

TITANIO

Innovazione e sostenibilità
al servizio della progettazione



TITANIO - Innovazione e sostenibilità al servizio della progettazione

Tesi Triennale
Settembre 2025

Candidato
Francesco Dinelli

Relatrice
Prof.ssa
Beatrice Lerma



**Politecnico
di Torino**



Politecnico di Torino

Corso di Laurea in
Design e Comunicazione

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Settembre 2025

TITANIO

Innovazione e sostenibilità al servizio della progettazione

Relatrice
Prof.ssa Beatrice Lerma

Candidato
Francesco Dinelli
s310447

INDICE

Introduzione	6
Capitolo 1 – Il Titanio: Storia, Proprietà e Tecnologie di Produzione	9
1.1 Scoperta e primo sviluppo industriale del titanio	10
1.2 Proprietà fisiche e chimiche del titanio	13
1.3 Tecniche di estrazione e processi di produzione	16
1.4 Principali leghe di titanio e loro caratteristiche	21
Capitolo 2 – Applicazioni Industriali del Titanio	25
2.1 Settore aerospaziale e nautico	27
2.2 Settore automobilistico	34
2.3 Settore medico	36
2.4 Altri settori.....	38
2.4.1 Settore civile e infrastrutturale.....	38
2.4.2 Industria alimentare	39
2.4.3 Settore chimico, petrolchimico ed energia	40
2.4.4 Design e beni di consumo	41
2.5 Il titanio in architettura: introduzione	42
Capitolo 3 – Architettura e Design: Innovazione ed espressività	45
3.1 Caratteristiche e vantaggi del titanio in architettura	46
3.2 Casi studio significativi	50
3.3 Il titanio nel Product Design	66
3.3.1 I vantaggi del titanio nel Product Design	66
3.3.2 Casi studio di titanio nel Product Design	67
3.4 La titaniocromia	76

Capitolo 4 – Il Biossido di Titanio: Innovazione, Sostenibilità e Ambiente	81
4.1 Biossido di titanio: processo produttivo, funzioni e applicazioni	82
4.2 Proprietà fotocatalitiche e impatto sull'inquinamento	88
4.3 Biossido di titanio e gestione del calore	92
4.4 Urban Heat Island Effect	95
4.5 Applicazioni del biossido di titanio	98
4.5.1 TiO_2 e vernici	98
4.5.2 TiO_2 e materiale cementizio	99
4.5.3 TiO_2 e materiale ceramico	104
Capitolo 5 – Il Ciclo di Vita di Titanio e TiO_2: Riciclo e Recupero	107
5.1 Perché è importante riciclare il titanio	108
5.2 Vantaggi ambientali ed economici	110
5.3 Processi e tecniche di riciclo	114
5.4 Sfide e prospettive future	118
5.5 Riciclare il biossido di titanio	121
5.5.1 Il caso della vernice	123
5.6 Una tecnica non ancora matura	125
Capitolo 6 – Arredo Urbano: Biossido di Titanio per la sostenibilità e il benessere pubblico	127
6.1 Risultati della ricerca: dal titanio in architettura al materiale cementizio per il prodotto	128
6.2 Prospettive future di applicazione: l'arredo urbano	134
6.3 Semilavorati fotocatalitici: casi studio	142
6.4 Condizioni progettuali per garantire l'efficacia del biossido di titanio	148
6.4.1 Considerazioni finali e spunti progettuali	155
Bibliografia & Sitografia	159
Credits	170
Ringraziamenti	179

INTRODUZIONE

“Titanio - innovazione e sostenibilità al servizio della progettazione” è una tesi di ricerca, risultato di un processo che mette in relazione due aspetti fondamentali del percorso di studi affrontato, progettazione e sostenibilità. È frutto di un processo di acquisizione di consapevolezza, delle condizioni in cui versa il mondo ai giorni nostri, e della responsabilità che noi progettisti abbiamo verso le persone e l’ambiente nelle decisioni progettuali che decidiamo di intraprendere.

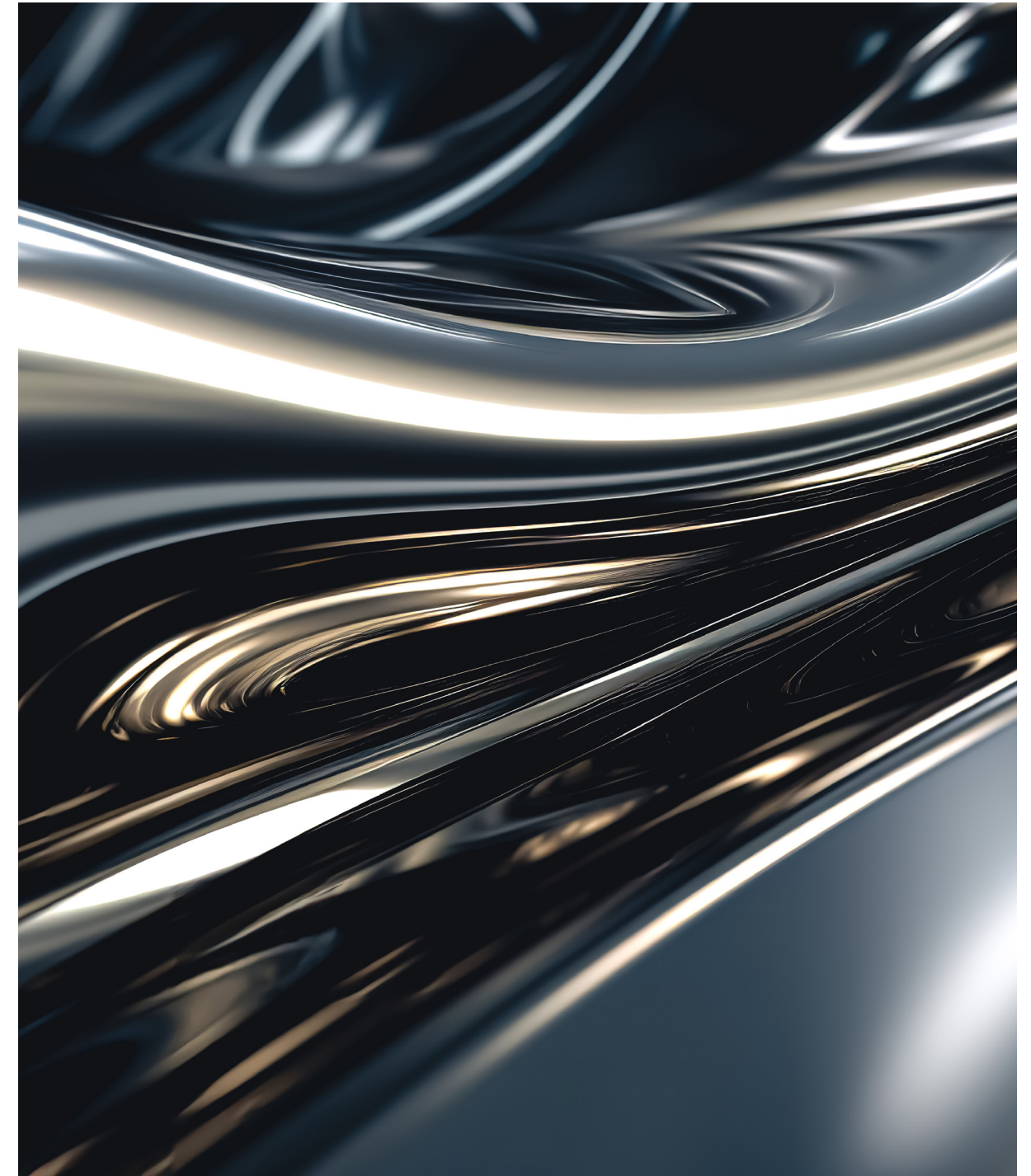
Il percorso inizia con una panoramica sulla storia del titanio metallico, dalla sua scoperta fino al suo sviluppo industriale, passando poi per le sue principali applicazioni tra le quali ritroviamo il settore aerospaziale, l’automotive, il medicale, e soffermandoci su quelle in ambito architettonico e nel design. In queste soluzioni si trovano i primi casi in cui si iniziano a comprendere le potenzialità nascoste di questo materiale, che non si riducono solo alla sua resistenza, la leggerezza, la biocompatibilità e la sua espressività, nonostante siano caratteristiche sorprendenti senza le quali non saremmo riusciti a raggiungere molti obiettivi in molti settori.

Successivamente si introduce il biossido di titanio, elemento fondamentale

e che garantisce gran parte delle caratteristiche superficiali del titanio metallico, del quale se ne approfondiscono le principali funzioni e applicazioni. In seguito se ne affrontano le proprietà fotocatalitiche, di autopulizia e di rinfrescamento passivo, che risultano estremamente efficaci per migliorare il benessere di individui e ambiente, ciò dimostrato a partire dai principali casi studio di applicazione. Se ne analizzano poi le diverse applicazioni, principalmente con risvolti ancora solo sperimentali, che vedono il biossido di titanio impiegato per le sue proprietà di fotocatalisi e autopulizia, sia in Italia che all’estero.

Prima di concludere, si dedica una breve digressione all’approfondimento delle tecniche di riciclo del titanio e del biossido di titanio, la loro importanza, le loro potenzialità e le sfide principali che dovrà affrontare in futuro.

Infine si effettua un passaggio di scala, dall’architettura al prodotto, e si propone una nuova applicazione per i semilavorati fotocatalitici al fine di migliorare il benessere delle persone e dell’ambiente nelle aree urbane, concludendo il ragionamento con delle condizioni progettuali che se seguite rendano efficaci queste soluzioni e degli spunti da cui partire.



1.IL TITANIO:

**STORIA, PROPRIETÀ E
TECNOLOGIE DI PRODUZIONE**

1.1 Scoperta e primo sviluppo industriale del titanio

Il titanio è un elemento chimico rappresentato dal simbolo Ti. Fu scoperto da **William Gregor** (fig. 1) nel 1789, nei pressi del minuscolo villaggio di Manaccan, la sua attenzione fu catturata dalle **sabbie del fiume Helford** dove individuò alcuni granuli nerastri, attaccati ad un minerale magnetico. Provò quindi ad allontanare e trattare i granuli con acido cloridrico, ottenendo una soluzione contenente ferro e una polvere verde insolubile. Nella polvere rileva manganese, silicio e un altro elemento a lui sconosciuto che chiama **monacanite**.

Figura 2 - Martin Heinrich Klaproth

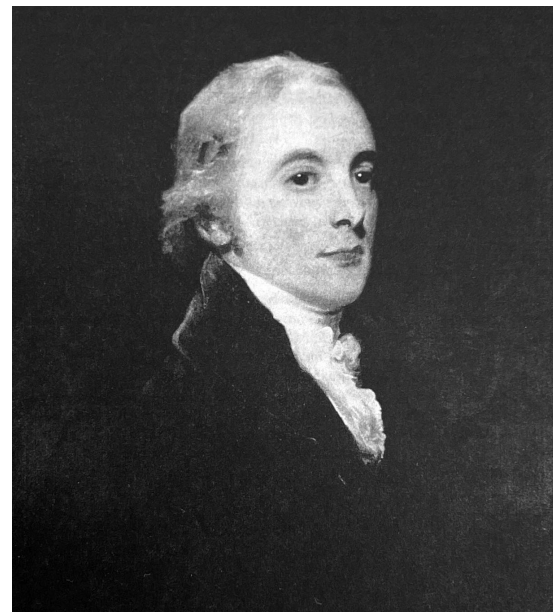


Figura 1 - William Gregor

Nel 1795 il chimico tedesco **Martin Heinrich Klaproth** (fig. 2) studiò le caratteristiche di un campione di minerale proveniente dall'attuale Slovacchia, noto come **"schorl rosso"**, denominato successivamente rutilo dal geologo tedesco Abraham Gottlob Werner. Si trattava di un minerale rosso cristallino che Klaproth notò essere composto principalmente da **ossido** di un nuovo elemento che chiamò **titanio**. Mostrò che l'elemento contenuto nell'ilmenite di Manaccan e quello presente nello schorl rosso erano ossidi di uno stesso metallo.

Tuttavia, per osservare il titanio in **forma pura** (99,9%) si dovette aspettare fino al 1910 con l'ingegnere neozelandese **Matthew A. Hunter** che utilizzò un processo che oggi porta il suo nome¹.

La distribuzione del titanio in natura può variare a seconda di processi geologici, agenti atmosferici e storia geologica. Generalmente si trova in queste forme:

- **Rocce ignee**, come anortosite, gabbro e peridotiti. Ilmenite e rutilo sono spesso associati a magnetite come accumuli minerali pesanti nel placer depositato, cioè concentrazioni di minerali che si formano dal processo naturale di erosione e sedimentazione.
- **Sabbia da spiaggia**, in particolare nelle aree con ambienti costieri ad alta energia, questi minerali sono resistenti agli agenti atmosferici e sono spesso concentrati in sabbie minerali pesanti estratte tramite dragaggio o estrazione mineraria.
- **Rocce metamorfiche**, come scisto e gneiss, a volte l'ilmenite può formarsi dopo il metamorfismo di sedimenti ricchi di ferro.

- **Rocce sedimentarie**, più raro, ma può trovarsi in rocce come arenaria, roccia scistosa e calcare. Sono casi solitamente associati alla presenza di altri minerali e non sono economicamente significativi.
- **Depositi secondari**, si formano per disfacimento ed erosione dei depositi primari, ad esempio l'ilmenite può essere alterata in leucoxene, che spesso si trova nei terreni e nei sedimenti residui.

Figura 3 - Titanio



¹. Colletta, 2020

Esistono diverse tipologie di minerali contenenti titanio:

- **Ilmenite** (FeTiO_3), è il più abbondante, contiene quantità variabili di ferro e titanio, tipicamente di colore nero o marrone scuro, è la principale fonte per scopi industriali.
- **Rutilo** (TiO_2), è un minerale duro, da bruno-rossastro a nero con un alto contenuto di titanio, è un importante fonte per la produzione di tipo metallico, utilizzato anche come pietra preziosa nei gioielli. (fig. 4)
- **Leucosseno**, è una forma alterata di ilmenite, da bianco-grigiastro a

marrone, tipicamente più morbido dei precedenti, utilizzato principalmente per la produzione di pigmenti di biossido di titanio.

- **Anortosite**, è ricca di calcio e alluminio, può contenere quantità significative di titanio, può essere una buona fonte ma la quantità di titanio contenuta può variare molto a seconda della specifica formazione geologica.
- **Perovskite**, tipicamente nero o marrone, non è una delle fonti principali ma potrebbe diventarlo in futuro dato il suo potenziale².



Figura 4 - Rutilo

2. MAT Mahmut, 2023

1.2 Proprietà fisiche e chimiche del titanio

Il titanio è un elemento chimico. Il suo numero atomico corrisponde a 22, possiede 5 isotopi e il suo peso atomico è 47,867. In natura si trova principalmente **sottoforma di biossido** (TiO_2), in tre diverse combinazioni minerali: **rutilo, anatasio e brookite**. Altrimenti si trova come metatitanato ferroso (FeTiO_3), o ilmenite, ma sono diffusi anche altri minerali quali la perovskite, o titanato di calcio (CaTiO_3), e la titanite, o silicotitanato di calcio ($\text{CaOTiO}_2\text{SiO}_2$). Il **metallo puro** si può ottenere per **riduzione** del cloruro con sodio o idruro di sodio, oppure per **scomposizione termica** dello ioduro di titanio³.

Densità: $4,5 \text{ g/cm}^3$, relativamente bassa per essere un metallo.

Punto di fusione: 1668°C (3034°F), ciò gli permette di mantenere la sua integrità strutturale ad alte temperature.

Punto di ebollizione: 3287°C (5949°F)⁴

Le uniche composizioni ad avere rilevanza industriale sono l'**ilmenite**, prodotto in India e in Norvegia, e il **rutilo** per due terzi prodotto dagli Stati Uniti d'America.

È diffuso in piccole quantità in un grande numero di rocce ignee, cioè di origine magmatica, perciò risulta **abbondante** nella **crosta terrestre**, occupando la nona posizione tra i materiali che ne fanno parte, con una quota pari allo **0,63%**⁵.

3. Caglioti, 1937

4. MAT Mahmut, 2023

5. Caglioti, 1937

Allo stato compatto ha un aspetto simile all'acciaio, a temperatura ordinaria è **duro e fragile**, ma se ad un elevato stadio di purezza, parzialmente lavorabile a freddo. Raggiunto il calor rosso, quindi una temperatura talmente elevata da poter vedere la radiazione sul materiale ad occhio nudo, **diventa malleabile**, permettendo processi di fucinatura e trafilatura.

A temperatura ambiente risulta **stabile all'aria** in quanto protetto dallo strato di ossido superficiale che lo ricopre. All'aumentare di essa inizia a reagire con sempre più elementi che lo attaccano dando origine a composti di diversa natura.



Figura 5 - Simbolo Ti tavola periodica

Si scioglie in acido cloridrico a caldo dando origine a tricloruro violetto e in acido nitrico diluito che con acqua raggia lo ossidano ad acido metatitanico. Anche l'acido fluoridrico e l'acido fluosilicico lo sciolgono facilmente⁶. È noto per il suo eccezionale **rapporto resistenza-peso**, tale rapporto indica la sua capacità di resistere a **sforzi meccanici** pur mantenendo un peso ridotto. Offre infatti una resistenza **simile all'acciaio**, ma con un **peso del 45% inferiore**, fondamentale nelle applicazioni in cui la riduzione del peso risulta cruciale come il settore aerospaziale e automobilistico.

Lo **strato superficiale di ossido** lo protegge quando esposto ad aria o acqua, evitando che il metallo sottostante si danneggi a causa degli agenti esterni. Suddetto strato di ossido, è estremamente stabile, aderente, ed offre una **protezione duratura** anche in **ambienti aggressivi**. Si mostra resistente in ambienti marini, clorurati e acidi; resistenza necessaria e particolarmente vantaggiosa nelle applicazioni che espongono il materiale a condizioni ambientali severe, come nel settore navale, nelle strutture sottoposte ad agenti atmosferici o nelle tubazioni industriali⁷.

Proprietà	Valore	Unità
Peso specifico	4.5	g/cm ³
Densità	4500	kg/m ³
Temperatura di fusione	1668-1677	°C
Conduttività termica	17-22	W/m°C
Resistenza a trazione	860-1000	MPa
Modulo di Young	103-114	GPa

Figura 6 -Tabella delle principali caratteristiche fisiche del titanio

6. Caglioti,, 1937
7. Exxmedia, 2024

A livello superficiale, il titanio presenta un'elevata resistenza alla corrosione, caratteristica dovuta ad un fenomeno elettrochimico chiamato **passivazione**. Cioè la formazione superficiale dello strato di ossido, precedentemente citato, causata dal contatto con sostanze presenti nell'ambiente. Questo è dovuto principalmente alla sua compattezza e alla scarsa porosità che rallenta la corrosione fino ad impedirla. Lo strato di ossido di superficie (biossido) è spesso alcune decine di nanometri e permette al materiale di **resistere fino a temperature prossime ai 530°C**.

Sempre allo strato di biossido si deve il processo di **fotocatalisi**, di fondamentale importanza in numerose applicazioni, ciò consiste nell'**ossidazione degli inquinanti** ad opera dello strato di biossido di titanio superficiale che catalizza la reazione in presenza di raggi UV. L'**efficacia** dell'azione catalitica del biossido di titanio, che accelera la reazione senza intervenire direttamente, **rimane inalterata nel tempo** senza che il materiale si esaurisca.

Altro carattere distintivo del titanio, in particolare sempre grazie al biossido superficiale, è la capacità di **autopulizia** che si basa sul medesimo principio della fotocatalisi. Il biossido accelera la **disgregazione delle particelle** che si depositano sulla superficie, e queste, grazie al **dilavamento delle piogge**, scivolano via, garantendo pulizia superficiale del materiale senza la necessità di interventi di manutenzione⁸.

Ulteriore fondamentale qualità del titanio è la **biocompatibilità**, cioè la capacità del materiale di essere accettato dal nostro corpo senza **nessuna reazione avversa**. Questo lo rende ideale per applicazioni mediche, come impianti e protesi, dove il materiale non reagisce negativamente con nessun tessuto corporeo, permettendo un'integrazione a lungo termine senza rischio di rigetto o infiammazioni.

A livello progettuale il titanio è stato largamente utilizzato anche per la sue particolari proprietà di **riflettenza** che danno origine a spettri cromatici dalle tonalità molto intense.

Infine, pur essendo un metallo, ha una **bassa conducibilità termica**, caratteristica utile in applicazioni che richiedono l'isolamento termico, inoltre presenta una buona resistenza meccanica anche a temperature molto basse, fondamentale in applicazioni in ambienti criogenici.

8. Colletta, 2020

1.3 Tecniche di estrazione e processi di produzione

Il primo passo nel processo di produzione del titanio metallico è l'**estrazione mineraria**, principalmente di rutilo e l'ilmenite, che vengono estratti dalla terra. Questi verranno poi elaborati per **separare il titanio dagli altri minerali**. L'estrazione prevede in genere lo **schacciamento** del minerale e l'uso di vari **processi chimici** per isolare il biossido di titanio. In questo processo le considerazioni ambientali hanno un grande rilievo, infatti le operazioni minerarie devono rispettare standard e regolamenti volti alla massima riduzione dell'impatto ecologico e ambientale⁹.

Figura 7 - Sede di estrazione mineraria



9. Lasting Titanium - How is titanium manufactured?, 2025

Il primo processo per ottenere titanio metallico è stato quello di Hunter che partì da una **miscela** di rutilo, cloro e coke dalla quale ottenne tetracloruro di titanio e anidride carbonica. Il secondo passaggio prevedeva la **riduzione** del tetracloruro di titanio con sodio per dare origine a titanio metallico. Ciò che lo aiutò rispetto ai tentativi precedenti di isolamento del metallo puro fu la partenza da un campione di tetracloruro di titanio molto puro, che dette origine ad un risultato migliore rispetto ai precedenti. I limiti del metodo di Hunter erano dati dalla **pericolosità delle modalità**

dell'operazione di **riduzione**: utilizzava una bombola di acciaio inossidabile a tenuta d'aria, si svolgeva ad una temperatura di 700-800°C, in modo esplosivo, utilizzando il sodio elementare.

Questo metodo pressoché sperimentale fu utilizzato fino al 1932, quando il chimico lussemburghese **William J. Kroll** (fig. 8) produsse le prime quantità significative di titanio duttile combinando il tetracloruro di titanio con il **calcio**. Nel 1938 produsse 20 chilogrammi di titanio, da lì a poco sarebbe scoppiata la seconda guerra mondiale che lo costrinse

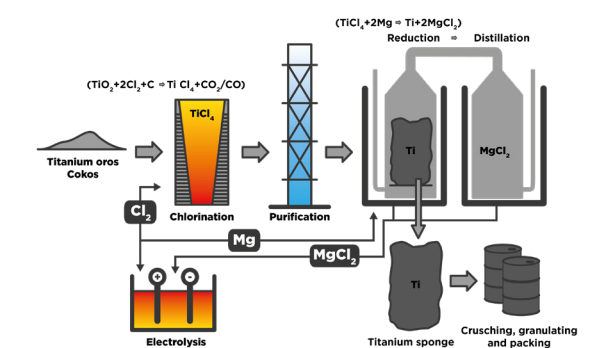
Figura 8 - William J. Kroll



10. Colletta, 2020

a spostarsi negli Stati Uniti dove continuò le sue sperimentazioni. Con il tempo perfezionò il suo metodo, sostituendo il calcio con il **magnesio**, nonostante i cambiamenti resta comunque un **processo costoso**, non paragonabile ad altri come la produzione dell'acciaio in alto forno, ma che resta ancora oggi **il più utilizzato** e che per questo consegna a Kroll il titolo di **padre della moderna industria del titanio**. Il processo di Kroll (fig. 9) è ancora oggi alla base della maggior parte della produzione del titanio, anche se il costo di questo processo rimane il vero grande ostacolo alla diffusione di questo **"wonder metal"**, per questo motivo, per lungo tempo, l'utilizzo del titanio è rimasto confinato al settore **militare**, dove il budget non rappresentava e non rappresenta tuttora un limite invalicabile¹⁰.

Figura 9 - Schema del processo di Kroll



Il **processo di Kroll** si articola in 4 fasi:

1. **Trattamento** del minerale ridotto **in polvere** con cloro in forma di gas per ottenere il tetracloruro di titanio.
2. **Purificazione** del tetracloruro di titanio (TiCl_4).
3. **Riduzione** del titanio a titanio poroso.
4. **Trattamento** del **titanio poroso** per ottenere il **titanio metallico**.

Più in particolare, per passare da **biossido di titanio**, ottenuto tramite estrazione, a **titanio metallico** con il metodo di Kroll, noto per la sua stabilità termica e resistenza agli attacchi chimici, è necessario un processo in **4 stadi**. Non è possibile che sia ridotto utilizzando **carbonio**, monossido di carbonio o idrogeno perchè in presenza di carbonio si ottiene carburo di titanio che rende il metallo **fragile**.

1. Il minerale è trattato in un reattore a letto fluidizzato a 1000°C con cloro gassoso in presenza di coke, si ottiene il tetracloruro di titanio, più facilmente riducibile rispetto al biossido di titanio.

2. Il tetracloruro viene poi trattato con solfuro di idrogeno per rimuovere le impurità e purificato attraverso distillazione per ottenere un grado di purezza del prodotto superiore al 99,9%.
3. Il tetracloruro purificato viene inserito in un reattore di acciaio inossidabile in atmosfera di argon a 500°C , ciò da origine a reazioni esotermiche che portano alla formazione di cloruro di titanio (II) e cloruro di titanio (III) causando un rapido aumento della temperatura fino a $800^\circ - 850^\circ\text{C}$. I due cloruri vengono ridotti gradualmente, con la temperatura che raggiunge i 1000°C per completare il processo.
4. Il titanio ottenuto risulta poroso e dev'essere purificato ulteriormente, viene per questo trattato con azoto e ossigeno ad alte temperature sottovuoto o in atmosfera inerte di argon per ottenere il prodotto finito. Attraverso un processo di fusione sottovuoto si andranno a rimuovere eventuali inclusioni, in modo da garantire l'uniformità del prodotto¹¹.

Durante il processo di fusione sarà possibile raggiungere la microstruttura desiderata e le proprietà meccaniche necessarie all'applicazione finale, anche attraverso la creazione di leghe, con gradi specifici di titanio, legati all'utilizzo finale del materiale¹². In relazione alle sue applicazioni è prodotto in diverse forme:

- **Sponge**, la forma più grezza del titanio prodotta attraverso il processo di Kroll.
- **Lingotti**, dopo il processo di sponge, viene fuso e raffinato, vengono poi prodotti i lingotti che sono la materia prima per successive lavorazioni.
- **Lastre, barre e fili**, a partire dai lingotti lavorati ulteriormente si ottengono queste forme usate in svariate applicazioni strutturali e di ingegneria¹³.

Figura 10 - Barre di titanio



Il lavoro di modellazione può comportare lavoro a freddo o a caldo a seconda del prodotto finale desiderato. Grazie alla sua versatilità, il titanio, permette di essere modellato in geometrie complesse, rendendolo adatto a progetti intricati e applicazioni particolari. Le tecniche di formatura avanzate, a cui il titanio può sottoporsi, permettono ai produttori di creare componenti che soddisfino specifiche rigorose ottimizzando notevolmente l'utilizzo del materiale. La **fase finale** della produzione del titanio prevede processi di **finitura** per migliorare la **qualità** della **superficie** e le **proprietà meccaniche** dei prodotti. La ricottura, il trattamento superficiale, il rivestimento o altre tecniche possono essere sfruttate per migliorare la resistenza alla **corrosione** e altre proprietà per prevenire l'usura. Questi processi sono fondamentali per garantire che i componenti in titanio rispettino i **rigorosi requisiti** previsti dai settori industriali¹⁴.

Figura 11 - Fili di titanio



11. Deseaux, 2020

12. Lasting Titanium - How is titanium manufactured?, 2025

13. Exxmedia, 2024

14. Lasting Titanium - How is titanium manufactured?, 2025

Il titanio può inoltre subire un trattamento di **ossidazione anodica**, processo elettrochimico che **ispessisce** e stabilizza lo strato di **ossido** presente sulla superficie di metalli come l'alluminio, il rame, il ferro, il magnesio e il titanio appunto. Attraverso un **circuito elettrico chiuso**, si collega il metallo da ossidare all'anodo e un conduttore inerte al catodo, si forma così uno strato di ossido sulla superficie del metallo. In particolare per il titanio, il processo inizia con l'assorbimento dell'ossigeno presente sullo strato di ossido già esistente sulla superficie del materiale. L'aumento di spessore del film è dato dal trasferimento di ioni Ti^{2+} e O^{2-} che segue una relazione lineare con il potenziale applicato ($20 \text{ \AA} \times \text{volt}$), lo **spessore aumenta all'aumentare della temperatura**¹⁵. Nelle sue **applicazioni biomediche**

è possibile depositare sulla superficie del materiale anche un **rivestimento in idrossipatite** (HAP) per migliorarne la **bioattività** superficiale e l'adesione tra film e substrato. La deposizione di HAP è facilitata dalla porosità del materiale metallico, che avviene attraverso un processo biomimetico che prevede un trattamento alcalino, un trattamento termico e l'immersione in un fluido biologico simulato. La distribuzione e la dimensione dei pori svolge un ruolo molto importante nel controllo dello spessore, della morfologia, della distribuzione e del fissaggio del rivestimento di HAP depositato sulle leghe porose di titanio, perciò è necessaria un'**attenta analisi preventiva** per progettare al meglio il processo di applicazione. Ciò è utile per **integrare** in modo ottimale una **protesi** a contatto con **tessuto osseo**¹⁶.



Figura 12 - Protesi in titanio

15. Pira, 2004
16. Li et al., 2017

1.4 Principali leghe di titanio e le loro caratteristiche

In metallurgia il titanio si adopera additivato in **lega con altri elementi**, quali ferro, carbonio, rame, alluminio e manganese, con percentuali che oscillano **tra 5 e 70%**. È inoltre utilizzato come **depuratore** per l'**acciaio** grazie alle sue affinità con ossigeno e azoto, che lo rendono più efficace dell'alluminio. In **combinazione** con il **carbonio** è utilizzato per evitare la **corrosione intercristallina nelle saldature di acciai inossidabili** e impedire la tempra all'aria di acciai al 5% di cromo, inoltre gli **acciai al titanio** si distinguono per la **maggiore resistenza ed elasticità**¹⁷.

Figura 13 - Saldatura di lamiera



17. Caglioti, 1937

A livello industriale il titanio viene legato ad altri elementi per migliorarne le proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione, in particolare gli elementi più presenti nelle leghe di titanio sono i seguenti:

- **Alluminio** (Al): aumenta la forza e la capacità di trattamento termico.
- **Vanadio** (V): migliora la durezza e la resistenza meccanica.
- **Molibdeno** (Mo) e **Zirconio** (Z): incrementano la resistenza alla corrosione.
- **Stagno** (Sn): migliora la resistenza meccanica e la duttilità.

Queste leghe sono classificate in tre categorie, basate sulle loro **caratteristiche microstrutturali**:

- **Alfa** (a), contengono stabilizzatori alfa come alluminio e ossigeno. Sono molto **resistenti** alla **corrosione** e mantengono buone **proprietà meccaniche** ad alte temperature.
- **Beta** (b), contengono elementi che stabilizzano la fase beta, come vanadio e molibdeno. Caratterizzate da maggiore **lavorabilità** e hanno la possibilità di essere **trattate**

termicamente per essere più **resistenti**.

- **Alfa-Beta** (a-b), combinano le qualità delle leghe alfa e beta. Offrono un buon equilibrio tra **lavorabilità, resistenza e duttilità**¹⁸.

Esempi di leghe di titanio:

Leghe alfa:

- Titanio Commercialmente Puro (CP-Ti), utilizzato principalmente per applicazioni mediche e chimiche.
- Ti-5Al-2.5Sn, utilizzato nei motori aeronautici per la sua particolare resistenza al creep.

Leghe beta:

- Ti-15Mo-5Zr-3Al, lega biocompatibile utilizzata nei componenti biomedicali.
- Ti-10V-2Fe-3Al, lega con elevata resistenza meccanica impiegata nell'industria aerospaziale.

Leghe alfa-beta:

- Ti-6Al-4V (Ti64), lega con maggiori applicazioni nel settore aerospaziale, automobilistico e biomedicale.
- Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, impiegata in motori aeronautici per la sua resistenza al creep e all'ossidazione¹⁹.



Figura 14 - Braccetto in titanio

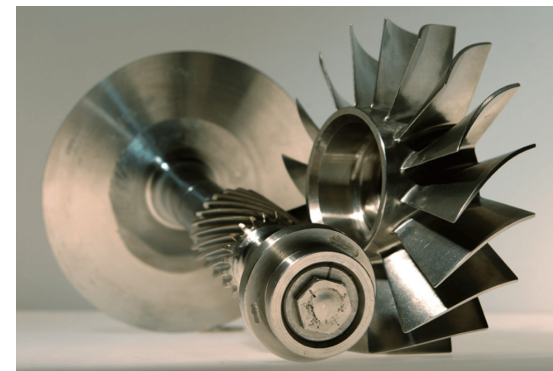


Figura 15 -Componentistica per settore aerospaziale



Figura 16 - Protesi per cranio

Esistono **6 tipologie di titanio commercialmente puro** (CP), ognuna di esse contiene una quantità diversa di impurezze, tra queste il CP Grado 1 è il più puro. Di queste, sono **quattro le tipologie di maggior rilievo** e contengono tra il **99,01% e il 99.5%** di titanio, più delle piccole quantità di ferro, carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno. Questi “intrusi” sono presenti in forma residuale e non compromettono in modo significativo le proprietà meccaniche del materiale. L'**ASTM** ha creato una classificazione in gruppi:

- **Grado 1**, titanio CP con basso contenuto di ossigeno, basso carico di rottura e **alta duttilità**.
- **Grado 2**, titanio CP con maggiore quantità di ossigeno, comporta maggiore resistenza, è il **più largamente usato** per l'equilibrio tra resistenza, saldabilità e formabilità.
- **Grado 3**, titanio CP con contenuto di ossigeno ancora maggiore, maggiore resistenza e minore duttilità.
- **Grado 4**, titanio CP con maggiore quantità di ossigeno, ha le caratteristiche di **resistenza più elevate**²⁰.

Il biossido di titanio inoltre può acquistare **proprietà pigmentarie** se preparato in determinate condizioni, in questo caso è prodotto industrialmente per **idrolisi a ebollizione delle soluzioni solforiche di TiO₂**. È un'operazione delicata, da questa dipenderanno le proprietà del prodotto risultante, funzione della concentrazione delle soluzioni solforiche presenti, dell'acidità del liquido, della temperatura e della velocità dell'idrolisi²¹.

¹⁸. Exxmedia, 2024
¹⁹. Mattacheo, 2020

²⁰. Vomiero, 2016
²¹. Caglioti, 1937



2.APPLICAZIONI

INDUSTRIALI DEL TITANIO

Il titanio nella storia moderna ha trovato applicazione nei settori più disparati, in relazione alle **prestazioni** richieste varia la tipologia e il grado, ma generalmente il titanio di **grado II** è quello **più utilizzato**, grazie ad un maggiore carico di snervamento rispetto al grado I, una buona duttilità, ad un'alta formabilità, una buona saldabilità e una resistenza meccanica notevole, tra i principali settori di applicazione troviamo il settore **aeronautico**, **marino**, **l'architettura**, il **design**, **l'industria chimica** e il settore **biomedicale**. Il titanio di **grado I** invece, data la sua duttilità e formabilità, è applicato principalmente nel settore **chimico**, **medico**, **marino** e **architettoneco**. Il **grado III** offre una resistenza meccaniche superiore al grado II, perciò è utilizzato in applicazioni **aerospaziali**, **marine**, **chimiche**, **medicali**. Infine il **grado IV**, in cui la resistenza raggiunge i valori massimi per il titanio, troviamo utilizzi relativi al settore dell'**aeronautica**, nella realizzazione di **strumenti chirurgici**, scambiatori di calore e serbatoi criogenici.

In generale, i diversi gradi di purezza sono applicati ognuno quasi in ogni settore, ma con applicazioni differenti in relazione al lavoro che il componente deve compiere.

2.1 Settore aerospaziale e nautico

La prima applicazione del titanio in un velivolo fu per il progetto sperimentale **Douglas X-3 "Stiletto"** (fig. 17) dei primi **anni '50**, l'obiettivo era farlo volare alla velocità di Mach 2. Pochi anni dopo nel **1960**, il 9% in peso del **Phantom F-4** era costituito da titanio. Ad oggi le percentuali sono enormemente aumentate ed il caso più significativo di utilizzo di questo materiale in aeronautica è nel ricognitore strategico statunitense **Lockheed SR-71**, noto come **"Blackbird"** (fig. 18). Sviluppato all'interno dell'area 51, è costituito per il **93% da tre diverse leghe di titanio**: grazie a questo l'aereo è in grado di superare il **Mach 3**, situazione in cui le superfici esterne sono sottoposte a temperature superiori a **300°C** a causa dell'enorme compressione dell'aria circostante.

Materiali tradizionali come la lega di alluminio non sarebbero stati in grado di sopportare questi stress termici senza degradarsi, a differenza del titanio, perfettamente in grado di affrontarli. Per dare un'idea dello stress a cui tali superfici sono sottoposte, basti pensare che, a causa di tali condizioni, il colore della carlinga dell'aeromobile passa da nero a blu.

Tutt'ora, se si escludono le superleghe di Nickel, il **titanio** è considerata l'**unica scelta** per applicazioni a **temperature così elevate**. Inoltre, il titanio, è il metallo con la migliore resistenza alla **corrosione**, con la sola eccezione del platino, grazie alla formazione, sulla superficie a contatto con ossigeno o acqua, dello strato di ossido resistente e protettivo che ne evita l'erosione²².

Figura 17 - Douglas X-3 "Stiletto"





Figura 18 -
Lockheed SR-71

Nell'aviazione, la **riduzione del peso** è una priorità assoluta, importante per migliorare l'efficienza del carburante, ma anche per aumentare la capacità di carico e le prestazioni complessive del velivolo.

Tra i componenti prodotti in titanio facenti parte di aeromobili troviamo telai per carrelli d'atterraggio, strutture di supporto per il motore e parti critiche del fusolaggio, ma lo troviamo anche nei fan blade dei motori a reazione, dove la resistenza a fatica e alla temperatura sono fondamentali²³.

Figura 19 - Struttura per carrello di atterraggio



23. Exxmedia, 2024

Negli **anni '80 North American Rockwell** utilizzò, per il suo bombardiere **B-1B**, il titanio per oltre **250 componenti** realizzati in lastre di lega **Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn**. Scelsero questa lega perchè era possibile produrla in **lastre**, ciò riduceva enormemente i **costi**, aveva una **formabilità** superiore rispetto alla più comune Ti-6Al-4V e inoltre poteva essere trattata termicamente per poter raggiungere una **resistenza a trazione superiore** a 1034 MPa.

Negli **anni '90** è la volta del **Boeing 777**, l'utilizzo maggiore riguarda la lega **Ti-10V-2Fe-3Al**, con una resistenza a trazione di almeno 1193 MPa, con principale applicazione nella **struttura del carrello di atterraggio** (fig. 19), risparmiando molti chilogrammi grazie alla sostituzione degli acciai altoresistenziali a basso tenore di lega (HSLA) come il 4340M e il 300M.

Il **Boeing 777** è stato il **primo aereo**, ad eccezione dell'SR-71, in cui il **Ti-6Al-4V non era la lega predominante**.

Per quanto riguarda **carrelli d'atterraggio e molle**, l'utilizzo della lega di titanio, nonostante il costo, risulta **vantaggiosa** per questioni di resistenza alla corrosione rispetto agli HSLA che richiedono manutenzioni costose ogni 6-10 anni, questo non accade nel caso delle leghe di titanio.

Più recentemente la lega **Ti-10V-2Fe-3Al** è stata utilizzata per **applicazioni rotanti** sull'albero del rotore di un **elicottero Westland Lynx** (fig. 20), tra cui dischi, manicotti e forgiature per l'albero del rotore; si è utilizzata questa lega invece della più comune Ti-6Al-4V per le sue capacità di **resistenza a fatica**, che nella lega tradizionale risultavano critiche²⁴.

Ad **oggi** l'industria **aeronautica** la fa ancora da **padrona** per quanto riguarda l'utilizzo del titanio grazie all'introduzione di nuovi processi elettrolitici per ottenerlo.

I più moderni aeromobili infatti fanno

sempre più uso di componenti in titanio. Alcuni esempi sono il moderno **caccia F-22** il cui telaio è per il **42%** costituito da leghe di titanio. Tendenza iniziata con la cosiddetta **"serie 10"** di caccia statunitensi, tra i quali troviamo F-14, F-15, F-16 e F-18, dagli omologhi Mig-29 e Su-27 russi e dalle classi europee di Rafale, Gripen e Typhoon. Tutto ciò anche grazie all'introduzione di **nuove tecniche di fusione** del titanio per realizzare componenti di **grandi dimensioni** come longheroni portanti delle ali e fusoliere, impensabili durante i primi utilizzi. (2)

Figura 20 - Elicottero Westland Lynx



24. Boyer R.R. and Briggs R.D., 2005

25. Colletta, 2020

In particolare modo, il titanio, risulta essere il **materiale ideale** per la realizzazione di **molle**, per la sua elevata **resistenza**, il basso **modulo elastico** e la bassa **densità** in combinazione con l'elevata **resistenza**. Ciò permette di **ridurre il volume** fino alla metà, rispetto a quelle in acciaio, e il **peso** fino al 70% in meno, oltre a risolvere il problema della **corrosione** che affliggeva le molle in acciaio. Ci si riferisce a molle per i carrelli di atterraggio, molle di bilanciamento delle porte, molle di controllo di volo, molle di centraggio e sensibilità per il volante, molle di ritorno dei pedali e molle di ritorno idrauliche.

Molle di questo tipo sono utilizzate anche in aerei di più piccole dimensioni come **Bombardier** e **Cessna**.

Anche i **prodotti di forgiatura** in **Ti-10V-2Fe-3Al**, nominati precedentemente, stanno trovando sempre maggior impiego nel settore **aerospaziale**, soprattutto negli **elicotteri**, sia in Europa che negli Stati Uniti, sempre per questioni di maggiore **resistenza a fatica**. Seguono processi e **livelli di resistenza differenti** rispetto a quelli di **Boeing**, con resistenza a trazione minima di 1100 MPa tradotta in resistenza a fatica ad alto numero di cicli pari a 650MPa con rapporto di sollecitazione ($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) uguale a -1.

Figura 21 - F-22 Raptor



Un esempio più recente di quest'applicazione è l'elicottero **Comanche** (fig. 22) costruito dal **team Sikorsky/Boeing** che ha utilizzato la lega **Ti-10V-2Fe-3Al** per **componenti del sistema del rotore principale**, tra cui il mozzo, la struttura di supporto del rotore sulla fusoliera, collegamenti e altro.

L'unico produttore di **jet** che utilizza questa lega è **Embraer**, nelle guide dei flap del modello da 70 passeggeri e in applicazioni simili per il modello da 190 passeggeri.

Ad oggi è in fase di valutazione la costruzione della **coda** del nuovo **Boeing 7E7** in **Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn**. Soluzione che ha la possibilità di essere prodotta in lastre, non ponendo limiti alla lun-

ghezza del foglio da cui ricavare il pezzo finale.

Per quanto riguarda le **forgiature**, si utilizzerà il **Ti-5Al-5Mo-3Cr**, che sostituirà il Ti-10V-2Fe-3Al, poichè la sua lavorazione risulta più semplice rispetto alla lega precedente.

La ricerca a lungo termine in questo ambito sta progettando **fissaggi in titanio ad alta resistenza**, destinati a sostituire quelli in acciaio a trazione di 1380 MPa. Alcune aziende, come SPS e TiPro, hanno già sviluppato leghe che sembrano rispondere ai requisiti prefissati. Anche Airbus sta sperimentando titanio ad alta resistenza in questi termini²⁶.

Figura 22 - Elicottero Comanche



26. Boyer R.R. and Briggs R.D., 2005

A partire dagli **anni '60**, la **marina Sovietica**, costruì una serie di sottomarini nucleari, chiamati **Alfa e Sierra**, aventi lo scafo completamente in titanio, ciò gli permetteva di raggiungere **quote di immersione doppie** rispetto alle unità con scafo d'acciaio.

Tuttavia i costi erano elevatissimi, tanto che questi sottomarini erano chiamati "pesci d'oro".

Figura 23 - Sottomarino Sierra



2.2 Settore automobilistico

Date le sue caratteristiche, anche il settore dell'auto vede il titanio come il più degno sostituto dell'acciaio. La corsa alla **riduzione del peso** delle vetture, per ridurre i **consumi** e di conseguenza le **emissioni** inquinanti, hanno visto l'applicazione di carbonio e alluminio, entrambi leggeri, ma non ai livelli del titanio. Il vero ingresso del titanio in automotive si deve a **Porsche** negli **anni '60**, quando lo utilizzò per la realizzazione del **motore Porsche 1500** ad otto cilindri per la **Formula 1**. La casa automobilistica di Stoccarda lo utilizzò in maniera più diffusa poi nella **917** che vinse la 24 di **Le Mans** per ben due anni consecutivi nel **1970 e 1971**.

Figura 24 - Porsche 917 del 1970 a Le Mans



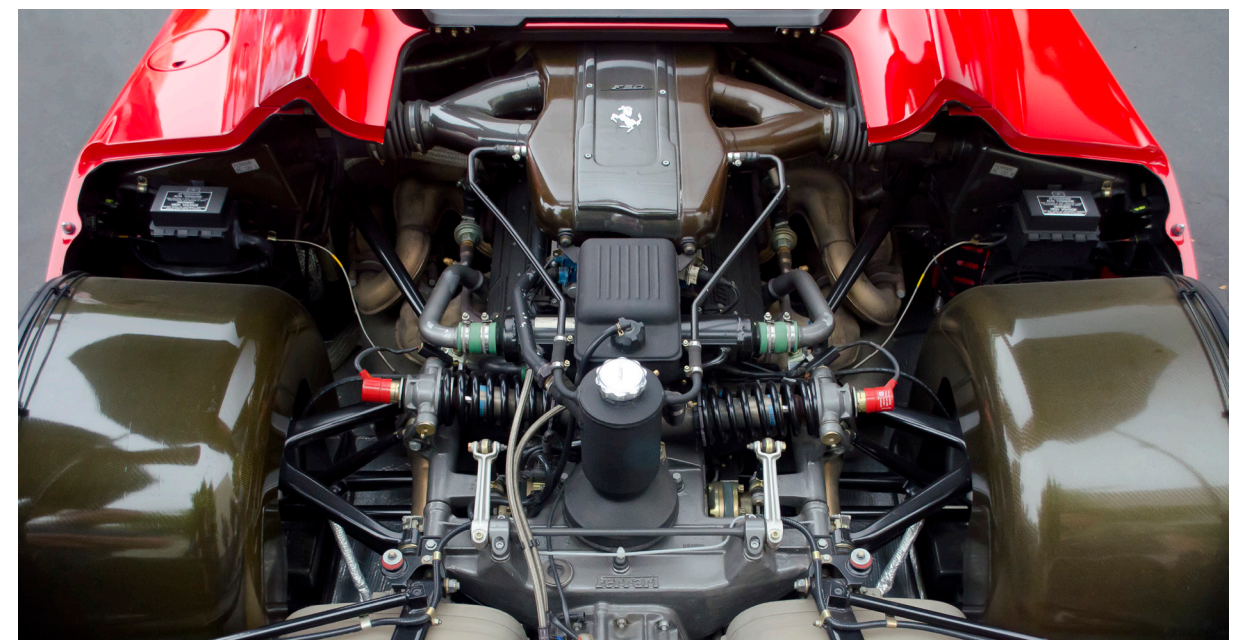
In questo caso in titanio erano realizzate le bielle, le valvole, le molle delle sospensioni, i portamozz, le campane dei dischi freno, gli scodellini e l'albero ausiliario.

Grazie alla sua **resistenza a trazione** risulta perfetto per la realizzazione di **telai** e **parti meccaniche**, garantendo allo stesso tempo una notevole diminuzione del peso. Inoltre, la resistenza alla **corrosione** lo rende ideale per la produzione di **marmitte, sospensioni, molle, viti, dadi e bulloni**.

Lo scoglio difficile da superare è il **costo**, che ne limita l'utilizzo al settore del **lusso** e delle **competizioni**, tuttavia non mancano applicazioni in casi decisamente accessibili.

Ovviamente, case come **Ferrari** hanno utilizzato il titanio ad esempio nell'**F50** (fig. 25) che ha le bielle del suo V12 in titanio, ma anche **Porsche** ha continuato ad utilizzarlo come nel caso della **GT3** dove le valvole sono in titanio. Maggiore è stato l'utilizzo che ne ha fatto **Bugatti** nella sua **Veyron**, nella versione **Super Sport** che nel 2010 ha stabilito il record mondiale di auto di produzione più veloce al mondo, raggiungendo oltre i 430 km/h di media. In questo caso, **molle** delle sospensioni, **bulloni, bielle, camp**ane di fissaggio dei dischi freno e sistemi di **scarico** sono tutti in titanio.

Figura 25 - Motore Ferrari F50



27. Colletta, 2020

“È indubbio quindi che il titanio, insieme ad alluminio e carbonio, rappresenta una delle frontiere nel mondo automobilistico, e che i tempi della sua affermazione saranno legati senza dubbio all'abbattimento dei costi di produzione.”

Possiamo però osservare esempi come la **Honda** che negli **anni '90** ha introdotto bielle in titanio nella **Acura NSX**, seguita dalla **Nissan** che negli anni **2000** l'ha impiegato nelle valvole di alcuni modelli, ma anche **General Motors** per gli scarichi della **Corvette**, **Volkswagen** per le molle delle sospensioni posteriori della **Lupo FSI** e la **Toyota** nella valvole motore di alcuni modelli²⁷.

2.3 Settore medico

In questo settore il titanio è utilizzato con risultati eccellenti, lo si trova in **protesi** per anche, ginocchia, nei **componenti** per stimolatori cardiaci, pacemaker e valvole cardiache, nelle **piastre** e nelle **viti** per interventi su fratture delle ossa, comprese quelle del cranio, ma anche come metallo nel fissaggio delle **protesi dentarie** (fig. 26). Sin dagli **anni '50** è impiegato in questo settore data la sua grande **biocompatibilità**, la comprovata **resistenza** all'attacco di liquidi organici e il fatto di essere un metallo **amagnetico**. È fondamentale la capacità di **osteointegrazione** del titanio che consiste nella capacità di integrarsi e fondersi con l'osso in cui viene innestato senza effetti avversi²⁸.

Le **leghe di titanio** sono tra le più utilizzate per protesi di tessuti duri, anche se ad oggi insieme ad altri metalli presentano dei **problemi** legati alle **proprietà meccaniche** e alla **citotossicità**. Il primo motivo è legato alla **compatibilità biomeccanica**, mentre il secondo è legato alla **compatibilità biochimica**. Nel primo caso la grande differenza tra il **modulo di Young** del metallo e quello osseo può causare il fenomeno di **stress shielding**, ciò può causare osteoporosi nel tessuto osseo circostante. La citotossicità consiste nella presenza di **sostanze tossiche** per l'organismo che possono causare

disturbi di vario genere. Per ovviare al problema si stanno elaborando nuove **leghe** di titanio di tipo **beta**, con un **basso modulo di Young**, e utilizzando **elementi** di lega **non tossici** come il **Mo** (molibdeno), per i quali i risultati della ricerca stanno dando esito positivo.

Figura 26 - Protesi dentale



Figura 27 - Protesi per anca



28. Colletta, 2020

Come seconda soluzione si stanno sfruttando **strutture porose** per facilitare il trasporto di **flussi corporei e nutrienti**, oltre a migliorare l'attacco dell'impianto al tessuto osseo circostante. Inoltre il modulo di **Young** e la **resistenza** possono essere **regolati**, variando i parametri di processo, per ottenere valori simili a quelli ossei.

Generalmente, nel momento dell'innesto, le protesi metalliche vengono circondate da tessuto fibroso e isolate da quello osseo a causa della loro **bioinerzia**. Ceramiche bioattive come **HAP** (idrossiapatite) non possono essere utilizzate da sole a causa della loro fragilità ma una soluzione ideale sarebbe la **combinazione** di **leghe di titanio poroso** con elementi di lega non tossici e una modifica superficiale attraverso deposizione di HAP bioattivo.

In particolare la **lega titanio - molibdeno** è quella ad aver riscontrato maggior interesse, perché ha un effetto stabilizzante della fase beta della lega più forte rispetto agli elementi più comuni. Rappresenta anche un **vantaggio economico** dato il costo inferiore rispetto agli stabilizzatori più comunemente usati. Inoltre il Molibdeno migliora la resistenza e la resistenza a corrosione pur riducendo il modulo di Young.

Ci sono ancora poche informazioni in merito alle leghe Ti-Mo porose,

rispetto a quelle solide, e a proposito del loro potenziale utilizzo come biomateriali, tuttavia è stata dimostrata e stabilita la soglia di almeno il 10% in peso di Mo per stabilizzare la fase beta²⁹.

Figura 28 - Protesi auricolare



29. Li et al., 2017

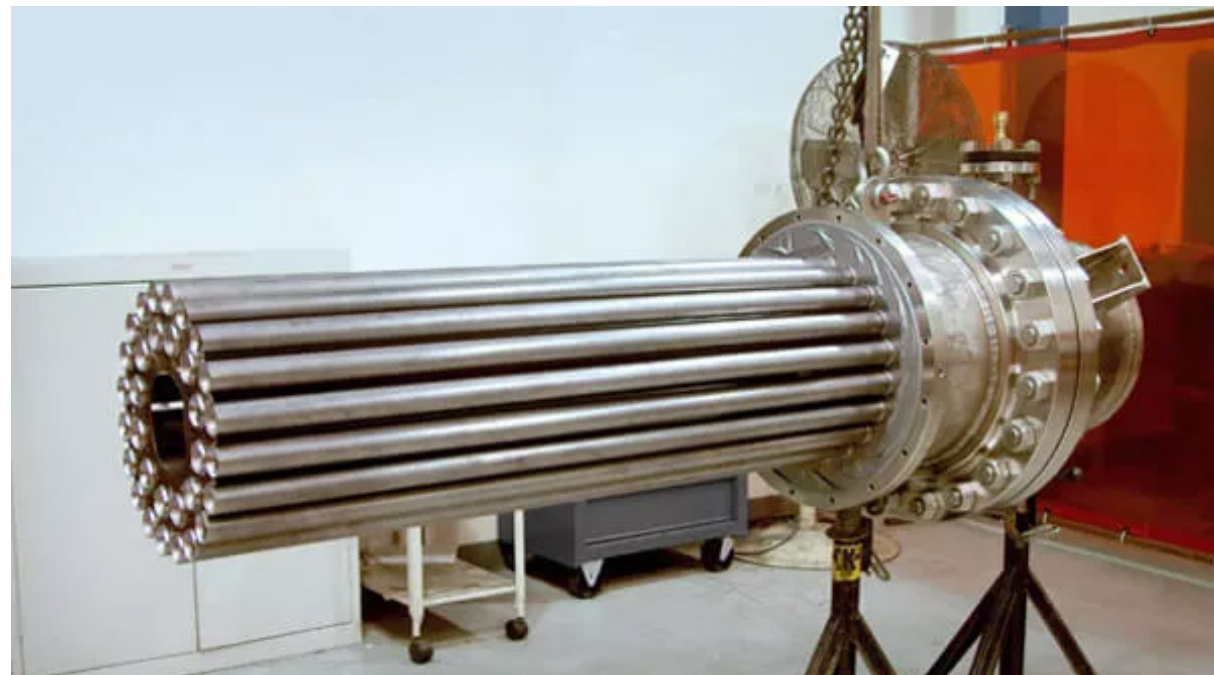
2.4 Altri settori

2.4.1 Settore civile e infrastrutturale

Una delle applicazioni più diffuse fin dagli esordi è stata quella dei **tubi per condensatori** (fig. 29), utilizzati nella produzione di **energia elettrica** che sfruttavano l'acqua di mare per lo scambio termico. A partire dal 1971, negli Stati Uniti, sono stati installati oltre centomila chilometri di questi tubi. Generalmente, in **ambienti marini**, il titanio è pressoché una **scelta obbligata**, nel settore infrastrutturale, in quanto garantisce una **resistenza praticamente illimitata**.

Si rivela inoltre una **scelta “economica”**, perché consente la riduzione del **peso** della struttura e del relativo ancoraggio, riducendo vertiginosamente i costi³⁰.

Figura 29 - Tubi per condensatori



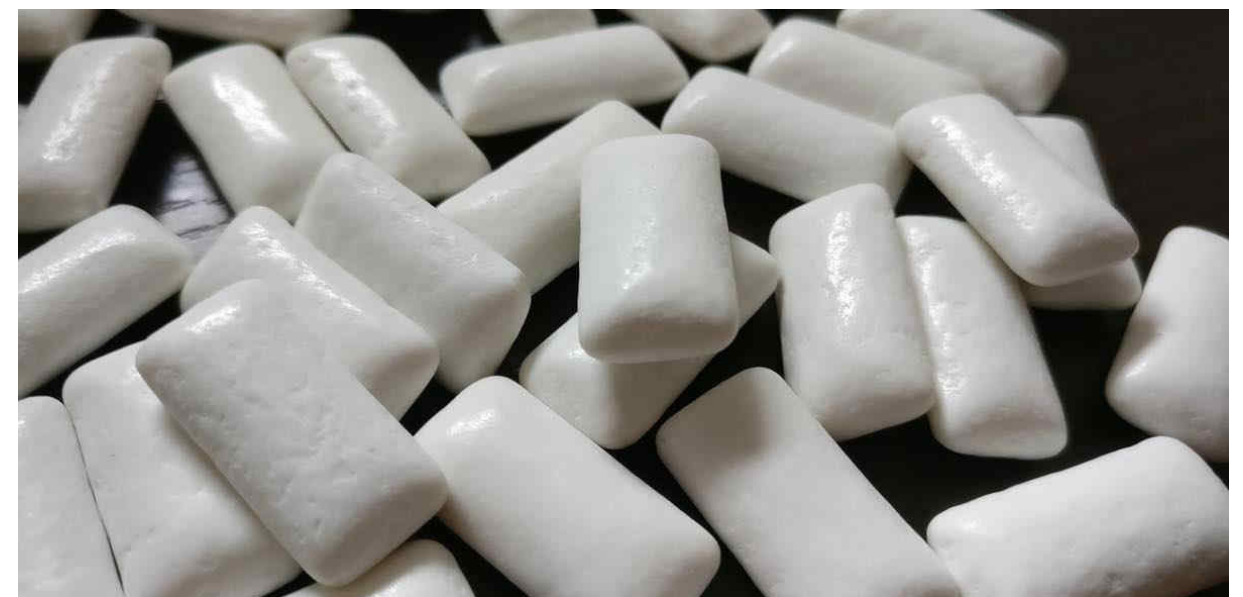
30. Colletta, 2020

2.4.2 Industria alimentare

In questo settore si riscontrava l'utilizzo del titanio come **colorante**, noto con la sigla **E171**. Lo si poteva trovare nei prodotti più disparati, dai dolci, ai prodotti a base di pesce, ai formaggi. A questo proposito, l'**EFSA**, autorità europea per la sicurezza alimentare, ha dichiarato che i dati per ora a disposizione **non fanno più considerare sicura la sua ingestione** e non è quindi possibile stabilire quale possa essere la dose giornaliera accettabile senza compromettere la salute del consumatore.

Tuttavia, l'Efsa, non essendo un ente di tipo legislativo o normativo, non può stabilire un divieto, essa si limita solamente alla valutazione dei rischi. Risulta comunque un ente autorevole, quindi alcuni paesi, come la **Francia**, hanno **vietato** la commercializzazione di prodotti che contengono l'E171 a partire dal **2020**³¹.

Figura 30 - Colorante E171 in gomme da masticare



31. EFSA, 2021

2.4.3 Settore chimico, petrolchimico ed energia

La **resistenza alla corrosione** lo rende ideale per apparecchiature utilizzate in **ambienti aggressivi** che coinvolgono acidi forti, alcali e cloruri. Ad esempio è utilizzato in scambiatori di calore, reattori (fig. 31), valvole e sistemi di tubazioni.

È diffusamente utilizzato nella **produzione di energia** e nella desalinizzazione grazie all'elevata resistenza alla corrosione e alla capacità di resistere ad alte temperature.

È impiegato in centrali elettriche, piattaforme petrolifere e di gas offshore³².

Figura 31 - Reattore



32. Colletta, 2020

2.4.4 Design e beni di consumo

Il titanio viene utilizzato diffusamente nella produzione di **articoli sportivi** come di mazze da golf (fig. 32), più leggere e accurate, ma anche nella realizzazione di telai di biciclette, sci, racchette da tennis³³. Ma viene utilizzato anche per montature per **occhiali, orologi e gioielli** grazie alla sua durata, resistenza alla corrosione e all'aspetto attraente³⁴.

Figura 32 - Mazze da golf



33. Colletta, 2020
34. MAT Mahmut, 2023

2.5 Il titanio in architettura: introduzione

La sua **riflettenza** e la capacità di **autopulizia** ha stimolato architetti come **Frank Owen Gehry** a scegliere il titanio per rivestire le loro costruzioni. L'esempio più celebre è il **Guggenheim di Bilbao** (fig. 33) del 1991 dove oltre trentamila **lastre** di titanio garantiscono alla struttura una pulizia costante che solo nelle lastre più protette, dove non si forma ossido a sufficienza, non viene fornita³⁵.

Ma questo non è l'unico motivo per cui il titanio risulta interessante nel settore

architettonico, infatti permette la **termoregolazione** degli spazi interni di edifici e la **riduzione** del tasso di **inquinamento** dell'aria nella zona circostante³⁶.

Il prossimo capitolo affronterà nello specifico le caratteristiche e i vantaggi dell'impiego del titanio in architettura e nel design facendo riferimento a una serie di casi studio significativi.

Figura 33 - Museo Guggenheim di Bilbao



³⁵. Colletta, 2020

³⁶. TDMA - Titanium dioxide in the sustainable built environment, 2025



3.ARCHITETTURA E DESIGN: INNOVAZIONE ED ESPRESSIVITÀ

3.1 Caratteristiche e vantaggi del titanio in architettura

Il titanio ha eccellenti qualità applicabili al **settore costruttivo**, per questo motivo ha trovato strada già negli **anni '70**, prima nel restauro e nella costruzione di **musei** e **templi** in Giappone, come punto di incontro tra storia e innovazione tecnologica, grazie ai suoi caratteri estetici, che gli permettono di inserirsi facilmente in contesti storici anche molto antichi, e per le sue eccezionali caratteristiche tecniche. Successivamente ha avuto una più ampia diffusione anche in altri ambiti.

Le caratteristiche fondamentali che rendono il titanio l'ideale per questo genere di applicazioni sono la sua eccellente **resistenza** a corrosione, dovuta allo stabile strato di ossido presente sulla superficie del materiale che ne garantisce resistenza alla corrosione per decenni, ma anche resistenza alle cricche da corrosione sotto sforzo, corrosione interstiziale e vaiolatura. Ovviamente la sua **leggerezza** è un'arma vincente in quanto i suoi $4,5 \text{ g/cm}^3$ lo rendono il 40% più leggero dell'acciaio e il 50% più leggero del rame. La **dilatazione termica minima** data da un coefficiente di espansione che è circa

la metà di quello di acciaio e rame e un terzo dell'alluminio, per questo si adatta bene a combinazione con vetro e cemento, perciò viene chiamato materiale non infiammabile. In **architettura** è apprezzata anche la sua **componente estetica** data da un'eccellente finitura superficiale e un colore argento tenue. Inoltre, grazie al processo di **ossidazione anodica** (fig. 34), si possono ottenere molti colori e riflessi cromatici, influenzati dall'angolo di osservazione, la curvatura del materiale ma anche l'ora del giorno o le condizioni atmosferiche.

Non avendo bisogno di rivestimenti con materiali terzi data la sua resistenza e robustezza, viene catalogato come **materiale innocuo**, compatibile con l'ambiente, che si mantiene per decenni.

Se prodotto in **lastre**, può essere lavorato con gli stessi utensili e macchinari utilizzati per lamiere di acciaio inox anche se tende ad avere un maggiore ritorno elastico rispetto all'acciaio durante il processo di piegatura³⁷.

Grazie alla loro **facilità di lavorazione e plasticità**, i semilavorati di titanio più

diffusi in architettura sono i **laminati zinco-titanio**, possono essere utilizzati in progetti architettonici complessi per coperture e facciate, dove resistenza, durabilità e impatto visivo concorrono per un unico obiettivo.

Può essere impiegato senza alcun problema nelle località di mare dove coperture realizzate oltre 100 anni fa non presentano particolari problemi di manutenzione, se non una leggera variazione del colore. I **laminati** esistono in diversi spessori, dipendenti dal loro utilizzo, di solito compresi tra il mezzo millimetro e il millimetro, i più sottili, utilizzati per **rivestimenti, coperture o opere di lattoneria** mentre i più spessi come pannelli di **facciata di grande formato**. La sua estrema lavorabilità e malleabilità lasciano spazio ad un grande numero di **geometrie possibili**, da semplici coperture piane a involucri curvilinei e complessi. Le diverse tipologie di applicazione generano **texture differenti** che donano unicità all'edificio. Questo permette al progettista di gestire l'intero volume architettonico con un unico materiale, dando inoltre

la possibilità di scegliere di valorizzare un particolare elemento facendo uso di diverse tecniche di giunzione.

Il **colore** del laminato **zinco-titanio** (fig. 35) è simile a quello del titanio puro, grigio scuro naturale, simile all'acciaio inox, dato da una **patina di carbonato di zinco** che dona al materiale un colore caratteristico e unico. Tale colorazione conferisce agli edifici **eleganza** e **aspetto minimale**, capaci quindi di inserirsi sia in contesti contemporanei che tradizionali. Se esposto all'aria forma un sottile **film di ossido**, grazie al titanio puro presente in lega, che, attraverso il contatto con acqua e anidride carbonica, si trasforma in carbonato di zinco basico, sostanza che previene con maggior efficacia il **degrado** della superficie e la sua corrosione rispetto allo zinco ordinario; un laminato di zinco ordinario, in un contesto urbano può resistere fino a 40 anni, la lega di titanio ha una durata prevista fino a 100 anni. Perciò, nonostante il costo di produzione elevato, e il conseguente bilancio energetico negativo, la lega zinco-titanio è considerata un materiale **energeticamente sostenibile**, grazie alla sua durabilità³⁸. Oltre all'eccezionale durabilità, il titanio ha altri attributi ambientali che ne garantiscono una posizione al vertice in termini di sostenibilità, come la possibilità di essere **riciclato al 100%** senza perdita di proprietà, riducendo enormemente l'impatto dell'estrazione pur mantenendo proprietà eccezionali. Inoltre la sua leggerezza riduce le **emissioni di carbonio** in fase di trasporto e installazione.



Figura 34 - Titanio ossidato anodicamente

37. Signer Titanium - Fogli architettonici in titanio puro, 2023

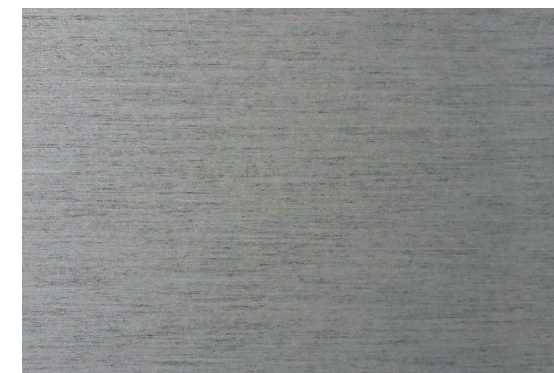


Figura 35 - Laminato zinco-titanio

38. Cantori Architectural Skins, 2020

Detto ciò, l'applicazione del titanio in **architettura** va ben oltre la funzionalità, infatti apre un panorama di infinite possibilità progettuali, in quanto le sue caratteristiche possono fondersi con numerose **esperienze estetiche** esplorando diversi design innovativi. Il suo colore dona **profondità e interesse visivo** all'architettura, trasformandola in un'**opera d'arte**, giochi di luci e ombre creano interazioni dinamiche che migliorano l'impatto visivo complessivo. Le sue texture lisce o strutturate ampliano l'esperienza dell'utente al senso tattile.

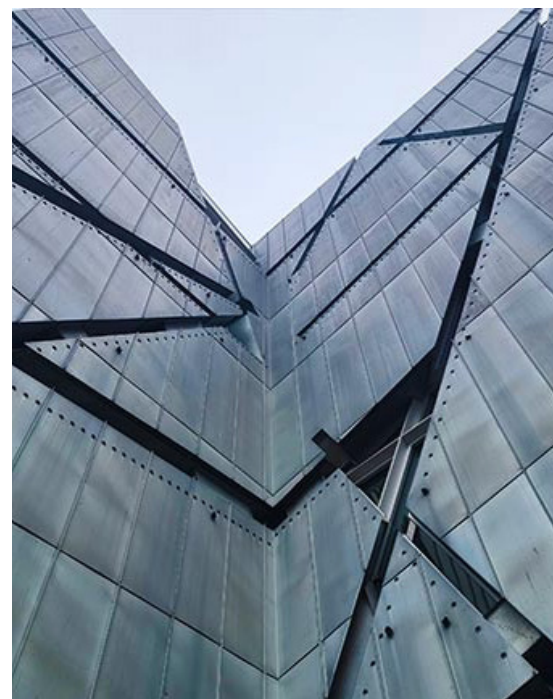
“L'applicazione del titanio in architettura eleva le forme artistiche, trascende i confini del design e lascia le persone stupite e ispirate.”

Più nello specifico, le **principali applicazioni** del titanio in edilizia sono le seguenti:

- **Facciate e rivestimenti**, i requisiti richiesti in queste situazioni sono la resistenza alla corrosione, la durezza e, dal punto di vista estetico, un aspetto elegante e moderno.
- **Coperture**, qui leggerezza, resistenza alle intemperie e peso ridotto sono le prerogative da seguire.
- **Componenti strutturali**, in strutture portanti e telai l'elevata resistenza e il peso ridotto sono essenziali per migliorare l'efficienza dell'edificio.

- **Ponti**, data la possibilità di operare in ambienti corrosivi per la sua resistenza, durezza e resistenza al degrado ambientale.
- **Monumenti e sculture**, le qualità estetiche e la durezza del titanio collaborano per garantire la resistenza agli agenti atmosferici e l'apprezzamento estetico della struttura.
- **Finestre e porte**, nei telai viene impiegato per la sua elevata robustezza, resistenza alla corrosione e la sua finitura elegante.

Figura 36 - Museo ebraico di Berlino



I **gradi di titanio** più comunemente utilizzati in questo settore sono:

- **Grado 1**, per la sua formabilità e la resistenza alla corrosione, soprattutto in coperture, rivestimenti e facciate architettoniche.
- **Grado 2**, l'equilibrio tra robustezza, resistenza alla corrosione e la facilità di fabbricazione garantiscono il suo ampio utilizzo in componenti strutturali, applicazioni architettoniche e superfici esterne come infissi.
- **Grado 5** (Ti-6Al-4V), unisce leggerezza e resistenza, adatta ad applicazioni impegnative come ponti e strutture portanti.
- **Grado 7**, l'aggiunta di palladio aumenta la resistenza alla corrosione, ciò lo rende ideale per costruzioni in ambienti altamente corrosivi come edifici costieri o impianti chimici³⁹.

Se si pone a confronto il titanio con gli altri materiali tradizionali utilizzati in architettura né risulterà che, rispetto all'acciaio, comunemente utilizzato in edilizia, ha una **maggiore resistenza** alla corrosione e un **peso** molto **inferiore**, quindi più adatto alle situazioni dove la riduzione di peso è essenziale; l'alluminio, leggero e resistente alla corrosione, ma meno resistente e adatto ad applicazioni strutturali che richiedono capacità di carico;

infine il **calcestruzzo**, materiale standard in edilizia, non garantisce resistenza alla corrosione e ha un peso elevatissimo rispetto al titanio, i due possono essere utilizzati in **combinazione per migliorare le prestazioni della struttura**.

Nonostante i vantaggi, il titanio presenta delle **criticità**, in primo luogo, il **costo** elevato, ciò può limitarne l'uso in progetti che non hanno grosse disponibilità o che devono comunque ridurre al minimo i costi. In secondo luogo, la necessità di **fabbricazione specializzata**, tali competenze possono aumentare complessità e costi di costruzione.

Si prevede che **accessibilità economica e operativa** saranno i motori di crescita futura del titanio, insieme alle sue potenzialità in termini di sostenibilità e creazione di progetti architettonici iconici, costituiti da strutture dal grande impatto visivo⁴⁰.

³⁹. Triply Circle Titanium - Prodotti in titanio per l'edilizia, 2024

⁴⁰. William, 2024

3.2 Casi studio significativi

Museo Guggenheim *Bilbao, 1991*

Materiale: Fogli metallici in lega zinco-titanio (99,1% zinco - 0,8% rame - 0,1% titanio) di spessore 0,3 mm.

Frank O. Gehry utilizza il laminato zinco-titanio come materiale per il suo **rivestimento**. È uno dei più celebri edifici del XX secolo, l'architetto canadese apre le porte ad un materiale ancora molto poco esplorato in architettura, comprendendone fascino, **componente espressiva** ma anche sfruttandone le caratteristiche tecniche. Lo spessore del laminato è di 0,3 mm, ma ciò che rende speciale questo materiale è la capacità di **riflettere il contesto**, rendendo l'edificio un'architettura dinamica che muta continuamente⁴¹.

Rappresenta la più importante espressione del potenziale espressivo e tecnologico del titanio in architettura, **punto di partenza** e di riferimento per applicazioni successive.

Il **tempo** ne ha amplificato il **valore espressivo** grazie alla comparsa sulla superficie metallica di **sfumature di colore giallo-oro** dovute all'invecchiamento che creano giochi di luce che modificano la percezione visiva dell'edificio.

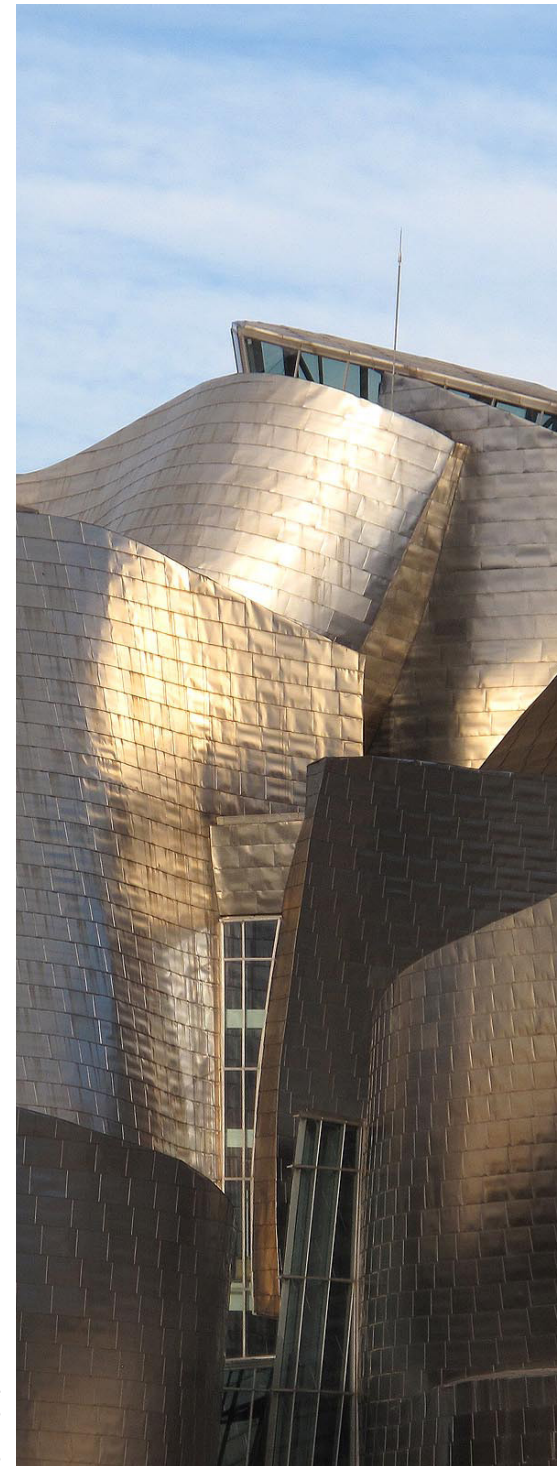


Figura 37 -
Facciata laterale
del museo
Guggenheim di
Bilbao

41. Cantori Architectural Skins, 2020



Figura 38 -
Facciata del mu-
seo Guggenheim
di Bilbao

MIT Stata Center *Cambridge, 2004*

Materiale: Pannelli metallici antipioggia in acciaio inossidabile, alluminio e titanio.

In questo caso **Frank O. Gehry** e il suo team di architetti Gehry Partners immagina una **struttura visivamente amorfa** e tentacolare per il complesso accademico, con il fine di creare spazi di socialità per gli studenti. È composto da **47 elementi unici**, realizzati utilizzando una varietà di materiali che spaziano dai mattoni, al vetro ai metalli architettonici tra i quali ritroviamo pannelli in facciata realizzati dall'azienda **Zahner** in acciaio inossidabile, alluminio e titanio che contribuiscono all'**aspetto dinamico e riflettente** della struttura. Sulle facciate e sul tetto sono state installate più di 10.000 pelli metalliche differenti⁴². Anche in quest'occasione è facile notare come la **componente espressiva** si **fonda** con le **caratteristiche tecnologiche** del materiale che si risolvono nelle **geometrie** che rende possibili.

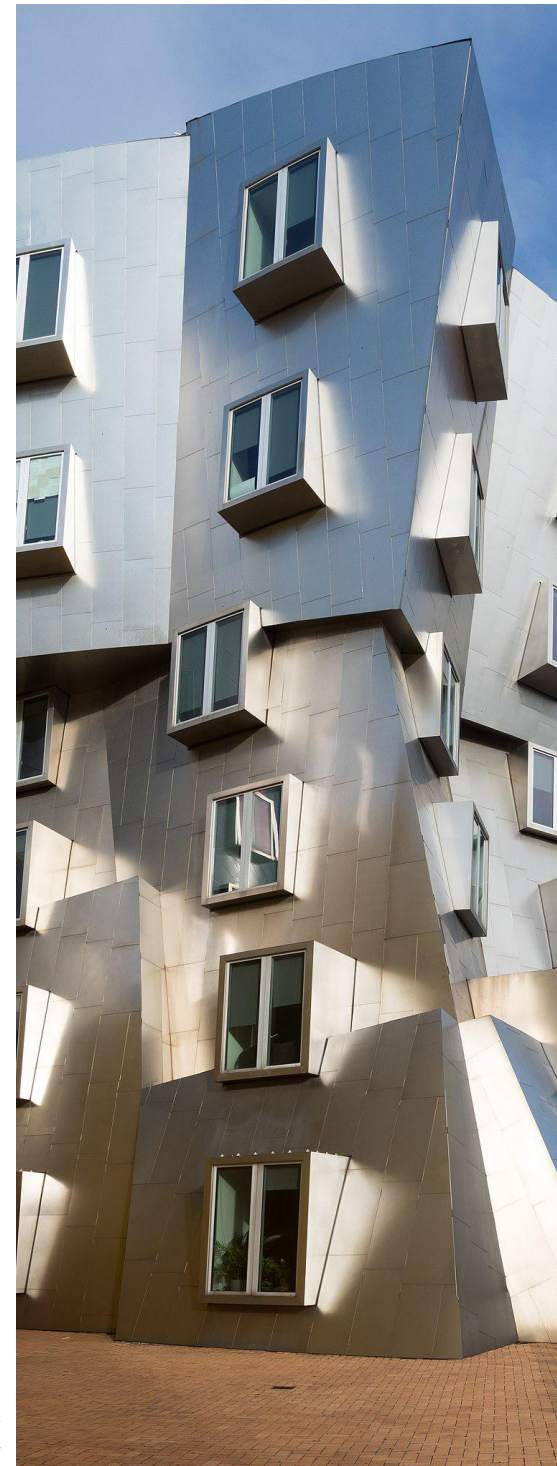


Figura 39 - MIT
Stata Center

42. Cmorris, 2016



Figura 40 - MIT
Stata Center

National Grand Theatre *Pechino, 2007*

Materiale: Pannelli metallici in titanio.

Disegnato da **Paul Andreu**, è un edificio curvo di 149.500 metri quadri che emerge dal centro di un lago. Ha un **guscio in titanio** dalla forma superellissoidale con una campata massima di 213 metri, una minima di 144 metri e un'altezza di 46 metri. È diviso in due da una copertura di vetro curva, larga 100 metri. Di giorno l'edificio è illuminato dalla luce che filtra dal vetro, mentre di notte dall'esterno si possono vedere i movimenti interni. È collegato alla riva del lago tramite un **sot-topassaggio di vetro** di 60 metri che non disturba l'espressività dell'edificio, lasciandolo privo di aperture. È simbolo di **passaggio dal mondo quotidiano a quello dell'opera, della finzione e dei sogni**⁴³. Ma è anche espressione dell'**avanzamento tecnologico** e delle possibilità che il materiale utilizzato offre a livello architettonico.



Figura 41 -
National Grand
Theatre

⁴³. ArchDaily, 2008



Hangzhou Grand Theatre

Hangzhou, 2003

Materiale: Pannelli metallici waterproof in titanio.

Edificio disegnato da **Carlos Ott** che sorge sulle rive del Qiantang. La struttura è suddivisa in tre parti. La facciata posteriore è ricoperta con **pannelli di titanio** waterproof, sulla quale sono presenti finestre di ventilazione orizzontale nella parte centrale e inferiore per permettere la circolazione dell'aria nell'ambiente interno. Sul tetto ellissoidale sono posizionate oltre **10.000 piastre di titanio**, fissate ad uno strato di alluminio-magnesio-manganese di 1 mm, attraverso un sistema di fissaggio molto complesso. È poi presente una facciata completamente vetrata costituita da una capriata controventata alta da 11 a 45 metri. Attraverso un sistema di cavi, aste e autobilanciati è costruita la superficie curva di vetro. Infine abbiamo il “tubo centrale” o “tuorlo d'uovo”, costituito da un cono rovesciato a due piani con facciata continua in vetro, sorretto da una struttura a cavi e aste che rende strutturale il sistema⁴⁴.

Figura 42 -
Hangzhou Grand
Theatre

44. LF-spaceframe, 2020



Hotel Marques de Riscal

Elciego, 2004

Materiale: Pannelli metallici in titanio rosa, titanio oro e acciaio inossidabile.

Disegnato da **Frank O. Gehry**, azienda agricola, albergo e ristorante, è chiamata anche la “cattedrale del vino”, l’edificio si erge sui vigneti con una geometria che evoca la gestualità della vite e dei suoi rami. Affonda le sue “radici” otto metri sotto terra, dove ospita le nuove cantine, da lì partono tre enormi sostegni di 16,5 metri che sostengono una spessa soletta di cemento armato profonda 1,5 metri. La struttura metallica ha sviluppo piramidale e si snoda verso l’esterno con delle **pensiline** che diventano il **segno distintivo** dell’edificio grazie alle tonalità delle finiture, il **titanio rosa** richiama il vino, quello **oro** la maglia della bottiglia, mentre l’acciaio inossidabile con finitura a specchio richiama la capsula che racchiude il collo della bottiglia. Questi **elementi curvilinei** si combinano con quelli rettilinei rivestiti in arenaria bionda naturale, permettendo il dialogo con gli edifici della zona⁴⁵.



Figura 43 - Hotel Marques de Riscal

45. *Arquitectura Viva*, 2006



Oita Bank Dome *Oita, 2001*

Materiale: Titanio Roll Dull resistente allo scolorimento con tecnologia NSSMC.

È stato il primo caso in cui si è impiegato il **titanio resistente allo scolorimento** (Roll Dull). Questa tipologia di titanio è stata sviluppata da Nippon Steel e Sumitomo Metal Corporation dopo aver condotto una ricerca sulle variazioni di colore del tetto in titanio.

Prima di questa scoperta con il tempo il titanio impiegato nelle coperture passava da un **colore argenteo** a **marrone** dovuto allo strato di ossido sulla superficie che reagisce con la pioggia e cresce, che quindi appare marrone a causa dell'**interferenza della luce**. La tecnologia sviluppata da NSSMC serve a rimuovere le impurità dallo strato superficiale di titanio. In quest'opera la quantità di titanio utilizzata è di oltre 50 tonnellate per un'estensione di circa **32.000 mq⁴⁶**. Rappresenta una svolta perché è il primo caso in cui è possibile **manipolare la degradazione del materiale**.



Figura 44 - Oita Bank Dome

46. Nippon Steel, 2016



JR Hakodate Station *Hakodate, 2002*

Materiale: Pannelli in titanio per facciate resistenti al tempo e agli agenti atmosferici.

È la principale stazione ferroviaria di Hakodate sull'isola di Hokkaido.
È stata progettata dallo studio danese **Gottlieb Paludan Architects**, collaborando con l'autorità ferroviaria dell'isola di Hokkaido.

È situata in un'area in via di sviluppo della città e vuole dialogare con il paesaggio circostante al fine di trasformare un'area portuale da zona industriale a zona urbana.
L'edificio della stazione ha due piani e le **facciate sono completamente rivestite in titanio**, è la prima volta per una facciata, perchè in grado di **mantenere invariato il suo colore** per lungo tempo, grazie allo strato di biossido di titanio che si forma sulla sua superficie a contatto con aria e acqua⁴⁷.



Figura 45 - JR
Hakodate Station

47. Gottlieb Paludan Architects, 2013



Figura 46 - JR
Hakodate Station

Senso-ji Temple Asakusa, 1958, 2010

Materiale: Tegole additivate con titanio.

Il tempio fondato nel 628 è il più antico di Tokyo, ricostruito nel 1958, è stato poi sottoposto alla sostituzione del tetto tradizionale **nel 2010**, utilizzando delle **tegole in titanio** per la copertura, precedentemente in argilla, questo perché più **resistente** alla corrosione ma allo stesso tempo enormemente più **leggero**, circa un ottavo del peso precedente, oltre ad essere più resistente a livello sismico. Ciò che si fa notare è quanto il titanio, un materiale nuovo, riesca ad **inserirsi in un contesto storico** come quello di questo tempio⁴⁸.



Figura 47 -
Senso-ji Temple

48. Muza-chan, 2011



3.3 Il titanio nel Product Design

3.3.1 I vantaggi del titanio nel Product Design

Come nel settore architettonico anche nel mondo del **design contemporaneo** è considerato uno dei materiali più affascinanti e performanti.

Il suo successo non è infatti limitato solo ai settori della tecnologia aerospaziale o chirurgica, ma anche alla sua capacità di coniugare **funzionalità** e **estetica** nei prodotti di consumo.

Come detto in precedenza, a parità di volume e robustezza, il titanio pesa circa la metà dell'acciaio, perciò è ideale per la realizzazione di **accessori**, complementi di **arredo** o **prodotti** di natura **tecnologica** dove comfort e praticità contano quanto l'estetica⁴⁹.

Sicuramente un altro aspetto che rende il titanio una scelta ideale nel design contemporaneo è la sua **resistenza alla corrosione**, grazie allo strato di ossido che si forma sulla sua superficie. Per questo, il titanio non teme umidità,

sudore, acqua salata e agenti chimici. Questa protezione naturale ne preserva l'**integrità** estetica e delle prestazioni, consentendo ai prodotti di durare per anni senza perdere le loro qualità⁵⁰.

La **biocompatibilità** e la sua natura **ipoallergenica** lo rendono perfetto per prodotti che entrano in **contatto** diretto con la **pelle** come gioielli, orologi e occhiali, i quali possono essere indossati quotidianamente anche da persone con allergie ai metalli più comuni.

La **versatilità estetica** permette invece di ottenere finiture opache, lucide, satinare o anodizzate per ottenere sfumature particolari.

Ma può anche essere soggetto a trattamenti PVD per migliorarne la resistenza e l'appeal visivo⁵¹.



Figura 48 - Orologio con cassa in titanio by Botta

49. Renox Impex, 2025
50. Metal Ti, 2024
51. De Naoum, 2023

3.3.2 Casi studio di titanio nel Product Design

ForeverPen *World's Tiniest*

Materiale: Titanio Grado 5

È una **penna inkless** proposta anche in titanio di alto grado per garantire resistenza a fuoco, acqua e urti. È il prodotto ideale per escursionisti, artigiani o scrittori che amano gli **ambienti estremi**.

Il corpo è prodotto in titanio mentre la punta è realizzata in un composito contenente argento che lascia segni permanenti **senza** la necessità di **inchiostri**.

Può scrivere **sott'acqua** o capovolta senza lasciare alcuna sbavatura. Il titanio ne garantisce non solo **leggerezza** e **durabilità**, ma anche aspetto raffinato e tecnico senza perdere di vista la **funzionalità**⁵².



Figura 49 - ForeverPen



Figura 50 - Persona che utilizza ForeverPen

52. Beavers, 2025

LAMY Imporium Titanium

Mario Bellini

Materiale: Finitura PVD titanio opaco

Si tratta di una penna disponibile in versione stilografica, roller e a sfera con corpo in ottone rivestito con una **finitura PVD di titanio opaco**. Combinazione di leggerezza, resistenza a graffi e corrosione. Sono assemblate a mano e presentano un gusto estetico che tende al **minimalista** con un corpo scanalato e un cappuccio cilindrico semplice. Il rivestimento PVD garantisce **grip** al tatto in modo sofisticato e duraturo, conferendo un **aspetto premium** al prodotto senza comprometterne comfort e robustezza⁵³.



Figura 51 - Penna LAMY Imporium Titanium



Figura 52 - Serie di penne LAMY Imporium Titanium

53. Stilografica.it, 2025

Sebeza Collection

Chris Reeve

Materiale: Lega di titanio 6Al-4V

I Sebeza sono una serie di **coltelli pieghevoli artigianali** che, grazie al **manico** realizzato in lega di **titanio**, offrono un perfetto rapporto resistenza/peso, che si traduce in **robustezza** strutturale e **leggerezza** allo stesso tempo. Il titanio è **sabbiato** per garantire grip grazie alla finitura opaca. Perni e i distanziatori presentano invece tolleranze minime, ciò assicura scorrevolezza, stabilità e di conseguenza longevità al prodotto. Questa lega resiste inoltre alla **corrosione** permettendone l'utilizzo quotidiano anche in ambienti aggressivi⁵⁴.



Figura 53 - Coltello pieghevole Sebeza Collection chiuso



Figura 54 - Coltello pieghevole Sebeza Collection aperto

54. Chris Reeve, 2025

Defy Classic Skeleton Zenith

Materiale: Titanio grado 5

Lo Zenith Defy Classic Skeleton è un orologio che ha una **cassa da 41mm in titanio con finitura spazzolata**, alta resistenza e peso ridotto.

Il **meccanismo automatico Elite 670 SK** è visibile attraverso il quadrante e il fondello in zaffiro.

Ha 50 ore di riserva di carica e presenta il **bracciale in titanio** che assieme al fondello trasparente amplificano la percezione di leggerezza e di alta tecnologia dell'orologio. Ha uno spessore contenuto di 10,75 mm ed è **resistente all'acqua**, tutto ciò lo rende un orologio sia sportivo che elegante⁵⁵.



Figura 55 - Retro orologio Zenith Defy Classic Skeleton



Figura 56 - Orologio Zenith Defy Classic Skeleton

55. Goulard, 2018

iPhone 16 Pro Apple

Materiale: Titanio grado 5

Lo smartphone presenta una **scozza in titanio aerospaziale**, ciò lo rende più leggero ma comunque resistente ad urti e torsioni.

Questo metallo conferisce all'oggetto una **finitura sofisticata** e migliora la capacità di **dissipazione del calore**.

La scelta tecnologica di impiegare il titanio per la scocca è una strategia di **ingegneria avanzata** che come risultato offre un prodotto robusto e raffinato, incrementando sia la sensazione premium del prodotto che la **durabilità** del device⁵⁶.



Figura 57 - iPhone 16 Pro

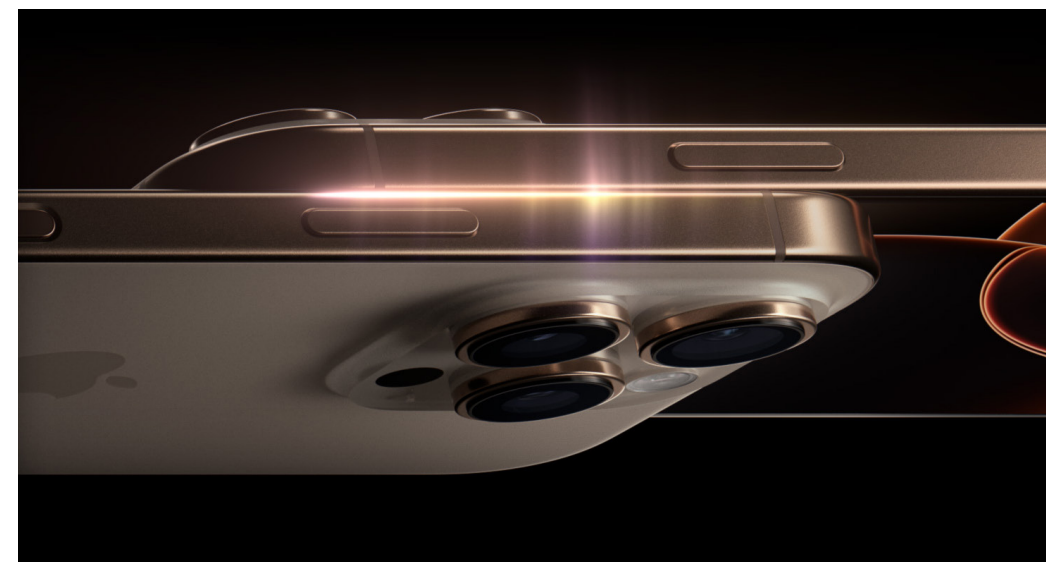


Figura 58 - Dettaglio iPhone 16 Pro

56. Apple, 2025

The Fjord Thorum

Materiale: Lega di titanio 6Al-4V

L'**anello** The Fjord è prodotto in lega di titanio, anche in questo caso i punti di forza sono l'eccellente **rapporto resistenza/peso** e la resistenza alla **corrosione**.

la superficie è **martellata** e crea effetti di luce e texture tattili particolari.

Ha uno **spessore di 1,8 mm** e presenta un profilo "comfort fit" che garantisce una vestibilità ergonomica per un uso prolungato.

È perfetto per chi ha **allergie** a metalli comuni e la **stabilità dimensionale** fa sì che la forma e il colore rimangano invariati nel tempo⁵⁷.



Figura 59 - Anello The Fjord by Thorum



Figura 60 -
Dettaglio anello
The Fjord by
Thorum

57. Thorum, 2025

Titanium Infinity Table William Emmerson

Materiale: Titanio metallico

Questo tavolo di Emmerson è composto da **due elementi in titanio** piegati e saldati a mano risultando leggero ma robusto allo stesso tempo.

La **curva continua** che lo costituisce dona equilibrio visivo che non si lega necessariamente alla funzionalità del prodotto.

Ogni giunzione è stata **rifinita artigianalmente** per garantire continuità e integrità, il risultato è un tavolo in titanio dove il materiale non è solo materia ma elemento che **partecipa all'espressività** del prodotto⁵⁸.



Figura 61 - Titanium Infinity Table con fiori by William Emmerson



Figura 62 -
Titanium Infinity
Table by William
Emmerson

58. Orange Furniture, 2025

Spazio Coffee Table *Estro Milano*

Materiale: Titanio metallico

Il tavolo da caffè Spazio di Estro Milano è costituito da una **base in titanio** che sorregge un piano in marmo bianco che unisce **leggerezza strutturale e raffinatezza estetica**.

Il titanio permette di sostenere materiali pesanti come il marmo senza la necessità di profili voluminosi.

La finitura del metallo può essere **lucida o satinata** e in entrambi i casi garantisce resistenza alla **corrosione**.

Il risultato è un prodotto dal **design armonico e moderno** che unisce la freddezza del marmo con la brillantezza metallica del titanio⁵⁹.



Figura 63 - Dettaglio Spazio Coffee Table by Estro Milano



Figura 64 - Spazio Coffee Table by Estro Milano

59. *Furnitalia, 2025*

P'8688 *Porsche Design*

Materiale: Titanio metallico puro

La **montatura** di questi occhiali è prodotta in titanio puro. Per questo è completamente **biocompatibile** e **ipoallergenica** e offre un comfort eccezionale per usi prolungati.

Il titanio permette la realizzazione di **profili sottili e linee geometriche precise** mantenendo rigidità e stabilità.

Il design del prodotto segue il concetto **“form follow function”** e sfrutta la **resilienza** del titanio per garantire durevolezza senza deformazioni.

Per ottenere un effetto **premium** e **sportivo**, le finiture del metallo sono sia satinata che lucide, il risultato è un prodotto che unisce **estetica automobilistica** e **innovazione dei materiali**⁶⁰.



Figura 65 - Occhiali P'8688 by Porsche



Figura 66 - Occhiali P'8688 by Porsche indossati da Patrick Dempsey

60. *Porsche, 2025*

3.4 La titaniocromia

Le applicazioni che coinvolgono in modo particolare l'**espressività** di questo materiale riguardano le **sperimentazioni** nell'ambito della titaniocromia. Per poter parlare di ciò è necessario prendere in considerazione il biossido di titanio (TiO_2), esso può essere utilizzato come **pigmento** perché ha **elevato potere coprente**, inerzia chimica e stabilità. Il potere coprente è dipendente dalla grossezza delle particelle e dall'indice di rifrazione, più elevato nel TiO_2 rispetto a tutti gli altri pigmenti bianchi. È utilizzabile anche per la produzione di **pigmenti colorati**, perciò si ritiene possa avere sempre più largo impiego⁶¹.

Negli **ultimi 30 anni** la **colorazione del titanio** ha acquisito sempre più importanza per la sua **applicazione** in diversi settori oltre al militare, tra cui chimico, energetico, biomedicale, sportivo e architettonico. La tecnica più diffusa è l'**ossidazione anodica** che crea una **colorazione di interferenza variabile** in relazione allo spessore dello strato di ossido, regolato dalla tensione applicata. Il processo, oltre a portare ad un miglioramento estetico, migliora la resistenza alla corrosione e riduce il rilascio di ioni quando il titanio è impiantato nel corpo umano. Gli studi a proposito di questa tecnica iniziarono nel **1967** con **Cotton e Hayfield**, mentre il professore **Pietro Pedeferra** del Politecnico di Milano contribuì alla ricerca e all'**uso artistico del titanio anodizzato**, collaborando con grandi nomi del design e brevettando diverse soluzioni per l'anodizzazione elettrolitica⁶².

61. Caglioti, 2025

62. Pira, 2004

Fino ai primi **anni 2000** si è parlato del titanio unicamente per le sue proprietà di leggerezza, di resistenza meccanica, di resistenza alla corrosione e biocompatibilità, tralasciando quelle attribuibili al **velo di ossido** che si può ottenere sulla sua superficie e i suoi relativi **colori**. In natura solo due metalli sono colorati, l'oro e il rame, gli altri mostrano sfumature più o meno chiare tra il grigio e il bianco. Quest'ultimi possono essere colorati se trattati con patine di prodotti di corrosione oppure se rivestiti di un velo di ossido sottile e trasparente che **riflette e rifrange la luce** attraverso un comportamento detto **"interferenza"**, come nel caso del titanio ossidato. Sulla superficie di questo metallo si possono notare colori che dipendono dallo **spessore** di questo film, essi possono variare su una **scala cromatica** secondo la sequenza giallo, porpora, blu, azzurro, argento, giallo, rosa, violetto, turchese, verde, verdegiallo e rosa. Questa scala esclude il rosso vivo.

I film di ossido che danno colori di interferenza si producono sia per **ossidazione anodica** che con trattamenti ad **alta temperatura** per reazione con l'**ossigeno**. Per comprendere il concetto di **interferenza** è necessario pensare che, quando si osserva una superficie ricoperta da uno strato di ossido, l'occhio è raggiunto da **due radiazioni luminose sovrapposte**, una riflessa dallo strato esterno del film, mentre la seconda è riflessa dallo strato sottostante del film, quello a contatto con la superficie, che quindi opera un doppio attraversamento dell'ossido.

In quest'occasione si possono avere diversi comportamenti, se le due onde si muovono in perfetta **sincronia**, sovrapponendosi si rafforzano e il colore mostrato sarà più intenso, se sono in **opposizione di fase** andranno ad annullarsi a vicenda, esistono ovviamente situazioni intermedie d'interferenza additiva o sottrattiva.

Se ad esempio illuminiamo una superficie con luce bianca, che contiene tutto lo spettro cromatico, avremo un colore con lunghezze d'onda in concordanza che risulterà rafforzato, uno con lunghezze d'onda in opposizione che porterà all'estinzione, mentre tra i due un'ampia gamma di **situazioni intermedie**.

Al variare dello spessore dell'ossido variano sia i colori che si rafforzano sia quelli che si indeboliscono.

Per ottenere questo fenomeno con il titanio, il processo è tutt'altro che semplice, fondamentalmente perché il titanio è soggetto ad un comportamento detto **imprinting**, ciò significa che il valore del potenziale che il titanio percepisce nei primi istanti della sua ossidazione condiziona le proprietà dell'ossido con cui verrà ricoperto.

Il comportamento che il potenziale trasmette al metallo è registrato nei primi momenti di crescita del film di ossido, nonostante i suoi **effetti** si possano osservare **solo a crescita ultimata**, questo è un processo **irreversibile**.



Figura 67 -
Ossidazione anodica del titanio

Il risultato dell'ossidazione può dare origine a tre diverse situazioni, queste dipendono dal valore del potenziale somministrato al materiale rispetto ad un **valore potenziale critico**:

1. Se l'ossidazione inizia esattamente al **valore critico**, lo spessore cresce fino a **oltre 300 nanometri** quando si raggiungono i 140 volt e passa attraverso tutta la scala cromatica precedentemente indicata. Questa scala è detta **“prima” o “principale”** e i film di ossido in questa scala hanno una **struttura amorfa** come quella del vetro.
2. Se l'ossidazione inizia a **valori inferiori** a quello critico, solo alcune facce dei grani cristallini si ricoprono del film amorfo, sulle altre si forma un film bianco, in questo caso si ottiene ancora la **scala cromatica principale** ma più **sbiadita**, sarà tanto più sbiadita tanto più il valore iniziale si discosta da quello critico.
3. Se l'ossidazione inizia a **valori superiori** a quello critico, si formano

ossidi cristallini, questi danno origine a colori di una scala detta **“secondaria”**, meno ricca, essi hanno sempre uno spessore compreso tra 10-20 nanometri.

Dopo il primo istante è possibile cambiare i colori dello strato ma solo all'interno della rispettiva scala.

Il titanio ossidato anodicamente, oltre alla **colorazione**, acquisisce caratteristiche che ne determinano utilizzi diversi in ambito ingegneristico, in primis una maggiore **resistenza** alla corrosione rispetto al titanio naturale. Presenta poi **caratteristiche foto-elettrochimiche** e altre se ricoperto da anatasio per riscaldamento a 400°C dei film amorfi. Dell'anatasio in particolare sono note le **proprietà catalitiche** e le sue applicazioni nel campo della lotta all'inquinamento ambientale attraverso la sua **azione foto-ossidativa**, soprattutto in presenza di raggi ultravioletti. Sono note anche attività antibatteriche utili nel settore biomedicale sia per quanto riguarda la produzione di protesi che di ambienti asettici⁶³.

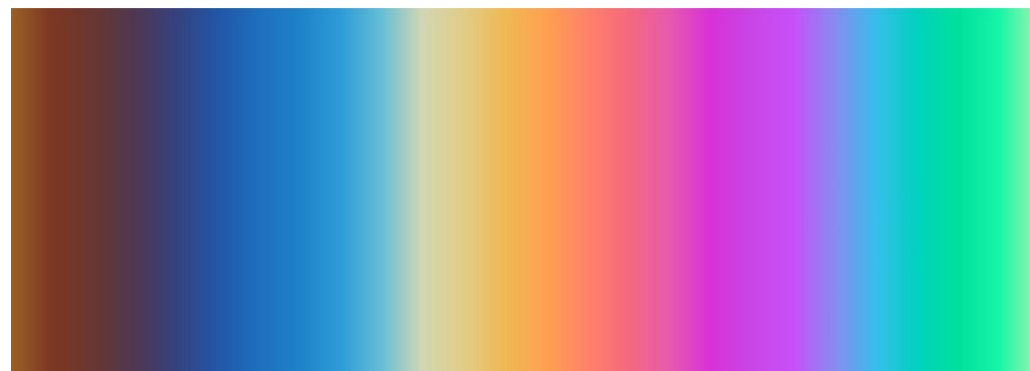
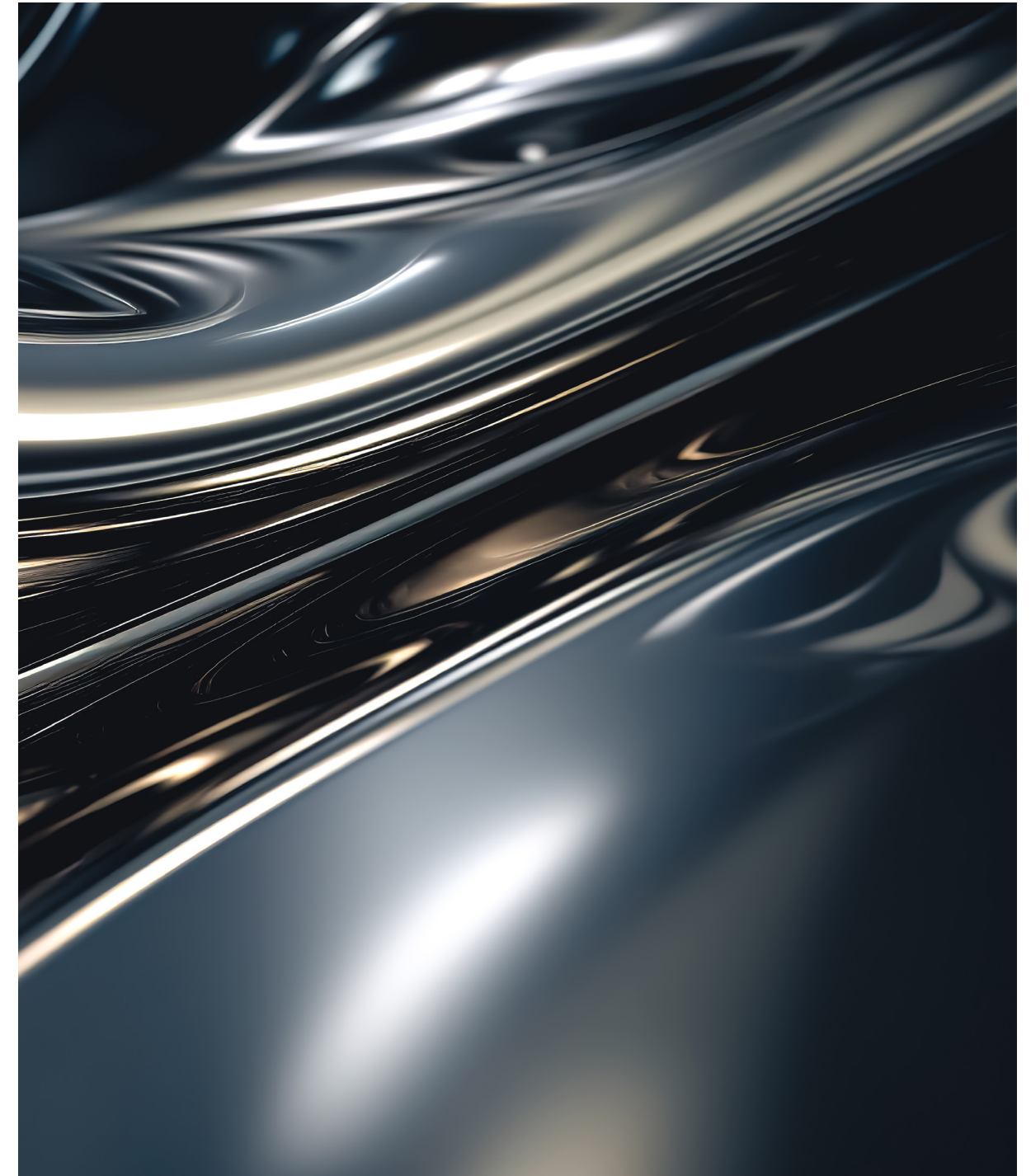


Figura 68 - Scala cromatica principale

⁶³. Collepardi et al., 2004



4.IL BIOSSIDO DI TITANIO:

**INNOVAZIONE, SOSTENIBILITÀ
E AMBIENTE**

4.1 Biossido di titanio: processo produttivo, funzioni e applicazioni

Si sono introdotte le caratteristiche dello strato di ossido superficiale del titanio metallico e alcune sperimentazioni in ambito progettuale. Adesso si approfondirà l'ossido stesso come materiale protagonista del progetto. Il **biossido di titanio** (TiO_2) è un composto chimico inorganico di grande importanza tecnologica, ampiamente utilizzato e studiato nell'**industria moderna**. La sua versatilità e le numerose applicazioni in ambiti diversi ne fanno uno dei materiali più diffusi a livello industriale. Esiste in diverse **forme cristalline**, tra cui le più comuni sono il **rutilo** e l'**anatasio**. La struttura cristallina influenza in modo determinante le sue proprietà fisiche e chimiche, che generalmente comprendono un'elevata capacità di **fotocatalisi**,

cioè la possibilità di attivare reazioni chimiche quando esposto a luce ultravioletta, caratteristica sfruttata nei processi di **purificazione ambientale**. È altamente **stabile** dal punto di vista chimico, il che gli consente di resistere in ambienti fortemente corrosivi. Presenta un'elevata **opacità** e un forte **potere riflettente**, qualità che lo rendono ideale per applicazioni in rivestimenti e vernici. Possiede una **buona conduttività elettrica** quando è applicato in forma di sottili strati, caratteristica che trova impiego in dispositivi elettronici e celle solari⁶⁴.

A livello estrattivo l'**ilmenite** e il **rutilo** sono i due minerali contenenti la maggior quantità di biossido di titanio, il primo tra il 50% e il 60%, il secondo circa il 95%.

Figura 69 - Biossido di titanio



64. Faichim, 2023

La lavorazione di queste materie prime porta alla **produzione di TiO_2** appunto.

Questo materiale è impiegato per oltre il **50% dei casi in vernici come pigmento**, in particolare, il biossido di titanio puro può essere considerato pigmento se possiede concentrazioni superiori all'80% e un cristallo di dimensioni tra 0,2 e 0,4 micron.

I due principali processi produttivi per ricavare biossido di titanio a partire dalla materia prima minerale sono il **processo via solfato**, che si basa sull'attacco dell'ilmenite con acido solforico concentrato, e il **processo via cloro**, che invece prevede l'attacco del rutilo con cloro in forma di gas.

I due metodi hanno vantaggi e svantaggi propri, ma soprattutto output propri, per questo ogni produttore in generale è dedito a **produrre con entrambi i processi**. Entrambi i metodi producono biossido di titanio sotto forma di cristallo di rutilo ma, mentre via cloro è possibile produrre solo questo, via solfato si può avere anche biossido di titanio sotto forma di cristallo di anatasio, che ha proprietà differenti ed è destinato ad applicazioni industriali particolari. In generale si stima che il **65% del biossido di titanio prodotto venga realizzato via cloro**.

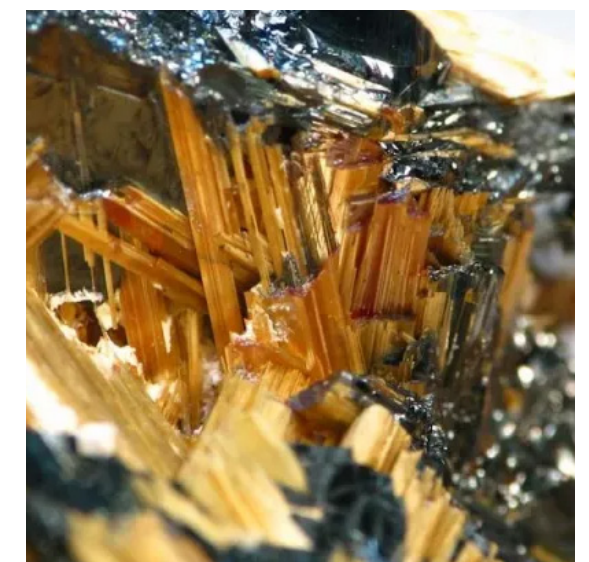
Il **processo via solfato** si articola in **sei fasi**:

- **Attacco del minerale**, che viene macinato finemente e fatto reagire con acido solforico a formare una **miscela di solfati**.

Questo per garantire la **separazione dal ferro**, pericoloso inquinante del materiale, perchè ciò avvenga è necessario che tutto il ferro in reazione sia nella forma Fe^{2+} . Dopodiché la soluzione viene fatta **decantare** per far sì che il solido non reagito si depositi sul fondo, si procede poi alla **filtrazione** che elimina il residuo, il liquido risulta perfettamente chiarificato e di un colore molto scuro (**black-liquor**).

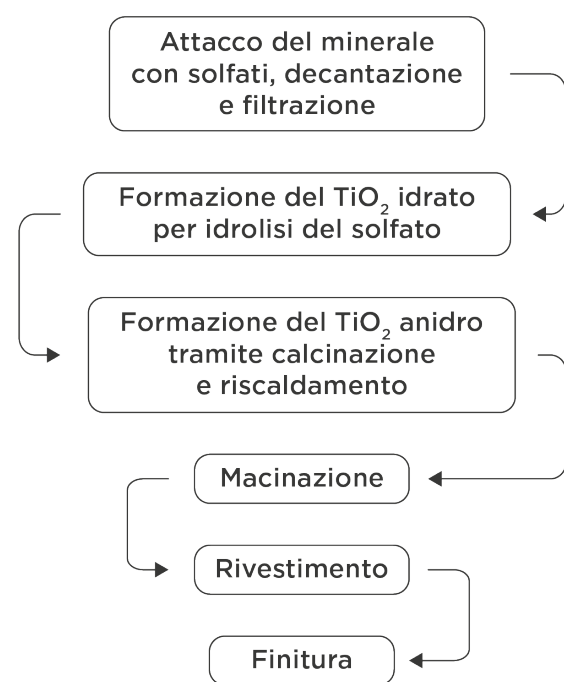
- **Formazione di biossido di titanio idrato**, prevede l'**idrolisi del solfato di titanile** che reagendo da origine al biossido di titanio insolubile e idratato. È una fase critica che va tenuta sotto controllo per garantire che il precipitato sia idoneo alle fasi successive di filtrazione e calcinazione.

Figura 70 - Minerale di rutilo



- **Formazione di biossido di titanio anidro**, è la fase finale del processo e inizia con la **calcinazione** del biossido che viene portato da 313°C a oltre **900°C** tramite riscaldamento da combustione con metano. Il riscaldamento fa evaporare l'acqua e decompone l'acido solforico rimasto. Per far emergere le **qualità ottiche** del biossido di titanio sono fondamentali le fasi di **macinazione, rivestimento e finitura**. La prima riduce il materiale in particelle delle dimensioni necessarie in relazione all'applicazione, mentre il **rivestimento**, con ossido di **alluminio o silice**, è effettuato per rendere possibile la miscelazione del biossido di titanio con i veicoli di utilizzo.

Figura 71 - Schema del processo di produzione del biossido di titanio via solfato



Si ottiene disperdendo in acqua contenente le sostanze chimiche di rivestimento il prodotto secco, grazie a manipolazione di **temperatura e pH** della soluzione i rivestimenti precipitano sui cristalli di biossido di titanio incidendo tra il 3% e l'8% sul peso del pigmento essiccato finale. La **finitura finale** è necessaria per **eliminare gli agglomerati** formati durante gli step precedenti che potrebbero dare origine a difetti che renderebbero inutilizzabile il materiale.

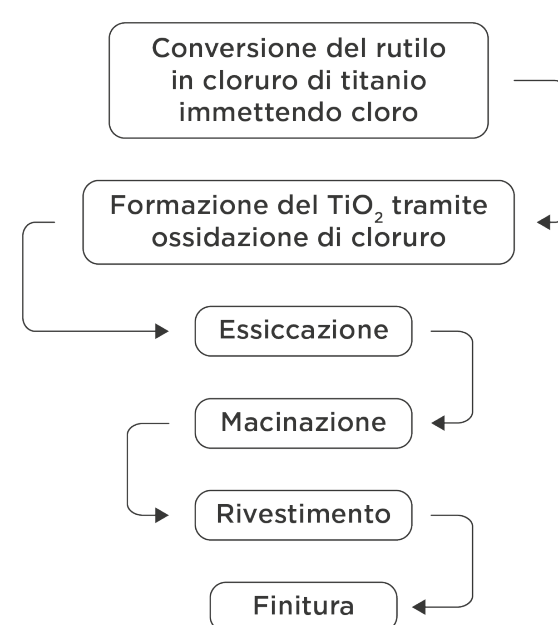
Il **processo via cloro** si articola in **due fasi principali**, ma la successiva macinazione, il rivestimento e la finitura sono fondamentali anche in questo caso:

- **Conversione del rutilo in cloruro di titanio**, immettendolo in un letto riscaldato insieme ad una fonte di carbonio, viene immesso il **cloro che avvia la reazione per formare cloruro di titanio** in forma vapore che viene rimosso dal letto insieme a ferro e altri metalli che vengono clorurati. L'ossigeno si combina con il carbonio e forma monossido e biossido di carbonio. Si raffredda la corrente di vapore e **i cloruri metallici diversi dal cloruro di titanio si condensano e solidificano**. Il vapore di cloruro di titanio, contenente cloruro di titanio quasi puro, ha un punto di ebollizione inferiore, è condensato e immagazzinato

come liquido. Si procede poi a farlo **ribollire e distillare** per dare origine ad un prodotto più puro.

- **Ossidazione del cloruro di titanio**, viene innanzitutto vaporizzato e bruciato in ossigeno con una fonte di combustibile idrocarburico ad una temperatura tale che permetta la prosecuzione della reazione. **Si forma il biossido di titanio**, come solido fine, e viene filtrato mediante cicloni o filtri. Anche in questo caso è **fondamentale la dimensione dei pigmenti**. Il cloro utilizzato viene riciclato per il processo successivo, mentre la piccola quantità assorbita dal prodotto finale viene rimossa, i passaggi successivi sono

Figura 72 - Schema del processo di produzione del biossido di titanio via cloro



65. Caprioli, 2020
66. Middlemas et al., 2013

l'**essiccazione** e poi **macinazione, rivestimento** e la **finitura**⁶⁵.

Un **nuovo processo** per la produzione di biossido di titanio pigmentario e di tipo **idrometallurgico** e **non prevede emissione diretta di CO2**. Inizia con un processo di torrefazione alcalina, successive fasi di lavaggio, lisciviazione, estrazione con solvente, idrolisi e calcinazione, ottenendo pigmenti di **anatasio o rutilo ad elevato grado di purezza**.

L'**estrazione con solvente** è altamente efficace per quanto riguarda la **riduzione di concentrazione delle impurità decoloranti** che altrimenti non farebbero raggiungere al risultato livelli commercialmente accettabili.

Questo metodo potrebbe essere la **soluzione ai processi produttivi tradizionali** i quali producono effluenti acidi e rifiuti solidi. Il processo idrometallurgico è il risultato degli ultimi 10 anni di studio ed è in grado di produrre un pigmento con una **purezza del 99%** e un contenuto di ferro dello 0,07%.

La **sfida** per i nuovi processi è infatti quella di ottenere **vantaggi rispetto ai metodi attuali** ma ovviamente anche **soddisfare gli standard di purezza dei pigmenti commerciali**, quindi ottenere pigmenti di qualità in termini di purezza, al contempo contenere il consumo energetico ed eliminare le emissioni dirette di CO2 dei processi tradizionali⁶⁶.

Il biossido di titanio è impiegato in numerose **applicazioni**, le più comuni sono le seguenti:

- **Industria dei rivestimenti**, grazie alla sua opacità e al suo potere riflettente.
- **Industria cosmetica**, utilizzato come pigmento bianco in molti prodotti per le proprietà opacizzanti e schermanti dai raggi UV.
- **Fotocatalisi ambientale**, nell'ambito della purificazione dell'aria e dell'acqua per la rimozione di inquinanti organici e batteri.
- **Celle solari**, per assorbire e trasferire l'energia luminosa agli elettrodi dopo un processo di sensibilizzazione della superficie.
- **Materiali autopulenti**, anch'essi si avvalgono della fotocatalisi per decomporre lo sporco e gli agenti inquinanti sulla superficie⁶⁷.

Soffermandoci sul suo **potere sanificante**, ci possiamo riferire a studi pubblicati sul **Journal of Photochemistry and Photobiology A**, questi studi hanno dimostrato che, se fotoattivato, quando questa sostanza entra in contatto con un microrganismo ne causa la distruzione. Il processo è dato dall'iniziale decomposizione parziale della membrana esterna, poi dal disordine della membrana citoplasmatica con la conseguente morte cellulare.

67. Faichim, 2023

Questa tecnologia è diffusamente utilizzata sia in **interventi shock di disinfezione** per interni ed esterni, sia per potenziare il risultato di un trattamento di sanificazione eseguito con sostanze differenti.

Il comportamento del biossido di titanio è chiamato **disinfezione fotocatalitica ed è atossico**, chimicamente stabile, sicuro per l'uomo e gli oggetti, e non lascia residui tossici nell'ambiente.

Principalmente è impiegato in:

- **Miglioramento dell'aria Indoor o outdoor**, negli interni per eliminare batteri, virus, funghi e altre fonti di infezioni e malattie, mentre all'esterno per la sua capacità di distruggere i VOC (Composti Organici Volatili) per ridurre l'inquinamento ambientale.
- **Laboratori e strutture medico-ospedaliere**, per la disinfezione di aria e di superfici al fine di ridurre la carica microbica e prevenire la trasmissione di virus e batteri. In campo medico si stanno portando avanti esperimenti che dimostrerebbero la capacità del biossido di titanio fotoattivato di ridurre le cellule tumorali.
- **Industria alimentare e fitosanitaria**, tutti gli ambienti che riguardano il settore del food necessitano di adeguata sanificazione per evitare qualsiasi tipo di infezione di origine alimentare, inoltre sono presenti

norme stringenti che non permettono di utilizzare detergenti chimici o biocidi, perciò il TiO_2 risulta essere una buona alternativa. Anche nei prodotti fitosanitari la disinfezione fotocatalitica rappresenta una delle migliori soluzioni, in questo caso per proteggere le piante e i loro prodotti senza l'uso di pesticidi chimici.

- **Disinfezione dell'acqua**, nei trattamenti di disinfezione di acque reflue e potabili, è stato dimostrato che il biossido di titanio è in grado di inattivare tre specie di alghe responsabili di problemi di salute dell'uomo, per questo potrebbe essere una valida alternativa ad algicidi a base di rame⁶⁸.

Recentemente sono di interesse due comportamenti del biossido di titanio riscontrati in laboratorio.

Il primo è il **comportamento superidrofílico**, cioè la riduzione fino a 0° dell'angolo di contatto liquido/solido se si irraggia la superficie con raggi UV.

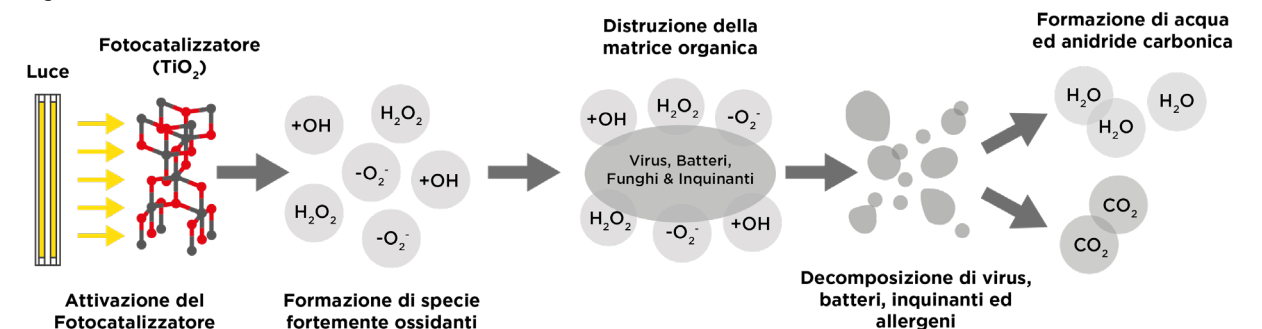
Questo perché, una volta eliminata la materia organica tramite fotocatalisi ossidativa, la superficie diventa altamente idrofila, con un angolo di contatto di molto inferiore rispetto a quello di partenza.

Il secondo è l'utilizzo del **TiO_2 come schermo UV**, grazie alla sua capacità di assorbire radiazione ultravioletta, ciò, insieme al comportamento antibatterico, ha aperto la strada nell'**industria tessile** al biossido di titanio.

Essendo un attenuatore di radiazione elettromagnetica a largo spettro, permette la protezione dai raggi UV, prevenendo scottature, eritemi e invecchiamento della pelle.

Nuovi processi flessibili di sintesi hanno permesso la produzione su larga scala di **sospensioni di biossido di titanio nanoparticellare fotoattivo in mezzi liquidi** applicabili con tecniche tradizionali su supporti di varia natura. Ciò permette di ottenere **superfici tradizionali funzionalizzate** con caratteristiche innovative come l'antibattericità o la capacità di abbattere inquinanti⁶⁹.

Figura 73 - Schema ossidazione fotocatalitica



68. Gea, 2025

69. Baldi e Cappelletti, 2006

4.2 Proprietà fotocatalitiche e impatto sull'inquinamento

La fotocatalisi è un **fenomeno naturale** in cui il fotocatalizzatore, il biossido di titanio nel nostro caso, **accelera la velocità di reazione** attraverso l'azione della luce, naturale o artificiale. Ogni reazione richiede una determinata energia di attivazione per iniziare, per accelerare questo processo e abbassare quindi l'energia di attivazione si sfrutta un **catalizzatore**, che rende possibile la reazione in condizioni che altrimenti non lo permetterebbero. La caratteristica del catalizzatore è inoltre quella di **non esaurirsi** durante la reazione, rimanendo uguale e disponibile per reazioni successive. Il termine "foto" indica che il catalizzatore viene **attivato attraverso la luce**. Grazie a quest'ultima i fotocatalizzatori creano reagenti fortemente ossidanti che hanno la capacità di decomporre sostanze organiche e parte di quelle inorganiche presenti in atmosfera, favorendo la **decomposizione degli inquinanti** e evitandone l'accumulo in ambiente.

ARPA LOMBARDIA
Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente



Figura 74 e 75 - Logo Arpa Lombardia e logo Barilla Srl

I risultati più interessanti che la fotocatalisi, data dal biossido di titanio, permette di raggiungere sono sicuramente quelli che seguono.

- **Antinquinamento outdoor**, quindi la riduzione degli inquinanti nell'area dove quest'azione è messa in atto, in particolare l'**ARPA Lombardia** per conto di Global Engineering fa ricerca a proposito di fotocatalisi. In uno studio ha dimostrato la sua efficacia al di fuori delle prove di laboratorio, su una superficie stradale di **3700 mq nell'hinterland milanese**, applicando una pavimentazione cementizia fotocatalitica sulla **sede stradale** e i marciapiedi, i risultati confermati da **ARPA**, dal **CNR** e dal **Centro di Ricerche ISPRA** hanno dimostrato una riduzione del **62%** del biossido di azoto con un'attestazione **media** nei successivi due anni del **54%**.

- **Antinquinamento indoor**, **Barilla SpA** ha condotto test in una delle sue sale di produzione con l'esigenza di capire come rendere l'**ambiente di produzione** di prodotti alimentari il più **asettico** possibile utilizzando materiali economici e semplici da applicare.

Utilizzando una **Ecopittura fotocatalitica** contro NOx, SOx e VOC, i risultati sono stati la riduzione del **100% dei VOC**, del **49% dei NOx** e del **94% dei SOx⁷⁰**.

Le **vernici fotocatalitiche** hanno la capacità di pulire l'aria dagli inquinanti atmosferici, sono per questo dette "**vernici mangia smog**", sfruttando la fotocatalisi delle nanoparticelle di biossido di titanio, possono agire sugli ossidi di azoto, i principali responsabili della formazione di ozono, e trasformarli in acido nitrico, di più facile gestione. La vernice fotocatalitica può essere applicata su pareti interne ed esterne, in questo modo contribuisce ad **abbassare il livello di inquinamento** presente nell'aria causato da auto,

fabbriche e riscaldamento domestici. Oltre a disgregare le sostanze organiche e inorganiche depositate sulle superfici, risultano anche battericide e fungicide. Basti pensare che **mille metri quadri di superficie di cemento trattata con vernice fotocatalitica riesce a ridurre la quantità di NOx nell'aria quanto 56 alberi adulti**. Questi prodotti **si applicano come normali pitture**, anche in casa, e per le loro caratteristiche sarebbero in grado di ridurre l'inquinamento presente in essa. Sono sorti dubbi relativi ai **residui** dell'azione ossidante, il **CNR** ha specificato che i composti derivanti dalla trasformazione degli inquinanti sono **sali minerali e calcare**, prodotti in quantità minima, innocui,

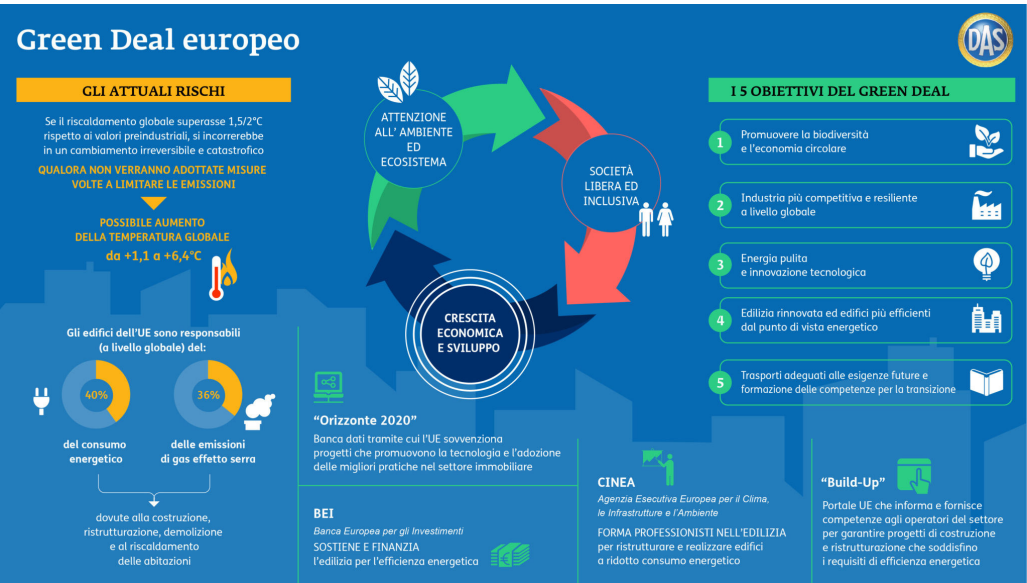


Figura 76 - Obiettivi Green Deal EU

70. Guerra, 2014

invisibili e facilmente dilavabili dalle piogge, quindi assolutamente **eco-compatibili e non nocivi**⁷¹.

Il **settore edilizio** è una **priorità** per l'**UE** in relazione al **Green Deal europeo**, perché ha un impatto significativo sul clima e sull'ambiente, il settore delle costruzioni impiega il **50% delle materie prime estratte globalmente**, ed è responsabile della produzione del **35% dei rifiuti totali nell'UE**. Per questi motivi la sostenibilità è un pilastro chiave nel settore delle costruzioni⁷².

Se si applicano queste vernici agli edifici, o utilizzando materiali contenenti biossido di titanio, è possibile generare questa **reazione su larga scala**. Le sostanze inquinanti presenti nell'aria sono tipicamente prodotte da motori diesel e benzina e sono sia dannose per la salute sia responsabili della formazione dello smog. Questo processo permette di **rimuovere in sicurezza dall'aria materiale pericoloso** e inquinante. Inoltre come detto precedentemente, il biossido di titanio non verrà consumato o degradato, continuando la sua azione nel tempo, costituendo una **soluzione conveniente e a bassa manutenzione**.

L'**Organizzazione Mondiale della Sanità** (OMS) stima che circa 2.4 milioni di persone ogni anno muoiono a causa dell'inquinamento atmosferico, se il biossido di titanio fosse applicato su larga scala potrebbe essere uno strumento in più per combattere gli alti livelli di inquinamento prodotto quotidianamente nelle città.

⁷¹. Silvestrin, 2021

⁷². TDMA - Titanium dioxide in the sustainable built environment, 2025

⁷³. TDMA - The buildings that clean our air, 2025

Perché ciò sia efficace è necessario che sia **applicato su superfici sufficientemente grandi** e che siano **esposte** ad adeguati livelli di luce naturale.

Città del Messico è stata nominata la città più inquinata del pianeta nel 1992, uno dei più importanti ospedali della città, il **Torre de Especialidades** (fig. 77), sta combattendo l'inquinamento impiegando **piastrelle con biossido di titanio** che coprono l'intera facciata. Si stima che questo rivestimento riesca a **neutralizzare** ogni giorno l'equivalente dell'**inquinamento di 8.750 automobili**.

"Il TiO_2 fornisce un modo a bassa manutenzione ed economico per influenzare positivamente le condizioni di vita di milioni di persone attraverso una migliore qualità dell'aria" ⁷³



Figura 77 - Ospedale di Torre de Especialidades

4.3 Biossido di titanio e gestione del calore

Il **piano di ricostruzione edilizia dell'UE** dovrà sicuramente tenere in considerazione il **dispendio energetico** degli edifici, in questo caso il biossido di titanio può giocare un ruolo da protagonista.

Le **proprietà riflettenti** dei suoi pigmenti nei confronti del calore generato dai raggi infrarossi del sole possono aiutare a ridurre l'accumulo di esso negli edifici se impiegato in vernici o altre forme. In particolare modo i **"tetti freddi"**, cioè quelli dipinti con rivestimenti bianchi o colori chiari contenuti biossido di titanio possono ridurre in modo considerevole l'**accumulo di calore interno**. Questo ridurrebbe il consumo energetico per il funzionamento dei sistemi di condizionamento.

Un contributo fondamentale sarebbe dato anche alla **riduzione dell'effetto UHI** (Urban Heat Island effect) in quanto l'assorbimento di calore da parte di calcestruzzo e materiali da costruzione sarebbe notevolmente ridotto se si dipingessero le superfici con vernice bianca contenente biossido di titanio, rendendo più sopportabile la vita urbana nelle grandi città.

Oltre alla riduzione del calore contribuirebbe ad una maggiore **illuminazione degli ambienti** grazie alla **brillantezza** che il biossido di titanio dona alla vernice⁷⁴.

Inoltre il potere fotocatalitico del biossido di titanio permette di **abbattere i volumi di inquinamenti** presenti nell'aria, come raccontato nel corso di questo capitolo, ciò contribuirebbe all'annientamento dell'**effetto UHI** nelle grandi

città, dato che **anidride carboniche e altri inquinanti** sono, oltre che dannosi per la salute umana, una delle **cause principali** dei **riscaldamento globale** e della formazione delle isole di calore. Un ulteriore problema riscontrato è che gli **impianti** di condizionamento sono molto **costosi**, esistono tuttavia paesi in via di sviluppo dove il problema dell'UHI è molto diffuso e dove gli abitanti non sono in grado di sostenere costi di acquisto e gestione di tali impianti.

Si contano in media **12.000 persone** ogni anno che **muoiono** a causa delle ondate di **calore**, la sfida è trovare una soluzione sostenibile sia a livello ambientale che economico per ovviare a questo problema.

È un esempio la **Million Cool Roofs Challenge**, istituita dalla **Clean Cooling Collaborative**, in collaborazione con la **Global Cool Cities Alliance**, **Sustainable Energy for All** e **Nesta Challenges**, una competizione globale da 10 milioni di dollari per velocizzare l'**implementazione di "tetti freddi" nei paesi in via di sviluppo**.

Una delle aziende premiate è stata **Steam Plant Ltd** in Kenya, che ha applicato rivestimenti bianchi ai tetti degli edifici delle baraccopoli di **Nairobi**, dove vivono circa 2 milioni di persone. Abitazioni anguste e termicamente inefficienti che espongono gli abitanti a **stress da calore rischiosi per la loro salute**.

Il loro obiettivo era quello di **mitigare lo stress da calore** che mette a rischio le persone e offrire loro un'opzione di **raffreddamento** che **non** richiedesse **costosi mezzi finanziari** per essere mantenuta come un'impianto di condizionamento.

Steam Plant Ltd, in collaborazione con **Topps Products**, ha applicato un rivestimento bianco ai tetti di stagno ondulato delle baraccopoli, tale rivestimento funziona **riflettendo la radiazione solare**, riducendo le temperature all'interno delle abitazioni, mitigando l'effetto UHI, questo fenomeno è detto **"raffrescamento radiativo passivo"**. È stato dimostrato che il rivestimento bianco fornito da Topps Products **riduce** la temperatura interna **fino a 10°C o più**.

L'ingrediente fondamentale di tale rivestimento è il **biossido di titanio**, il

pigmento bianco permette di riflettere il calore generato dai raggi infrarossi, inoltre, data la sua **opacità**, non necessita di strati spessi o doppi come le altre vernici, così da **risparmiare risorse e denaro**.

Steam Plant Ltd si è servito di **giovani della zona** così da poterli impiegare economicamente e sperando di incoraggiarli ad avviare attività che sfruttino questi prodotti per **migliorare le loro condizioni**. Oltre alle case, questo rivestimento è stato applicato anche a scuole, cliniche, case per bambini e altri edifici pubblici.

Ad oggi Steam Plant Ltd ha applicato **11.000 metri quadri di rivestimento**, con riscontri estremamente positivi da parte di esperti e degli stessi abitanti che percepiscono il cambiamento⁷⁵.

Figura 78 - "Tetti freddi" realizzati nelle baraccopoli di Nairobi



75. TDMA - How titanium dioxide is helping to keep Kenyan homes cool, 2025

74. TDMA - Titanium dioxide in the sustainable built environment, 2025

4.4 Urban Heat Island Effect

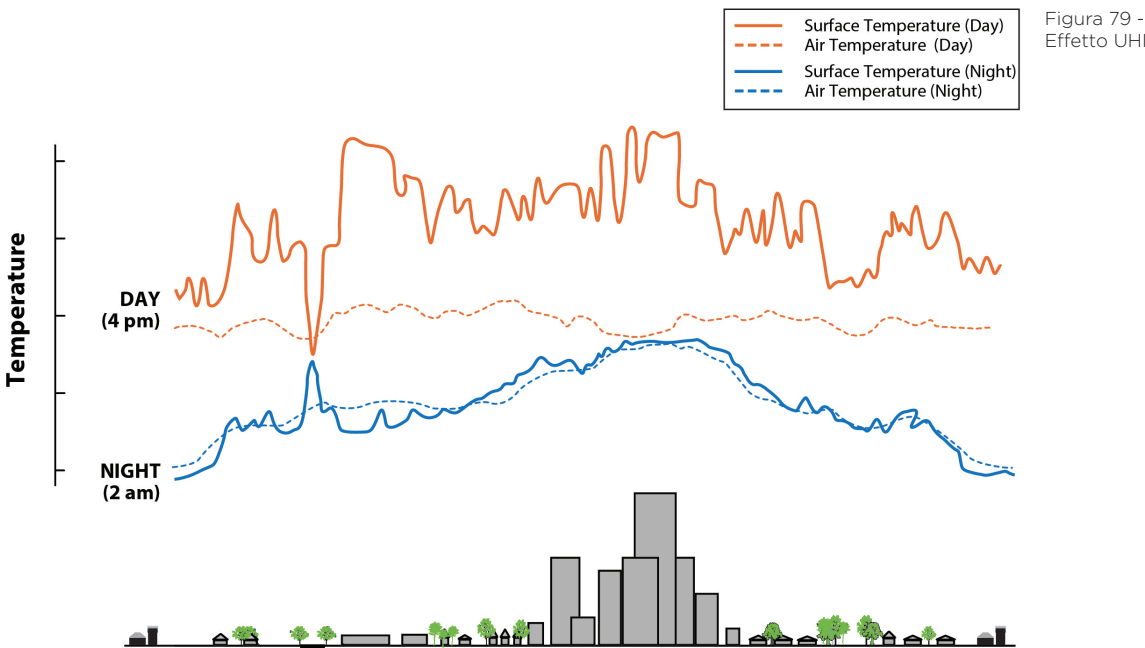
Una “**Isola di Calore Urbano**” (UHI), è un’area metropolitana molto più calda delle zone rurali limitrofe. Il calore è generato dalle **persone**, dalle **auto**, dai **treni** e da qualsiasi **attività antropica** presente nelle grandi città. Più in generale le UHI si creano nei luoghi dove ci sono **molte persone e molte attività**. A contribuire alle UHI è la **vicinanza** con cui abitazioni, negozi e altri **edifici** sono costruiti, inoltre la capacità di trattenere e isolare il calore dei materiali da costruzione contribuisce a rendere le zone circostanti ad essi più calde. Anche il “**calore di spreco**”, scarto di qualsiasi attività umana, il solo **movimento**, aumenta questo fenomeno, motivo per cui ovunque ci siano molte persone è generalmente più caldo. Questo effetto si nota anche di **notte**

perché **strade, marciapiedi e edifici** impediscono al suolo di liberare il calore verso il cielo notturno, rimanendo intrappolato a quote più basse e aumentando la temperatura. Nelle zone dove si verifica UHI generalmente si riscontra una **qualità dell’aria e dell’acqua inferiore** a causa degli inquinanti presenti in esse, in quanto impediti alla dispersione proprio dall’effetto UHI. Questo fenomeno incrementa l’utilizzo di **sistemi di condizionamento** per ambienti che a loro volta mettono a dura prova le risorse energetiche globali, per questo, queste zone sono spesso soggette a “**Blackout controllati**”, a discre-

zione delle società fornitrici di energia che non sono in grado di soddisfare le richieste dei clienti. L’energia consumata dagli impianti di condizionamento contribuisce all’UHI in quanto generatrice di calore e sostanze inquinanti⁷⁶. Soprattutto nelle **ore notturne** l’effetto UHI è più pronunciato, con temperature che nelle aree urbane possono arrivare **fino a più di 10°C più alte rispetto alle aree rurali**, ciò dovuto al calore rilasciato da strade ed edifici durante la notte. Le grandi città ovviamente sono più soggette a questo fenomeno, **Londra e Parigi**, ad esempio, registrano **regolarmente 4°C in più** durante la notte rispetto alle aree circostanti⁷⁷. Più nello specifico i **motivi** per cui le “**isole di calore**” si formano sono quelli che seguono.

ad assorbire ed emettere più calore solare rispetto alla vegetazione, inoltre i materiali da costruzione hanno più **lento rilascio di calore**, perciò anche durante la notte continuano ad emetterne.

- **Geometria urbana**, le dimensioni e l’organizzazione degli edifici urbani influenza il **flusso del vento** e la capacità dei materiali di assorbire e rilasciare calore, infatti strade strette che diventano **canyon** tra alti grattacieli trasformano quest’ultimi in gigantesche masse termiche che non riescono a rilasciare calore e in più ostacolano il flusso di vento che potrebbe raffreddare la zona.
- Calore generato dalle **attività umane**, qualsiasi attività antropica genera calore come scarto che contribuisce all’UHI.
- **Meteo e geografia**, le condizioni meteorologiche e la zona geografica influenza la formazione delle isole di calore, **zone nuvo-lose saranno meno soggette** ad esse mentre ad esempio aree vicine a montagne che **bloccano il flusso dei venti sono più a rischio**.



76. Rutledge et al., 2024

77. Copernicus, 2025

Anche all'interno delle città stesse possono essere presenti zone più calde e più fresche, sono dette **“isole di calore intraurbane”**. Inoltre esistono due tipologie di “isole di calore” a seconda che si riscontrino sulla superficie terrestre o nell'aria atmosferica, queste differiscono per causa, tecniche di identificazione e misura, negli impatti e nelle soluzioni per raffreddarle:

- **Isole di calore superficiale**, superfici urbane come strade e tetti assorbono più calore rispetto alle superfici naturali, esse tendono ad essere più intense durante il giorno in presenza di sole.
- **Isole di calore atmosferico**, si formano come risultato dell'aria più calda delle aree urbane rispetto a quella delle aree periferiche, queste variano molto meno in intensità rispetto a quelle precedenti.

Parliamo ora di **impatti** delle isole di calore, le conseguenze dell'UHI sono molteplici e con diversi risvolti:

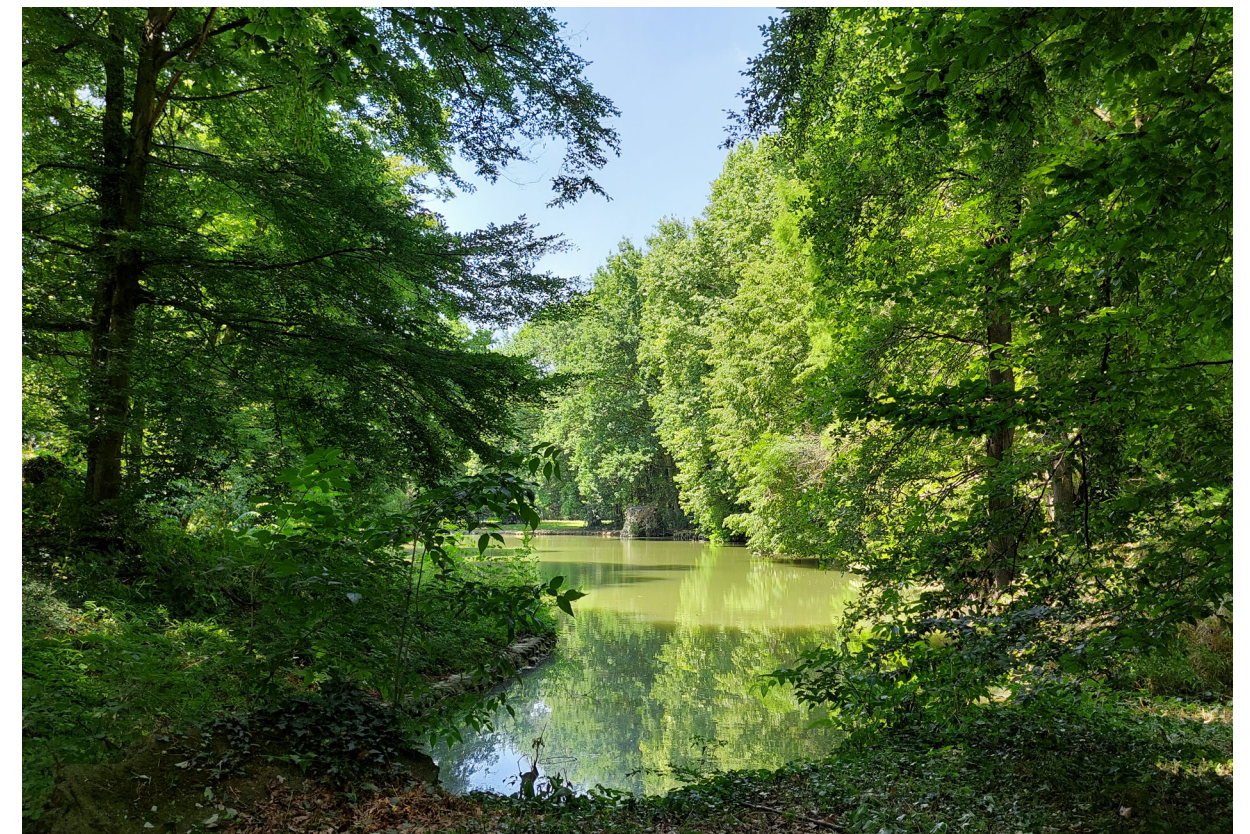
- **Aumento del consumo energetico**, l'UHI aumenta la domanda di elettricità per l'aria condizionata, si stima che essa aumenti dall'1% al 9% per ogni 2°F di aumento di temperatura, con un aumento maggiore nei paesi dove la maggior parte degli edifici sono forniti di impianti di condizionamento come gli Stati Uniti.

Questa maggior domanda contribuisce all'**aumento delle spese elettriche** ed è causa dei blackout controllati istituiti dalle società elettriche.

- **Elevate emissioni di inquinanti e gas serra nell'ambiente**, la fonte di energia delle centrali elettriche nei momenti di maggior richiesta sono le centrali a **combustibili fossili**, ciò aumenta le emissioni di gas serra che contribuiscono al cambiamento climatico, questi sono dannosi per la salute umana e contribuiscono alla **formazione di ozono** a livello del suolo (smog), **particolato fine** e **pioggia acida**.
- **Danneggiamento della salute e del comfort** umani, decessi e malattie legate al calore sono sempre più comuni, soprattutto tra i soggetti più deboli come bambini o anziani.
- **Qualità dell'acqua compromessa**, il calore delle superfici riscalda il deflusso delle acque piovane, questo contribuisce al riscaldamento di fiumi e laghi. Il riscaldamento dell'acqua **influenza la riproduzione di molte specie** acquatiche che corrono grandi rischi a causa di questo fenomeno⁷⁸.

Urbanisti e governi locali vogliono risolvere questo problema con strategie per ridurre lo stress da calore, attraverso l'aumento di **infrastrutture verde-blu**, quindi una maggiore copertura di vegetazione e una maggiore superficie d'acqua che mitighi questo effetto⁷⁹.

Figura 80 - Infrastrutture verde-blu



78. US EPA, 2024

79. Copernicus, 202

4.5 Applicazioni del biossido di titanio

4.5.1 TiO₂ e vernici

La produzione di **pittura, vernici, carta e plastica** rappresentano circa l'**80% del consumo mondiale** di biossido di titanio, si stima sia presente in 2/3 di tutte le vernici in commercio. Secondo un sondaggio del 2018, il valore delle vernici contenenti questo pigmento disponibili sul mercato ammontava a **13.2 miliardi di dollari**⁸⁰.

Il biossido di titanio è il pigmento bianco più utilizzato e più importante nell'industria delle vernici nonostante aumenti il prezzo del prodotto finale di circa il 20%, è disponibile in due diverse strutture cristalline: rutilo e anatasio. I pigmenti di **rutilo** sono più indicati per quest'applicazione in quanto disperdono più efficientemente la luce e sono più stabili e duraturi rispetto a quelli di anatasio. Tali pigmenti sono insolubili all'interno dei veicoli di verniciatura, perciò le **proprietà prestazionali** quali caratteristiche chimiche, fotochimiche e fisiche, dipendono principalmente dalla **dimensione** delle particelle del pigmento e dalla **composizione chimica** della superficie. È possibile applicarvi sopra dei **modificatori superficiali** che amplificano proprietà prestazionali della superficie come la disperdibilità di acqua, l'efficienza di copertura, la resistenza alla scrostatura o la resistenza alla decolorazione per calore o fotoriduzione. Inoltre è opportuno dire che la qualità della prestazione non dipende dalla concentrazione di pigmento, in quanto essa può essere maggiore in concentrazioni minori rispetto ad altre⁸¹. Possiamo riassumere il **comportamento del biossido di titanio** all'interno

delle **vernici** in questi quattro punti:

- Migliora il **potere coprente**, questo perché ha un indice di rifrazione maggiore dell'aria e della maggior parte delle sostanze organiche, perciò può bloccare la luce e garantire effetto coprente.
- Migliora la **brillantezza**, può far sì che la superficie rifletta ripetutamente la luce, donando elevata brillantezza e facendola risultare liscia e delicata, questo sempre perché il biossido di titanio ha elevato indice di rifrazione e un'elevata riflettività.
- Migliora la **resistenza alla corrosione**, può assorbire gas nocivi presenti nell'aria, formando uno strato di titanato e prevenire la corrosione. Inoltre ha la capacità di assorbire le radiazioni ultraviolette, riducendo il tasso di invecchiamento del materiale organico nel rivestimento.
- Migliora la **resistenza agli agenti atmosferici**, riduce la desquamazione, l'ingiallimento e lo scolorimento del rivestimento prolungandone la durata.

Ad oggi è ampiamente utilizzata in edifici, automobili, navi, mobili, elettrodomestici e altri settori. Sicuramente **il settore architettonico è quello in cui è maggiormente diffuso**⁸².

4.5.2 TiO₂ e materiale cementizio

L'attenzione verso il biossido di titanio e le sue proprietà fotocatalitiche è cresciuta insieme all'aumento dell'inquinamento atmosferico, promuovendo lo sviluppo di **soluzioni edilizie come cementi e leganti fotoattivi**. È diventato quindi un ingrediente fondamentale per la produzione di **calcestruzzi fotocatalitici**, impiegati per ridurre l'impatto ambientale di edifici e costruzioni. Il loro **costo** supera del **30-40%** quello dei **calcestruzzi tradizionali**.

nali, circa 100-150 €/m³ contro 150-200 €/m³, ma ciò è giustificato dai benefici ambientali, soprattutto se impiegato in pareti esterne esposte al sole. La prima realizzazione concreta di un'architettura basata su tale tecnologia in Italia è la **chiesa Dives in Misericordia a Roma** (fig. 81), progettata da **Richard Meier nel 1996**. Lo stesso architetto successivamente sfruttò tale tecnica nel **laboratorio Italcementi al Kilometro Rosso di Bergamo**.

Figura 81 - Chiesa Dives in Misericordia a Roma



⁸⁰. MSDS Europe, 2021

⁸¹. Ti-Pure, 2025

⁸². Chen, 2024

Oggi è impiegato in una **varietà di prodotti edilizi**, dalle pavimentazioni agli intonaci, contribuendo al miglioramento della qualità ambientale sia interna che esterna, abbattendo inquinanti come **gas e particolato degli scarichi delle auto**. Questa tecnologia può trovare applicazione anche nell'edilizia storica, perché permette di rallentare il processo di degrado delle superfici murarie causato dall'inquinamento, costituendo un ruolo importante nella conservazione del patrimonio architettonico⁸³.

In **Giappone** e **Stati Uniti** sono state sperimentate **pavimentazioni** contenenti biossido di titanio, con risultati decisamente rilevanti. In **Texas** ad esempio hanno stimato che un'area di **dimensioni minori ad un chilometro quadrato** sia in grado di degradare fino ad **una tonnellata di NOx**, considerando una durata della pavimentazione limitata a 5 anni.

A livello italiano, **Italcementi**, ha **sviluppato e brevettato il principio attivo TX Active**, integrando il biossido di titanio in cementi fotoattivi, ricevendo anche riconoscimenti internazionali⁸⁴. Questa **nuova soluzione degli anni '90** risultò **rivoluzionaria** e subito efficace. **Test** successivi in collaborazione con l'**Università di Ferrara**, il **CNR** e il **Centro Comune di Ricerca della Comunità Europea** hanno confermato la capacità del materiale di **abbattere fino al 91% dei NOx** in ambiente controllato. L'efficacia è provata anche contro **PM10** e **VOC**. Il suo successo applicativo venne consolidato da progetti come

le **Torri Vodafone** (fig. 82) a Milano e il **padiglione Italia di EXPO 2015** (fig. 83), dove il biossido di titanio unì prestazioni ambientali, resistenza e qualità estetica⁸⁵.

Il biossido di titanio è generalmente **aggiunto a secco** nelle miscele cementizie con **concentrazioni** che variano tra **0,1% e 50%** rispetto al legante, ma viene **prevalentemente** utilizzato come **strato superficiale del calcestruzzo**, con spessori vicini al centimetro. Tra le diverse opzioni esistono anche **intonaci fotocatalitici** a base di calce e cemento che sfruttano le proprietà del biossido di titanio e vengono applicati come un **normale rivestimento murario**.

Figura 82 - Torri Vodafone a Milano



Figura 83 - Padiglione Italia di EXPO

83. Belpoliti, 2009
84. Guerra, 2014
85. Ricci, 2023

La **forma cristallina del biossido di titanio ne influenza l'efficacia**: la fase anatasio, rispetto al rutilo, è più performante per capacità depurativa e brillantezza, in particolare in particelle molto fini. **Italcementi ha dimostrato** che rivestimenti in malta cementizia fotocatalitica sono in grado di abbattere fino a **30 tonnellate di NOx all'anno per chilometro quadrato**.

Considerando che solo a Milano si stimano 13.000 tonnellate annue di emissioni di azoto, questa soluzione potrebbe **ridurre** in modo significativo l'**inquinamento atmosferico**.

È da tenere in considerazione che l'aggiunta di biossido di titanio alla malta può ridurne progressivamente alcune proprietà meccaniche come la resistenza a compressione e il modulo elastico, anche se comunque con valori compatibili con applicazioni edilizie. Per massimizzarne l'**effettività** è necessario che la **superficie sia esposta alla luce solare**, per questo motivo se ne prediligono applicazioni esterne, in questo modo non solo migliorano la qualità dell'aria, ma **mantengono pulito e brillante l'aspetto della costruzione**, a patto che la miscela sia eseguita in modo corretto nella gestione dei rapporti tra componenti e tecniche di mescolamento⁸⁶.

Grazie a queste caratteristiche il cemento assume un **ruolo doppio, costruttivo e ambientale**, guadagnandosi il soprannome di cemento "**mangia smog**", la sua efficacia dipende fortemente dalla combinazione con le nanotecnologie, che permettono il mantenimento delle proprietà del biossido

di titanio anche in forma nanometrica, oltre alla **purificazione dell'aria**, come detto precedentemente ha anche un'importante **capacità autopulente**, dovuta alla sua **superidrofilicità**, che fa sì che le superfici non trattengano l'acqua, permettendo la rimozione spontanea dello sporco, **riducendo i costi di manutenzione**.

La sua efficienza dipende dalla luce solare, per questo si stanno sperimentando formulazioni arricchite con azoto per migliorarne l'attivazione anche in condizioni di bassa luminosità.

Questi materiali hanno trovato il loro **primo sviluppo in Giappone**, principalmente in forma di **piastrelle** con rivestimenti fotocatalitici, soprattutto in edifici prestigiosi, dato il suo costo che tuttavia non ne ha limitato la diffusione.

Nuove sperimentazioni stanno sviluppando soluzioni di **calcestruzzo fotocatalitico rinforzato con fibra di vetro** che permetterebbe di integrare questa tecnologia in modo più semplice⁸⁷. Poco indagata era ancora la **durabilità** dei materiali cementizi con biossido di titanio nel tempo, come anche la tenuta delle proprietà fotocatalitiche, perciò è stato condotto uno **studio** utilizzando materiali forniti dall'azienda **Zecca Prefabbrica SpA**. Confrontando i campioni, i risultati hanno dato **esito positivo**. Campioni trattati con **rasanti superficiali**, una delle tipologie di cemento fotocatalitico esaminato, hanno mostrato **buone prestazioni in termini di durabilità**, a differenza di altri che, intrappolando aria al loro interno, perdevano parte delle loro proprietà,

anche le **proprietà fotocatalitiche sono state confermate** dimostrando il potenziale del materiale anche in condizioni ambientali reali⁸⁸.

Come detto sopra, si deve al **Giappone** la scoperta delle proprietà fotocatalitiche del biossido di titanio e della sua applicazione nanometrica nei materiali cementizi, in particolare a **Akui-ra Fujishima**, un chimico, che scopre queste proprietà nel **1967**. Per le sue proprietà il biossido di titanio unito a materiale cementizio si è guadagnato il titolo di **materiale "intelligente"**.

Per quanto riguarda il dilavamento degli inquinanti abbattuti, ciò è possibile grazie alla **superidrofbicità della superficie** del materiale, che si manifesta **se esposta alla luce solare**. Questo fenomeno è detto anche "**effetto loto**" ed è dovuto alla struttura gerarchica della superficie grazie a dei rilievi sia micro che nanometrici che trattengono un sottile strato di aria impedendo il contatto tra acqua e materiale solido, facendo sì che **l'acqua scivoli via senza penetrare e trascini con sé i residui** della reazione fotocatalitica. Questo comportamento dimostra l'**intelligenza funzionale** di questo materiale, che non si limita alla pulizia passiva, ma modifica attivamente la bagnabilità della superficie se esposto alla luce solare⁸⁹.

Nel **progetto europeo PHOENICS** il biossido di titanio ha svolto un ruolo centrale, in quanto ha permesso di affrontare il **doppio problema** legato all'**inquinamento atmosferico** e del **consumo energetico** degli edifici, responsabile di circa il 40% del consumo

energetico e di un terzo delle emissioni di CO₂. Questo è stato possibile **trattando le superfici di cemento con TiO₂** e integrandolo nel cemento senza perdere stabilità e prestazioni complessive del composto. Questo lavoro è poi confluito anche nel **progetto Light2CAT**, dedicato alla **fotocatalisi visibile nel cemento**.

Nel progetto è stato inserito anche un **materiale a cambiamento di fase (PCM)** per l'accumulo di energia termica, una pietra pomice impregnata con PEG600. Questo materiale è in grado di **migliorare la regolazione termica** negli edifici sia quando è caldo che quando è freddo. L'abbinamento di questi due materiali ha visto la nascita di una **soluzione cementizia multifunzionale**, strutturalmente efficiente, attiva contro inquinamento, degrado e consumo energetico⁹⁰.

Figura 84 - Logo Commissione Europea



⁸⁶. Guerra, 2014
⁸⁷. Michele, 2023

⁸⁸. Buraschi, 2017
⁸⁹. Ausiliello, 2025
⁹⁰. Commissione Europea - Un cemento che assorbe l'inquinamento e a risparmio energetico, 2024

4.5.3 TiO₂ e materiale ceramico

I materiali ceramici fotocatalitici contenenti biossido di titanio **differiscono dai materiali cementizi** per la loro **composizione chimica** anche se anch'essi sono utilizzabili per l'abbattimento degli inquinanti ambientali. Uno dei primi esempi è stato quello della società cinese **Toto Ltd.** in collaborazione con il professore **Akira Fujishima**, che ha sviluppato un prodotto chiamato **Hydrotect**, questo consiste in delle **piastrelle ceramiche** spruzzate con una **sospensione acquosa di biossido di titanio** e successivamente **trattate termicamente** tra i 600°C e gli 800°C per fissare il rivestimento alla superficie. La piastrella presentava un **film fotocatalitico** di pochi micrometri, aveva **comportamento super-**

idrofilo, fondamentale per l'autorimozione dello sporco attraverso le piogge ed è risultata efficace sia in **ambienti indoor che outdoor**.

Questo trattamento in sintesi trasforma la ceramica in una superficie attiva dal punto di vista ecologico e ambientale. Il **successo delle piastrelle** fotocatalitiche è iniziato nel **1998**, nel mercato Europeo dal 2000 grazie ad alcune aziende che hanno preso spunto da Toto Ltd. I campi applicativi si sono ampliati e l'innovazione tecnologica ha portato a **migliorare le proprietà** precedenti e a farne nascere di nuove.

Inoltre, oltre alle piastrelle si è sperimentato con successo l'utilizzo di **tegole fotocatalitiche in argilla**⁹¹.

Figura 85 - Piastrelle realizzate da Toto Ltd in collaborazione con Laminam



91. Guerra, 2014

Active Surfaces® ha sviluppato materie ceramiche contenenti biossido di titanio con potere fotocatalitico, puntando a proprietà avanzate e orientate alla sostenibilità ambientale. Questa tipologia di materiale è conosciuta proprio come Active Surfaces®; sono impiegabili sia in **interni** che in **esterni** e offrono azioni **antibatteriche**, **antivirali** e **anti-inquinamento**. Il principio attivo è il medesimo dei casi precedentemente analizzati.

Dal 2017 Active ha sviluppato una **versione migliorata e brevettata** di questo materiale, preparando argento in combinazione con biossido di titanio. Con l'aggiunta di questo elemento le proprietà del materiale salgono ulteriormente, raggiungendo un **efficacia antivirale e antibatterica superiore al 99%**, migliorando le qualità di abbattimento degli inquinanti grazie a tempi di reazione più rapidi. Ha inoltre ampliato l'utilizzo a situazioni di **illuminazione LED**, non rendendo più inutilizzabile il biossido di titanio nelle zone dove non arriva la luce del sole⁹².

Anche in **Italia** e in particolare grazie al **Centro Ceramico** si sta portando avanti ricerca in merito alle ceramiche fotocatalitiche con i principali obiettivi di ottenere **superfici antibatteriche e fotocatalitiche** attraverso l'utilizzo della ceramica, garantire **durabilità prolungata** dei trattamenti superficiali e conservare le **caratteristiche estetiche** del materiale⁹³.

Un altro settore in cui il biossido di titanio additivato alla ceramica rappresenta una risorsa è quello dell'**ingegneria tissutale**.

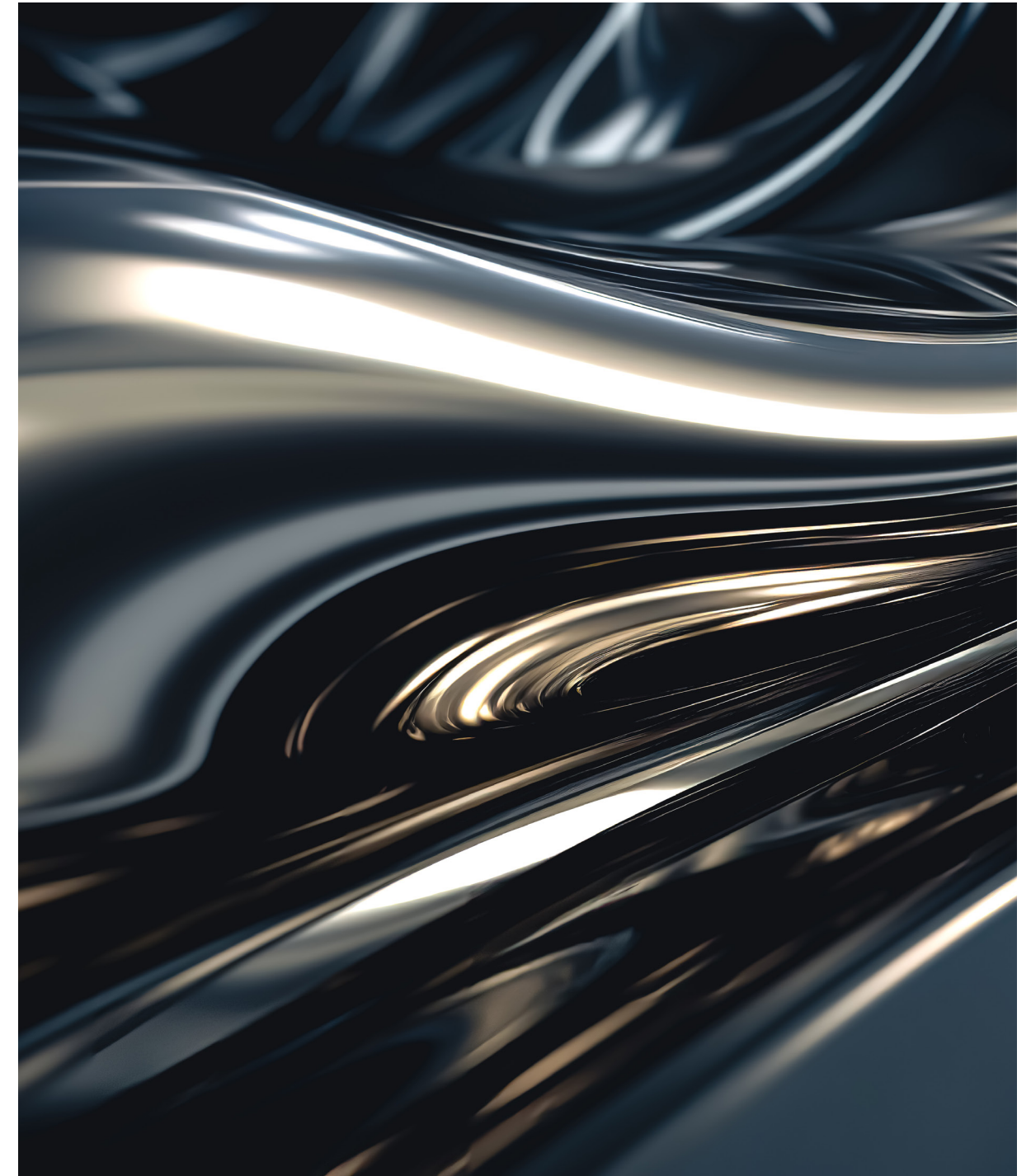
Il biossido di titanio si è dimostrato adatto ad essere impiegato in **bioceramiche porose** come scaffold per la rigenerazione ossea, questo grazie alla possibilità di raggiungere **porosità fino all'85%** del volume, ideale per la formazione di **ossa e vasi sanguigni durante l'integrazione** dell'impianto, ma anche grazie alle **dimensioni dei fori** (100-300 micron) che agevolano l'osteointegrazione e le sue proprietà meccaniche.

In quest'applicazione il biossido di titanio conserva le sue **proprietà fotocatalitiche**, quindi in presenza di **luce e umidità** permette di decomporre sostanze organiche, aiutando l'organismo a **mantenere le superfici impiantari pulite**. Questo effetto riduce il rischio di infezione e migliora la stabilità dell'impianto a lungo termine⁹⁴.

92. Iris Ceramica Group, 2025

93. Rambaldi, 2025

94. Il Dentista Moderno, 2017

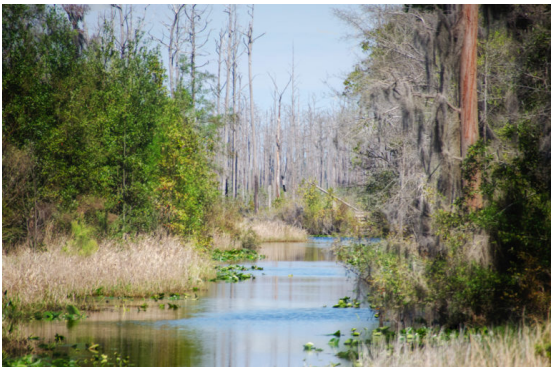


5.IL CICLO DI VITA DI TITANIO E TiO_2 : RICICLO E RECUPERO

5.1 Perché è importante riciclare il titanio

La produzione di titanio prevede **processi minerari altamente energivori** che hanno un impatto notevole sotto diversi aspetti. Dal punto di vista **ecologico** ciò riguarda soprattutto l'alterazione degli **habitat** a causa della distruzione di vegetazione e topsoil che condizionano sia la proliferazione della vegetazione stessa sia quella degli animali. Inoltre diretta conseguenza dell'erosione del suolo è la **perdita di terreno fertile** e l'aumento della sedimentazione nei giacimenti idrici vicini che riduce la **qualità dell'acqua** danneggiando gli organismi acquatici. Due esempi a riguardo solo il caso della **Palude di Okefenokee** (fig. 86) in Georgia, dove gli esperti affermano che l'attività mineraria in tale area potrebbe danneggiare la **qualità dell'acqua** e abbassare i **livelli idrici** aumentando la frequenza e la gravità di incendi e periodi di siccità. Essendo questa palude habitat di specie in via di estinzione, ciò potrebbe avere **conseguenze ecologiche significative**.

Figura 86 - Palude di Okefenokee



95. Artizono, 2025
96. Caldwell, 2024

Allo stesso modo nel distretto keniota di **Kwale** (fig. 87) l'estrazione di titanio ha causato **impatti sociali e ambientali** molto significativi. I principali motivi di preoccupazione sono lo **sfollamento** di parte della popolazione e la **distruzione di ecosistemi locali**. Al momento sono in atto operazioni per mitigare questi fenomeni attraverso processi di riforestazione e coinvolgimento delle comunità, ma ci sono preoccupazioni per quanto riguarda il mantenimento dell'**equilibrio** tra, **sviluppo economico**, e **conservazione dell'ambiente**⁹⁵. Il titanio è spesso chiamato il **"metallo del futuro"** in quanto svolge un ruolo chiave in diversi settori industriali, come quello aerospaziale e medicale, questo fa sì che la sua **domanda sia in continua crescita**, di conseguenza anche l'importanza del **riciclaggio** sta crescendo in modo esponenziale⁹⁶.

Figura 87 - Distretto keniota di Kwale



L'**utilizzo** del titanio a **livello globale** è in costante **crescita** e si prevede una progressione positiva almeno fino al 2030, contemporaneamente si prevede anche una crescita della quantità di **rifiuti** da lavorazioni di titanio, dato molto preoccupante, ciò rende necessaria la ricerca di nuove soluzioni per migliorare in modo efficace la **riciclabilità** di suddetti rottami di titanio. L'utilizzo di tali risorse secondarie prevede anche un miglior utilizzo di quelle primarie e di conseguenza la **riduzione dell'impatto ambientale** dato da tali processi.

Queste pratiche non sono ancora molto diffuse a livello industriale, inoltre i processi di **lavorazione** per ora più diffusi sono di tipo **sottrattivo**, i quali danno origine a molto materiale di scarto. Anche l'**AM** sta continuando a diffondersi ma ci sono ancora problemi che devono essere risolti. Per queste applicazioni si stanno sperimentando **metodi di riciclo di rottami** per la produzioni di polveri per processi additivi⁹⁷.

Figura 88 - Componenti stampati in 3D



97. Tebaldo et al., 2024

5.2 Vantaggi ambientali ed economici

Riciclare il titanio porta diversi vantaggi con sé, non solo conserva le risorse ma fronteggia anche **sfide ambientali e benefici economici**.

In primo luogo riduce l'impatto ambientale, in quanto l'estrazione e la raffinazione del minerale di titanio prevede l'impiego di grosse quantità di **energia e acqua** e al contempo genera sostanziose **emissioni** di carbonio. Il riciclaggio riduce la necessità di estrazione del materiale vergine e di conseguenza le emissioni di gas serra. Ad esempio, a livello energetico, il riciclo di rottami **impiega il 95% in meno di energia** rispetto alla produzione da materia prima vergine.

In seconda battuta si può parlare di **materie prime**, come detto precedentemente, il titanio costituisce lo 0,63% della crosta terrestre. Ciò non significa che a tale quantità corrisponda il titanio utilizzabile a livello industriale, in particolare, il **rutilo**, il minerale di titanio di più alta qualità, è molto più raro e di **difficile reperimento** in quanto concentrato in specifiche regioni geografiche. La dipendenza da queste fonti limitate potrebbe costituire un problema in futuro sia per quanto riguarda la limitata possibilità di fornitura, sia per possibili **vulnerabilità geopolitiche**. Il riciclo offre l'opportunità di risolvere tali questioni costituendo una **catena di approvvigionamento secondaria e parallela**, riducendo o addirittura eliminando la necessità di estrazione mineraria.

I **costi energetici** di produzione si riflettono ovviamente in elevati costi economici dovuti a tali processi, il riciclaggio figura come un'alternativa molto conveniente per i produttori, permettendo loro di **ridurre drasticamente** i costi di produzione **senza compromettere la qualità del prodotto**⁹⁸. Come detto sopra, il riciclaggio riduce anche la quantità di rifiuti che altrimenti finirebbero in discarica, promuovendo l'**economia circolare** e rendendo più sostenibili i processi produttivi anche dal punto di vista ambientale. Queste pratiche non solo aiutano la **conservazione delle risorse**, ma sono in accordo anche con le **linee guida globali** per ridurre l'impatto ambientale dell'industria.

Infine è necessario ricordare che il titanio è **riciclabile al 100%** senza una perdita significativa di proprietà meccaniche e fisiche, ciò lo rende una **scelta sostenibile** per le industrie che intendono ridurre al minimo gli sprechi e ottimizzare al massimo l'utilizzo delle risorse⁹⁹.

L'**università Leibniz di Hannover** sta conducendo studi per riuscire a riciclare i **trucioli di titanio**, lasciati dai processi di lavorazione, tramite la stampa 3D. Questo perché durante la lavorazione alla **CNC** di pezzi di medie e grandi dimensioni si ha uno **spreco di oltre il 90% di materiale** e ciò non è tollerabile per un materiale così raro e importante a livello industriale.



Figura 89 - Lavorazione del titanio con CNC

Durante tali studi ha riscontrato che mentre i **trucioli di titanio** possono essere **riutilizzati** in applicazioni di qualità inferiore, ad esempio in compositi, il **materiale residuo** è spesso **corrotto** a causa delle impurità dovute all'ossidazione, al raffreddamento, ai lubrificanti e a particelle di utensili. Perciò sta cercando strade per poter **rimuovere** tali **impurità** modificando i parametri di lavorazione nella fusione del materiale. Nonostante ciò, il team dell'università di Hannover promuove il **riciclaggio del materiale direttamente in polvere per la produzione additiva**, evitando il processo di fusione ad alta intensità energetica.

I ricercatori affermano che:

*“Usando i chip come materiale di input nella produzione di polvere, prevediamo una riduzione del consumo di energia e delle emissioni di CO2 fino all'80%”*¹⁰⁰.

Sotto un punto di vista più prettamente **economico** si può stimare che il riciclo del titanio porti ad una **riduzione** generale dei **costi di processo** pari al **60-70%** rispetto all'impiego della materia vergine in quanto estrazione e raffinazione, sono processi che richiedono tempo e enormi investimenti di capitale e manodopera.

⁹⁸. Caldwell, 2024
⁹⁹. Machine MFG, 2025

¹⁰⁰. Margiov, 2020

Oltre a questo, i **rottami** di titanio hanno un **alto valore di mercato** data la scarsità e la limitata disponibilità dello stesso, perciò, chi si occupa di riciclare il titanio può beneficiare di questo valore che offre loro nuove opportunità redditizie.

Il riciclaggio del titanio non è un processo semplice e richiede **manodopera specializzata**, in particolare la catena del riciclo è costituita da coloro che raccolgono e smistano i rottami e dall'apparato logistico che gestisce la catena di approvvigionamento assicurando che il titanio riciclato raggiunga i produttori. L'aumento di tali pratiche porterebbe ad un **notevole aumento dei posti di lavoro**.

Il mercato dei rottami è sicuramente guidato dall'**industria aerospaziale** che sta cercando un **equilibrio tra prestazioni e sostenibilità**. Finora, la buona qualità del materiale riciclato **ha rispettato gli standard** per la produzione di componenti ad **alto valore aggiunto** per aeromobili, per questo, giganti come **AirBus**, da anni utilizzano titanio riciclato nella loro catena di approvvigionamento, al fine di abbattere costi e raggiungere obiettivi ambientali.

Un altro settore che guida la domanda di titanio riciclato è la **fabbricazione additiva**, per la quale tale materiale è tra i più ampiamente utilizzati, in particolare in forma di polvere, data la sua resistenza e biocompatibilità.

Figura 90 - Flotta aerea Airbus



Altro motore di diffusione per questo materiale è l'elevata **adozione di veicoli elettrici**, i quali necessitano di componenti sempre più **leggeri**, per migliorarne l'efficienza e l'autonomia, oltre alle prestazioni, anche in questo caso si sta promuovendo il riciclo del titanio per raggiungere sempre nuovi **obiettivi di sostenibilità**.

Infine **governi e società** da tutto il mondo promuovono principi di **economia circolare** per ridurre **rifiuti** in discarica, migliorare l'**efficienza** di risorse e ridurre le **emissioni di gas serra**⁷². All'interno dello **scenario industriale europeo**, fino a circa 8 anni fa, non era semplice reperire titanio o trovare un modo economico per riciclarne gli scarti, in quanto questo mercato era

principalmente sviluppato negli **Stati Uniti e in Russia**.

Tuttavia dal 2017 ad oggi **EcoTitanium**, azienda francese di Saint-Georges-de-Mons, sta cercando di risolvere questo problema, attraverso un impianto che si occupa di **approvvigionamento e riciclaggio di titanio**. Utilizza una tecnologia innovativa con forni al plasma e sottovuoto che consumano un quantitativo minore di energia rispetto ai processi fusori.

Gli organi aziendali affermano che EcoTitanium **impedirà l'emissione di 100.000 tonnellate di anidride carbonica ogni anno**, producendo titanio riciclato e non basando la loro produzione sul minerale¹⁰¹.

INTEGRATED SOLUTION FOR TITANIUM

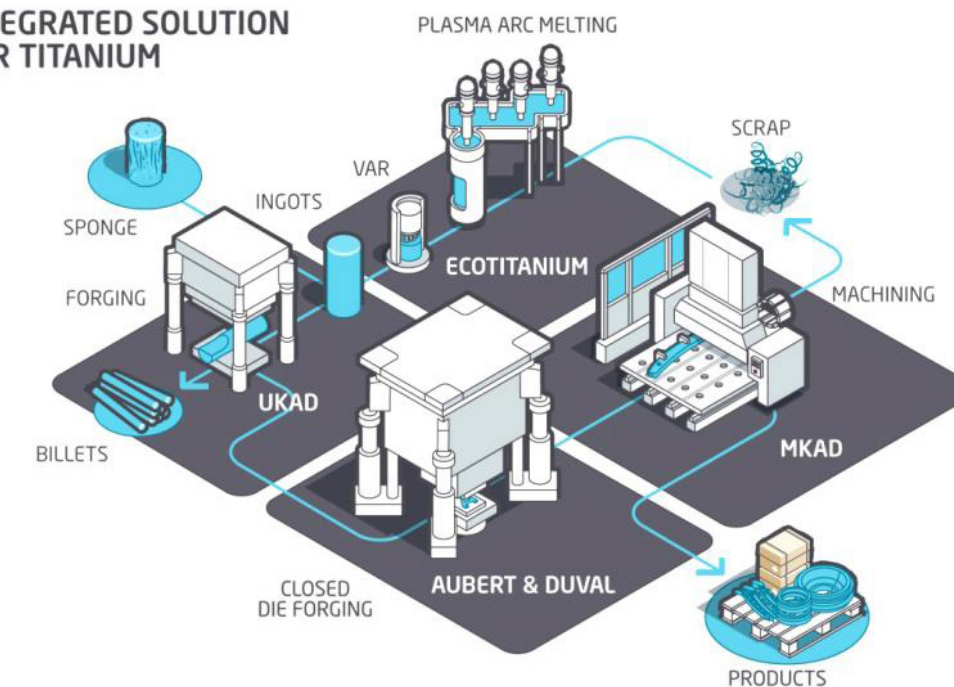


Figura 91 - Impianto produttivo di Ecotitanium

¹⁰¹. Knight, 2018

5.3 Processi e tecniche di riciclo

Il titanio è impiegato in **prodotti altamente specializzati**, quando questi raggiungono la fine del loro ciclo di vita per usura o obsolescenza possono essere nuovamente utilizzati per ottenere titanio riciclato¹⁰².

I **metodi principali** per il riciclo di questo materiale si possono raggruppare in **due famiglie**, i metodi **fisici** e i metodi **chimici**; i primi che comprendono tecniche come fusione, frantumazione e vagliatura, che sfruttano mezzi meccanici per modificare lo stato fisico dei rottami al fine di poter operare nuove lavorazioni e utilizzi; i secondi implicano reazioni chimiche per rimuovere o ridurre le impurità in particolare tramite la **deossidazione**, fondamentale per migliorare la prestazione dei materiali contenenti titanio¹⁰³.

Il processo di riciclo del titanio inizia con la **raccolta del materiale di scarto**, in particolare i rottami vengono prelevati da una varietà di fonti:

- **Produzione industriale:** utilizzato in un'ampia gamma di prodotti, il titanio viene raccolto lungo le filiere di diversi settori industriali.
- **Rifiuti elettronici:** presente anche in molti apparecchi elettronici, quando questi vengono dismessi, il titanio al loro interno può essere recuperato.
- **Rifiuti da costruzione:** spesso impiegato in lastre di metallo, una volta giunte a fine vita, questo può essere recuperato¹⁰⁴.

Passaggio fondamentale, successivo alla raccolta dei rottami, è la **suddivisione** di quest'ultimi per garantire la purezza del titanio riciclato, le tecniche più diffuse sono la **separazione magnetica**, la **classificazione dell'aria** e la **selezione manuale**.

Dopodiché si procede alla **pulizia** per rimuovere elementi di contaminazione come vernici, grasso o sporco¹⁰⁵. Contestualmente al processo di pulizia avviene la **triturazione** che riduce il materiale a pezzi più piccoli e più gestibili nelle successive lavorazioni, questo processo non solo riduce le dimensioni del materiale ma ne aumenta anche la superficie al fine di **rendere più semplice la pulizia** e la preparazione del materiale per la fusione. I metodi di pulizia comprendono **bagni chimici**, tecniche di **sabbatura** e altri processi di **pulizia industriale**¹⁰⁶.

Figura 92 - Schema del processo di riciclo del titanio



¹⁰⁵. Machine MFG, 2025

¹⁰⁶. Caldwell, 2024

Il titanio ridotto in piccoli pezzi viene poi sottoposto a **fusione** per produrre lingotti di alta qualità, in questo caso si impiegano due diverse tecniche di fusione:

- **Scioglimento ad arco sotto vuoto (VAR):** che utilizza un arco elettrico per sciogliere il titanio nel vuoto, aiutando la rimozione di impurità.
- **Remelting del focolare a freddo a fascio di elettroni (EBCHR):** che prevede la fusione del titanio in un forno a focolare freddo attraverso l'impiego di un fascio di elettroni, anche in questo caso il processo avviene sottovuoto, il che aiuta a **raffinare il materiale** rimuovendo i contaminanti come nel caso del VAR.

Il vantaggio della **seconda tecnica** rispetto alla prima è quello di produrre **grossi lingotti con inclusioni minime**, ciò lo rende ideale per applicazioni di **alta qualità**¹⁰⁷.

I forni specializzati utilizzati in questa fase sono progettati per mantenere l'integrità del materiale, nel caso dell'EBCHR, il fascio di elettroni può essere impiegato per un **controllo preciso del processo di fusione**. Il titanio fuso può poi essere raffinato per ottenere **purezza e consistenza desiderate**, in particolare attraverso cicli ripetuti di fusione¹⁰⁸.

¹⁰⁷. Machine MFG, 2025

¹⁰⁸. Caldwell, 2024

È possibile **aggiungere**, durante la fusione, **altri metalli**, come alluminio e vanadio, per produrre **leghe specifiche** adatte a diverse applicazioni.

L'ultima fase del processo prevede la **colatura** del titanio fuso in forme utilizzabili per ottenere semilavorati definitivi, questo processo è chiamato **rifusione** e produce lingotti, fogli, fili ed aste, semilavorati utilizzati in aziende appartenenti a diversi settori industriali.

Figura 93 - Titanio colato in stampo



Esistono altre **tecniche alternative** che propongono nuovi metodi innovativi per riciclare il titanio in modo efficace. In particolare la tecnica di **deformazione plastica grave (SPD)** che, come l'**Equal Channel Angular Pressing (ECAP)**, permette di **perfezionare la microstruttura** del titanio senza dover ricorrere ad un lungo processo di fusione. Poi l'**estrusione ad attrito**, un processo che si svolge in **fase solida** e che trasforma gli sfridi di titanio in fili o billette, il che lo rende perfetto per applicazioni ad alta precisione come la fabbricazione additiva. Infine la tecnica **Granulazione - Sinterizzazione - Deossigenazione (GSD)**, indicata per il riciclo delle **polveri** di titanio al fine di produrre granuli sferici a basso contenuto di ossigeno. Quest'ultimo è un processo particolarmente vantaggioso laddove si debbano ottenere **polveri di titanio ad alta purezza**.

Ogni tecnica ha le sue caratteristiche e i suoi settori di applicazione preferiti, infatti ciò che potrà essere riciclato più o meno bene con un determinato processo, non è detto possa essere trattato allo stesso modo con un altro e viceversa. Utilizzano tutti tecnologie differenti, ma con principi comuni alla base, quasi tutti **preferiscono materiali di input differenti e generano output altrettanto differenti**¹⁰⁹.

Argomento comune per tutte le tipologie di riciclo che vogliono ottenere materiale ad alto grado di purezza è la **qualità di deossidazione degli scarti**, una sorta di pulizia del materiale dalle tracce di ossido più o meno invadenti

che si sono formate durante il suo utilizzo esposto all'ambiente. I **processi di deossidazione** hanno fatto progressi negli ultimi anni, si possono differenziare 3 diversi metodi:

- **Deossidazione Elettrochimica a Sali Fusi:** processi che sfruttano sale fuso di alogenuro di calcio o il processo FFC Cambridge e offrono la possibilità di ottenere **titanio metallico direttamente dal biossido di titanio**. Tuttavia è ancora in via di sviluppo, a causa di difficoltà nella **diffusione dell'ossigeno** all'interno degli elettrodi solidi e **problemi di stabilità** per la membrana permeabile all'ossigeno.
- **Processo di Deidrogenazione Dell'idrogeno (HDH):** nuovo metodo emergente di deossidazione, si attua **facendo reagire idrogeno e ossigeno nei rottami** per formare vapore acqueo. Nonostante stia dando buoni risultati in laboratorio, deve ancora essere affinata la tecnica per la rimozione completa dell'idrogeno e l'elevato contenuto di ossigeno al fine di poter essere impiegato su scala industriale.
- **Riduzione Termica Combinata con Fusione di Leghe di Titanio:** attraverso la selezione di **agenti deossidanti e scorie deossidanti** appropriati si riduce efficacemente il contenuto di ossigeno nei rottami, approccio ad ora efficiente per incrementare le prestazioni di titanio riciclato¹¹⁰.

Le **applicazioni principali** in cui il titanio riciclato viene impiegato sono molto simili a quelle del titanio metallico da materiale vergine. L'industria **aerospaziale** utilizza questo materiale per componenti leggeri e durevoli, aiutando a **ridurre i costi** ma mantenendo le alte prestazioni richieste. Nel settore **medico** viene utilizzato nelle protesi, in impianti dentali o strumenti chirurgici grazie alla sua **biocompatibilità** anche dopo il riciclo, in questo caso mantenerne la **purezza** è fondamentale per garantire le prestazioni. Nell'industria **automobilistica** e nell'**elettronica di**

consumo è impiegato in componenti di scarico o nel motore, grazie alla sua leggerezza e resistenza alla corrosione, ma anche in **smartphone e laptop** perché dona all'oggetto una sensazione premium e riduce l'**impatto ambientale**. Anche **articoli sportivi e gioielli di alta qualità** fanno uso di titanio, grazie alla sua durata e al suo fascino estetico è perfetto per articoli come mazze da golf, biciclette o orologi, anche in questo caso **il riciclo incrementa la sostenibilità dei processi senza compromettere la qualità** del prodotto¹¹¹.



Figura 94 - Orologio realizzato con titanio riciclato

¹⁰⁹. Machine MFG, 2025
¹¹⁰. ST-Titanium, 2024

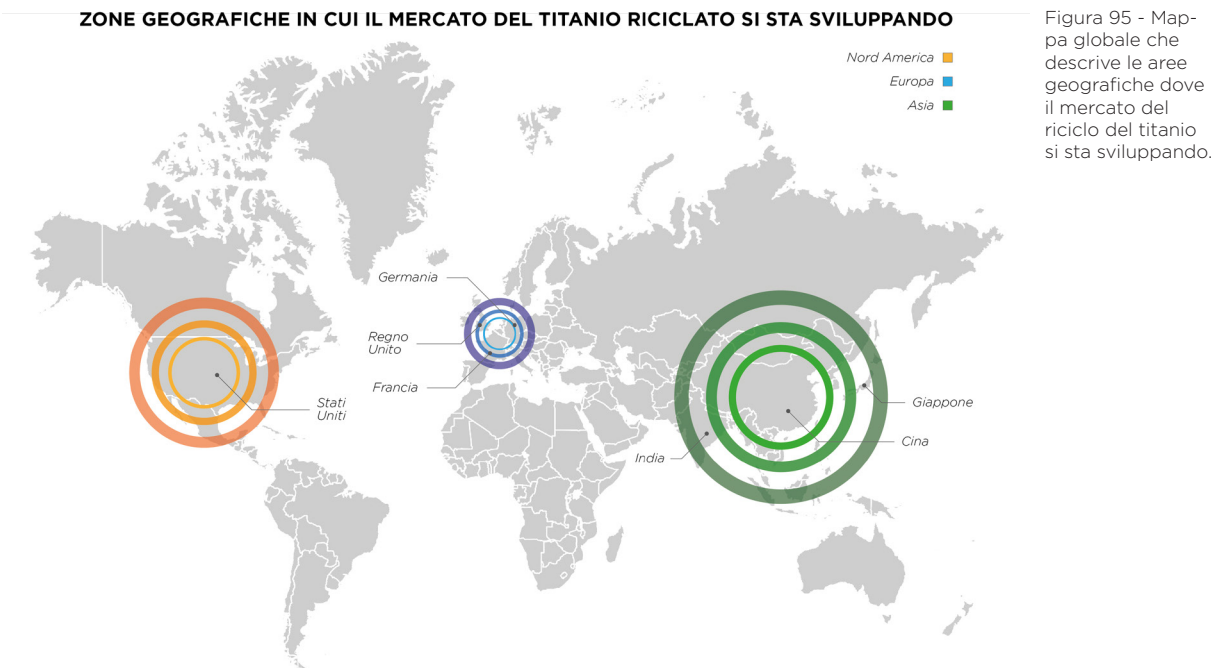
¹¹¹. Machine MFG, 2025

5.4 Sfide e prospettive future

Dati i vantaggi che il riciclo di questo materiale porta, esistono diverse **zone geografiche** dove il mercato di questa materia seconda si sta sviluppando, in particolare l'**Asia** e il **Pacifico** risultano focolai di crescita di queste tecniche, **Cina**, **India** e **Giappone** stanno ampliando la loro capacità di riciclare il titanio a supporto di diversi settori industriali, questo grazie ai notevoli **incentivi governativi** per le attività sostenibili e il rapido processo di industrializzazione di queste zone.

Anche il **Nord America** è un centro di innovazione e leadership, gli **Stati Uniti** sono il **centro dell'innovazione mondiale** grazie a varie aziende leader nel settore aerospaziale e della difesa. Dato il grande numero di imprese sul loro mercato, il riciclaggio del titanio è una pratica apprezzata per perseguire

sia **obiettivi economici che ambientali**. Anche l'**Europa** ha la sostenibilità in prima linea, molti paesi prevedono che le rigide **normative ambientali** e la forte attenzione verso le iniziative di **economia circolare** porteranno all'aumento delle pratiche di riciclaggio, ci sono già molti paesi come **Germania**, **Francia** e **Regno Unito** che hanno stabilito **standard industriali** per l'utilizzo di materiali in modo sostenibile¹¹². Nonostante i numerosi vantaggi portati dalle pratiche di riciclaggio del titanio, esistono diverse **sfide** che questi processi devono affrontare per entrare a far parte dello scenario industriale globale, quali i grossi **costi di avvio delle strutture**, le difficoltà nella separazione del materiale dalle **impurità**. Gli sviluppi futuri mirano a risolvere tutti



¹¹². Jha, 2024

questi problemi, in modo da rendere il **riciclaggio del titanio più accessibile ed economicamente sostenibile** per un'ampia gamma di applicazioni¹¹³.

Più nello specifico le **sfide principali** che il riciclo di titanio deve affrontare sono le seguenti:

- **Rischi di contaminazione:** gli standard prestazionali del titanio lo rendono estremamente sensibile alla contaminazione, in quanto la sua **qualità** può essere facilmente **compromessa** dalla presenza di **materiali estranei**, soprattutto nelle sue applicazioni più critiche. Per garantire **purezza** è necessario padroneggiare tecniche di filtrazione avanzate, tecniche di separazione e attente e rigorose procedure di controllo qualità. Questi processi, oltre ad allungare i **tempi** di riciclaggio, ovviamente ne aumentano anche i **costi**, rendendo il lavoro molto più impegnativo.
- **Raccolta e logistica:** il titanio è spesso inserito in **sistemi più complessi** che comprendono diversi materiali, come i **compositi** negli aerei, o in **componenti rinforzati**, come nei macchinari industriali. La separazione del titanio da questi non è semplice e richiede attrezzature specializzate nella gestione di questi materiali in modo efficiente, ma anche **manodopera specializzata** in queste pratiche. Inoltre, la **pianificazione logistica** di queste lavorazioni, che comprende

¹¹³. Machine MFG, 2025

¹¹⁴. Caldwell, 2024

anche il trasporto in siti differenti, rende il tutto più lungo e più complesso¹¹⁴.

- **Importanti investimenti iniziali:** La costruzione di un impianto di riciclaggio comporta elevati impieghi di denaro, ciò funge spesso da **barriera all'ingresso nel mercato**. Attrezzature specializzate, tecnologie avanzate e infrastrutture robuste sono necessarie per la gestione delle proprietà uniche del materiale e le difficoltà che il processo pone di fronte a chi lo porta a compimento.
- **Risorse scarse:** la scarsità del titanio stesso è una sfida per l'ingresso sul mercato, a differenza di altri metalli, il titanio è **raro a causa delle sue applicazioni specializzate** e della sua **produzione limitata**. Inoltre, il ciclo di vita dei prodotti è molto lungo, facendoli entrare nel ciclo di riciclaggio molto tardi. Altri aspetti come le risorse di approvvigionamento frammentate si aggiungono a tutto ciò e i suoi volumi di scarti ancora relativamente piccoli e distribuiti in diversi settori rende l'intero processo costoso e inefficiente. Questi fattori influenzano i **prezzi, molto volatili**, tra produttori e riciclatori, che portano ad una restrizione della pianificazione ed ad un conseguente aumento dei costi complessivi di produzione.

- **Standard industriali:** l'assenza di **processi standardizzati** e di **parametri** di riferimento di **qualità** per il titanio riciclato porta a **variabilità** degli output, questo rende difficile per i produttori fare affidamento su materiali riciclati.

*“La strada da percorrere sembra molto promettente per il mercato del riciclaggio dei rottami di titanio, ma richiede il sostegno di politici, innovatori e imprese. Poiché il processo di riciclaggio del titanio aiuta a ridurre l'impatto ambientale e riduce anche le emissioni minerarie e dei prodotti. Questo è un passo vantaggioso per tutti che non solo avvantaggia l'ambiente, ma aiuta anche le industrie e i consumatori a lungo termine.”*¹¹⁵

Quello che si sta cercando di fare è trovare un **equilibrio** tra **interessi economici e ambientali**, la sfida è proprio bilanciare questi due motori di crescita. La garanzia di **attività estrattive responsabili** di fianco alla promozione di **pratiche sostenibili** sono indispensabili per la sostenibilità economica a lungo termine dell'industria. L'**innovazione continua** sarà indispensabile per ridurre al minimo l'impatto ambientale dell'estrazione del titanio e trovare il punto di equilibrio che renda **efficace ed efficiente la pratica di riciclaggio**¹¹⁶.

¹¹⁵. Jha, 2024
¹¹⁶. Artizono, 2025

5.5 Riciclare il biossido di titanio

Quanto detto a proposito del titanio metallico, vale anche per il biossido di titanio, la cui produzione, ma non solo, richiede **grandi quantitativi di energia**, è quindi doveroso dare spazio a nuove soluzioni che ne permettano il **riciclo** a partire da prodotti esausti che altrimenti sarebbero scartati e che danno origine a **materie prime-seconde di alta qualità**, in alcuni casi addirittura migliori ad alcuni prodotti commerciali derivanti da materia prima vergine. Una nuova tecnica studiata e sviluppata in **Cina**, mira a recuperare biossido di titanio, in particolare nella forma di **nanoparticelle di anatasio e rutilo**, a partire da **catalizzatori SCR esausti**. Questi catalizzatori, utilizzati a livello industriale, perdono la loro efficacia dopo 3-5 anni e vengono solitamente smaltiti come rifiuti pericolosi. Questa pratica provoca **due problemi**, il loro smaltimento improprio che causa la dispersione in ambiente di **composti tossici**, in particolare quelli contenenti vanadio, dall'altro lato lo **spreco di biossido di titanio**, importante risorsa per i motivi esplicitati precedentemente.

Questo nuovo metodo **combina due processi**, il primo di **sinterizzazione a bassa temperatura** e il secondo di **lisciviazione selettiva**. Il fulcro sta nell'utilizzo di due sali alcalini: l'**idrossido di sodio**, che rende solubili alcuni contaminanti del catalizzatore agevolandone l'eliminazione, e il **carbonato di sodio**, che evita l'agglomerazione delle particelle che altrimenti renderebbe difficile l'estrazione di biossido di titanio, favorendo la formazione di un **residuo poroso in polvere**.

Il processo opera a circa **500°C**, temperatura molto più bassa rispetto a quelle dei metodi pirometallurgici tradizionali, **riducendo il consumo energetico del 30%**.

Il processo permette il recupero e riutilizzo totale dei reagenti chimici grazie ad un **ciclo chiuso**. Attraverso questo processo è stato possibile ottenere nanoparticelle di biossido di titanio con un **grado di purezza superiore al 99%**, migliore di alcuni prodotti commerciali particolarmente apprezzati per le loro proprietà fotocatalitiche.

Figura 96 - Catalizzatore SCR



Il recupero tramite questa via non solo **preserva risorse** limitate come il titanio, ma riduce anche l'**impatto ambientale** di processi da materia prima vergine. Si stima che il **riciclo di una tonnellata** di biossido di titanio eviti l'emissione di **circa 4,5 tonnellate di CO2**. Inoltre le nanoparticelle mantengono le loro caratteristiche pressoché invariate, permettendone l'immediato impiego a livello industriale ad esempio nella purificazione di aria o acqua, promuovendo un'economia più circolare.

Questo processo è anche in linea con gli **obiettivi di sviluppo sostenibile** (SDGs) numero **12**, di consumo responsabile, numero **13**, per il clima, numero **9**, per l'innovazione industriale, e apre le porte alla ricerca di un modello analogo anche per altre filiere industriali¹¹⁷.

È importante adesso valutare il **comportamento delle proprietà fotocatalitiche** prima e dopo il processo di riciclo, perciò prendiamo in esame uno studio portato avanti da diversi **centri studi situati in Oriente** che in particolare si è concentrato sulla **decrescita dell'efficienza fotocatalitica per nanotubi di titanio riciclati** e nanotubi di biossido di titanio **caricati con argento** in soluzione acquosa.

Questi nanotubi sono stati **funzionalizzati** tramite **foto deposizione** di argento per migliorarne le qualità fotocatalitiche, lo studio descrive la presenza di nanotubi di biossido di titanio di lunghezza media pari a 2 micron e diametro tra 90 e 120 nanometri costituiti **esclusivamente da fase anatasio**.

¹¹⁷. Lu et al., 2025

¹¹⁸. Wint et al., 2020

Lo studio ha mostrato che i campioni **caricati con argento** hanno raggiunto un'**efficienza di fotodegradazione del 98%** e una velocità di reazione notevolmente superiore rispetto a quelli **non caricati**, che hanno raggiunto solo l'**83%** di efficacia. Nonostante il dislivello iniziale, questo si assottiglia nel corso dei cicli di riciclo, infatti i nanotubi non caricati **dopo otto cicli** hanno avuto una **riduzione** dell'efficienza pari all'**8,4%**, mentre **quelli caricati** di argento hanno perso il **18,4%** della loro efficacia **dopo sei cicli**.

Un'analisi chimica superficiale mediante **spettroscopia fotoelettrica a raggi X** ha rivelato che nei nanotubi non caricati riciclati, la perdita di efficacia è dovuta all'**accumulo di contaminanti carboniosi in superficie** che interferiscono con l'azione fotocatalitica. Nei **nanotubi caricati** riciclati invece, ci sono **due cause**, la prima è la **contaminazione da carbonio**, come negli altri, ma si nota anche una **lisciviazione progressiva dell'argento**, che riduce il suo contributo all'efficienza fotocatalitica.

Da questo studio è interessante osservare come l'inserimento di **nanoparticelle di argento** in nanotubi di titanio **migliori le presentazioni** fotocatalitiche per la degradazione di inquinanti organici. Questo però **non è duraturo** nel lungo termine dopo alcuni cicli di riciclo. La **sfida** in questo senso è quindi **comprendere** in modo approfondito i **meccanismi** che determinano il **degrado** del biossido di titanio dal punto di vista fotocatalitico, al fine di **svilupparne di più durevoli e industrialmente sostenibili**¹¹⁸.

5.5.1 Il caso della vernice

Il biossido di titanio, come detto precedentemente, è largamente utilizzato come pigmento per la sua capacità di conferire **bianchezza, coprenza e lucentezza** alle vernici, per questo è stato oggetto di studi mirati al suo **recupero dai rifiuti di vernice**.

Inizialmente, è stato **riciclato insieme ad altri pigmenti** e reintrodotta in nuove formulazioni, i risultati hanno mostrato un **calo di qualità**, in particolare per la presenza di **aggregati visibili** che ne compromettevano la resa estetica.

Successivamente, uno studio ha **isolato il biossido di titanio** come unico pigmento **perfezionando il processo** di riciclo includendo un lavaggio per rimuovere i residui salini, riuscendo ad ottenere un pigmento dalle **caratteristiche simili a quello vergine**.

Tuttavia, la riciclabilità del biossido di titanio si è rivelata dipendere dalla sua **chimica superficiale**, in grado di influenzare le interazioni con gli altri componenti della vernice, in particolare durante la formazione del film asciutto.

In un test, **due vernici identiche tranne che per il tipo di pigmento** (riciclato o vergine) sono state confrontate. Le **differenze** tra le due vernici si sono rivelate **quasi nulle** nel prodotto **liquido**, con solo una leggera variazione nella **viscosità**, inoltre facilmente correggibile. Nei **film asciutti**, invece, la vernice contenente **biossido di titanio riciclato** ha mostrato un **potere coprente e una lucentezza inferiori**, un aspetto rilevante in molte applicazioni.

Nonostante queste criticità, il pigmento riciclato si è dimostrato **funzionale** in contesti dove la **lucentezza non è prioritaria**, come nel caso di vernici per pareti o soffitti, oppure su superfici ruvide o poco visibili. La sua integrazione totale nella formulazione ha portato ad un calo delle prestazioni, ma una **parziale sostituzione potrebbe essere un buon compromesso**.

Quindi, il riciclo del biossido di titanio nelle vernici è tecnicamente fattibile e promettente dal punto di vista industriale. Anche se le **prestazioni non eguagliano ancora quelle del materiale vergine**, i risultati sono incoraggianti, soprattutto se il pigmento viene impiegato in formulazioni adattate o in applicazioni meno esigenti. La **sfida** principale rimane il **controllo dell'aggregazione**, che potrebbe essere superata con ulteriori studi¹¹⁹.

Figura 97 - Vernice bianca con biossido di titanio



¹¹⁹. Karlsson et al., 2019

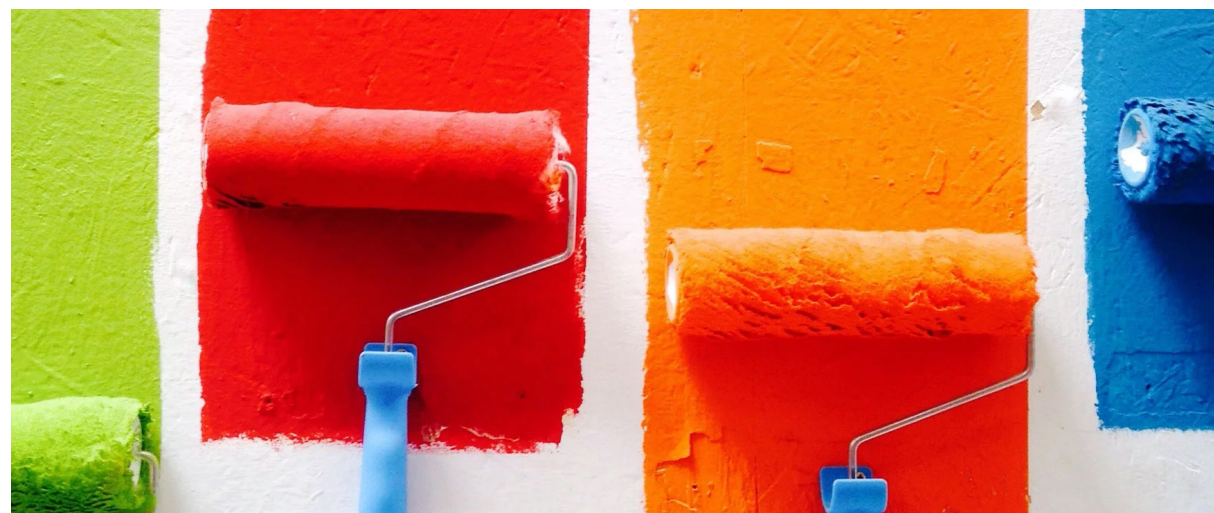
Uno studio successivo ha approfondito i metodi di recupero del biossido di titanio da vernice contenente **pigmento di rutilo rivestito in ossido di alluminio**, in particolare utilizzando un processo termico di **pirolisi** per estrarlo dalla matrice polimerica. In ricerche precedenti si era ottenuta una miscela grezza di biossido di titanio e altri estensori, mentre in questo caso, si è ottenuta una **formulazione semplificata** per analizzare i **dettagli** di questo **processo di riciclo termico** e le **proprietà** del **pigmento** stesso.

Da ciò è emerso che il **nucleo cristallino di rutilo** e il **rivestimento** di ossido di alluminio sono rimasti **strutturalmente intatti** dopo il processo, ciò che **varia** è la **distribuzione dimensionale delle particelle**, che risulta leggermente più ampia, oltre ad alcuni altri fattori

che presentano leggere variazioni, indicando un **cambiamento della chimica superficiale**, dovuto probabilmente a una riduzione dei gruppi ossidrilici.

Questo a dimostrazione che anche se vengono mantenute intatte le strutture cristalline principali, il processo di **riciclaggio modifica le proprietà superficiali** del biossido di titanio, influenzando la sua reazione con altri elementi della vernice. Al fine di riutilizzare efficacemente il biossido di titanio in nuove formulazioni, è necessario **comprendere le dinamiche di queste variazioni**, in quanto, in prospettiva, un riciclo efficiente di questa materia prima può contribuire in modo molto significativo alla **sostenibilità** del settore dei rivestimenti portando a grossi **benefici economici e ambientali**¹²⁰.

Figura 98 - Vernice colorata con biossido di titanio



¹²⁰. Karlsson et al., 2018

5.6 Una tecnica non ancora matura

Il riciclo del titanio e del biossido di titanio è un ambito di ricerca in **evoluzione continua**, le cui prospettive di applicazione industriale stanno continuando a suscitare crescente interesse. Entrambi i materiali possiedono **proprietà uniche** come abbiamo visto fino ad ora e proprio per il loro potenziale e la loro diffusione su larga scala, la possibilità di recuperarli in modo efficace e sostenibile risulta di fondamentale importanza sia dal punto di vista economico che ambientale.

Le ricerche condotte finora mostrano risultati sempre più incoraggianti, le **tecniche di recupero** del titanio da sfridi di lavorazione o prodotti giunti a fine vita hanno dimostrato di poter **ridurre** sensibilmente l'**attività estrattiva** di materie prime, mentre i processi per il riciclo del TiO_2 stanno mostrando nuove opportunità di valorizzazione e riutilizzo degli scarti industriali.

Tuttavia, nonostante gli obiettivi raggiunti, è evidente che siano da affrontare ancora **sfide significative**.

In particolare, gli investimenti necessari, la scalabilità dei processi, i costi energetici, la gestione dei semilavorati e la necessità di standard qualitativi elevati a livello industriale rappresentano ancora fattori determinanti per il passaggio dalla **fase di testing** a quella industriale su larga scala.

Sono necessari ulteriori **investimenti in ricerca e sviluppo**, così come l'implementazione di filiere di recupero integrate e progettate ad hoc per i processi produttivi esistenti.

Il potenziale del riciclo del titanio e del suo biossido è enorme e si inserisce perfettamente tra gli obiettivi di economia circolare e di riduzione dell'impatto ambientale. L'**innovazione tecnologica** e la collaborazione tra **industrie, università e centri di ricerca** saranno fattori chiave per trasformare questo potenziale in soluzioni affidabili, competitive e sostenibili nel lungo periodo.



6.ARREDO URBANO: BIOSSIDO DI TITANIO PER LA SOSTENIBILITÀ E IL BENESSERE PUBBLICO

6.1 Risultati della ricerca: dal titanio in architettura al materiale cementizio per il prodotto

Nel terzo capitolo abbiamo iniziato parlando del **titanio in architettura e design**, di come ha trovato spazio fin dai primi anni '70 grazie alle sue **caratteristiche meccaniche** unite alla sua **leggerezza** e alla sua **biocompatibilità** se posto a contatto con l'ambiente. Di pari passo, l'alto grado di **lavorabilità**, plasticità e le geometrie possibili, hanno permesso la diffusione di questo materiale nell'**architettura e nel design moderni**¹²¹. Oltre alle sue caratteristiche meccaniche, sono di fondamentale importanza le **caratteristiche chimiche**, in particolare la capacità di formare un **film di ossido** in superficie se esposto all'aria che ne garantisce durabilità. Ciò, unito alla possibilità di essere riciclato al 100% senza una perdita significativa di proprietà, gli ha permesso di guadagnarsi il nome di "**materiale energeticamente sostenibile**"¹²².

Si è riscontrata tuttavia una **criticità** che va ad intaccare i vantaggi di questo materiale, il **costo**, ancora molto elevato data la scarsità in natura di materia prima di elevata qualità, e la necessità di manodopera specializzata per la sua lavorazione, aspetti che si aggiungono ai processi energivori per ottenere semilavorati e prodotti finiti. Le applicazioni più diffuse spaziano dalle **facciate**, ai **rivestimenti**, alle **coperture**, per la sua leggerezza, le proprietà di **autopulizia** e **fotocatalisi**; ma lo si ritrova anche in **componenti strutturali**, soprattutto di piccole dimensioni per le sue eccellenti caratteristiche meccaniche e di resistenza in ambienti aggressivi.

Grazie ai suoi **caratteri estetici** uniti alle proprietà chimiche lo si ritrova anche in monumenti, sculture e opere d'arte¹²³.

Nel quarto capitolo si sono evidenziate invece le caratteristiche del **biossido di titanio**, un composto chimico inorganico derivante da rutilo e anatasio, diffusosi per le sue eccellenti proprietà fotocatalitiche, che lo rendono perfetto per applicazioni di **purificazione ambientale**. La sua **opacità** e capacità di **riflessione** della luce, insieme alle proprietà fotocatalitiche, gli hanno garantito un posto in prima fila nell'industria dei **rivestimenti**, in cui circa i 2/3 dei pigmenti di colore bianco e altre tonalità chiare a livello mondiale, contengono biossido di titanio¹²⁴.

Si è poi raccontato il **processo produttivo** per ottenere il biossido di titanio che si effettua a partire da ilmenite e rutilo, due minerali contenenti titanio. Ciò può avvenire attraverso due metodi, **via solfato o via cloro**, articolati in diverse fasi¹²⁵. Oltre ai due processi tradizionali, stanno andando sviluppandosi metodi innovativi al fine di **ridurre l'impatto energetico e ambientale** di questi processi. L'obiettivo è quello di ottenere vantaggi dal punto di vista produttivo rispetto ai metodi tradizionali ma allo stesso tempo soddisfare gli **standard di purezza** commerciali che lo rendono utilizzabile¹²⁶. Il potere fotocatalitico lo ha reso perfetto anche per applicazioni nel **settore della disinfezione e sanificazione**, applicato sia in ambienti indoor che outdoor, anche molto sensibili come

strutture mediche, ospedaliere e alimentari. La **fotocatalisi** si traduce nella decomposizione di sostanze organiche e inorganiche presenti in atmosfera semplicemente grazie all'esposizione alla luce del sole. Queste proprietà sono state confermate da numerosi **test** come quello di **ARPA Lombardia** che ne ha dimostrato l'efficacia se additivato a **materiale cementizio** per sedi stradali e marciapiedi, ma anche in ambienti indoor, come nel caso di **Barilla Spa** che ha applicato in alcuni **ambienti di produzione** dei suoi prodotti alimentari un'**Ecopittura fotocatalitica** contro NOx, SOx e VOC, ottenendo risultati di **riduzione anche del 100%**¹²⁷. Inoltre, come specificato dal **CNR**, i prodotti di questa degradazione sono sali minerali e calcare completamente **ecocompatibili** e **non nocivi**, a dimostrazione della completa ecosostenibilità di quest'attività¹²⁸.

La seconda questione importante che il biossido di titanio riesce a risolvere è la **riduzione dell'effetto isola di calore urbano** che tende a creare situazioni di vita non sostenibili. Quest'effetto è causa di grosse problematiche specialmente nei **paesi in via di sviluppo**, dove mancano le risorse per fronteggiare le alte temperature soprattutto nei mesi più caldi dell'anno. È proprio in questi luoghi che si sono visti i primi interventi per fronteggiare questo problema. Una delle conseguenze dirette di quest'effetto è la **riduzione della qualità dell'aria e dell'acqua**, anche in questo caso il biossido di titanio si è rivelato una soluzione, grazie alle sue **proprietà riflettenti** riesce a ridurre



Figura 99 - Logo Million Cool Roofs Challenge

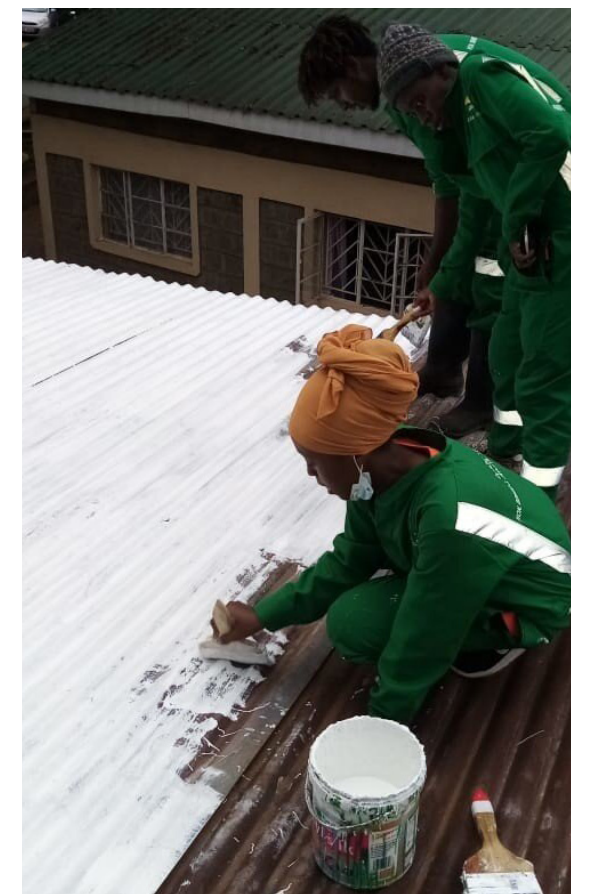


Figura 100 - Applicazione della vernice contenente biossido di titanio sui tetti di Nairobi

121. Signer Titanium - Fogli architettonici in titanio puro, 2023
122. Cantori Architectural Skins, 2020
123. Triply Circle Titanium - Prodotti in titanio per l'edilizia, 2024
124. Faichim, 2023

125. Caprioli, 2020
126. Middlemas et al., 2013

127. Guerra, 2014
128. Silvestrin, 2021

l'accumulo di calore interno e di conseguenza la temperatura interna degli edifici fino a più di 10°C. Di pari passo le riduzioni della qualità di aria e acqua causate da questo fenomeno possono essere fronteggiate grazie alle **proprietà fotocatalitiche** del biossido di titanio, secondo i principi raccontati precedentemente¹²⁹.

Esempio emblematico di quest'applicazione è la **Million Cool Roofs Challenge**, che ha permesso l'implementazione dei cosiddetti **"tetti freddi"** nella baraccopoli di **Nairobi**¹³⁰.

Si sono poi analizzate le applicazioni del TiO₂ in vernici, cementi e ceramiche, è risultato che quella più promettente e sperimentata è in forma di **materiale cementizio** contenente biossido di titanio. I costi di questi materiali sono leggermente più elevati rispetto a quello tradizionale, con un **incremento** che oscilla **tra il 30% e il 40%**. La prima applicazione concreta di questa soluzione in Italia è la **Chiesa Dives in Misericordia** a Roma, progettata da **Richard Meier** nel **1996**. Successivamente il progettista si è spostato nel **laboratorio sperimentale di Italcementi** dove si trova uno degli esempi più emblematici per quanto riguarda il potere fotocatalitico di questa categoria di materiali, il **Kilometro Rosso di Bergamo**¹³¹. Anche Giappone e Stati Uniti hanno sviluppato soluzioni che sfruttano questi materiali, consolidandone le caratteristiche di **sostenibilità, benessere pubblico e privato**¹³². Attraverso l'implementazione di biossido di titanio all'interno di materiale



Figura 101 e 102 - Logo e sede Kilometro Rosso Innovation District



Figura 103 - Spazi interni sede Kilometro Rosso Innovation District

cementizio, quest'ultimo acquisisce una **duplice funzione, costruttiva e ambientale**, grazie a quest'ultima chiamati **cementi "mangia smog"**, inoltre, grazie al potere superidrofobo, questi materiali sono in grado di **autopulirsi** semplicemente grazie al dilavamento delle piogge dopo l'azione fotocatalitica¹³³.

Questo fenomeno è chiamato **"effetto loto"** ed è dovuto alla struttura gerarchica della superficie cementizia che forma un sottile strato d'aria tra acqua e materiale, impedendo il contatto reciproco, e **permettendo all'acqua di scivolare via senza penetrare in esso** portando con sé i residui dell'azione fotocatalitica¹³⁴.

Con il quinto capitolo si sono affrontate le questioni di **sostenibilità** dei **processi produttivi** del titanio e del suo biossido, partendo dall'estrazione fino alla produzione del prodotto finale, valutando alcune **tecniche innovative di riciclo**. In particolare, i processi minerari risultano essere altamente energivori con conseguenti impatti dal punto di vista ecologico.

Il titanio è considerato il **"metallo del futuro"** per il suo ruolo chiave in diversi settori industriali, per questo gli studi stanno promuovendo la **ricerca di processi di riciclo efficaci ed efficienti**¹³⁵. L'aumento dei suoi impieghi industriali fa prevedere un notevole incremento della quantità di **rifiuti da lavorazioni**, soprattutto in quelle che coinvolgono macchine utensili per sottrazione per componenti medio-grandi, dove le **perdite di materiale** raggiungono

facilmente il **90%** del materiale di partenza. È chiaro che il riciclo del titanio abbia dei vantaggi sia dal punto di vista ambientale che economico. Il dato che maggiormente salta all'occhio è il **risparmio energetico** dato dal riciclo di questo materiale, che riduce il consumo energetico del **95%**. Non è da sottovalutare nemmeno la **scarsità** di questo materiale in natura nelle sue forme di maggiore qualità, il riciclo costituisce un'opportunità per incrementare una futura diffusione del titanio a livello industriale¹³⁶.

Dal punto di vista economico, la **riduzione** generale dei **costi** produttivi è pari al **60-70%**, tuttavia il riciclaggio non è un processo semplice, richiede **manodopera specializzata** e una **qualità** della **materia prima-seconda** molto elevata, date le applicazioni che questi prodotti hanno.

Sono noti diversi **"driver"** che promuovono la diffusione delle pratiche di **riciclo**, tra questi troviamo le realtà industriali che maggiormente utilizzano questo materiale, ma anche governi e società che promuovono l'**economia circolare**¹³⁷.

I processi di riciclo per ora sviluppati applicano metodi sia **fisici** che **chimici** e si articolano in diverse fasi. Le principali sono la raccolta del materiale di scarto, che può derivare da diversi settori, la separazione, la classificazione dell'aria e la selezione manuale. Si procede poi alla pulizia, contestualmente alla quale avviene la triturazione, dopodiché si passa alla fusione, che può avvenire attraverso differenti metodologie, e alla colatura in stampi

¹²⁹. Rutledge et al., 2024

¹³⁰. TDMA - How titanium dioxide is helping to keep Kenyan homes cool, 2025

¹³¹. Belpoliti, 2009

¹³². Guerra, 2014

¹³³. Michele, 2023

¹³⁴. Ausiliello, 2025

¹³⁵. Caldwell, 2024

¹³⁶. Margiov, 2020

¹³⁷. Knight, 2018



Figura 104 - Trucioli da lavorazione di titanio

138. Caldwell, 2024
 139. Machine MFG, 2025
 140. ST-Titanium, 2024
 141. Machine MFG, 2025

per ottenere **semilavorati**¹³⁸. Parallelamente ai metodi più tradizionali si stanno studiando **nuovi processi** per il riciclo che tuttavia richiedono ancora ulteriori studi per diventare efficaci e paragonabili a quelli tradizionali¹³⁹. Il passaggio più difficile ma di maggior importanza per quanto riguarda la **purezza** del risultato del riciclo è la **de-ossidazione degli scarti**, che mira alla rimozione delle tracce di ossido immagazzinate dal materiale durante il suo ciclo di vita a contatto con l'aria¹⁴⁰. Il **mercato** del titanio riciclato, come quello dei metalli riciclati in generale, è in via di sviluppo in particolare in **Asia** e nel **Pacifico**, anche il **Nord America**, essendo la sede di un gran numero di imprese che hanno a che fare con questo materiale, è interessato allo sviluppo di questo mercato. In **Europa** negli ultimi decenni la **sostenibilità è in prima linea** e la continua diffusione di normative ambientali non fa altro che aumentare l'interesse verso le pratiche di riciclo in generale, comprese quelle relative al titanio¹⁴¹.

Recycled Metal Global Market Report 2025

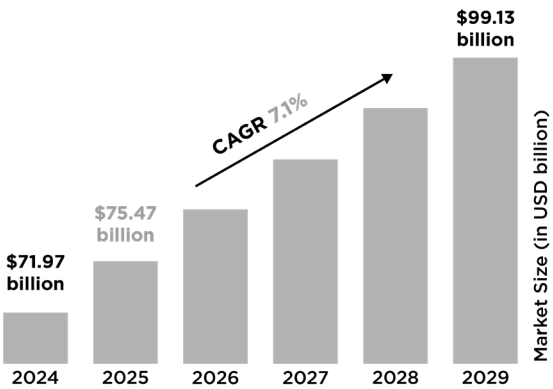


Figura 105 - Andamento del mercato globale relativo ai metalli riciclati

Nonostante l'interesse verso questi argomenti, esistono diverse **sfide** che ostacolano la diffusione di questi processi. In primo luogo troviamo gli elevati **costi di avvio** e le difficoltà nella **separazione dalle impurità**, ma le difficoltà non si riassumono solo in queste due problematiche. L'obiettivo è quindi raggiungere un **equilibrio tra interessi economici e ambientali** che renda questi processi efficaci, efficienti e sostenibili economicamente a lungo termine¹⁴². Anche per il biossido, come per il titanio metallico, si stanno valutando **nuove pratiche** di riciclo, esistono diversi studi che ne hanno verificato la possibilità e la qualità dei risultati, in particolare un **progetto cinese** per quanto riguarda il **riciclo** del materiale¹⁴³. Sempre in Oriente **diversi centri di studi** in collaborazione hanno valutato la **conservazione dell'efficienza fotocatalitica**, ottenendo risultati positivi in entrambi i casi, ma che ovviamente hanno ancora bisogno di essere **ottimizzati**¹⁴⁴.

Il percorso della ricerca fa comprendere come il comportamento del biossido di titanio inserito all'interno di **materiali da costruzione** costituisca una risorsa molto importante per promuovere la **sostenibilità e il benessere pubblico e privato**. Anche le tecniche di **riciclo** mostrano un potenziale importante ma attualmente risultano ancora **immature** per poter essere inserite all'interno di una filiera industriale su larga scala. La loro continua evoluzione gli permetterà di inserirsi nel mercato appena si raggiungeranno gli standard necessari. Per quanto riguarda il **"Dove agire"**, considerando il **materiale cementizio** come la migliore soluzione attualmente sul mercato e affidandosi al **settore pubblico**, colui che dovrebbe essere il maggiore interessato alla sostenibilità e il benessere della collettività, l'**arredo urbano** si costituisce come il miglior ambito progettuale all'interno del quale operare utilizzando **materiale cementizio fotocatalitico**; nel prossimo paragrafo si approfondirà proprio questo argomento e si mostreranno casi studio che confermano quanto sostenuto fino ad ora.

142. Caldwell, 2024
 143. Lu et al., 2025
 144. Wint et al., 2020

6.2 Prospettive future di applicazione: l'arredo urbano

Per quanto detto fino ad ora, l'utilizzo di **materiale cementizio contenente biossido di titanio** costituisce un'opportunità senza precedenti per ridurre gli inquinanti, in particolare all'interno degli **ambienti urbani**, che comprendono sia le grandi città che i grandi centri industriali, considerati i principali motori di diffusione di gas inquinanti in atmosfera. L'**obiettivo** è quello di trovare quali siano gli elementi presenti all'interno della rete urbana, soprattutto nelle zone maggiormente esposte a queste sostanze, che possano utilizzare queste soluzioni al fine di **sfruttare la fotocatalisi per abbattere sostanze organiche e inorganiche** presenti nell'aria circostante e migliorarne la **qualità** al fine di promuovere la **sostenibilità** e il **benessere pubblico**. L'obiettivo è stato individuare elementi

che si trovano all'**esterno** e che sono esposti alla **luce solare** per gran parte della giornata, mentre a livello materico devono presentare una **superficie porosa**, o microporosa, che gli permetta di interagire con l'aria circostante. L'**arredo urbano** si presenta come la **miglior applicazione** per questi materiali, in particolare, gli elementi che arredano le strade delle nostre città come panchine, fontane, muretti, ma anche le pavimentazioni stradali e pedonali, fino ad arrivare alle barriere antirumore posizionate nei pressi delle autostrade e non solo, risultano perfetti per ottenere i risultati prefissati, inoltre, **gran parte** di questi sono **già stati testati in passato** per questo genere di applicazioni, dando origine a risultati molto promettenti.



Figura 106 -
Arredo urbano
TX Active a
Colleferro



Figura 107 -
Arredo urbano
TX Active a
Colleferro

SEA, Società Esercizi Aeroportuali, ha sperimentato l'utilizzo di **Coverlite**, prodotto dall'impresa **Bacchi** che sfrutta le proprietà del biossido di titanio, confermandone la significativa azione fotocatalitica. Questo **spruzzando un'emulsione polimerica** a base di biossido di titanio e acqua su un manto di **conglomerato bituminoso** esteso per circa **18.000 metri quadrati** nell'area del **Terminal 1 dell'aeroporto di Milano Malpensa**, conferendogli caratteristiche fotocatalitiche antismog. La tecnica a spruzzo fa sì che l'emulsione penetri nelle macro e micro porosità della pavimentazione, senza alterarne le caratteristiche tecniche originali. Il macchinario utilizzato permette l'**applicazione** di questo prodotto su

qualsiasi tipologia di conglomerato bituminoso e può avvenire **a caldo**, contestualmente alla fase di stesa del manto, o **a freddo**, su manti già realizzati da tempo. I **test** dei risultati si sono svolti per 8 settimane, 4 precedenti all'applicazione per registrare i livelli di inquinamento di partenza e 4 successive all'applicazione per verificarne i risultati.

Le analisi sono state effettuate secondo **due modalità, in loco** e nel **Laboratorio Sperimentale Stradale della Sezione Infrastrutture Viarie del DIAR Politecnico di Milano**, nel primo caso si è riscontrato l'abbattimento del **9%** degli **ossidi d'azoto**, in modo costante e duraturo nel tempo, i test **in laboratorio** effettuati sui campioni prelevati

in fase di spruzzatura hanno invece calcolato un indice di abbattimento degli **ossidi di azoto** medio del **43%**. Dice Andrea Poggio, il Vicedirettore Generale di Legambiente:

“È la prima volta che un prodotto fotocatalitico si sottopone a valutazioni sul campo, simili a quelle che si verificano nella gran parte delle strade urbane. Un abbattimento dell'ordine di grandezza del 10%, non consente solo di eliminare l'inquinamento di troppo, ma potrebbe aiutare sensibilmente a rientrare nei limiti di qualità dell'aria richiesti dall'Europa. In futuro si costruirà diversamente da quanto si è fatto fino ad oggi, anche le strade!”¹⁴⁵

Oltretutto, gli esperti hanno ribadito che l'applicazione di una soluzione del genere in **zone di minor movimento d'aria, effetto canyon** e con maggiori concentrazioni di **traffico, aumenterebbe** sensibilmente la percentuale di **abbattimento**¹⁴⁶.

Figura 108 - Applicazione trattamento antismog a Milano Malpensa



¹⁴⁵. Rinnovabili.it, 2011

¹⁴⁶. Patscheider, 2011

¹⁴⁷. Barcella, 2025

Un altro esempio molto vicino a noi è quello del **quartiere Bicocca a Milano**, dove sono stati posati, in zone di viabilità secondaria e in percorsi pedonali, **masselli autobloccanti drenanti e fotocatalitici**, il monitoraggio dell'attività fotocatalitica ha mostrato un notevole miglioramento della qualità dell'aria con riduzioni dei **NOx tra il 20% e il 40%**. I vantaggi di questi prodotti realizzati con impasti ad alta porosità, spaziatore ad hoc per favorire il drenaggio e l'aggiunta di biossido di titanio per conferire potere fotocatalitico, sono molteplici. In primis, la **posa a secco** non richiede malte o leganti, rendendo il processo più **rapido** ed eventualmente **reversibile**; ogni componente è facilmente removibile singolarmente in caso necessiti di manutenzione o sostituzione; hanno un'elevata resistenza di carico che li rende perfetti per applicazioni come pavimentazioni stradali, pedonali o altre simili legate al contesto urbano. Infine, se posate correttamente e mantenute, possono resistere per **oltre 30 anni** senza necessità di essere sostituite¹⁴⁷.

Se torniamo indietro di qualche anno, nel **2006**, a **Bergamo**, un esperimento condotto da **Italcementi**, consistette nel pavimentare un tratto di strada con materiale cementizio fotocatalitico a base di biossido di titanio per confrontare la **concentrazione di NOx** con un tratto parallelo realizzato con pavimentazione tradizionale. Dopo quattro settimane venne registrata un **riduzione** della concentrazione dei **NOx del 30-40%** nel tratto trattato.

Il test si verificò in ambiente reale, dimostrando le potenzialità di questo materiale e le **prime prove reali dell'efficacia del biossido di titanio** incorporato nel cemento.

Sempre nel **2006**, a **Segrate**, venne effettuato un test su una superficie di **7000 metri quadrati di strada urbana**, applicando anche in questo caso materiale cementizio additivato con biossido di titanio. In questo caso il risultato fu ancora più sorprendente del precedente, il **57% dei NOx risultarono abbattuti** dopo il trattamento. Costituisce ancora oggi uno dei casi più significativi di applicazione su scala urbana. La riuscita dell'esperimento si dovette non solo alla qualità del materiale cementizio, ma anche alla **corretta esposizione solare** e la **struttura porosa** della malta che agevolava l'interazione tra inquinanti e la superficie.

A **Fulda**, in **Germania**, nel **2010** fu condotta una sperimentazione su **4500 metri quadrati di marciapiede** lungo la Petersbergerstraße. Si utilizzarono **mattonelle** fotocatalitiche per la pavimentazione e si monitorarono due tratti di questo marciapiede. L'analisi dei test vide una riduzione del **17% dei NO₂** alla quota di **10 cm** dal suolo, mentre a **3 metri** di altezza questa percentuale scese al **9%**, rispetto a tratti non trattati. I valori non furono elevati come i casi precedentemente citati, ma questo studio ha dimostrato l'impatto misurabile che queste superfici possono avere anche in **aree urbane meno soleggiate e pedonali**¹⁴⁸.

¹⁴⁸. Serpone, 2018

¹⁴⁹. Bartolucci, 2020

Detto ciò, il caso a noi più vicino ed emblematico è sicuramente la **collezione Morandiana** (fig. 110) del **2020** realizzata da **Ri-Gymnasium**, per il Complesso Monumentale della città di **Colleferro**. Un progetto di **arredo urbano identitario** che si concretizza in un catalogo di arredi urbani, e non solo, progettati per lo spazio pubblico utilizzando il **cemento fotocatalitico TX Active** di Italcementi di cui abbiamo elencato in precedenza le caratteristiche fondamentali¹⁴⁹.

Figura 109 - Arredo urbano TX Active a Colleferro

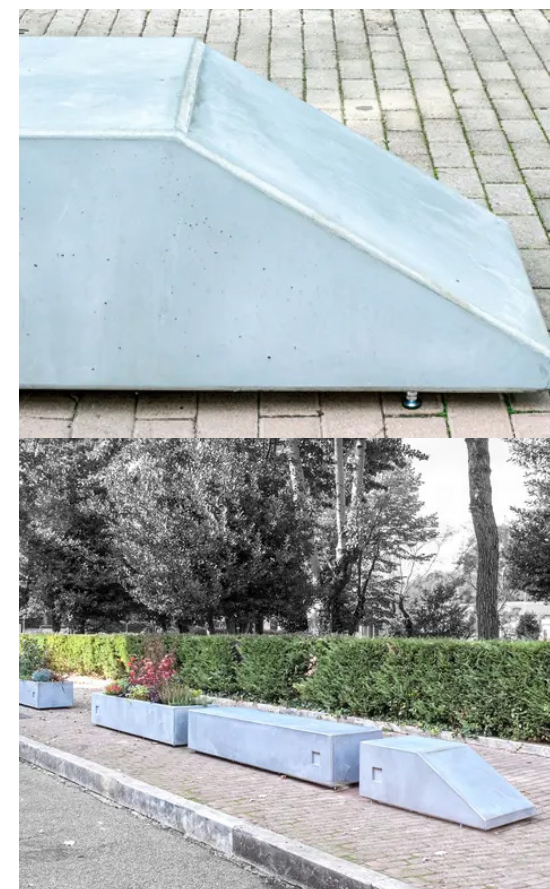




Figura 110 - collezione Morandiana del 2020 realizzata da Ri-Gymnasium, per il Complesso Monumentale della città di Colleferro

Il potenziale effettivo di questi materiali è confermato anche dal progetto **Light2CAT** conclusosi nel **2015**, finanziato per oltre il **70% dall'Unione Europea** e portato avanti dall'**Istituto di Tecnologia della Danimarca**.

In particolare, si sono concentrati sullo sviluppo di un **nuovo tipo** di biossido di titanio che fosse attivabile con la luce visibile e quindi più efficace anche in condizioni di illuminazione non ottimale, come nei paesi del Nord Europa dove l'**irraggiamento UV**, necessario per l'attivazione fotocatalitica, è più **scarso**. Sono stati sviluppati calcestruzzi per applicazioni sia orizzontali che verticali e i risultati hanno rispettato le aspettative. Sono stati aggiunti **elementi metallici e non metallici** al biossido di titanio tradizionale.

Quest'ultimo oltre ad attivarsi in situazioni di **irraggiamento UV quasi nullo**, garantisce un'efficienza di riduzione di **NOx** del **15%** in condizioni nelle quali il biossido di titanio tradizionale non riuscirebbe ad attivarsi. Presenta inoltre una **selettività** verso i **nitrati** maggiore rispetto al biossido di titanio tradizionale come si è visto dai test. Questi sono stati effettuati a **Copenaghen** in ambiente urbano e autostradale, e a **Valencia** utilizzando barriere Jersey e piastrelle. Le analisi hanno mostrato **riduzioni medie dei NOx** tra il **5% e il 20%**, a **Valencia** si è registrato un abbattimento del **56,5%** dei NOx mentre a **Copenaghen** ci si è fermati solo al **18,9%**, tuttavia si è confermata l'efficacia della soluzione anche in situazioni di **basso irraggiamento UV**¹⁵⁰.

¹⁵⁰. Commissione Europea - Visible LIGHT Active PhotoCATalytic Concretes for Air pollution Treatment | FP7, 2016

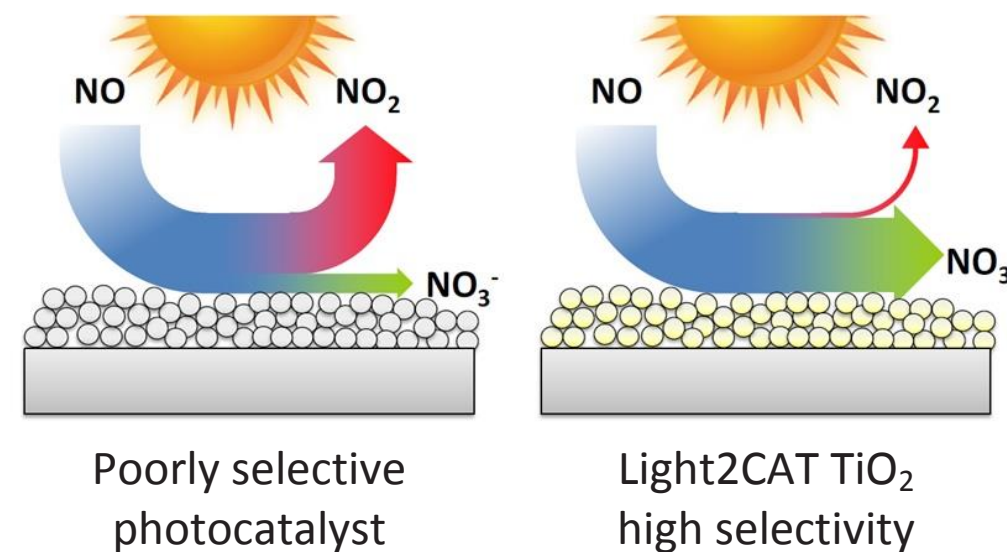


Figura 111 - Funzionamento TiO2 altamente selettivo Light2CAT

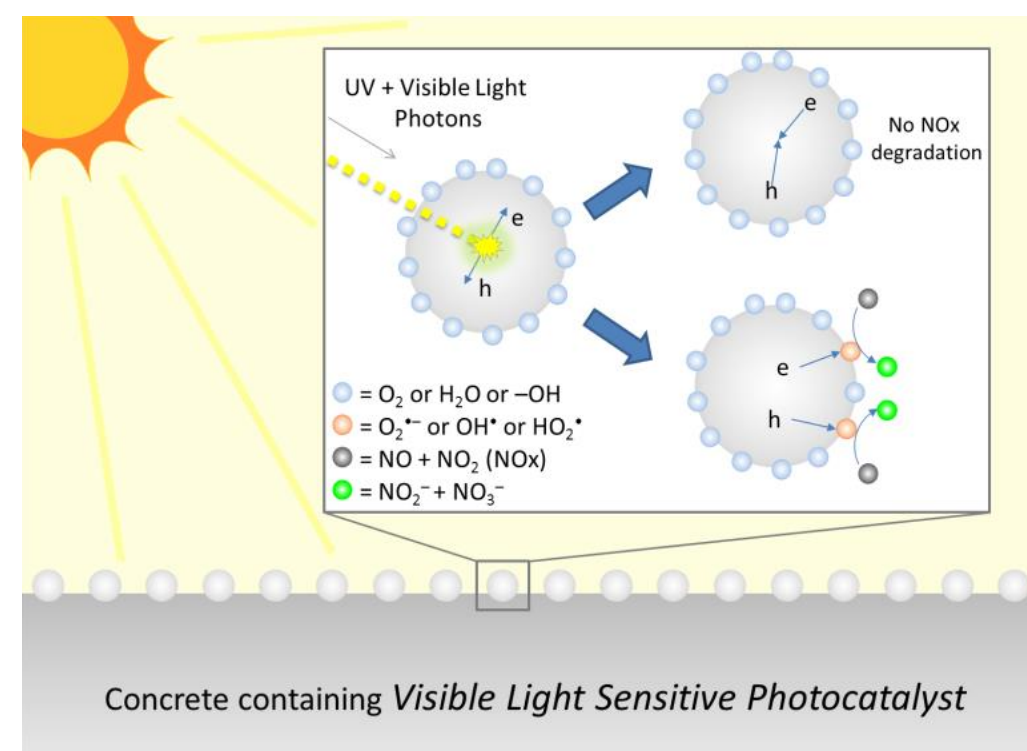


Figura 112 - Funzionamento TiO2 sensibile alla luce visibile Light2CAT

In questa **tabella comparativa** sono riassunti i dati principali relativi ai casi studio analizzati, utile per avere una **visione di insieme**, al fine di confrontare i diversi risultati e poter valutare le criticità di ciascun caso e ipotizzare delle **condizioni progettuali**.

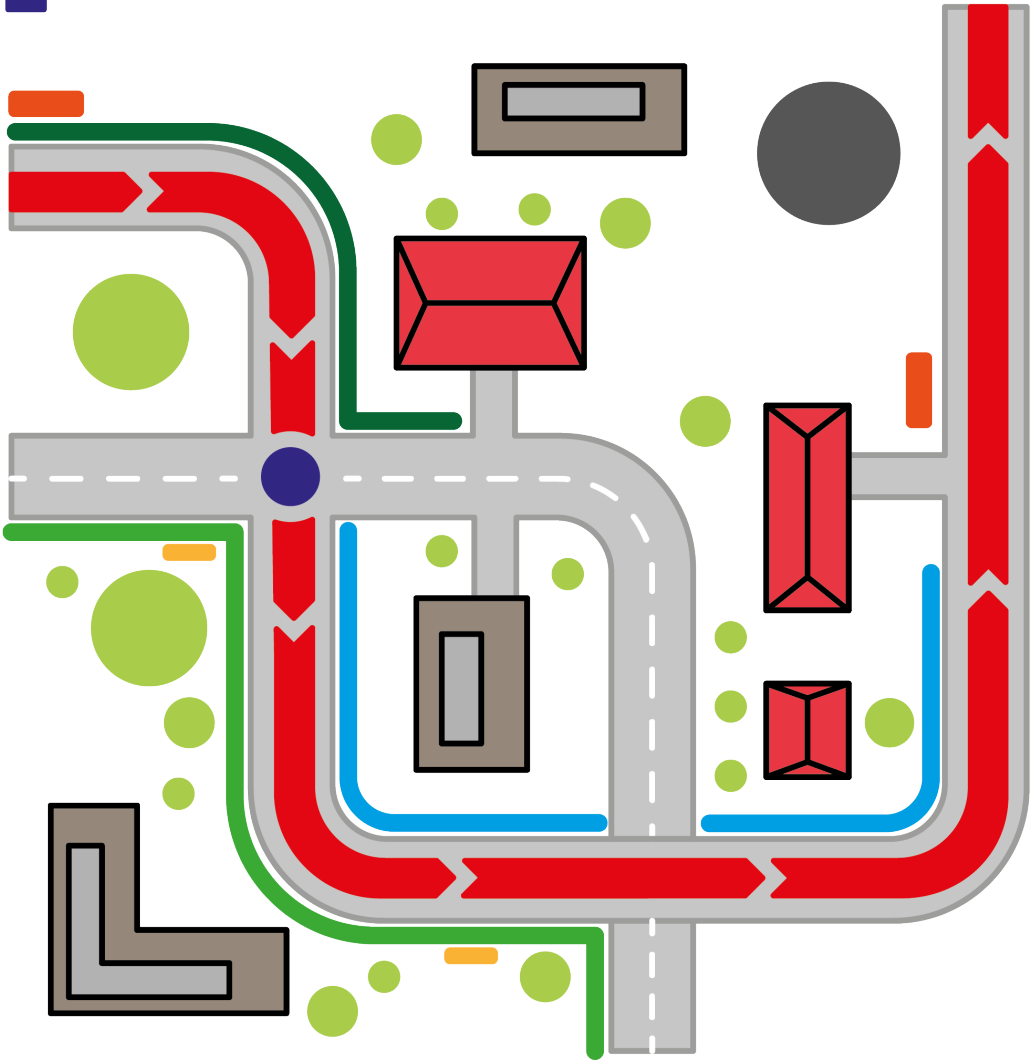
Luogo	Anno	Tipo di intervento	Riduzione NOx (%)	Note	Criticità
Bergamo (IT)	2006	Pavimentazione stradale fotocatalitica	30-40%	Prima applicazione su strada urbana, alta esposizione solare.	Costi elevati, necessità di superfici esposte a sole diretto.
Segrate (IT)	2006	Pavimentazione stradale fotocatalitica	57%	Uno dei risultati più alti registrati, struttura porosa ottimale.	Stessa criticità di Bergamo, possibile perdita di efficacia in ombra.
Fulda (DE)	2010	Marciapiede fotocatalitico	9-17%	Zona meno soleggiata, riduzione più bassa ma significativa.	Bassa efficienza dovuta a scarsa esposizione solare.
Malpensa (IT)	2011	Trattamento a spruzzo su asfalto	9% (in situ) 43% (lab)	Applicabile su manti esistenti senza alterare proprietà meccaniche.	Necessità di manutenzione periodica.
Bicocca (IT)	2018	Masselli drenanti fotocatalitici autobloccanti	20-40%	Alta durabilità, posa a secco reversibile.	Costo iniziale alto; necessità di posa accurata per prestazioni ottimali.
Valencia (ES)	2015	Barriere stradali fotocatalitiche	56,5%	TiO ₂ modificato per attivazione con luce visibile.	Costo di sviluppo elevato, tecnologia non ancora diffusa su larga scala.
Copenaghen (DK)	2015	Pavimentazione e barriere fotocatalitiche	18,9%	Efficace anche con bassa radiazione UV.	Riduzione modesta in assenza di luce, costi elevati per tecnologia avanzata.

Figura 113 - Tabella comparativa dei dati relativi ai casi studio analizzati nel paragrafo 6.2

Qui si riporta una **rappresentazione esemplificativa** di come gli elementi con potere fotocatalitico potrebbero essere inseriti nel tessuto urbano.

- Zona a traffico intenso
- Marciapiede fotocatalitico
- Pista ciclabile fotocatalitica
- Barriera anti-rumore fotocatalitica
- Rotonda fotocatalitica
- Panchina fotocatalitica
- Pensilina fotocatalitica
- Fontana fotocatalitica
- Manto stradale fotocatalitico

Figura 114 - Mappa esemplificativa del tessuto urbano



6.3 Semilavorati fotocatalitici: casi studio

TX Active® Italcementi

Tipologia: Cemento fotocatalitico

Il TiO₂ in questo caso è **incorporato** all'interno della **matrice cementizia** e se esposto alla luce degrada NO_x/VOC e mantiene il calcestruzzo pulito. Le applicazioni possibili sono sia **orizzontali** che **verticali** e può essere utilizzato in pavimentazioni, arredi stradali, masselli autobloccanti, rivestimenti, pannelli prefabbricati, tegole. I **valori** di abbattimento sono **variabili**

a seconda dei contesti d'uso ma TX Active è **usato commercialmente** in progetti civili e infrastrutturali. Ha il vantaggio di essere più **durevole e stabile** nell'attività fotocatalitica essendo integrato all'interno della matrice cementizia, tuttavia l'**efficacia** dipende molto dall'**esposizione solare** e si riduce in zone permanentemente in ombra¹⁵¹.



Figura 115 -
Logo TX Active
by Italcementi

¹⁵¹. Heidelberg Materials, 2023

Coverlite® Impresa Bacchi

Tipologia: Emulsione polimerica

È un'**emulsione polimerica da applicare a spruzzo** su conglomerato bituminoso o superfici già esistenti. **Penetrando** nelle macroporosità e nelle microporosità il **manto viene funzionalizzato** per attivare la reazione fotocatalitica. Può essere **applicato** nel momento di gittata del cemento oppure in un **momento successivo**, molto utile laddove non si voglia sostituire la pavimentazione.

Anche in questo caso le prestazioni sono fortemente dipendenti dalle **condizioni** ma i **test in laboratorio** hanno raggiunto abbondantemente percentuali di abbattimento di **NO_x** del **40%**. Il vantaggio principale è sicuramente quello di non dover necessariamente sostituire la superficie cementizia su cui viene applicato ma la **durabilità** è **ridotta** rispetto al caso precedente¹⁵².



Figura 116 -
Nome e slogan
azienda Coverlite®

¹⁵². Coverlite, 2008

TiO₂ attivato con luce visibile *Progetto Light2CAT*

Tipologia: TiO₂ modificato

Il biossido di titanio viene drogato con **elementi metallici e non metallici** per renderlo efficace anche in situazioni di **irraggiamento UV basso** o addirittura nullo. È pensato per essere applicato in zone dove normalmente si ha una bassa radiazione UV come ad esempio i paesi del **Nord Europa** ed applicabile sia a superfici verticali che orizzontali. I **test** effettuati dai ricercatori del progetto **Light2CAT** hanno riscontrato ri-

sultati di abbattimento nell'ordine del **5-20%** in **test urbani estesi**, in altre occasioni si sono ottenuti risultati migliori. Il principale vantaggio è sicuramente la **maggiore flessibilità geografica e temporale** di utilizzo, nonostante i valori nominali di abbattimento siano più bassi delle altre soluzioni, anche se è ancora in fase di sviluppo la versione commerciale del prodotto¹⁵³.



Figura 117 -
Logo progetto
Light2CAT

¹⁵³. Commissione Europea - Visible LIGHT Active PhotoCATalytic Concretes for Air pollution Treatment | FP7, 2016

AEROXIDE® TiO₂ P25 *Evonik*

Tipologia: Nanoparticelle ad alta reattività

Si tratta di **nanoparticelle di TiO₂** ad alta reattività che possono essere additivate a **pitture o rivestimenti cementizi** ed hanno elevate performance fotocatalitiche. In camera di prova, i test hanno mostrato un abbattimento dei **NOx** che oscilla tra **20% e 40%**, mentre in condizioni tipiche si sono raggiunti abbattimenti anche superiori al 90%.

I vantaggi di questa soluzione sono sicuramente l'**alto grado di purezza**, la compatibilità con un **gran numero di leganti** e la possibilità di **fornitura globale** del materiale che non pone limiti alla sua diffusione. Lo svantaggio è la difficoltà di dispersione nel legante e la necessità di **manodopera specializzata**¹⁵⁴.



Figura 118 -
Logo Evonik

¹⁵⁴. Evonik, 2025

CristalACTiV™ Tronox

Tipologia: TiO₂ fotocatalitico

Tronox propone un biossido di titanio fotocatalitico **ottimizzato in fase anatase** indicato per **cementi** e **rivestimenti**. Le applicazioni consigliate sono pavimentazioni, facciate pannelli prefabbricati urbani. Test effettuati su strade e facciate hanno riportato abbattimenti del **20-50% per i NOx**. In questo caso, i vantaggi riguardano l'inserimento di questo prodotto all'in-

terno di una **filiera integrata e consolidata**, inoltre come nel caso precedente, è possibile reperire il prodotto ovunque a **livello globale**, ciò non pone limiti alla sua diffusione. Lo svantaggio è la decrescita dell'**efficienza** in situazioni di **basso irraggiamento UV**, come accade per la maggior parte di questi prodotti¹⁵⁵.



Figura 119 -
Logo Tronox

¹⁵⁵. Tronox, 2025

PhotocataClean AkzoNobel

Tipologia: Rivestimento murale fotocatalitico dopato per luce visibile

Consiste in un **rivestimento murale** fotocatalitico che riesce a lavorare anche in condizioni di **luce diffusa**, in particolar modo contro i VOC e come operazione di autopulizia. Principalmente è impiegato in facciate di edifici urbani e barriere stradali con abbattimenti che si attestano attorno al **40% per i VOC**.

Il vantaggio principale è la capacità di attivarsi anche in **condizioni di irraggiamento UV nullo**, unicamente grazie alla luce visibile. Un limite rilevante è la **durabilità limitata** alla resistenza del rivestimento stesso che non può essere paragonata a quella di un materiale cementizio¹⁵⁶.



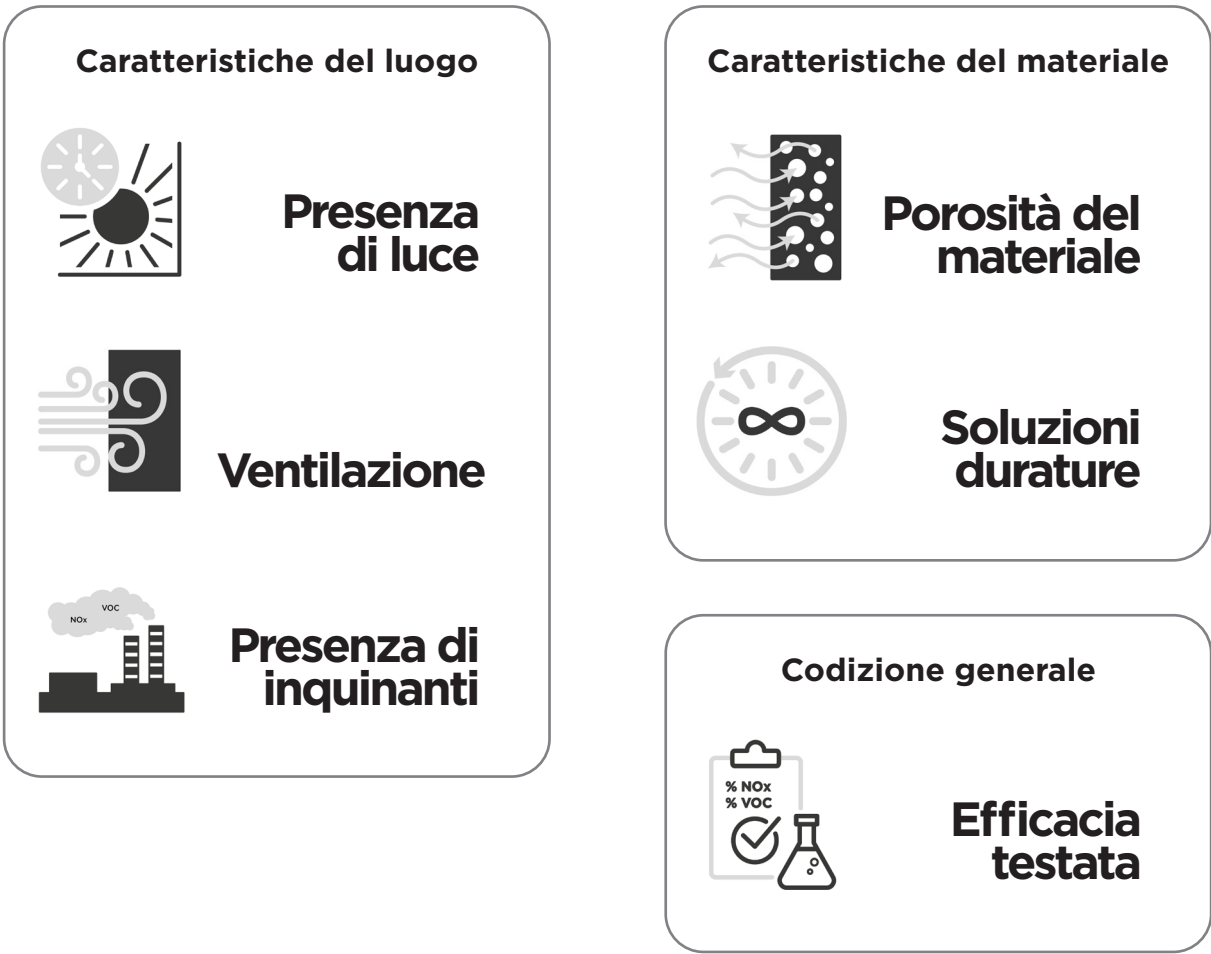
Figura 120 -
Logo AkzoNobel

¹⁵⁶. AkzoNobel, 2025

6.4 Condizioni progettuali per garantire l'efficacia del biossido di titanio

Per progettare una soluzione che sfrutti le proprietà del biossido di titanio in modo efficace è necessario prendere in considerazione **diversi fattori**, che ne influenzano il funzionamento e la resa effettiva una volta che i processi sono stati attivati. Ciò non dipende solo dal **materiale**, ma anche, e soprattutto, dalla **posizione** e dall'**orientamento** con cui il prodotto è collocato nel tessuto urbano. La **coesistenza di queste condizioni** permette il corretto funzionamento dei

processi di **fotocatalisi e autopulizia**, se queste non fossero prese in considerazione si rischierebbe un inutile spreco di denaro per impiegare materiali dalle grandi potenzialità in condizioni che non permettono a queste di essere messe in pratica. Con l'obiettivo di guidare la progettazione di queste nuove soluzioni si sono individuate **6 condizioni progettuali** che sono riassunte qui sotto e verranno esplicate durante il corso di questo paragrafo.



Caratteristica del luogo Presenza di luce

È il motore della reazione, in particolare la **radiazione UV**, anche se si stanno sviluppando soluzioni che si attivano in assenza quasi totali di tale radiazione. È la **principale condizione** che sopra ogni altra dev'essere soddisfatta perché il progetto possa funzionare. In ogni caso studio che abbiamo analizzato l'**esposizione solare e l'orientamento delle superfici** sono sempre stati il primo punto da prendere in considerazione. In particolare, è necessario che la superficie realizzata con materiale cementizio fotocatalitico sia esposta alla **luce solare per almeno 4 ore al giorno**. Questo perché l'attività di fotocatalisi diventi efficace e porti ad un reale beneficio per la zona circostante.

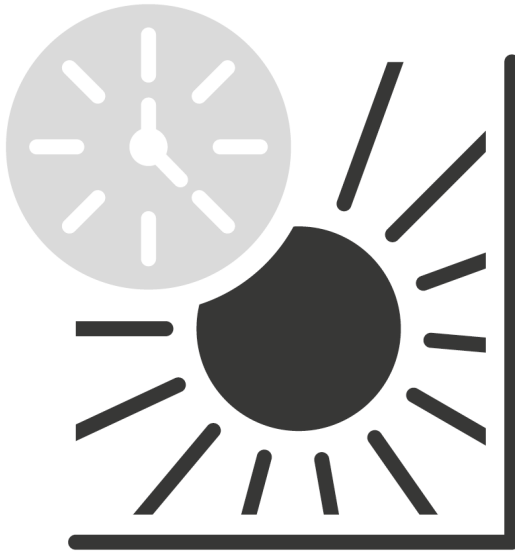


Figura 121 - Luce



Caratteristica del luogo Ventilazione

Per migliorare la **reattività** delle superfici e ottenere migliori risultati è ottimale operare in zone dove siano presenti **correnti di vento** che si spostino ad una **velocità media di 1 o 2 metri al secondo**. È fondamentale che le superfici interessate restino a **contatto con gli inquinanti** per almeno **un secondo**, quindi non devono essere presenti costantemente correnti ventose molto forti ma allo stesso tempo l'assenza totale di queste correnti non permetterebbe agli inquinanti di spostarsi ed entrare in contatto con le superfici fotocatalitiche per attivare la reazione.



Figura 122 - Vento



Caratteristica del luogo Presenza di inquinanti

Il posizionamento dei prodotti non dev'essere casuale, ma è necessario che sia progettato ad hoc al fine di riuscire a **entrare in contatto con il maggior numero di inquinanti possibile**, nelle zone in cui la densità di quest'ultimi sia massima. Posizionare queste soluzioni in zone pedonali ad esempio, potrebbe ridurne drasticamente l'efficacia, perchè i maggiori produttori di inquinanti a livello urbano sono i **veicoli**. Per questo è ideale sfruttare queste soluzioni in **zone prossime a strade e autostrade**, dove il livello di inquinanti è molto alto e la reazione possa quindi lavorare al meglio.

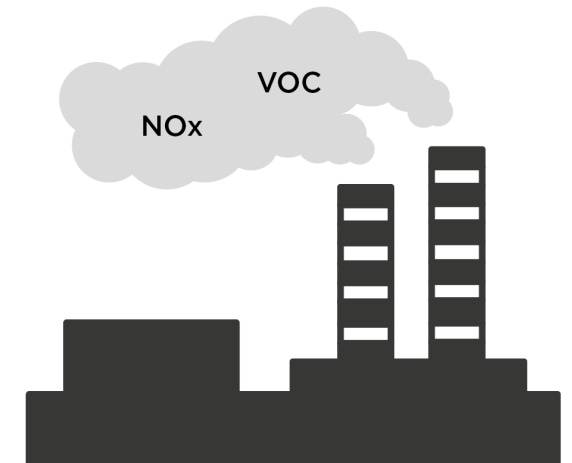


Figura 123 - Smog urbano



Caratteristica del materiale **Porosità**

Permette l'**interazione** tra aria e materiale. Ogni soluzione, cementizia e non, indagata fino ad ora, presentava una **struttura del materiale porosa o microporosa**, questo perché la possibilità, prima per il biossido di titanio in fase di preparazione, poi per l'**aria** e l'**acqua**, di penetrare superficialmente nel materiale, ne migliora l'interazione. Ciò aumenta la **superficie di contatto** e di conseguenza l'efficacia della reazione fotocatalitica, aumentando il numero di inquinanti abbattuti in ambiente. Tuttavia, la **penetrazione** nel materiale **non** dev'essere **invasiva**, questo per far sì che gli inquinanti non vadano a penetrare in modo permanente all'interno del prodotto e non permettere l'autopulizia della superficie.

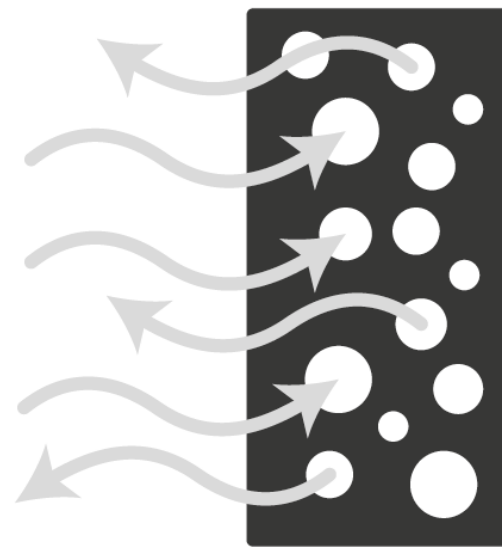


Figura 124 - Pietra porosa



Caratteristica del materiale **Soluzioni durature**

Perché queste soluzioni siano efficaci è necessario che siano **progettate per durare nel tempo**, i costi di questi materiali non sono irrisori e comportano investimenti maggiori rispetto a quelli per materiali tradizionali. Perciò, l'impiego di prodotti fotocatalitici in soluzioni di arredo urbano, deve avere un **orizzonte di vita di almeno 5/10 anni** perché possa essere considerato efficace e sostenibile, questo anche grazie alle capacità di **autopulizia** del materiale che ne garantisce **manutenzione autonoma** e che contribuisce alla **sostenibilità dell'investimento**, riducendo i costi di gestione. L'investimento non sarebbe conveniente se il prodotto persistesse solo per un **breve periodo**.

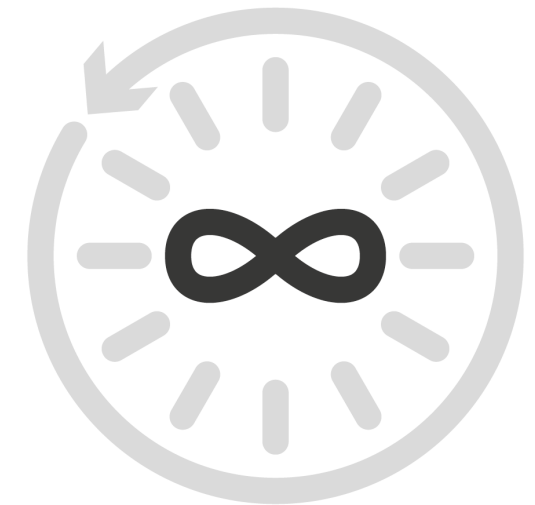


Figura 125 - Albero secolare



Condizione generale Efficacia testata

Come si è visto nei casi analizzati, l'efficacia dell'attività fotocatalitica non è la medesima in tutte le situazioni, ma è relativa alle **condizioni della singola applicazione**. Per questo è necessario **testare** il comportamento dell'attività fotocatalitica laddove si intenda sfruttarla prima di procedere alla costruzione di soluzioni permanenti. Perché questa sia efficace, sarebbe l'ideale avere delle percentuali di abbattimento di **NOx e VOC** che si attestino intorno **almeno al 40-50% nei test di laboratorio**, questo garantirebbe una buona attività fotocatalitica anche in situazioni reali.

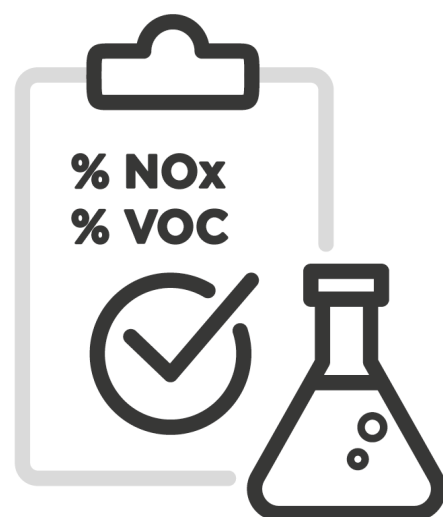


Figura 126 - Provette da laboratorio



6.4.1 Considerazioni finali e spunti progettuali

Si sono riassunte le **principali condizioni** che, se rispettate, aumentano sensibilmente le possibilità che il progetto di una soluzione che utilizza cemento fotocatalitico, sia **effettivamente efficace ed efficiente nell'abbattimento di inquinanti**. Queste sono raccomandazioni basate sull'attuale stato dell'arte, per tale motivazione non devono essere prese e applicate in modo dogmatico in ogni luogo e tempo. Come si è potuto vedere nel corso della ricerca, si parla di **soluzioni tecnologicamente giovani e in continuo sviluppo**, questo permette di prevedere che nel breve, medio o lungo periodo sicuramente saranno divulgate opzioni che modificheranno in parte o totalmente le condizioni progettuali di riferimento. Tuttavia, quanto detto sopra, rappresenta un **punto di partenza** per iniziare a sfruttare le caratteristiche del biossido di titanio, ancora trattato troppo superficialmente, rispetto al **potenziale nascosto** che presenta in termini di **benessere e sostenibilità**.

In tal senso è possibile prevedere quali possono essere i migliori **spunti progettuali** da cui partire, al fine di sfruttare le caratteristiche di queste soluzioni per ridurre gli inquinanti all'interno delle realtà urbane e, di conseguenza, migliorare la qualità e l'aspettativa di vita degli abitanti.

Come punto di partenze sarebbe opportuno andare ad operare in quelle situazioni che tradizionalmente presentano **già** alcune delle **caratteristiche necessarie** a garantire l'efficacia dell'attività fotocatalitica.

In primo luogo, la soluzione più ovvia si risolve nell'applicazione di questi materiali in **pavimentazioni stradali su larga scala**, per adesso limitata solamente, o quasi, alla scala sperimentale. Il manto stradale presenta pressoché tutti i **prerequisiti necessari** ancor prima dell'operazione progettuale.

L'esposizione solare è garantita nella quasi totalità delle strade essendo una **superficie orizzontale** e non avendo niente che ne ostruisca il contatto con i raggi solari, fatta eccezione per gallerie e zone particolarmente dense di edifici alti che limitano l'esposizione. Inoltre, il **movimento delle auto** su di esse, contribuisce al movimento dell'aria e di conseguenza alla ventilazione della zona. In più, le auto stesse rappresentano il **maggior produttore di inquinanti** a livello urbano e extraurbano insieme alle attività industriali, delle quali gli inquinanti avvolgono le nostre città, garantendo così anche la terza condizione necessaria rispetto al luogo.

La porosità è dipendente dal **tipo di mescola** che si va ad utilizzare quindi sarà necessario scegliere la soluzione fotocatalitica più adeguata per ottenere il risultato atteso, sarà **fortemente sconsigliato** utilizzare uno **spalmato** al posto di una soluzione cementizia fotocatalitica come quella applicata nel caso di Milano Malpensa, perché lo **sfregamento continuo** con gli **pneumatici** delle auto andrebbe a **comprometterne l'integrità** in un tempo molto breve, facendo perdere di significato l'operazione progettuale fatta.

Per quanto riguarda la durabilità del manto, le **strade** dovrebbero essere **soluzioni durature per definizione** in quanto infrastrutture fondamentali per permettere lo svolgimento delle attività comuni all'interno dei centri urbani. L'efficacia come dice la condizione stessa necessita test sul territorio.

In seconda battuta, si potrebbe **procedere “per prossimità”**, considerando ciò che sta nelle immediate vicinanze delle strade, privilegiando le soluzioni di grandi dimensioni in modo da avere un **superficie d'azione più ampia possibile**. Le **barriere anti-rumore** e non, presenti in strada urbane, extraurbane e autostrade costituiscono un'opzione ideale in tal senso e anche in quest'occasione le applicazioni analizzate hanno riguardato unicamente sperimentazioni.

Come per le pavimentazioni stradali, anche le barriere presenti ai lati della strade, presentano già gran parte dei **prerequisiti necessari**.

L'esposizione solare è garantita come nel primo caso dall'**assenza di elementi di ostruzione** tra prodotto e **luce** solare e la superficie verticale o inclinata non presenta criticità rispetto a quella orizzontale. Inutile dire che anche in quest'occasione le **auto** contribuiscono sia alla **ventilazione** che alla presenza di **inquinanti**, in più la **verticalità** della barriere permette di entrare in contatto anche con gli inquinanti che non si trovano a stretto contatto con il suolo, dimostrandosi anche **più efficace** della soluzione precedente a parità di superficie.

La porosità come nel caso precedente dipende dalla miscela scelta, per le barriere si aggiunge la **possibilità di utilizzare uno spalmato**, anche se meno duraturo rispetto alla matrice cementizia fotocatalitica, ma ovviamente anche **più economico**.

Per quanto riguarda la durata di vita della barriera, in genere i progetti che coinvolgono questi prodotti hanno **orizzonti di vita che superano i 5/10 anni**, limite indicato nelle condizioni progettuali necessarie a garantire l'efficacia. Come nel caso precedente, i test andranno effettuati per verificare l'efficienza dell'operazione.

Sempre procedendo per prossimità rispetto alla sede stradale, ma spostandoci sempre più verso i **centri urbani**, si trovano le pavimentazioni dei **marciapiedi**. Esse presentano esattamente le stesse **caratteristiche** sia in termini di luogo che di materiale dei **manti stradali**, a patto che si trovino nelle immediate vicinanze di strade e non in zone pedonali o di altro genere dove non passano auto, fatta **eccezione** per il tipo di **soluzione fotocatalitica utilizzata**.

Infatti, a differenza dei manti stradali dove è meno comune, le pavimentazioni dei marciapiedi possono essere realizzate anche con **masselli autobloccanti** come nel caso della sperimentazione in zona Bicocca a Milano. Ciò rende più semplice la gestione della pavimentazione sia nella messa a terra, che non richiede tempi di presa, che nella **manutenzione straordinaria**,

come la rottura di un massello che può essere agevolmente sostituito senza la necessità di dover rifare l'intero manto.

Continuando con il **“principio di prossimità delle fonti inquinanti”** è possibile andare ad individuare altre tipologie di prodotti che costituiscono il tessuto urbano e possono contribuire a questa transizione, il primo esempio che salta all'occhio sono le piste ciclabili, ma anche le pensiline di autobus, tram o stazioni dei taxi, panchine, fontane, rotonde stradali e così via.

Le opportunità esistono, tocca a noi coglierle e farle diventare realtà.

Bibliografia & Sitografia

Akzonobel, prodotto Akzonobel, PhotocataClean (2025), Disponibile in: <https://www.akzonobel.com/akzonobel-prod-publish1euwest1-b80>
Ultima consultazione: 12-08-2025

Apple, Prodotto Apple, iPhone 16 Pro e iPhone 16 Pro Max (2025), Disponibile in: <https://www.apple.com/it/iphone-16-pro/>
Ultima consultazione: 09-08-2025

ArchDaily, Articolo ArchDaily, National Grand Theater of China | Paul Andreu (2008), Disponibile in: <https://www.archdaily.com/1218/national-grand-theater-of-china-paul-andreu>
Ultima consultazione: 29-05-2025

Arquitectura Viva, Articolo Arquitectura Viva, Marqués de Riscal Hotel, Elciego (2006), Disponibile in: <https://arquitecturaviva.com/works/hotel-marques-de-riscal-9>
Ultima consultazione: 17-07-2025

Artizono, Articolo Artizono, Comprendere l'impatto ambientale della produzione di titanio (2025), Disponibile in: <https://artizono.com/it/comprendere-limpatto-ambientale-della-produzione-di-titanio/>
Ultima consultazione: 03-05-2025

Ausiliello Gigliola, Articolo Ingenio, Effetti del biossido di titanio nelle miscele cementizie: focus sulle proprietà autopulenti e antinquinanti (2025), Disponibile in: <https://www.ingenio-web.it/articoli/miscele-cementizie-imitare-riprodurre-e-potenziare-con-il-biossido-di-titanio/>
Ultima consultazione: 22-07-2025

Baldi Giovanni, Cappelletti Serena, Articolo Chimica & Nanotecnologie, Sviluppo di nuovi materiali (2006)
Ultima consultazione: 17-07-2025

Barcella Gilberto, Articolo Ingenio, Pavimentazioni esterne sostenibili: i vantaggi dei masselli autobloccanti drenanti e fotocatalitici (2025), Disponibile in: <https://www.ingenio-web.it/articoli/pavimentazioni-autobloccanti-drenanti-e-fotocatalitiche-una-soluzione-tecnica-per-citta-sostenibili/>
Ultima consultazione: 23-07-2025

Bartolucci Mario, Articolo Heidelberg Materials, Colleferro città Morandiana (2020), Disponibile in: <https://www.heidelbergmaterials.it/it/arredo-urbano-txactive-colleferro>
Ultima consultazione: 24-07-2025

Beavers Luke, Articolo Sfgate, Here's why everyone from hikers to writers love this titanium pen (2025), Disponibile in: <https://www.sfgate.com/shopping/article/ink-less-titanium-pen-deal-20046924.php>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Belpoliti Vittorino, Articolo Sfera Unife, Il biossido di titanio nei materiali da costruzione (2009), Disponibile in: <https://sfera.unife.it/handle/11392/1402467>
Ultima consultazione: 02-06-2025

Boyer R.R. and **Briggs R.D.**, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), The use of beta titanium alloys in the aerospace industry (2005)
Ultima consultazione: 16-07-2025

Buraschi Riccardo, Articolo Politesi Polimi, Characterization of the photocatalytic activity and durability of TiO2 containing concrete (2017), Disponibile in: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/133393>
Ultima consultazione: 02-06-2025

Caglioti Vincenzo, Enciclopedia Treccani, Titanio (1937), Disponibile in: [https://www.treccani.it/enciclopedia/titanio_res-e1676d43-8bb7-11dc-8e9d-0016357eee51_\(Enciclopedia-Italiana\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/titanio_res-e1676d43-8bb7-11dc-8e9d-0016357eee51_(Enciclopedia-Italiana)/)
Ultima consultazione: 27-07-2025

Caldwell Ethan, Articolo Aeropro, Why Recycling Titanium is Essential for Our Future (2024), Disponibile in: <https://www.aeroproind.com/post/why-recycling-titanium-is-essential-for-our-future>
Ultima consultazione: 22-05-2025

Cantori Architectural Skins, Articolo Cantori Architectural Skins, Laminato zinco titanio: guida completa all'utilizzo in progetti edilizi (2020), Disponibile in: <https://www.cantorialluminio.it/laminato-zinco-titanio-per-progetti-edilizi/>
Ultima consultazione: 22-04-2025

Caprioli Francesca, Articolo Chimica Industriale Essenziale: Guida ai Processi e Prodotti Chimici, Biossido di titanio (2020), Disponibile in: <https://www.chimicaindustrialeessenziale.org/prodotti-chimici-di-base/biossido-di-titanio/>
Ultima consultazione: 22-07-2025

Chen Jeff, Articolo King Chroma, Come utilizzare il biossido di titanio per la vernice? (2024), Disponibile in: <https://www.kingchroma.com/it/uses/how-to-use-titanium-dioxide-for-paint>
Ultima consultazione: 17-07-2025

Chris Reeve, Prodotto Chris Reeve Knives, Sebenza 31 (2025), Disponibile in: <https://chrisreeve.com/collections/sebenza-31>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Comorris, Articolo Zahner, MIT Stata Center (2016), Disponibile in: <https://www.azahner.com/works/mit-stata/>
Ultima consultazione: 28-05-2025

Colletta Stefano, Articolo Meccanica News, Titanio: tutto ciò che si deve sapere (2020), Disponibile in: <https://www.meccanicanews.com/2020/02/18/titanio-tutto-cio-che-si-deve-sapere/>
Ultima consultazione: 22-04-2025

Colleparidi Mario, Olagot Jacob Ogoumah, Simonelli Francesca, Troli Roberto, Periodico Enco Journal, Old Temple, Titanocromia (2004)
Ultima consultazione: 24-04-2025

Commissione Europea, Articolo CORDIS | Europea Commission, Visible LIGHT Active PhotoCATalytic Concretes for Air pollution Treatment | FP7 (2016), Disponibile in: <https://cordis.europa.eu/project/id/283062/reporting>
Ultima consultazione: 23-07-2025

Commissione Europea, Articolo CORDIS | Europea Commission, Un cemento che assorbe l'inquinamento e a risparmio energetico (2024), Disponibile in: <https://cordis.europa.eu/article/id/151625-pollutanteating-energysaving-concrete/it>
Ultima consultazione: 22-07-2025

Copernicus, Articolo Climate Copernicus EU, Demonstrating heat stress in European cities (2025), Disponibile in: <https://climate.copernicus.eu/demonstrating-heat-stress-european-cities>
Ultima consultazione: 26-04-2025

Coverlite, prodotto Coverlite, Coverlite - trattamento fotocatalitico antismog (2025), Disponibile in: <http://coverlite.it/>
Ultima consultazione: 12-08-2025

De Naoum Kat, Articolo Xometry, All About Titanium (2023), Disponibile in: <https://www.xometry.com/resources/materials/titanium/>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Deseaux Fabrice, Articolo Chimica Today, Estrazione del titanio: processo di Kroll (2020), Disponibile in: <https://chimica.today/chimica-generale/processo-kroll/>
Ultima consultazione: 16-07-2025

EFSA, Articolo EFSA, Biossido di titanio: l'E171 non è più considerato sicuro se usato come additivo alimentare | EFSA (2021), Disponibile in: <https://www.efsa.europa.eu/it/news/titanium-dioxide-e171-no-longer-considered-safe-when-used-food-additive>
Ultima consultazione: 01-09-2025

Evonik, prodotto Evonik, AEROXIDE® TiO₂ P25 (2025), Disponibile in: <https://www.evonik.com/en.html>
Ultima consultazione: 12-08-2025

Exxmedia, Articolo Rossi Tre, Titanio: cos'è, caratteristiche e applicazioni (2024), Disponibile in: <https://www.rossitre.com/titanio/>
Ultima consultazione: 22-04-2025

Faichim, Prodotto Faichim, Biossido di Titanio (2023), Disponibile in: <https://www.faichim.com/product/biossido-di-titanio/>
Ultima consultazione: 17-07-2025

Furnitalia, Prodotto Furnitalia, Estro Milano Spazio Coffee Table White Marble Titanium Base (2025), Disponibile in: <https://www.furnitalia.com/product/estro-milano-spazio-coffee-table-white-marble-titanium-base/>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Gea, Portfolio Gea, Applicazioni del biossido di titanio (2025), Disponibile in: <https://www.gea.bio/portfolio/applicazioni-del-biossido-di-titanio/>
Ultima consultazione: 24-04-2025

Gottlieb Paludan Architects, Articolo Gottlieb Paludan Architects, Hakodate Railway Station (2013), Disponibile in: <https://www.gottliebpaludan.com/en/project/hakodate-railway-station>
Ultima consultazione: 21-07-2025

Goulard Brice, Articolo Monochrome Watches, Introducing - Zenith Defy Classic - Baselworld 2018 (2018), Disponibile in: <https://monochrome-watches.com/zenith-defy-classic-baselworld-2018-specs-price/>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Guerra Valentina, Corso di Laurea in Ingegneria Edile L: Attività fotocatalitica del biossido di titanio applicato ai materiali da costruzione. Analisi delle prestazioni in funzione della tipologia di supporto e della tecnica di deposizione (2014), Relatore: Fregni Alberto, Correlatore: Venturi Luca Politecnico di Torino
Ultima consultazione: 25-04-2025

Heidelberg Materials, Flyer Heidelberg Materials, TX Active: good, clean design (2023), Disponibile in: https://www.heidelbergmaterials.us/docs/default-source/default-document-library/txactive_heidelberg-materials-flyer_2.22.23.pdf?sfvrsn=f29f4558_1
Ultima consultazione: 12-08-2025

Il Dentista Moderno, Articolo Redazione Il Dentista Moderno, Ceramiche al biossido di titanio come nuovi biomateriali (2017), Disponibile in: <https://www.ildentistamoderno.com/ceramiche-al-biossido-di-titanio/>
Ultima consultazione: 10-06-2025

Iris Ceramica Group, Articolo Iris Ceramica Group, Active Surfaces la Ceramica antibatterica e antivirale, antinquinante e anti odore (2025), Disponibile in: <https://www.irisceramicagroup.com/sostenibilita/active/>
Ultima consultazione: 02-06-2025

Jha S. N., Articolo Factmr, How Titanium Scrap Recycling Is Shaping The Future Of Circular Economy (2024), Disponibile in: <https://blog.factmr.com/titanium-scrap-recycling-shapes-circular-economy/>
Ultima consultazione: 22-05-2025

Karlsson Mikael C. F., Álvarez Rubén, Bordes Romain, Larsson Anders, Taylor Phil, Steenari Britt, Articolo Journal of Coatings Technology and Research, Characterization of paint formulated using secondary TiO₂ pigments recovered from waste paint (2019), Disponibile in: <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0132-x>
Ultima consultazione: 28-07-2025

Karlsson Mikael C. F., Abbas Zareen, Bordes Romain, Cao Yu, Larsson Anders, Roland Antonin, Taylor Phil, Steenari Britt, Articolo Progress in Organic Coatings, Surface properties of recycled titanium oxide recovered from paint waste (2018), Disponibile in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944018302601>
Ultima consultazione: 13-05-2025

Knight Chris, Articolo European Investment Bank, Titanium recycling gives Europe a valuable new metal supply (2018), Disponibile in: <https://www.eib.org/en/stories/titanium-recycling>
Ultima consultazione: 18-07-2025

LF-spaceframe, Articolo LF-spaceframe, Analisi della struttura del Gran Teatro di Hangzhou (2020), Disponibile in: <https://www.lfspaceframe.com/news/analysis-of-hangzhou-grand-theater-structure/>
Ultima consultazione: 17-07-2025

Lasting Titanium, Articolo Lasting Titanium, How is titanium manufactured? (2025), Disponibile in: <https://www.lastingtitanium.com/it/how-is-titanium-manufactured.html>
Ultima consultazione: 24-04-2025

Lemir Srl, Articolo Lemir Srl, Rottami di titanio: un tesoro nascosto (2025), Disponibile in: <https://www.lemirsrl.com/news?view=article&id=291:rottami-di-titanio-un-tesoro-nascosto&catid=53:news>
Ultima consultazione: 22-05-2025

Li Yong-Hua, Wang Fang, Li Jian-Jun, Internationale Journal of Material Research, Current developments of biomedical porous Ti-Mo alloys (2017), Disponibile in: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/146.111526/html>
Ultima consultazione: 29-07-2025

Lu Zhaoming, Xi Xiaojing, Yang Yanling, Tian Wenjie, Xu Bin, Chen-Jun Hua-Jun, Articolo MDPI, Sustainable Recycling of TiO₂ Nanoparticles with High Photocatalytic Performance from Spent Selective Catalytic Reduction Catalysts (2025), Disponibile in: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/7/3003>
Ultima consultazione: 22-07-2025

Machine MFG, Articolo Machine MFG, Ultimate Guide to Recycling Titanium (2025), Disponibile in: <https://shop.machinemfg.com/ultimate-guide-to-recycling-titanium/>
Ultima consultazione: 22-05-2025

MAT Mahmut, Articolo Geology Science, Minerale di Titanio (Ti) (2023), Disponibile in: <https://it.geologyscience.com/minerali-minerali/minerale-di-titanio/>
Ultima consultazione: 23-04-2025

Margiov, Articolo Stampare in 3D, Il riciclaggio di chip in titanio potrebbe ridurre le emissioni di CO₂ dell'80% dall'Università della Leibniz (2020), Disponibile in: <https://stamparein3d.it/il-riciclaggio-di-chip-in-titanio-potrebbe-ridurre-le-emissioni-di-co2-dell80-dalluniversita-della-leibniz/>
Ultima consultazione: 18-07-2025

Mattacheo Andrea, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale: Laser Powder Bed Fusion of a Novel Ti Alloy via in-situ Alloying (2020), Relatori: *Biamino Sara, Saboori Abdollah, Politecnico di Torino*
Ultima consultazione: 18-04-2025

Metal Ti, Articolo Metal Titanium, 6 advantages of titanium in building material (2024), Disponibile in: <https://www.metal-ti.com/news/6-advantages-of-titanium-in-building-materials-80705178.html>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Middlemans Scott, Fang Z. Zak, Fan Peng, Articolo Hydrometallurgy, A new method for production of titanium dioxide pigment (2013), Disponibile in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X12002423>
Ultima consultazione: 12-05-2025

Michele, Articolo General Cover, Cemento Fotocatalitico: Mangia Smog - Autopulente (2023), Disponibile in: <https://www.generalcover.it/cemento-fotocatalitico/>
Ultima consultazione: 02-06-2025

Muza-chan, Articolo Muza-chan's Gate to Japan, Old Temple, Titanium Roof (2011), Disponibile in: <https://muza-chan.net/japan/index.php/blog/titanium-roof-senso-ji>
Ultima consultazione: 28-07-2025

MSDS Europe, Articolo you SDS expert, Biossido di titanio, un colorante male interpretato - si tratta più di rischio, non di pericolo (2021), Disponibile in: <https://www.msds-europe.com/it/biossido-di-titanio/>
Ultima consultazione: 17-07-2025

Nippon Steel, Articolo Nippon Steel, Demonstration Test of Performance of World's First Titanium Building Materials with Discoloration Resistance (2016), Disponibile in: https://www.nipponsteel.com/en/news/20160630_100.html?
Ultima consultazione: 18-07-2025

Orange Furniture Los Angeles, Prodotto Orange Furniture Los Angeles, Titanium Infinity Table by William Emerson (2025), Disponibile in: <https://orangefurniture.com/products/titanium-infinity-table-by-william-emmerson>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Patscheider Gunther, Articolo Lavori Pubblici, Finalmente una prova in ambiente reale delle pavimentazioni fotocatalitiche (2011), Disponibile in: <https://www.lavori-pubblici.net/finalmente-una-prova-in-ambiente-reale-delle-pavimentazioni-fotocatalitiche/>
Ultima consultazione: 01-07-2025

Pira Cristian, Corso di Laurea Triennale in Scienze dei Materiali: Titanocromia tramite ossidazione anodica (2004), Relatore: Palmieri Vincenzo, Correlatore: Rampazzo Vanessa, Università degli studi di Padova
Ultima consultazione: 18-04-2025

Porsche, Prodotto Porsche Shop, Occhiali da Sole P'8688 (2025), Disponibile in: <https://shop.porsche.com/it/it-IT/p/p8688-occhiali-da-solP-P8500-207/4044709509811>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Rambaldi Elisa, Articolo Centro Ceramico, Piastrelle ceramiche fotocatalitiche e antibatteriche - biossido di titanio (2025), Disponibile in: <https://www.centroceramico.it/fotocatalisi-antibattericit-2/>
Ultima consultazione: 25-07-2025

Renox Impex, Articolo Renox Impex, Titanium Applications: Strength, Durability & Innovation (2025), Disponibile in: <https://www.renoximpex.com/blog/what-is-titanium-used-for/>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Ricci Patrizia, Articolo Heidelberg Materials, Il principio attivo TX Active® per migliorare l'aria (2023), Disponibile in: <https://blog.heidelbergmaterials.it/it/italcementi-e-il-principio-attivo-tx-active-un-contributo-al-miglioramento-della-qualita-dellaria>
Ultima consultazione: 22-07-2025

Rutledge Kim, McDaniel Melissa, Teng Santani, Hall Hilary, Ramroop Tara, Sprout Erin, Hant Jeff, Boudreau Diane, Costa Hilary, Articolo National Geographic Education, Urban Heat Island (2024), Disponibile in: <https://education.nationalgeographic.org/resource/urban-heat-island>
Ultima consultazione: 24-07-2025

Rinnovabili.it, Articolo Rinnovabili, Milano Malpensa abbate lo smog con Coverlite (2011), Disponibile in: <https://www.rinnovabili.it/clima-e-ambiente/milano-malpensa-abbatte-lo-smog-con-coverlite3125/>
Ultima consultazione: 23-07-2025

Serpone Nick, Articolo ResearchGate, Heterogeneous Photocatalysis and Prospects of TiO2-Based Photocatalytic DeNOxing the Atmospheric Environment (2018), Disponibile in: https://www.researchgate.net/publication/329007169_Heterogeneous_Photocatalysis_and_Prospects_of_TiO2-Based_Photocatalytic_DeNOxing_the_Atmospheric_Environment
Ultima consultazione: 23-07-2025

Silvestrin Stefano, Articolo Nanosilv, Vernici fotocatalitiche anti inquinamento: cosa sono e cosa c'è di vero (2021), Disponibile in: <https://www.nanosilv.it/blog/vernici-fotocatalitiche-anti-inquinamento-cosa-sono-e-cosa-cè-di-vero>
Ultima consultazione: 18-07-2025

Signer Titanium, Articolo Signer Titanium, Fogli architettonici in titanio puro (2023), Disponibile in: <https://www.signer-titanium.com/it/architettura>
Ultima consultazione: 27-07-2025

Stilografica.it, Articolo Stilografica.it, Lamy imporium Casa della Stilografica (2025), Disponibile in: <https://www.stilografica.it/products/lamy-pens/lamy-imprium-titanium-4079.htm>
Ultima consultazione: 09-08-2025

ST-Titanium, Articolo ST-Titanium, Riciclaggio e utilizzo dei rottami di titanio (2024), Disponibile in: <https://it.st-titanium.com/info/recycling-and-utilization-of-titanium-scrap-100312267.html>
Ultima consultazione: 21-07-2025

TDMA, Articolo TDMA, How titanium dioxide is helping to keep Kenyan homes cool (2025), Disponibile in: <https://www.tdma.info/uses-of-tio2/how-titanium-dioxide-is-helping-to-keep-kenyan-homes-cool/>
Ultima consultazione: 26-04-2025

TDMA, Articolo TDMA, The buildings that clean our air (2025), Disponibile in: <https://www.tdma.info/uses-of-tio2/the-buildings-that-clean-our-air/>
Ultima consultazione: 28-07-2025

TDMA, Articolo TDMA, Titanium dioxide in the sustainable built environment (2025), Disponibile in: <https://www.tdma.info/sustainability/titanium-dioxide-in-the-sustainable-built-environment/>
Ultima consultazione: 28-07-2025

Tebaldo Vincenzo, Gautier Giovanna, Duraccio Donatella, Faga Maria Giulia, Articolo MDPI Sustainability, Sustainable Recovery of Titanium Alloy: From Waste to Feedstock for Additive Manufacturing (2024), Disponibile in: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/1/330>
Ultima consultazione: 02-05-2025

Thorum, Prodotto Thorum, The Fjord (2025), Disponibile in: <https://www.thorum.com/en-it/products/hammeredtitaniumring>
Ultima consultazione: 09-08-2025

Ti-Pure, Articolo Ti-Pure, Soluzioni al biossido di titanio (TiO₂) per rivestimenti | TiO₂ Ti-Pure™ by Chemours (2025), Disponibile in: <https://www.tipure.com/it/products/coatings>
Ultima consultazione: 25-04-2025

Triply Cicle Titanium, Articolo Senjun, Titanium Products for Construction (2024), Disponibile in: <https://triplycircuititanium.com/titanium-solution-construction/>
Ultima consultazione: 22-05-2025

Tronox, prodotto Tronox, CristalACTiV™ (2025), Disponibile in: <https://www.tronox.com/>
Ultima consultazione: 12-08-2025

US EPA, Articolo US EPA, What Are Heat Islands? (2014), Disponibile in: <https://www.epa.gov/heatislands/what-are-heat-islands>
Ultima consultazione: 26-04-2025

Vomiero Marco, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica e dei Materiali: Influenza dei parametri operativi sul processo di anodizzazione dura del titanio grado II (2016), Relatore: Dabalà Manuele, Correlatore: Pezzato Luca, Università degli studi di Padova
Ultima consultazione: 18-04-2025

William Wong, Articolo XunYang, How Is Titanium Transforming Modern Construction Projects? (2024), Disponibile in: <https://triplycircuititanium.com/how-is-titanium-transforming-modern-construction-projects/>
Ultima consultazione: 26-05-2025

Wint Theint Hay Mar, Smith Michael F., Chanlek Narong, Chen Fuming, Oo Than Zaw, Songsiriritthigul Prayoon, Articolo MDPI, Physical Origin of Diminishing Photocatalytic Efficiency for Recycled TiO₂ Nanotubes and Ag-Loaded TiO₂ Nanotubes in Organic Aqueous Solution (2020), Disponibile in: <https://www.mdpi.com/2073-4344/10/7/737>
Ultima consultazione: 22-07-2025

Credits

Copertina - **Minerale di Titanio**, di Dave Hoefler su Unsplash

Copertina capitoli - **Titanio Fluido**, di Freepik p. 9, 25, 45, 81, 107, 127

Figura 1 - **William Gregor**, di Mellangoose - Own work, CC BY-SA 4.0 p. 10

Figura 2 - **Martin Heinrich Klaproth**, di Pubblico dominio, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=140310> p. 10

Figura 3 - **Titanio**, di Alchemist-hp (pse-mendelejew.de) - Opera propria, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7329436> p. 11

Figura 4 - **Rutilo**, di <https://images.app.goo.gl/v8hd5uFsWNZ1nz6R6> p. 12

Figura 5 - **Simbolo Ti tavola periodica**, di https://t2.gstatic.com/licensed-image?q=tbn:ANd9GcTSi9Yk0Jledw3PQCKIRoBqWOATOjecp21_Bs5sSKCP9Pi-fahwB44yloLBgAL6ZRE3Nt4rCwWTFA0RZR0ky p. 13

Figura 6 - **Tabella delle principali caratteristiche fisiche del titanio**, dati di MAT Mahmut, 2023 p. 16

Figura 7 - **Sede di estrazione mineraria**, di <https://www.google.com/url?sa=i&ul=ht-tps%3A%2F%2Fwww.rockwellautomation.com%2Fit-it%2Findustries%2Fmi-ning-automation%2Fextraction.html&psig=AOvVaw3fGWbulbAHGi1lIDGITvtS&u-st=1750583403050000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRx-qFwoTCMir-MaVgo4DFQAAAAAdAAAAABAf> p. 17

Figura 8 - **William J. Kroll**, di <https://www.invent.org/inductees/william-j-kroll>

Figura 9 - **Schema del processo di Kroll**, di <https://www.tulingmetal.com/wp-content/uploads/2024/09/Kroll-Process-and-Its-Impact.jpg> p. 17

Figura 10 - **Barre di titanio**, di <https://hwn-titan.com/wp-content/uploads/titan-grade-5-eli-staebe-800x533.webp> p. 19

Figura 11 - **Fili di titanio**, di <https://hwn-titan.com/wp-content/uploads/titan-grade-4-draht-800x533.webp> p. 19

Figura 12 - **Protesi in titanio**, di https://www.azonano.com/image-handler/ts/20211214035726/ri/1000/src/images/Article_Images/ImageForArticle_5915_16394722450703306.jpg p. 20

Figura 13 - **Saldatura di lamiera**, di <https://mobilferro.it/wp-content/uploads/2022/08/saldature-lamiere-ferro-acciaio.jpg> p. 21

Figura 14 - **Braccetto in titanio**, di <https://assets-eu-01.kc-usercontent.com/8ff-24b0e-57a3-0157-62d1-fa4ac9734eb5/7f9ad6f6-9a0547c1-9d37-6eb64cba9e7b/mab-slm-titanium-lift-brackets.jpg> p. 22

Figura 15 - **Componentistica per settore aerospaziale**, di <https://blog.goldsupplier.com/wp-content/uploads/2024/08/titanium-aerospace.png> p. 22

Figura 16 - **Protesi per cranio**, di <https://www.scientistlive.com/sites/scientistlive/files/EOS%201152-1.jpg> p. 22

Figura 17 - **Douglas X-3 “Stiletto”**, di NASA - <https://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/X-3/Large/E-17348.jpg>, Pubblico dominio, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=227254> p. 27

Figura 18 - **Lockheed SR-71**, di <https://ids.si.edu/ids/deliveryService?id=NA-SM-NA-SM2013-00890&max=900> p. 28

Figura 19 - **Struttura per carrello di atterraggio**, di <https://www.tag.it/wp-content/uploads/2019/12/10.jpg> p. 29

Figura 20 - **Elicottero Westland Lynx**, di <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/602531ed52cb0b327fea1168/d77a7135-084e-46ea-93ee-0f378a016105/RIA-T+2024+Thursday+Non+Logo+%2811%29.jpg> p. 30

Figura 21 - **F-22 Raptor**, di pubblico dominio, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5988655> p. 31

Figura 22 - **Elicottero Comanche**, di <https://www.konflikty.pl/wp-content/uploads/2019/10/Bell-360-Invictus-small.jpg> p. 32

Figura 23 - **Sottomarino Sierra**, di https://img.ilgcdn.com/sites/default/files/styles/xl/public/foto/2019/06/26/1561567905-k-336-pskov-project-945a-sierra-class-ssn.jpg?_1561567905&format=webp p. 33

Figura 24 - **Porsche 917 del 1970 a Le Mans**, di <https://cdn.motor1.com/images/mgl/x7J6P/s1/porsche-917k-1970.webp> p. 34

Figura 25 - **Motore Ferrari F50**, di Axion23 - Ferrari F50 Engine Bay, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33855663> p. 35

Figura 26 - **Protesi dentale**, di <https://www.studioschweiger.com/wp-content/uploads/2022/04/impianto-dentale-fisso.jpg> p. 36

Figura 27 - **Protesi per anca**, di https://www.orthosportgroup.it/wp-content/uploads/2019/05/Protesi-anca_OK_1-860x660.jpg p. 36

Figura 28 - **Protesi auricolare**, di <https://www.audiotechnologies.it/upload/immagini/img900/TAP-07.67-SH.jpg> p. 37

Figura 29 - **Tubi per condensatori**, di <https://ikrorwxhqpqlj5m.lidcdn.com/cloud/ImBppKqplnSRokopkmrijp/Titanium-Used-for-Condenser.jpg> p. 38

Figura 30 - **Colorante E171 in gomme da masticare**, di <https://w-content.meteosuper.it/2022/01/colorante-E171-pericoloso-salute-1.jpg> p. 39

Figura 31 - **Reattore**, di <https://www.ravagnan.com/images/soluzioni/reattori/Reattore%20Solvay%201.jpg> p. 40

Figura 32 - **Mazze da golf**, di https://img001.video2b.com/195/file_51705653491100.jpg?x-oss-process=image/resize,m_lfit,w_768/quality,80 p. 41

Figura 33 - **Museo Guggenheim di Bilbao**, di Naotake Murayama from San Francisco, CA, USA - Museo Guggenheim, Bilbao, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=54782250> p. 42

Figura 34 - **Titanio ossidato anodicamente**, di <https://shengenfab.com/it/titanium-anodizing/> p. 46

Figura 35 - **Laminato zinco-titanio**, di <https://tidmetal.com/zinco-titanio/> p. 47

Figura 36 - **Facciata laterale del Museo ebraico di Berlino**, di <https://www.viveberlintours.com/it/tour/visita-guidata-museo-ebraico-berlino/> p. 48

Figura 37 - **Facciata del Museo Guggenheim di Bilbao**, di Kamahale - Opera propria, CC BY-SA 3.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17421660> p. 50

Figura 38 - **Museo Guggenheim di Bilbao**, di Naotake Murayama from San Francisco, CA, USA - Museo Guggenheim, Bilbao, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=54782250> p. 51

Figura 39 - **MIT Stata Center**, di https://www.reddit.com/r/architecture/comments/qemdea/the_stata_center_an_academic_complex_at_the/ p. 52

Figura 40 - **MIT Stata Center**, di <https://www.hydrotechusa.com/projects/mit-stata-center> p. 53

Figura 41 - **National Grand Theatre**, di xiquinhosilva - <https://www.flickr.com/photos/xiquinho/54446726699/>, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=163852250> p. 54-55

Figura 42 - **Hangzhou Grand Theatre**, di https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hangzhou_Grand_Theatre.jpg p. 56-57

Figura 43 - **Hotel Marques de Riscal**, di Door David Mapletoft - https://www.flickr.com/photos/imagine_david/51356202300/, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=108621381> p. 58-59

Figura 44 - **Oita Bank Dome**, di https://it.wikipedia.org/wiki/Stadio_ita#/media/File:OitaStadium1.JPG p. 60-61

Figura 45 - **JR Hakodate Station**, di <https://www.flickr.com/photos/dgmckelvey/33196566503/in/photostream/> p. 62

Figura 46 - **JR Hakodate Station**, di https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hakodate_Station_Hokkaido_Japan02s3.jpg p. 63

Figura 47 - **Senso-ji Temple**, di jreysp - Opera propria, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71118453> p. 64-65

Figura 48 - **Orologio con cassa in titanio by Botta**, di <https://www.botta-design.de/en/blogs/wissen/titan-das-e-del-leichtmetall?srsId=AfmBOooeGoVE6vGpZcYMV-MacIP44NQd7ndKW-OV-Kwe-JVMIutbsKkss&utm> p. 66

Figura 49 - **ForeverPen**, di <https://www.worldstiniest.com> p. 67

Figura 50 - **Persona che utilizza ForeverPen**, di <https://www.worldstiniest.com> p. 67

Figura 51 - **Penna LAMY Imporium Titanium** di <https://bellini.it/portfolio-articoli/imporium/#gallery> p. 68

Figura 52 - **Serie di penne LAMY Imporium Titanium** di <https://bellini.it/portfolio-articoli/imporium/#gallery> p. 68

Figura 53 - **Coltello pieghevole Sebeza Collection chiuso**, di <https://chrisreeve.com/collections/sebenza-31/products/sebenza-31-plain> p. 69

Figura 54 - **Coltello pieghevole Sebeza Collection aperto**, di <https://chrisreeve.com/collections/sebenza-31/products/sebenza-31-plain> p. 69

Figura 55 - **Retro orologio Zenith Defy Classic Skeleton**, di <https://monochrome-watches.com/zenith-defy-classic-baselworld-2018-specs-price/> p. 70

Figura 56 - **Orologio Zenith Defy Classic Skeleton**, di <https://monochrome-watches.com/zenith-defy-classic-baselworld-2018-specs-price/> p. 70

Figura 57 - **iPhone 16 Pro**, di <https://www.apple.com/it/shop/buy-iphone/iphone-16-pro> p. 71

Figura 58 - **Dettaglio iPhone 16 Pro**, di <https://www.apple.com/it/iphone-16-pro/> p. 71

Figura 59 - **Anello The Fjord by Thorum**, di <https://www.thorum.com/en-it/products/hammeredtitaniumring?srsId=AfmBOoow9w18a7sfs27rdvjRncceHRM4LN5MY8U1QS5X6RFI00NmBygy> p. 72

Figura 60 - **Dettaglio anello The Fjord by Thorum**, di <https://www.thorum.com/en-it/products/hammeredtitaniumring?srsId=AfmBOoow9w18a7sfs27rdvjRncceHRM4LN5MY8U1QS5X6RFI00NmBygy> p. 72

Figura 61 - **Titanium Infinity Table con fiori by William Emerson**, di <https://orange-furniture.com/products/titanium-infinity-table-by-william-emmerson> p. 73

Figura 62 - **Titanium Infinity Table by William Emerson**, di <https://orange-furniture.com/products/titanium-infinity-table-by-william-emmerson> p. 73

Figura 63 - **Dettaglio Spazio Coffee Table by Estro Milano**, di <https://www.furnitalia.com/product/estro-milano-spazio-coffee-table-white-marble-titanium-base> p. 74

Figura 64 - **Spazio Coffee Table by Estro Milano**, di <https://www.furnitalia.com/product/estro-milano-spazio-coffee-table-white-marble-titanium-base> p. 74

Figura 65 - **Occhiali P'8688 by Porsche**, di <https://shop.porsche.com/it/it-IT/p/p8688-occhiali-da-sole-P-P8500-207/4044709509811?queryID=739393bf5e8c-019d41cd1d9ce9dea98e> p. 75

Figura 66 - **Occhiali P'8688 by Porsche indossati da Patrick Dempsey**, di <https://shop.porsche.com/it/it-IT/p/p8688-occhiali-da-sole-P-P8500-207/4044709509811?queryID=739393bf5e8c019d41cd1d9ce9dea98e> p. 75

Figura 67 - **Ossidazione anodica del titanio**, di <https://www.cescor.it/it/9-italia-no/58-pietro-pedeferreri-e-la-scuola-di-corrosione-e-protezione-dei-materiali-al-poli-tecnico-di-milano.html> p. 77

Figura 68 - **Scala cromatica principale**, di <https://wisconsin-metaltech.com/anodized-titanium/> p. 78

Figura 69 - **Biossido di titanio**, di <https://www.kosmeticanews.it/biossido-di-titanio-in-silice-mesoporosa-per-la-fotoprotezione-delle-labbra/> p. 82

Figura 70 - **Minerale di rutilo**, di <https://it.geologyscience.com/minerali/rutilo/> p. 83

Figura 71 - **Schema del processo di produzione del biossido di titanio via solfato**

Figura 72 - **Schema del processo di produzione del biossido di titanio via cloro**

Figura 73 - **Schema ossidazione fotocatalitica**, di <https://pure-health.it/ossidazione-fotocatalitica-effetto-antibatterico-e-virucida/> p. 87

Figura 74 - **Logo ARPA Lombardia** p. 88

Figura 75 - **Logo Barilla Srl** p. 88

Figura 76 - **Obiettivi Green Deal EU**, di <https://www.das.it/magazine/green-deal-europeo-le-5-cose-da-sapere> p. 89

Figura 77 - **Ospedale di Torre de Especialidades**, di <https://archello.com/project/torre-de-especialidades> p. 91

Figura 78 - **“Tetti freddi” realizzati nelle baraccopoli di Nairobi**, di <https://www.tdma.info/uses-of-tio2/how-titanium-dioxide-is-helping-to-keep-kenyan-homes-cool/> p. 93

Figura 79 - **Effetto UHI**, di <https://www.epa.gov/heatislands/what-are-heat-islands> p. 94

Figura 80 - **Infrastrutture verde-blu**, di <https://fesr.regione.emilia-romagna.it/novita/eventi/2024/infrastrutture-verdi-e-blu-buone-pratiche-di-rigenerazione-in-emilia-romagna> p. 97

Figura 81 - **Chiesa Dives in Misericordia a Roma**, di <http://sacrark.altervista.org/richard-meier-chiesa-del-giubileo/> p. 99

Figura 82 - **Torri Vodafone a Milano**, di <https://www.heidelbergmaterials.it/it/torri-vodafone-milano> p. 100

Figura 83 - **Padiglione Italia di EXPO 2015**, di <https://www.excellencemagazine.luxury/expo-2015-lo-splendore-del-padiglione-italia/?lang=it> p. 101

Figura 84 - **Logo Commissione Europea**, di <https://www.thinke.eu/vocabolario/commissione-europea/> p. 103

Figura 85 - **Piastrelle realizzate da Toto Ltd in collaborazione con Laminam**, di https://www.archiportale.com/news/2015/05/eventi/toto-with-laminam-design-exchange_45783_32.html p. 104

Figura 86 - **Palude di Okefenokee**, di <https://www.floridapaddlenotes.com/the-waterways/okefenokee-swamp/> p. 108

Figura 87 - **Distretto keniota di Kwale**, di <https://www.woodchuckusa.com/pages/kwale-kenya?srltid=AfmBOoq35woACfYmDzOZkjTcLj7DMw6Dt-LRiVPfEL6DHNI-7SjqN8XrC> p. 108

Figura 88 - **Componenti stampati in 3D**, di <https://www.3dnatives.com/it/guida-metalli-stampa-3d-120920219/> p. 109

Figura 89 - **Lavorazione del titanio con CNC**, di <https://at-machining.com/it/titanium-cnc-machining/> p. 111

Figura 90 - **Flotta aerea Airbus**, di <https://www.startmag.it/smartcity/perche-airbus-teme-le-sanzioni-ue-al-titanio-russo/> p. 112

Figura 91 - **Impianto produttivo di Ecotitanium**, di <https://www.eib.org/en/stories/titanium-recycling> p. 113

Figura 92 - **Schema del processo di riciclo del titanio** p. 114

Figura 93 - **Titanio colato in stampo**, di <https://proleantech.com/it/commonly-used-casting-metals/> p. 115

Figura 94 - **Orologio realizzato con titanio riciclato**, di <https://giornaleorologi.it/2021/12/10/titanio-riciclato-e-riciclabile-la-nuova-frontiera-di-panatere/> p. 117

Figura 95 - **Mappa globale che descrive le aree geografiche dove il mercato del riciclo del titanio si sta sviluppando** p. 118

Figura 96 - **Catalizzatore SCR**, di <https://www.uitlaataanbiedingen.nl/oe-katalysator-volkswagen-golf-4-bora-skoda-octavi.html> p. 121

Figura 97 - **Vernice bianca con biossido di titanio**, di <https://www.tipure.com/en/products/coatings/ts-6300> p. 123

Figura 98 - **Vernice colorata con biossido di titanio**, di <https://www.tdma.info/uses-of-tio2/titanium-dioxide-an-essential-ingredient-in-paints/> p. 124

Figura 99 - **Logo Million Cool Roofs Challenge**, di <https://www.africanpowerplatform.org/financing/grants/1067-million-cool-roofs-challenge.html> p. 129

Figura 100 - **Applicazione della vernice contenente biossido di titanio sui tetti di Nairobi**, di <https://www.buildinganddecor.co.za/cool-roofs-for-nairobis-kibera-and-korogocho-settlements/> p. 129

Figura 101 - **Logo Kilometro Rosso Innovation District**, di <https://www.kilometrorosso.com> p. 130

Figura 102 - **Sede Kilometro Rosso Innovation District**, di <https://www.kilometrorosso.com> p. 130

Figura 103 - **Spazi interni sede Kilometro Rosso Innovation District**, di <https://www.unibg.it/ateneo/chi-siamo/sedi/kilometro-rosso> p. 130

Figura 104 - **Trucioli da lavorazione di titanio**, di Johnny Sanchez su Unsplash p. 132

Figura 105 - **Andamento del mercato globale relativo ai metalli riciclati**, di <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/recycled-metal-global-market-report> p. 132

Figura 106 - **Arredo urbano TX Active a Colleferro**, di <https://www.heidelbergmaterials.it/it/arredo-urbano-txactive-colleferro> p. 134

Figura 107 - **Arredo urbano TX Active a Colleferro**, di <https://www.heidelbergmaterials.it/it/arredo-urbano-txactive-colleferro> p. 135

Figura 108 - **Applicazione trattamento antismog a Milano Malpensa**, di <https://www.stradeeautostrade.it/pavimentazioni-e-manti/all-aeroporto-di-malpensa-la-prima-pavimentazione-antismog/> p. 136

Figura 109 - **Arredo urbano TX Active a Colleferro**, di <https://www.heidelbergmaterials.it/it/arredo-urbano-txactive-colleferro> p. 137

Figura 110 - **Arredo urbano TX Active per Colleferro**, di <https://www.heidelbergmaterials.it/it/arredo-urbano-txactive-colleferro> p. 138

Figura 111 - **Funzionamento TiO_2 altamente selettivo Light2CAT**, di <https://cordis.europa.eu/project/id/283062/reporting> p. 139

Figura 112 - **Funzionamento TiO_2 sensibile alla luce visibile Light2CAT**, di <https://cordis.europa.eu/project/id/283062/reporting> p. 139

Figura 113 - **Tabella comparativa dei dati relativi ai casi studio analizzati nel paragrafo 6.2**, p. 140

Figura 114 - **Mappa esemplificativa del tessuto urbano**, p. 141

Figura 115 - **Logo TX Active by Italcementi**, di <https://www.pavimentiindustrialicom/pavimenti-tx-active> p. 142

Figura 116 - **Nome e slogan azienda Coverlite®**, p. 143

Figura 117 - **Logo progetto Light2CAT**, di <https://www.facebook.com/Light2cat/> p. 144

Figura 118 - **Logo Evonik**, di https://it.wikipedia.org/wiki/File:Evonik_logo_2020.png p. 145

Figura 119 - **Logo Tronox**, di https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tronox_logo.png p. 146

Figura 120 - **Logo AkzoNobel**, di <https://logos-world.net/akzonobel-logo/> p. 147

Figura 121 - **Luce**, di Maxx Miller su Unsplash p. 149

Figura 122 - **Vento**, di Daniele Levis Pelusi su Unsplash p. 150

Figura 123 - **Smog urbano**, di Kristen Morith su Unsplash p. 151

Figura 124 - **Pietra porosa**, di benjamin lehman su Unsplash p. 152 **Vento**, di Daniele Levis Pelusi su Unsplash p. 152

Figura 125 - **Albero secolare**, di E. Diop su Unsplash p. 153

Figura 126 - **Provette da laboratorio**, di Testalize.me su Unsplash p. 154

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia gratitudine alla mia relatrice, che con grande disponibilità e attenzione mi ha guidato lungo questo percorso.

Mi ha stimolato, ha ascoltato le mie idee e le ha indirizzate nella giusta direzione, è stata per me un punto di riferimento costante.

Grazie a lei non solo ho portato a termine questo lavoro, ma ho anche avuto l'opportunità di crescere dal punto di vista accademico e personale.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, che hanno sempre creduto in me e mi hanno sostenuto in ogni fase di questo cammino.

Nonostante i chilometri che ci separano, la loro presenza non è mai mancata, anche solo con una telefonata o un messaggio, sono riusciti a farmi sentire vicino tutto il loro calore.

La loro vicinanza, pur nella lontananza, è stata una forza silenziosa ma fondamentale.

Il mio pensiero più affettuoso va a Cecilia, che con pazienza e entusiasmo mi è stata accanto in ogni momento.

Nei giorni più faticosi ha trovato sem-

pre le parole giuste per spronarmi e aiutarmi a non perdere di vista l'obiettivo. Un grazie sincero va anche alla sua famiglia, che mi ha accolto con affetto e che, a modo suo, ha contribuito a farmi sentire sostenuto.

Infine, voglio ringraziare di cuore tutti i miei amici, sia quelli vicini, sia quelli più lontani che hanno fatto sentire la loro vicinanza in altri modi.

Ognuno di loro che ha dimostrato disponibilità ad ascoltarmi e a condividere momenti di confronto, ha rappresentato un tassello importante in questo percorso.

Sapere di poter contare su persone così è stato un privilegio e una motivazione in più per andare avanti.

Per ultimo, voglio ringraziare me stesso. Perché, nonostante le difficoltà, i momenti di stanchezza e i dubbi, ce l'ho messa tutta.

Ho trovato la forza di andare avanti passo dopo passo, senza arrendermi, e alla fine ho raggiunto il mio obiettivo. Questo traguardo è anche il risultato della mia determinazione e della fiducia che ho imparato ad avere in me.