I

Corso di Laurea Magistrale, quinquennale

ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020

Migliore durabilità può essere in alternativa conferita agli acciai comuni con diversi tipi di rivestimenti superficiali.

La zincatura costituisce il processo di rivestimento più largamente utilizzato; strati di zinco dello spessore di qualche centinaio di micron proteggono catodicamente l'acciaio, abbassando notevolmente la sua velocità di corrosione in atmosfere mediamente aggressive.



L'*alluminio* è un metallo leggero, con basso punto di fusione (660 °C) ed elevata conducibilità termica.

Viene estratto dalla bauxite, minerale molto diffuso la cui lavorazione presenta però costi e difficoltà tecnologiche che hanno reso impossibile lo sfruttamento su vasta scala di questo metallo fino alla seconda metà dei novecento.

Resistenza meccanica e durezza non sono elevate, ma possono essere fortemente migliorate mediante aggregazione con magnesio, zinco e rame.

L'alluminio presenta elevata resilienza, buona plasticità ed ottima lavorabilità, che gli consentono di essere facilmente formato anche con strette tolleranze dimensionali.



La resistenza alla corrosione è ottima in ambienti ossidanti in quanto l'alluminio mostra capacità di passivarsi velocemente anche a temperatura ambiente.

In ambiente marino vengono utilizzate leghe Al-Mg, dotate di migliore resistenza al pitting (corrosione a forma di piccolissimi crateri).

Secondo solo all'acciaio nella produzione mondiale di metalli per uso architettonico, l'alluminio è largamente impiegato per prodotti da costruzione adatti ad ambienti sia interni che esterni, specialmente in forma di profilati e laminati, utilizzati come condotte, serramenti, supporti strutturali per pannelli, lastre e lamiera per rivestimenti e coperture.

Il colore delle superfici di alluminio esposte all'esterno è grigio chiaro, e il tipico aspetto opaco è dovuto alla pellicola superficiale di ossido formata naturalmente o artificialmente accresciuta mediante processi galvanici di anodizzazione.



M. Pei, Bank of China a Hong Kong, 1990.
Le nervature costituite da larghi pannelli di alluminio anodizzato suddividono le pareti in vetri.



Il *titanio* costituisce l'ultima frontiera nel campo dei metalli per uso architettonico.

Si tratta di un metallo di aspetto gradevole, di color grigio chiaro, dalle caratteristiche meccaniche eccellenti e dotato, grazie ad una grande facilità di passivarsi efficacemente, di ottima resistenza alla corrosione.

Ciò che lo rende particolarmente attraente, tuttavia, è il bassissimo peso specifico: con i suoi 4500 kg/m^3 , pesa circa la metà del rame e meno di due terzi dell'acciaio, esibendo nel contempo durezza, resistenza a trazione e carico di snervamento paragonabili o superiori a quelli di quest'ultimo.

Una caratteristica interessante del titanio è la possibilità di sviluppare colori diversi mediante processi elettrolitici, sfruttando fenomeni di interferenza della luce.



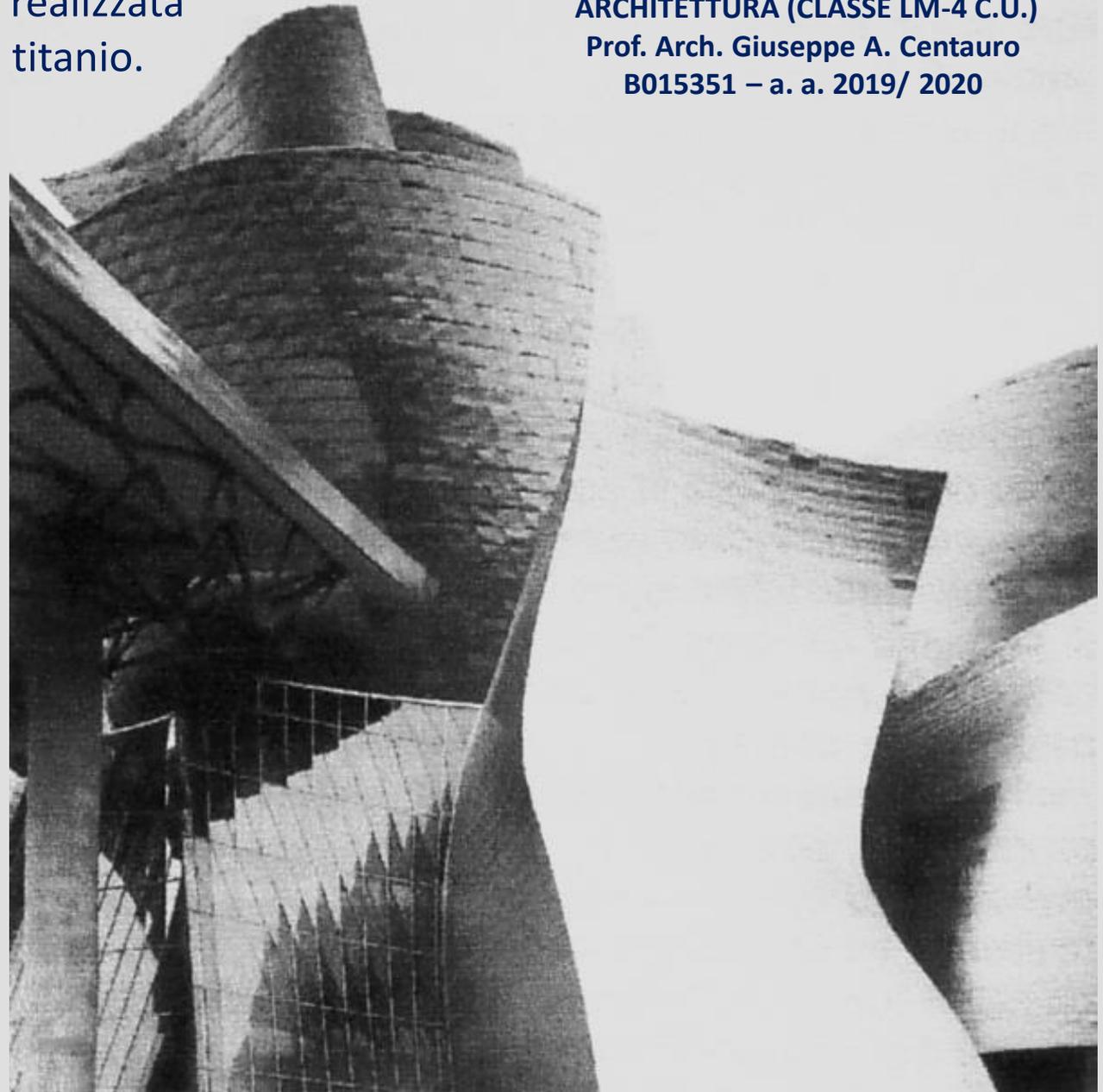
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

F. O. Gehry, Museo Guggenheim a Bilbao, 1997.
La superficie curva continua è realizzata
accostando tra loro lamiere di titanio.

LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I
Corso di Laurea Magistrale, quinquennale
ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)
Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro
B015351 – a. a. 2019/ 2020

Simbolo dell'originalità nella
creazione architettonica moder-
na che l'uso di un metallo dotato
di qualità così peculiari può
stimolare è senza dubbio oggi il
Museo Guggenheim di Bilbao,
realizzato nel 1997 su disegno di
Frank Gehry.





Un settore con ottime prospettive di espansione è inoltre quello del restauro di materiali lapidei, mattoni e calcestruzzi.

Il titanio infatti è totalmente compatibile con questi materiali da costruzione, grazie al basso valore del coefficiente di dilatazione termica, e all'elevata elasticità, che permettono di ridurre le tensioni create da variazioni termiche o igrometriche repentine.

Esso inoltre non produce strati di corrosione voluminosi, e può quindi essere utilizzato in forma di perni, cerchiature o grappe, senza rischio di distacchi di materiale o di inestetiche macchie e scolature, quali quelle causate da leghe di ferro e di rame.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

LABORATORIO DI RESTAURO I–RESTORATION WORKSHOP I

Corso di Laurea Magistrale, quinquennale

ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020

Il primo, famoso esempio di intervento di restauro eseguito negli anni '80 sostituendo i vecchi perni in acciaio con migliaia di barre in titanio è quello del Partenone e dell'Eretteo sull'Acropoli di Atene.

Un esempio recente è quello della Fontana Maggiore di Perugia, le cui vasche di pietra sono ora interamente sostenute da una struttura in titanio.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I

Corso di Laurea Magistrale, quinquennale

ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020

Ai fini di un primo approccio al tema della conservazione di queste strutture si riportano le principali forme di degrado che possono alterare e danneggiare gli elementi strutturali metallici. Queste note dovranno essere necessariamente approfondite per una conoscenza maggiore e valutate caso per caso, di conseguenza si rimanda al testo di M. L. TABASSO, *Materiali*, in *Il manuale del restauro architettonico*, Roma 2002, pp. C. 75-81. .



Corrosione atmosferica

La presenza di acqua sulla superficie di un manufatto metallico esposto all'aperto è condizione necessaria per l'innescò e l'avanzamento di un processo corrosivo.

Il fenomeno del “bagnamento” può essere fatto risalire a diversi meccanismi chimico-fisici: la presenza di acqua di pioggia, la condensazione dell'umidità atmosferica sulla superficie metallica al di sotto della temperatura di rugiada, la condensazione del vapore d'acqua nei pori di piccole dimensioni, attivata da fenomeni di capillarità, l'assorbimento e, infine, la condensazione chimica, dovuta alla presenza di sali igroscopici.



In generale l'aggressività dell'atmosfera è strettamente legata al valore della frazione di tempo in cui la superficie metallica è rivestita da un film di acqua; tuttavia molti altri parametri devono essere attentamente valutati, prima fra tutti la concentrazione di sostanze inquinanti o dannose.

La norma europea CEN 12500:1998, dal titolo *Protezione dei materiali metallici contro la corrosione - Probabilità di corrosione in atmosfera ambiente - Classificazione, determinazione e stima della corrosività degli ambienti atmosferici*, classifica gli ambienti secondo cinque diverse categorie a corrosività crescente.



1. Ambienti interni. in queste condizioni di temperatura ed umidità controllata il metallo è sottoposto al minimo rischio di corrosione; alcuni metalli possono essere bruniti o corrosi in seguito a contatto con detergenti frequentemente utilizzati per il vetro o la pietra (acido muriatico o altri acidi deboli), anche soltanto in forma di fumi o vapori.

2. Atmosfere rurali: la corrosione procede piuttosto lentamente; alcuni pericoli possono venire dalla presenza di fertilizzanti che si depositano in film alcalini aggressivi.



3. *Climi aridi:* in atmosfere secche, desertiche o semidesertiche, così come in zone dal clima particolarmente rigido, la corrosione non può avanzare velocemente.

Qualora la temperatura sia molto elevata, la forma di degrado più probabile sarà legata a sollecitazioni conseguenti ad espansioni termiche differenziali.

In caso di frequente presenza di forte vento, il trasporto di particelle abrasive (sabbia) può provocare gravi danni da erosione.

Una superficie erosa, caratterizzata da una elevata rugosità, e quindi da elevata superficie esposta, è comunque più sensibile all'attacco corrosivo.



4. Zone costiere: in strutture a diretto contatto con l'acqua di mare, o in zone che risentono comunque fortemente della presenza di aerosol marino, l'agente di maggiore pericolosità è il sale, e più in particolare lo ione cloruro.

Il sale, accumulato in pori ed interstizi e concentrato nel velo di umidità che ricopre la superficie metallica, provoca gravi attacchi di tipo localizzato a tutti i metalli che tendono ad autoprotendersi con la formazione di una patina superficiale. In questo caso la superficie corrosa appare coperta da piccoli crateri, più o meno profondi a seconda dell'entità dell'attacco.

La soluzione fortemente conduttiva contribuisce comunque a creare sulla superficie del metallo fenomeni di polarizzazione localizzata, accelerando così il processo corrosivo.



5. Atmosfere urbane o industriali: costituiscono l'atmosfera di esposizione potenzialmente più pericolosa.

L'agente più aggressivo in ambienti fortemente urbanizzati (riscaldamento e traffico motorizzato) o industrializzati è l'anidride solforosa (SO_2), che in presenza di ossigeno e umidità si ossida ad anidride solforica (SO_3) e si trasforma parzialmente in acido solforico (H_2SO_4), fortemente corrosivo.

Anche cloro, acido cloridrico, acido solfidrico e composti ammoniacali possono esercitare azione aggressiva.



Corrosione nel calcestruzzo

Il ferro è un materiale dal comportamento attivo-passivo, in grado di autoprotettersi in determinate condizioni ambientali, rivestendosi di un sottile film, compatto ed impermeabile, di prodotti di corrosione (formazione di ossidi superficiali: ruggine).

Le condizioni ideali per la passivazione del ferro (elevata basicità dell'ambiente) non si riscontrano normalmente nelle atmosfere di esposizione, ma sono perfettamente raggiungibili quando il metallo è immerso nel calcestruzzo, un materiale solido.

Il ferro nel calcestruzzo, quindi, non si corrode, fino al momento in cui agenti esterni di diversa origine non intervengano a perturbare l'equilibrio descritto.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA



LABORATORIO DI RESTAURO I-RESTORATION WORKSHOP I

Corso di Laurea Magistrale, quinquennale

ARCHITETTURA (CLASSE LM-4 C.U.)

Prof. Arch. Giuseppe A. Centauro

B015351 – a. a. 2019/ 2020

Espulsione del copriferro in corrispondenza dell'armatura ossidata. Tipico fenomeno di degrado del calcestruzzo detto "carbonatazione".