

**POLITECNICO DI TORINO**

Dipartimento di Architettura e Design

**Corso di laurea triennale  
in Design e Comunicazione**

**FOTOCATALISI:  
la luce come mezzo  
per la purificazione dell'aria**



**Relatore**

Chiar.mo Prof.  
Massimo Messori

**Candidata**

Anna Orefici

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

# INDICE

1) <b>Introduzione</b> .....	4
2) <b>Storia del fenomeno fotocatalitico</b> .....	6
2.1 <i>le prime scoperte</i> .....	6
3) <b>Fenomeno fotocatalitico</b> .....	8
3.1 <i>processo fotocatalitico</i> .....	8
3.2 <i>biossido di titanio</i> .....	10
3.3 <i>triossido di tungsteno</i> .....	13
4) <b>Materiali impiegati</b> .....	14
4.1 <i>cemento fotocatalitico</i> .....	14
4.2 <i>materiali plastici fotocatalitici</i> .....	17
4.3 <i>tessuti fotocatalitici</i> .....	17
4.4 <i>vetri fotocatalitici</i> .....	18
4.5 <i>vernici fotocatalitiche</i> .....	20
4.5.1 <i>Airlite</i> .....	20
4.6 <i>casi studio nel mondo del design</i> .....	21
5) <b>Vantaggi e benefici dell'utilizzo di questo processo</b> .....	25
5.1 <i>inquinamento atmosferico</i> .....	25
5.2 <i>principali agenti inquinanti</i> .....	26
5.3 <i>conseguenze dell'inquinamento atmosferico</i> .....	28
6) <b>Progetto lampadario</b> .....	29
6.1 <i>introduzione</i> .....	29
6.2 <i>ciò che non si vede</i> .....	29
6.3 <i>concept</i> .....	31
6.4 <i>Light Waves</i> .....	32
6.5 <i>dimensioni e quote</i> .....	33
7) <b>Conclusioni</b> .....	36
8) <b>Bibliografia e sitografia</b> .....	40
8.1 <i>riferimenti figure</i> .....	41



## 1) Introduzione

Questa ricerca nasce dalla curiosità e dalla volontà di conoscere ciò che mi circonda. Le risorse che ogni giorno abbiamo a disposizione possono essere fonti per soluzioni nuove, che l'uomo può adottare nella scomposizione di problematiche complesse. Un esempio di risorsa è sicuramente la luce solare, fonte rinnovabile ed inesauribile di energia, principio scatenante di molti processi naturali sul nostro pianeta. L'osservazione di quest'ultimi ha suscitato negli anni una forte curiosità nel settore scientifico, tanto ricercare la diretta interazione tra luce e oggetto anche a livello chimico. In questo studio infatti la fotosintesi clorofilliana viene identificata come punto di partenza per le scoperte tecnologiche a venire; gli studiosi faranno riferimento a questo processo naturale per ricondurlo successivamente ad una delle scoperte più importanti che modificherà la chimica attuale, ovvero il processo fotocatalitico. La fotocatalisi è un processo chimico, dalla giovane identificazione, ma che porta con sé la possibilità di essere un elemento di svolta nella vita quotidiana. Il primo elemento che favorisce l'attivazione di questa reazione è la luce solare, la quale irradiando la superficie presa in esame, innesca le reazioni di ossidazione e riduzione. Il secondo è l'elemento semiconduttore, responsabile delle reazioni chimiche prima citate e nella maggior parte dei casi vengono impiegati il biossido di titanio ( $\text{TiO}_2$ ) e il triossido di tungsteno ( $\text{WO}_3$ ).

L'approfondimento di questo tema mi ha consentito di avere una visione generale e completa del processo chimico che viene attuato al momento dell'esposizione solare dei materiali fotocatalitici e da questo ho portato avanti un progetto. Quest'ultimo consiste nella realizzazione di un lampadario a soffitto realizzato in vetro ricoperto da un coating di triossido di tungsteno. Oltre a svolgere la funzione originale come di fonte di luce, l'oggetto purifica l'aria dell'ambiente interno in cui è posto, favorendo così l'eliminazione delle molecole inquinanti. Il tema della purificazione dell'aria ha avuto un incremento molto importante, specialmente in questi ultimi anni con l'avvento del Covid-19. L'attenzione verso la pulizia allora si è riversata in un accurato controllo degli ambienti domestici e in special modo nell'areazione degli spazi interni. L'opportunità di avere nel proprio appartamento un oggetto che svolga questa duplice funzione, è sicuramente un valore aggiunto al proprio arredamento.

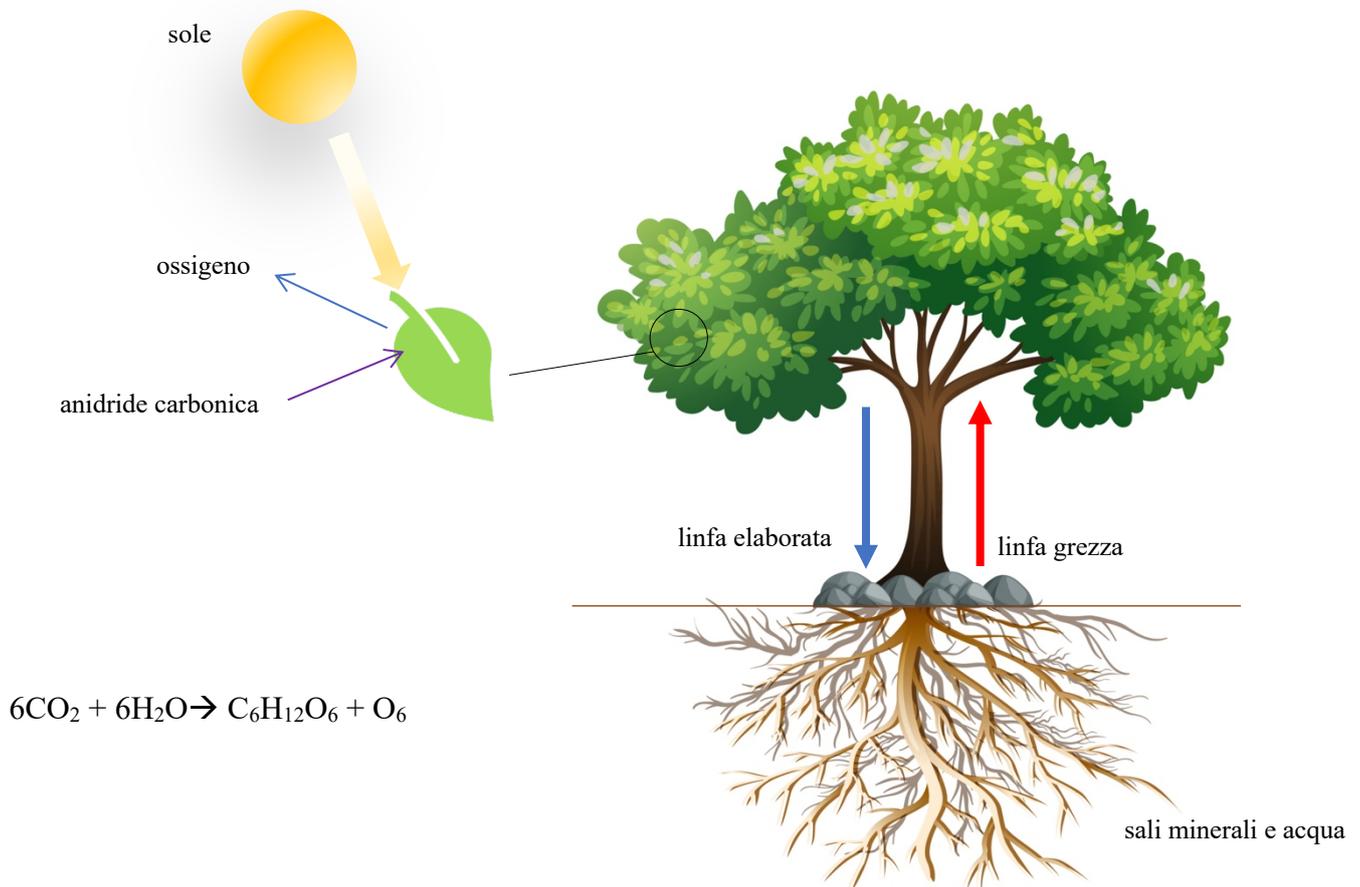


## 2) Storia del fenomeno fotocatalitico

### 2.1 *Le prime scoperte*

Spesso è la natura ad ispirarci e a fornirci le soluzioni giuste ai problemi che noi esseri umani causiamo. L'attenta osservazione delle spontanee ciclicità naturali diventa il mezzo principale per l'avanzamento scientifico-tecnologico.

In questo specifico caso il fenomeno naturale riconducibile per analogia al processo fotocatalitico è sicuramente la fotosintesi clorofilliana, vitale meccanismo biochimico grazie al quale le piante attraverso la luce solare producono i nutrienti necessari alla propria sopravvivenza (**Figura 1**). La luce solare diventa quindi il mezzo scatenante di questa reazione.



**Figura 1**- Illustrazione del processo della fotosintesi clorofilliana e relativa reazione chimica [21]

Nel 1950 il professore Kato Masuo iniziò i primi esperimenti riconducibili ad una prima fase di ricerca dell'attualmente noto processo fotocatalitico.

Il professore dell'Istitute of Tecnology di Kyoto sviluppò e accrebbe l'adozione di elementi catalizzatori, ovvero di specie chimiche in grado di modificare una reazione chimica accelerandone o rallentandone la velocità originaria.

Successivamente, agli inizi degli anni '70 due ricercatori, Honda e Fujishima, riuscirono a scindere l'acqua in idrogeno e ossigeno grazie all'utilizzo di una luce UV visibile (elettrolisi), ottenendo così:



Le ricerche nell'ambito continuarono, fino a quando nel 1979 i professori Inoue e Fujishima diedero vita all'era del fotocatalitico grazie alla pubblicazione del loro studio condotto dalla visione della reazione in acqua dei cristalli di biossido di titanio esposti alla luce solare. Con questo esperimento si ebbe un immediato riscontro e una diretta similitudine tra il processo naturale della fotosintesi e quello ricreato in laboratorio della fotocatalisi, ma quest'ultimo si presentava ancora molto limitato poiché entrava in gioco unicamente in una determinata fascia di frequenza luminosa. Solo successivamente nel 2009, il professore Taoda Hiroshi estese la riuscita della reazione anche con irradiazioni luminose più deboli, rendendo l'impiego del processo fotocatalitico più accessibile [6,7].

### 3) Fenomeno fotocatalitico

#### 3.1 Processo fotocatalitico

La fotocatalisi viene quindi definita come il processo grazie al quale alcuni elementi semiconduttori, quando esposti alla luce solare, innescano reazioni chimiche di riduzione o di ossidazione accelerando la reazione chimica coinvolta. I semiconduttori, denominati in questo caso fotocatalizzatori, divengono molto ossidanti, tanto da decomporre le sostanze inorganiche ed organiche presenti nell'ambiente circostante e convertirle in sostanze innocue come acqua, sali e anidride carbonica.

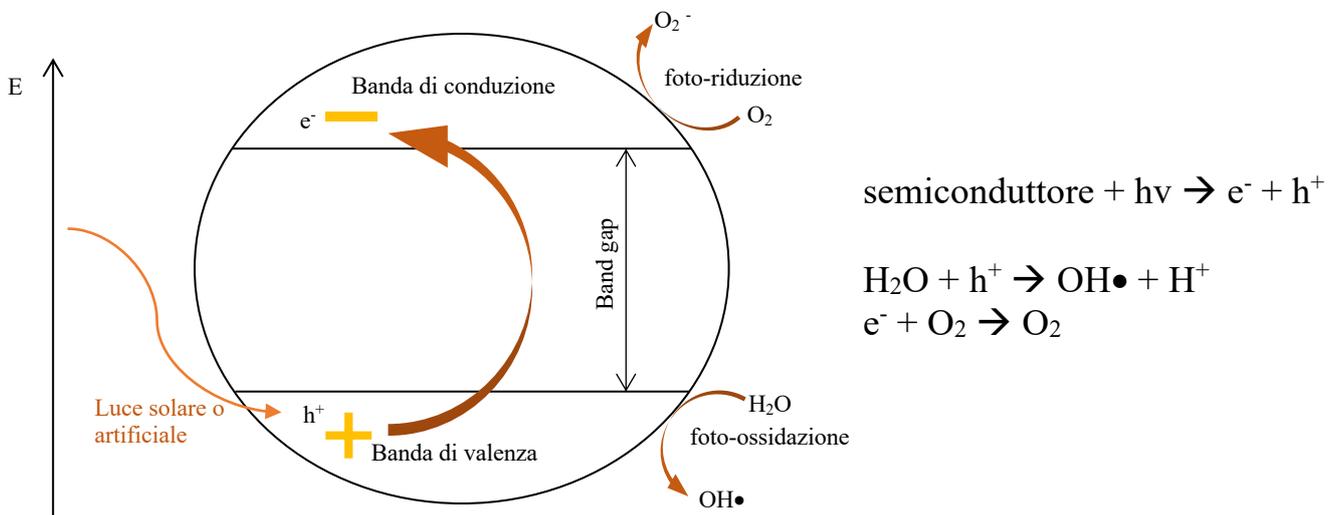


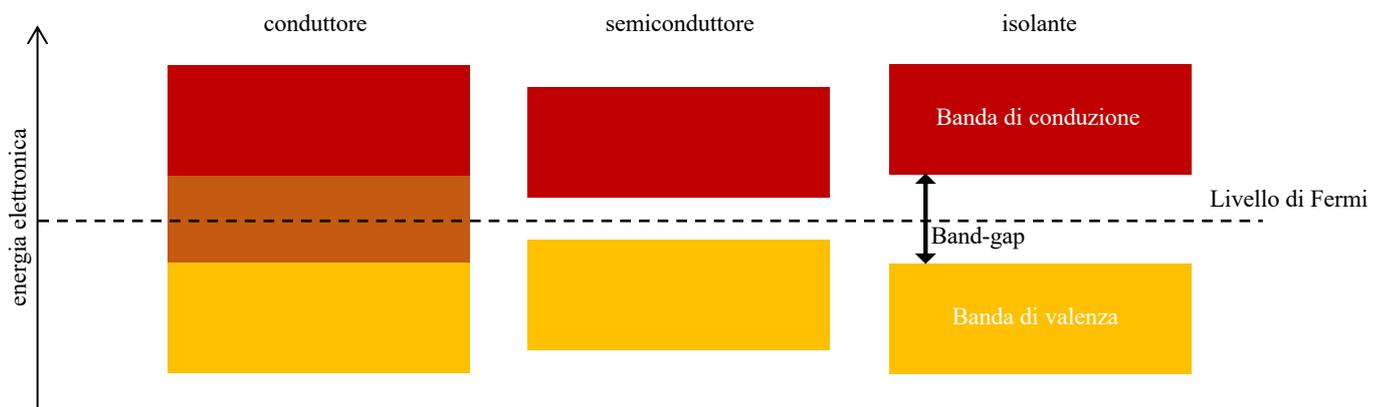
Figura 2- Illustrazione delle reazioni di foto-riduzione e foto-ossidazione

Quando un elettrone, esposto alla luce solare o alla luce artificiale, attraversa il band gap per raggiungere la banda di conduzione, genera nella banda di valenza una buca, detta anche vacanza libera ( $h^+$ ). Il rapporto elettrone-buca genera a sua volta reazioni di riduzione (ione superossido) e di ossidazione (radicali ossidrilici). I risultati delle due reazioni sono entrambi fortemente ossidanti e andranno a degradare gli agenti inquinanti presenti nell'aria (**Figura 2**).

I principali protagonisti di questa reazione sono sicuramente i semiconduttori, classificati in questo caso come materiali fotocatalizzatori, e quello più ampiamente utilizzato è sicuramente il biossido di titanio ( $TiO_2$ ).

Per comprendere a pieno l'attivazione dei catalizzatori in gioco è importante conoscere a livello chimico la loro struttura e il loro funzionamento. Sono infatti presenti tre differenti tipologie di elementi: i materiali conduttori, i materiali semiconduttori e i materiali isolanti. Questa differenziazione dipende dal loro comportamento a livello chimico, il quale può essere illustrato secondo il modello delle bande.

Gli atomi di ciascun materiale presentano due bande di energia: la prima prende il nome di banda di valenza, nasce dall'interazione degli orbitali atomici degli atomi stessi e gli elettroni possono occuparla o completamente o parzialmente; la seconda viene indicata come banda di conduzione, ha un'energia maggiore rispetto alla precedente perché prende origine dall'interazione degli orbitali atomici e solitamente non è occupata dagli elettroni. Queste due bande assumono due differenti comportamenti: se si trovano ravvicinate o parzialmente sovrapposte, gli elettroni saranno facilitati allo scorrimento e ciò avviene specialmente nei materiali conduttori; se invece le bande sono distanziate fra loro, l'area di distacco tra le due (band-gap o gap energetico) impedisce l'adeguato passaggio degli elettroni, i quali non fluiscono correttamente; questo è tipico nei materiali semiconduttori ed isolanti (**Figura 3**).



**Figura 3-** Composizione delle bande di conduzione e di valenza dei materiali conduttori, semiconduttori e isolanti

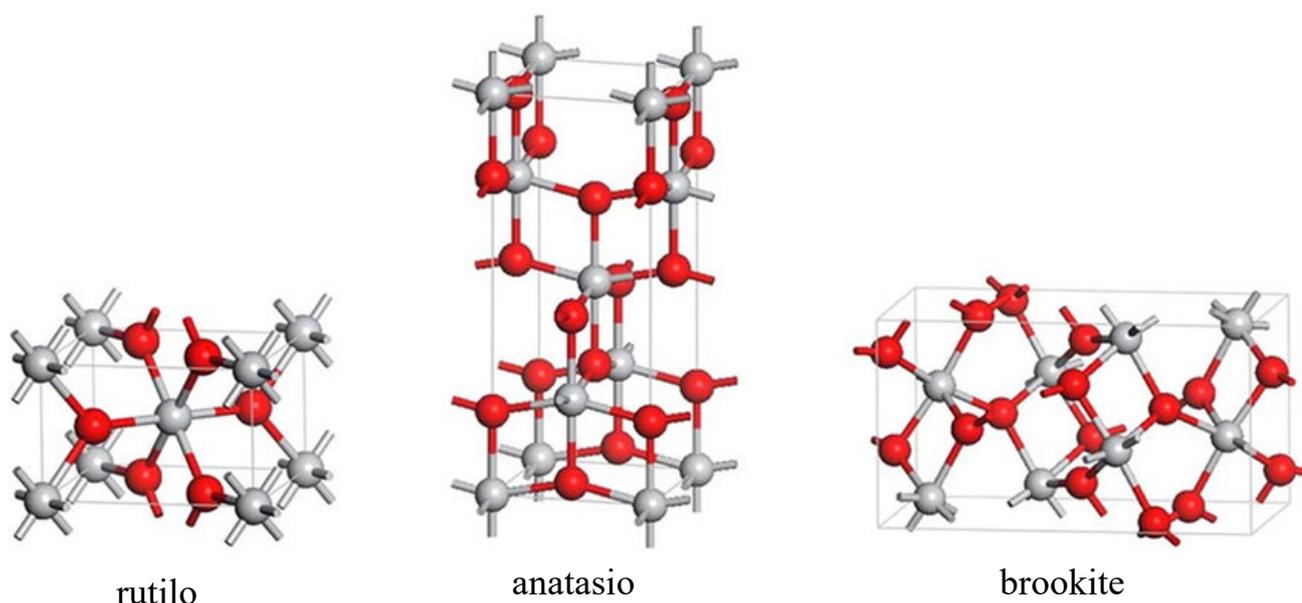
In questo secondo e ultimo caso, quando un elettrone eccitato supera la banda di valenza e raggiunge quella di conduzione si viene a formare nella prima banda una buca di potenziale. Il rapporto della buca formata e dell'elettrone eccitato è la base del meccanismo fotocatalitico [8].

### 3.2 Biossido di Titanio

Il biossido di titanio è uno dei composti chimici più diffusi in natura e, per il processo della fotocatalisi, è il fotocatalizzatore maggiormente usato poiché presenta un'elevata stabilità fotochimica e termica, è idoneo per reazioni di ossidazione e riduzione, non è tossico ed è relativamente economico.

Può essere classificato sotto tre tipologie principali, a seconda della sua conformazione strutturale (**Figura 4**):

- rutilo
- anatasio
- brookite

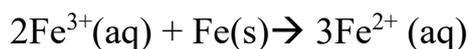


**Figura 4-** Le tre tipologie di biossido di titanio che si possono trovare in natura [22]

Il processo di produzione più comune di questo composto è il processo al solfato. Il minerale di partenza, ilmenite FeTiO<sub>3</sub>, è macinato e aggiunto insieme all'acido solforico, dal quale si ottiene la seguente reazione:



Affinché il ferro nei passaggi successivi si separi dal titanio, è importante riportare tutto il ferro presente nella reazione in forma Fe<sup>2+</sup>, per questo si avrà:



Successivamente avviene l'idrolisi del solfato di titanile, il quale diventa biossido di titanio idrato:



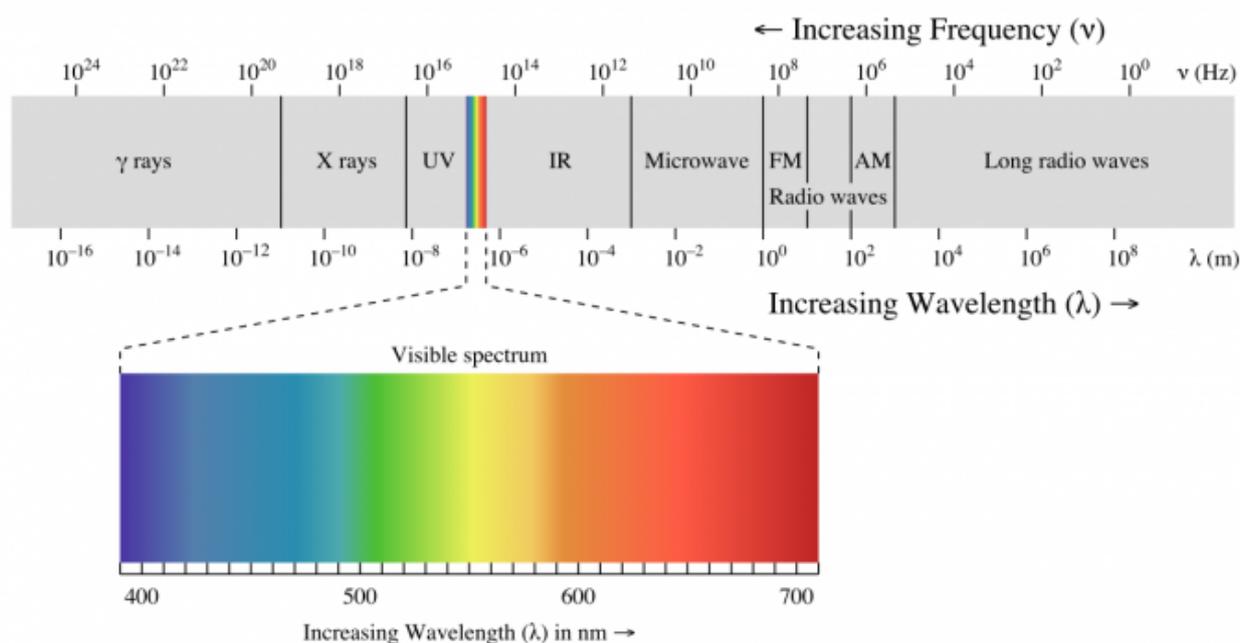
Da qui il composto solido è posto in un forno detto calcinatore, il quale roteando favorisce l'evaporazione dell'acqua e la decomposizione dell'acido solforico rimanente. Il composto finale sarà successivamente macinato della grandezza delle particelle desiderata [9].

Il biossido di titanio si presenta quindi come una polvere cristallina bianca (**Figura 5**) e grazie al suo elevato indice di rifrazione, prossimo a quello del diamante, risulta avere un'elevata coprenza opacizzante, un'elevata resistenza al calore e un ridotto assorbimento della luce del visibile. Queste spiccate caratteristiche lo rendono uno dei pigmenti più performanti e per questo più utilizzati al mondo. I suoi impieghi sono molteplici: principalmente questo composto viene utilizzato nel settore dell'edilizia e delle costruzioni, nella produzione di vernici, rivestimenti e smalti, detti anche coating, nell'ambito alimentare e medico, ma può essere anche aggiunto all'interno di cementi o materiali plastici.



**Figura 5-** Il biossido di titanio in polvere [23]

Nel settore fotocatalitico, il biossido di titanio si presenta come un elemento di grande importanza assumendo caratteristiche autopulenti, antibatteriche e quindi di purificazione. Queste sue capacità si sviluppano maggiormente all'esposizione del composto chimico sotto irradiazioni UV, molto più debolmente invece mediante la luce visibile. Nella **Figura 6** viene illustrato lo spettro elettromagnetico della luce e le relative frequenze e lunghezze d'onda che lo caratterizzano.



**Figura 6-** Lo spettro elettromagnetico della luce [24]

Per ampliare l'attivazione fotocatalitica del biossido di titanio anche nel VIS, ovvero nello spettro del visibile, è necessario dopare il composto attraverso l'utilizzo di metalli e non metalli. In questo modo si andranno a modificare le proprietà elettroniche del materiale e aumenteranno i livelli energetici disponibili nel gap energetico.

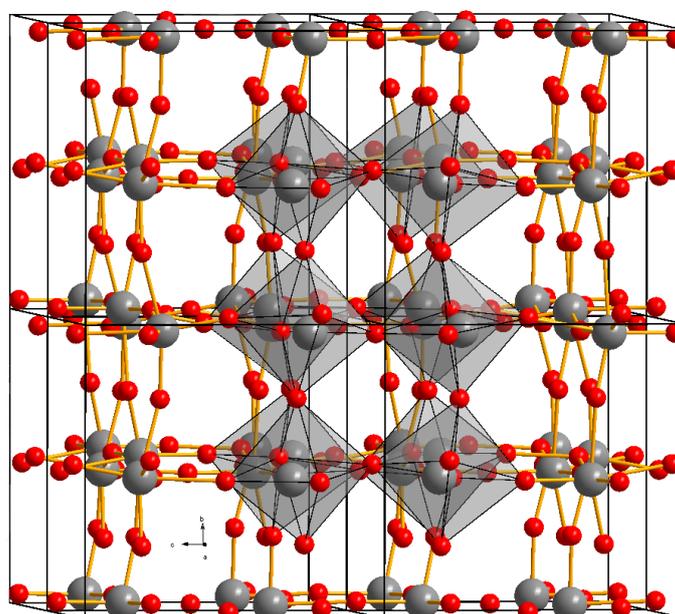
Vi è però un composto chimico che attiva maggiormente le proprie capacità fotocatalitiche se esposto alla luce visibile rispetto al  $\text{TiO}_2$  ed è il triossido di tungsteno.

### 3.3 Triossido di Tungsteno

Il tungsteno, o wolframio, è un metallo di transizione e si presenta di colore grigio-bianco, sia in forma di polvere sia di metallo lucente. In natura viene principalmente estratto come  $(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$  dai minerali e  $\text{CaWO}_4$  da scheelite.

Sotto forma di triossido di Tungsteno ( $\text{WO}_3$ ) viene impiegato come fotocatalizzatore per il processo della fotocatalisi e, rispetto al biossido di titanio, presenta un migliore trasporto elettronico, risultando essere maggiormente performante anche durante l'esposizione al VIS.

La sua conformazione cristallina si presenta così strutturata (**Figura 7**):



**Figura 7**- Struttura cristallina del triossido di tungsteno [25]

Il composto si presenta come una finissima polvere gialla ed è uno dei semiconduttori maggiormente investigati per la sua ottima stabilità chimica, bassa tossicità, resistenza alla corrosione e il suo elevato numero di vacanze di ossigeno. Quest'ultima caratteristica influisce sulla densità dell'elemento stesso, andando così a migliorare le proprietà d'assorbimento della luce.

Questo composto chimico viene impiegato in diversi settori, i principali sono quello elettrochimico e quello relativo al processo fotocatalitico.

Nel primo ambito viene spesso utilizzato come film, quindi come pellicola sottile, il quale favorisce un cambiamento cromatico attraverso la presenza di un minimo potenziale di corrente. Nel secondo ambito, quello della fotocatalisi, può svolgere

un'attività depurativa sia dell'acqua sia dell'aria, mineralizzando gli agenti inquinanti presenti nell'ambiente.

L'azione fotocatalitica che svolge il triossido di tungsteno, ma anche del composto  $W_{18}O_{49}$ , è usufruibile soprattutto al momento dell'esposizione del composto sotto lo spettro del visibile, favorendone così un maggiore flessibilità d'uso. Per ridurre il band-gap del composto, ovvero la distanza fra la banda di valenza e la banda di conduzione, e per aumentare il range di assorbimento luminoso, si può aggiungere al triossido di tungsteno altri elementi semiconduttori, come il  $TiO_2$  o una miscela di platino, la quale accrescere le proprietà depurative anche in presenza di una scarsa luminosità.

L'applicazione fisica di questa tecnologia viene impiegata attraverso l'utilizzo di film fotocatalitici e molti sono gli esperimenti condotti e i risultati ottenuti nella realizzazione di questi dispositivi.

#### **4) Materiali impiegati**

La fotocatalisi, a seconda del materiale preso in esame, svolge diverse funzionalità. I materiali vengono quindi combinati con questo processo chimico per accrescere le loro prestazioni in termini di pulizia della superficie sulla quale è applicato e dell'ambiente circostante. Il semiconduttore maggiormente impiegato insieme a questi materiali di base è il biossido di titanio.

I materiali principali sono:

- cemento
- materiali plastici
- tessuti
- vetro
- vernici

##### *4.1 Cemento fotocatalitico*

L'inquinamento atmosferico nelle grandi città è un tema molto ricorrente ai giorni nostri e dalla grande importanza della salvaguardia ambientale e della salute umana. L'aria delle città si presenta come un concentrato di gas di scarico dei mezzi di trasporto, sia pubblici sia privati, e le conseguenze hanno risvolti negativi sul benessere urbano.

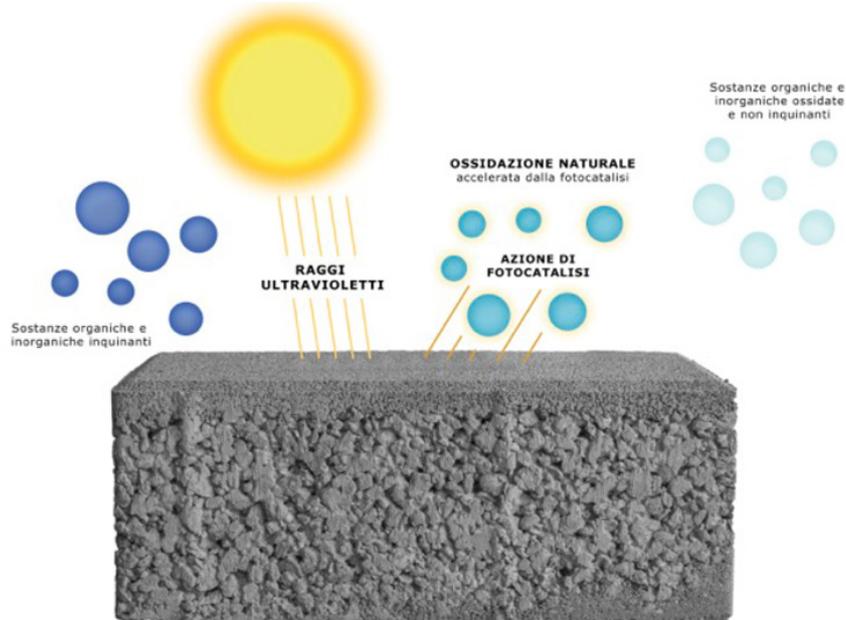
L'adozione di materiali che riducono la presenza di sostanze inquinanti nell'ambiente può essere un primo passo verso una riqualificazione dell'aria cittadina. Tra questi materiali vi è sicuramente il cemento, elemento fondante nell'ambito edile-costruttivo. Il processo produttivo per la generazione di questo tipo di materiale non si allontana dalla classica procedura, infatti il cosiddetto cemento fotocatalitico non è nient'altro che un blocco di cemento tradizionale con uno strato di 1 cm di cemento con l'aggiunta del semiconduttore (il biossido di titanio). Quest'ultimo strato sarà quello esposto verso l'ambiente nel quale si vuole attivare il processo fotocatalitico, per esempio se si vuole utilizzare questo materiale come elemento costruttivo di un edificio, la parte fotocatalitica risulterà essere visibile nella facciata esterna della struttura.

Il biossido di titanio svolge una funzione di autopulizia sulla superficie del materiale, andando a rilasciare nell'ambiente le sostanze inquinanti degradate in acqua e sali innocui. Una conseguenza diretta rispetto a questa caratteristica è sicuramente la conservazione e la durabilità del materiale, il quale tenderà a mantenere più a lunga la brillantezza e il colore originale. Questo implica inoltre una significativa riduzione dei costi di manutenzione degli edifici e delle strutture realizzate con questo materiale. Un esempio di edificio costruito in cemento fotocatalitico è la Chiesa di Dio Padre Misericordioso, chiamata anche chiesa del Dives, a Roma in **Figura 8**: il materiale impiegato garantisce una duratura brillantezza alla struttura, con una conseguente riduzione dei costi di manutenzione.



**Figura 8**- Chiesa di Dio Padre Misericordioso a Roma, esempio di utilizzo del cemento fotocatalitico [26]

Un altro impiego molto interessante del cemento fotocatalitico è quello inerente al manto stradale: la combinazione dell'asfalto comune insieme ad uno strato superficiale pari a 1-1.5 cm di cemento fotocatalitico, come illustrato in **Figura 9**, ha permesso la realizzazione di una nuova tipologia di suolo urbano.



**Figura 9**- Sezione del materiale fotocatalitico e illustrazione del processo di fotocatalisi [27]

La procedura di deposizione può essere effettuata sia automaticamente, con macchine specifiche, sia manualmente. L'asfalto fotocatalitico mantiene invariate le proprietà del cemento classico, andando però ad apportare maggiore attenzione verso l'ambiente grazie alle sue caratteristiche antinquinamento e di longevità.

Il cemento fotocatalitico può assumere un'ulteriore forma, quella di piastrelle. Sono state introdotte sul mercato nel 1998 e da allora sono state utilizzate in diversi ambiti, dalla ristorazione al settore medico. Sulla superficie della classica piastrella viene spruzzato una sospensione acquosa con biossido di titanio, quest'ultimo presente o sotto forma di gel o in polvere; il materiale viene poi successivamente riscaldato ad elevate temperature per garantire la sinterizzazione delle particelle e quindi la completa adesione delle due componenti.

## 4.2 *Materiali plastici fotocatalitici*

L'ottenimento di materiali plastici fotocatalitici è in questo caso molto difficile rispetto ai materiali precedentemente elencati. Una prima problematica che si viene a riscontrare al momento della effusione dei due elementi, del  $\text{TiO}_2$  e del materiale plastico, è sicuramente la loro diversità chimica. Il biossido di titanio affinché si possa fondere ed unire completamente al materiale base deve essere riscaldato ad elevate temperature per favorire la propria cristallizzazione o la sinterizzazione delle proprie particelle. Questo aspetto risulta essere limitante per i materiali plastici comuni poiché non possono essere trattati a temperature maggiori di  $200^\circ\text{C}$  in quanto perderebbero la maggior parte delle loro proprietà meccaniche.

Il processo più utilizzato per rendere la plastica fotocatalitica è quindi l'applicazione di uno spray-coat esterno rispetto al materiale base. Lo strato esterno di  $\text{TiO}_2$  favorisce quindi la generazione delle caratteristiche proprietà fotocatalitiche. Per avere una maggiore sicurezza di adesione delle due parti si può ricorrere ad un ulteriore trattamento chimico della superficie o semplicemente scegliendo il polimero plastico più affine per l'utilizzo ultimo del prodotto. Uno dei materiali plastici più performanti in questo campo è il policarbonato, impiegato in vari settori come l'edilizia e l'automotive [3].

## 4.3 *Tessuto fotocatalitico*

Anche nel settore del tessile sono state portate avanti numerose ricerche per favorire l'accrescimento dell'utilizzo di prodotti fotocatalitici. Il ruolo principale di questi innovativi materiali è quello dell'autopulizia, quindi della sanificazione da batteri e altri elementi esterni alla superficie. La fibra tessile più idonea per questa tecnologia è il cotone, altri filati meno performanti possono essere la lana, la seta e la canapa. Quest'ultimi risultano essere difficili da combinare con il biossido di titanio in quanto sono composti principalmente da cheratina, una proteina ricca di zolfo.

Per realizzare il cotone fotocatalitico è necessario immergere la stoffa in un bagno di sapone e carbonato di sodio; successivamente viene unito il biossido di titanio grazie ad un additivo amino siliconico reattivo.

Un altro metodo, più comune, per rendere fotocatalitico il cotone è attraverso l'utilizzo di uno strato esterno con l'aggiunta del semiconduttore.

Per le fibre tessili aventi la cheratina il processo produttivo è più difficoltoso rispetto ai precedenti. Come già detto questa proteina e il biossido di titanio risultano essere di

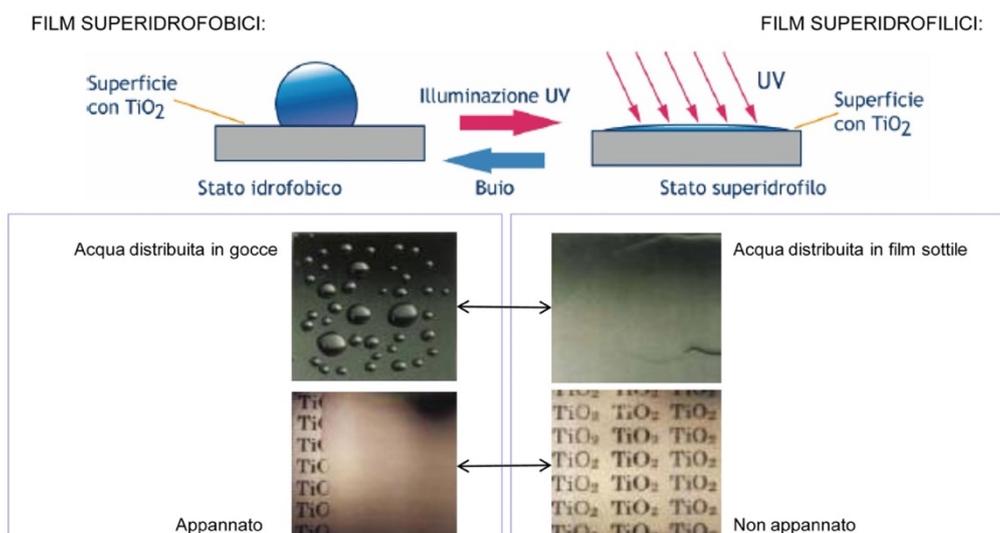
difficile combinazione, ma grazie ad un processo più attento e mirato anche queste fibre possono assumere le proprietà fotocatalitiche. Il biossido di titanio viene quindi applicato meticolosamente sul filato a basse temperature grazie alla tecnica del sol-gel.

Questa tipologia di tessuti, oltre a decomporre le sostanze nocive nell'aria, può rimuovere l'odore del fumo dalla stoffa stessa e può essere di grande aiuto per gli amanti dello sport, poiché favorisce l'autopulizia dei propri indumenti.

L'utilizzo del tessuto fotocatalitico ha trovato spazio anche nel mondo dell'arredamento, con l'impiego di queste stoffe anche per tendoni e cuscini da esterno [3].

#### 4.4 *Vetro fotocatalitico*

Questa tipologia di materiale è molto utilizzata specialmente per la spiccata caratteristica autopulente. Ad oggi i ricercatori proseguono i loro studi per il miglioramento di questa capacità, grazie all'impegno di film contenenti biossido di titanio. Affinché la proprietà autopulente si attivi è necessario applicare su tutta la superficie del materiale un film, ovvero una pellicola ceramica contenente il semiconduttore. Il processo di attivazione della fotocatalisi rimane invariato, quindi grazie all'esposizione solare del materiale stesso. Quando il materiale viene a contatto con l'acqua, quest'ultima assume conformazioni differenti, a seconda dell'interazione che si viene a creare tra la superficie trattata e liquido stesso. Questa interazione si può manifestare secondo due diverse tipologie (**Figura 10**).



**Figura 10-** Superidrofobicità e superidrofilità delle superfici [28]

La prima viene chiamata superidrofobicità e comporta la repulsione dell'acqua sulla superficie a contatto. Poiché l'angolo di contatto del liquido sul materiale è compreso tra i  $90^\circ$  e i  $120^\circ$ , l'acqua tenderà ad organizzarsi in gocce, le quali scivoleranno sulla superficie stessa. Durante il loro rotolamento, le gocce raccolgono le molecole inquinanti sul materiale attuando così una vera e propria autopulizia. Questo processo ripulente viene spesso associato al comportamento idrofobico delle foglie di loto, le quali lasciano scorrere l'acqua su tutta la loro superficie (**Figura 11**).



**Figura 11-** Fotografia di una foglia di loto al contatto con l'acqua [29]

La seconda tipologia viene definita superidrofilicità e avviene con l'esposizione ai raggi UV del materiale, ricoperto con il film in biossido di titanio. L'acqua sopra la superficie presa in esame tenderà a formare un film sottile, andando ad impedire l'adesione dello sporco sul materiale. Il sottile strato d'acqua oltre a mantenere costante la pulizia superficiale, minimizza i tempi di asciugatura del materiale, impedendo anche l'appannamento del vetro [28].

Questo particolare vetro è maggiormente impiegato negli ambienti dove l'igiene risulta essere un'importante tema, come per esempio nelle piscine, negli ospedali, servizi pubblici, nelle scuole, ma anche in strutture come aziende private e condomini. Uno sviluppo maggiore di utilizzo di questo materiale favorirebbe la diminuzione di spray industriali e altre sostanze chimiche volte alla pulizia della superficie stessa del materiale. Inoltre, si andrebbe ad accrescere il livello di purificazione dell'aria, sia in ambienti esterni sia in ambienti interni.

## 4.5 Vernici fotocatalitiche

Sono conosciute come vernici “mangia smog” per la loro incredibile proprietà di degradare le sostanze organiche ed inorganiche nocive presenti nell’aria. Il principio fotocatalitico rimane invariato e il loro utilizzo spazia dagli ambienti interni, come in abitazioni private, ospedali o piscine, a quelli esterni, come facciate di condomini, aziende e strutture pubbliche.

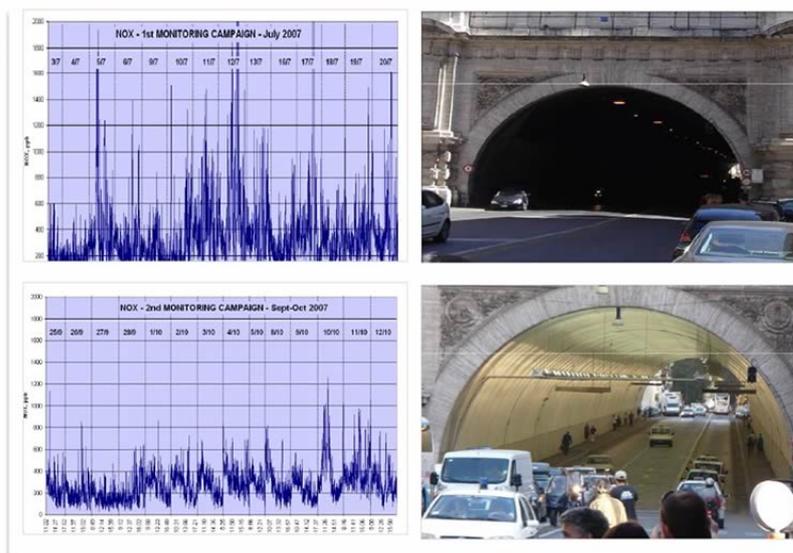
### 4.5.1 Airlite

Una realtà che si impegna per incentivare l’impiego di queste vernici è sicuramente l’azienda Airlite. La missione principale di questa realtà è la volontà di migliorare attivamente il benessere abitativo, ricercando e creando prodotti e materiali sostenibili ed affidabili. La pittura Airlite è 100% minerale e si presenta sotto forma di polvere, pronta per essere diluita in acqua. Per l’applicazione della pittura negli ambienti interni si procede inizialmente con la stesura di una base di sottofondo, per poi concludere con l’Airlite Purelight Interior. La vernice consente di ridurre fino al 99,9% batteri e virus presenti nell’ambiente, anche nelle ore notturne, elimina i cattivi odori e inibisce la deposizione di sostanze inquinanti sulla parete. Oltre alla linea di vernici dedicate agli interni, vi sono anche quelle specifiche per gli ambienti esterni e per i trattamenti antimuffa e antibatteri. Un esempio di applicazione di questa vernice si è verificato all’interno del Tunnel Umberto I a Roma (**Figura 12**) [11].

Test Tunnel  
Umberto I  
(Roma)

Riduzione  
NOx 51%

ed eliminazione  
di tutti i picchi



airlite

Figura 12- Fotografie e grafici del tunnel prima e dopo l’applicazione della vernice [30]

## 4.6 Casi studio nel mondo del design

- a) Sono molteplici gli esempi di utilizzo di questa tecnologia nel mondo del design. Partendo dal settore dell'edilizia e delle costruzioni troviamo l'Ospedale Manuel Gea Gonzalez a Città del Messico. La facciata principale dell'edificio è stata ristrutturata nel 2013 a fronte di un elevato livello di inquinamento dell'aria nella capitale messicana. Lo studio di Berlino Elegant Embellishments ha realizzato i caratteristici pattern geometrici tridimensionali, aggiungendo all'impasto base del materiale il biossido di titanio, avviando così l'inizio alla riduzione dei composti organici volatili e di altri agenti inquinanti presenti nell'aria. L'esposizione alla luce solare consente l'attivazione della reazione chimica fotocatalitica, garantendo una diminuzione giornaliera di gas nocivi presenti nell'ambiente circostante pari a quella di mille automobili. La facciata quindi non si presenta solo come pura opera estetica, ma porta con sé una specifica funzionalità volta al benessere ambientale.



Figure 13, 14,15- Facciata dell'Ospedale Manuel Gea Gonzalez [31]

b) Nel 2015 per l'Expo di Milano è stato realizzato il Palazzo Italia, una delle strutture più significative dell'evento stesso. L'edificio è stato costruito grazie all'utilizzo di un particolare cemento, chiamato TX Active, brevettato dall'azienda Italcementi. L'utilizzo di questo materiale è stato impiegato non solo per la complessa reticolazione esterna della struttura, ma anche per porzioni di alcune superfici interne. Il cemento TX Active racchiude il principio attivo della fotocatalisi, trasformando gli agenti inquinanti nell'aria in sali innocui. Secondo una ricerca, l'impiego edilizio anche solo del 15% di questo materiale favorirebbe la riduzione dell'inquinamento circa della metà in una città grande come Milano.

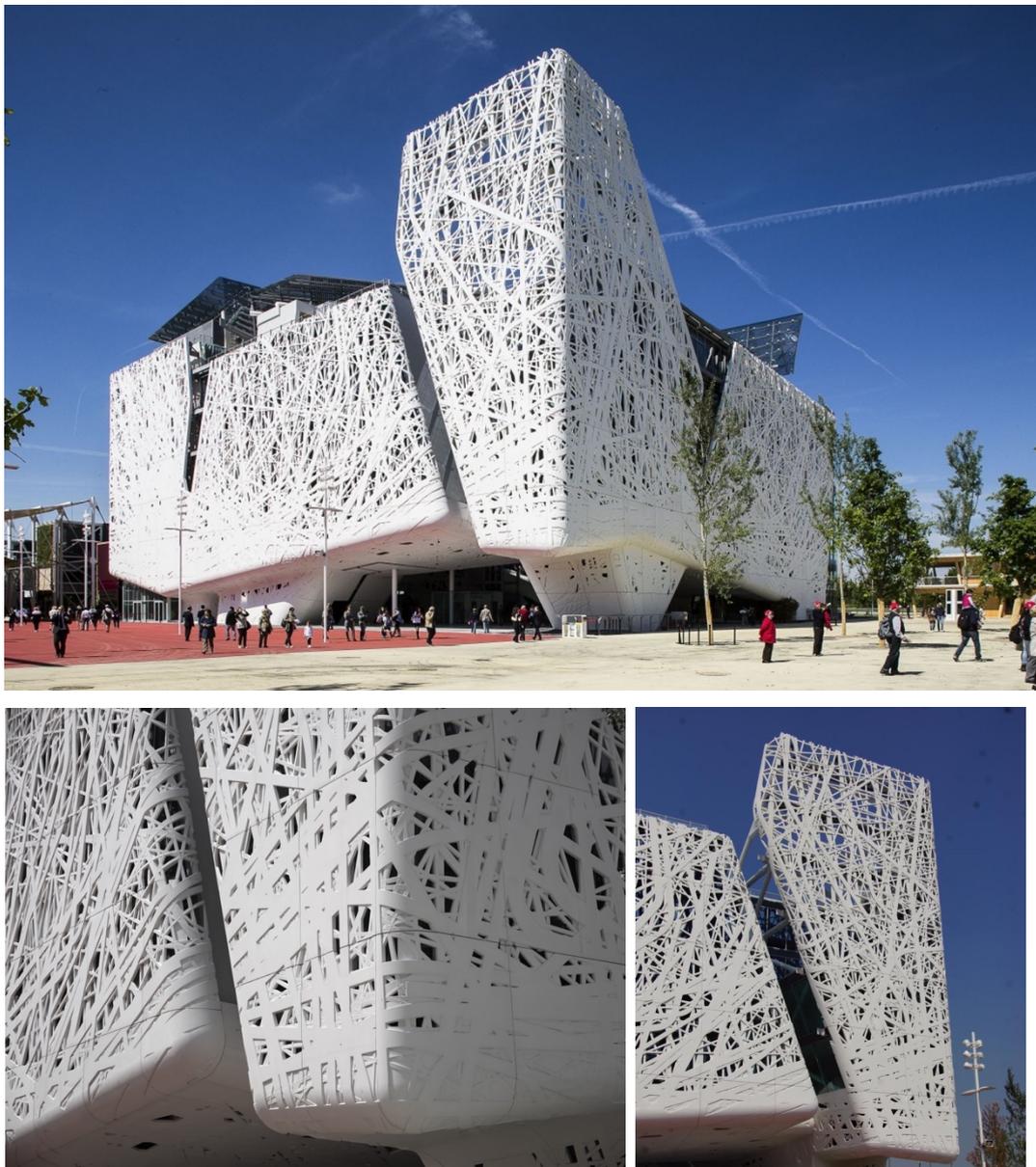


Figura 16,17,18- Palazzo Italia per l'Expo 2015 a Milano [32]

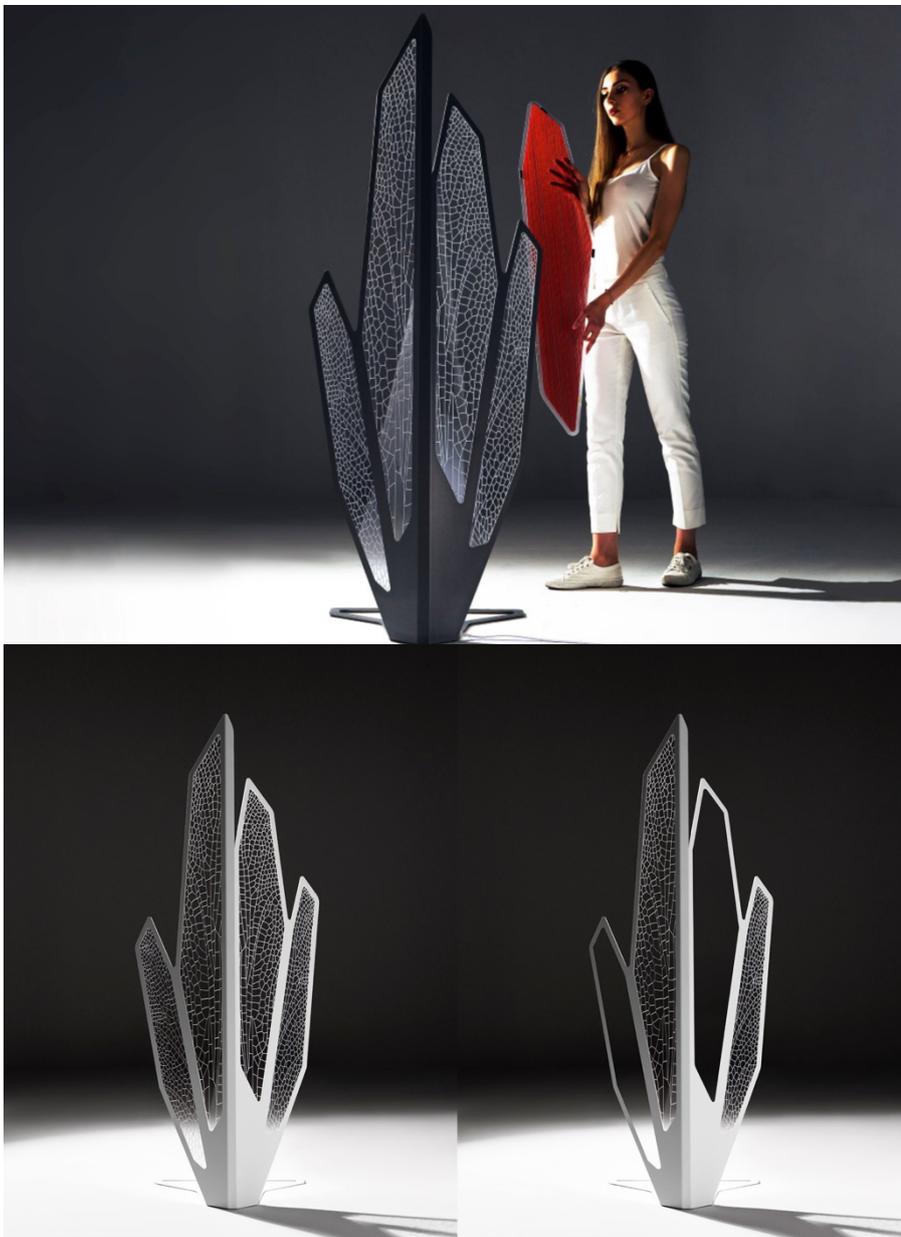
c) Sotto forma di vernice, l'effetto fotocatalitico viene impiegato per il murales Hunting Pollution, realizzato dall'artista Iena Cruz nel 2018 insieme a Yourban2030. L'opera si trova a Roma in un edificio all'angolo presso via del porto Fluviale, nel quartiere Piramide, uno dei più inquinati della capitale. Il disegno illustra un grande airone intento a cacciare la propria preda: l'animale in via d'estinzione simboleggia la costante minaccia che l'inquinamento causa alla natura e agli esseri viventi.

Il murales si estende su una superficie di 100 metri quadrati, i quali presentano le stesse proprietà di ripulire l'aria circostante pari alla presenza di trenta alberi. Un dato rilevante che renderebbe l'illustrazione la più grande opera di street art rigenerativa d'Europa.



Figura 19, 20, 21- Murales Hunting Pollution dell'artista Iena Cruz [33]

d) Foglia è una lampada da terra realizzata dal designer Kevin Chu. Prendendo ispirazione dalla caratteristica struttura vascolare delle foglie delle piante e dal meccanismo della fotosintesi clorofilliana, Kevin Chu realizza questo oggetto di design, personalizzabile con l'aggiunta di schermi di diversi colori. L'azione fotocatalitica è sollecitata da qualsiasi fonte luminosa, sia naturale sia artificiale, azionando così il processo di eliminazione delle sostanze inquinanti presenti nell'ambiente anche nelle ore notturne. Lo scheletro della lampada è realizzato in acciaio trattato con sostanze fotocatalitiche, mentre gli schermi colorati sono in acrilico, anche quest'ultimo con l'aggiunta di elementi fotocatalizzanti. L'oggetto può essere attivato a distanza grazie all'inserimento di un sistema wifi integrato.



**Figura 22,23-** La lampada Foglia progettata da Kevin Chu [34]

## 5) Vantaggi e benefici dell'utilizzo di questo processo

### 5.1 Inquinamento atmosferico

Il globo terrestre è avvolto da una massa gassosa, l'atmosfera, la quale viene suddivisa in diversi livelli e quello più prossimo alla crosta terrestre prende il nome di troposfera. In quest'ultimo si vengono a caratterizzare tutti i modelli climatici a noi conosciuti e per questo possiamo considerare questa area ricca di specie batteriche, virus ed altre tipologie di organismi.

L'aria è composta da diverse sostanze chimiche secondo le seguenti proporzioni:

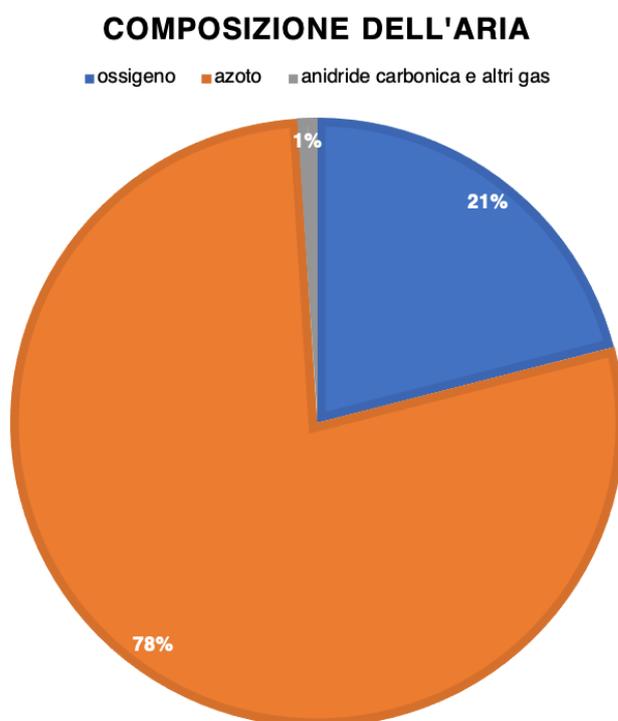


Figura 24- Grafico rappresentate le percentuali di gas presenti nell'aria

Nella percentuale indicata come 1% sono presenti numerose altre specie di gas, le quali possono ulteriormente combinarsi tra di loro per formare sostanze secondarie, anche nocive per la salute dell'uomo.

Con inquinamento atmosferico si intende quindi la presenza di determinati agenti inquinanti che vanno ad incidere in modo negativo non solo sulla salute umana, ma anche sul patrimonio naturale e culturale.

## 5.2 Principali agenti inquinanti

I principali agenti inquinanti presenti nell'aria sono le polveri sottili, tra le quali le più dannose sono il PM 10 e il PM 2.5. Queste due tipologie di particelle raggiungono rispettivamente una dimensione minore di 10 e 2.5 micron e di conseguenza possono essere facilmente inalate; i particolati atmosferici di dimensioni maggiori non sono considerate una grande minaccia poiché possono essere facilmente depositate. La principale fonte di generazione di questa specifica tipologia di agente inquinante è sicuramente il settore dei trasporti.

Un'altra classe di inquinanti atmosferici è quella degli ossidi di azoto indicati con  $\text{NO}_x$  e vengono emessi dalla combustione del carburante quindi dai mezzi di trasporto, dal settore industriale e dalla produzione di energia.

A differenza degli agenti inquinanti sopra elencati, l'ozono ( $\text{O}_3$ ) si viene a formare direttamente nell'aria come sostanza secondaria. È infatti il risultato della combinazione del biossido di azoto e degli idrocarburi con la luce solare. Quest'ultima risulta essere determinante per la concentrazione dell'ozono, infatti questo elemento si presenta in elevate concentrazioni specialmente durante l'estate, dove i giorni sono più caldi e soleggiati.

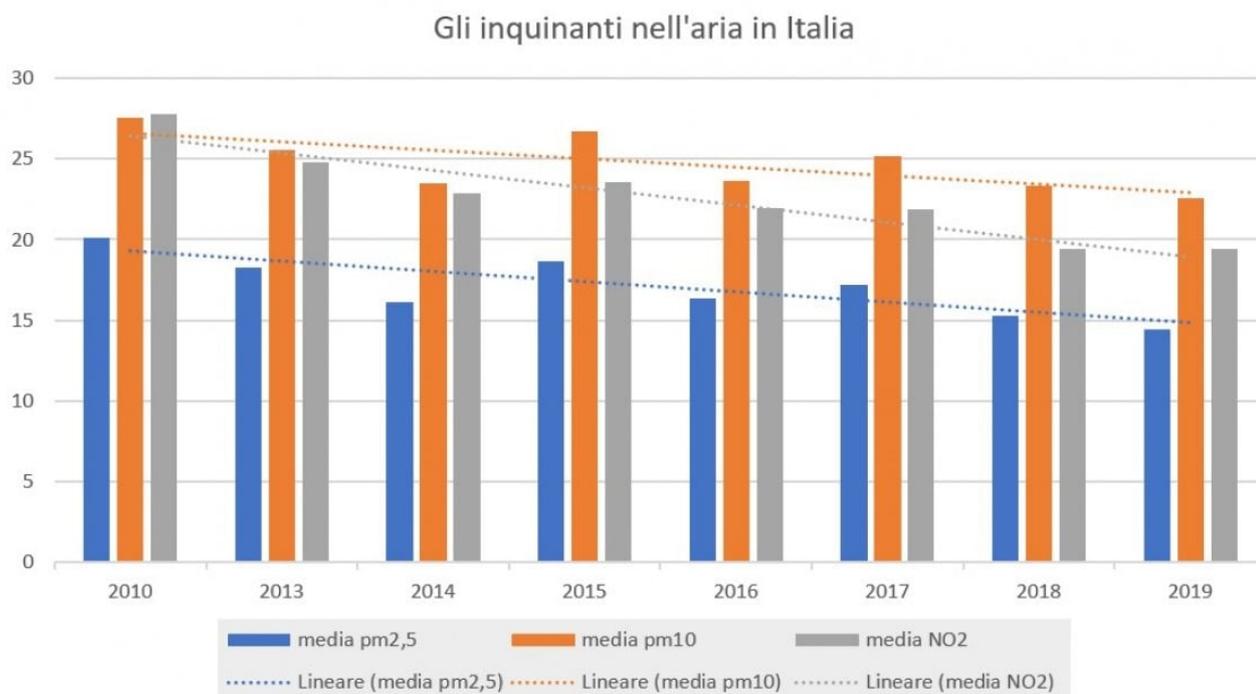
Come già detto, anche gli idrocarburi indicati con HC sono presenti nell'aria e sono un sottogruppo della grande famiglia dei composti organici volatili (VOC). Le loro proprietà variano a seconda della specifica tipologia presa in esame, possono essere quindi tossici, cancerogeni o innocui.

Il biossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ ) è il risultato della combustione dei combustibili fossili ed è il principale composto delle piogge acide, ovvero quelle piogge che presentano un pH minore di 5 e consistono nella ricaduta al suolo di gas nocivi presenti nell'atmosfera.

Infine vi è il monossido di carbonio indicato con CO, un particolare gas incolore e inodore emesso dalla incompleta combustione di materiali in carbonio. Questo composto è altamente tossico in quanto compromette il corretto trasporto dell'ossigeno nel sangue.

L'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) in seguito a numerose ricerche, ha riportato i dati inerenti alle concentrazioni di inquinanti nell'aria in Italia (**Figura 25**), in particolar modo soffermandosi sul PM 2.5, PM 10 e il biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ) [18].

La ricerca si è basata sull'arco temporale compreso tra il 2010 e il 2019 e i risultati riportanti evidenziano un'importante presenza nell'ambiente di queste sostanze e la loro media, seppur in diminuzione rispetto ai primi anni, risulta essere in ogni caso ancora molto elevato. L'organizzazione invita quindi ad una limitazione della generazione di questi inquinanti, ponendo particolare attenzione verso la riduzione dell'uso dei combustibili fossili [35].



**Figura 25-** Istogramma riportante i dati delle concentrazioni degli agenti inquinanti nell'aria in Italia [35]

### 5.3 *Conseguenze dell'inquinamento atmosferico*

La presenza nell'aria di gas nocivi ha sicuramente un grande ricaduta sulla salute degli esseri umani e la conseguenza principale è la comparsa di diverse patologie, tra queste le principali possono essere:

- mal di testa e ansia;
- irritazione degli occhi e dei canali respiratori (naso e gola);
- problemi respiratori con irritazioni, infiammazioni, infezioni;
- asma;
- peggioramento delle funzionalità di fegato, milza e sangue;
- pneumopatia cronica ostruttiva;
- malattie cardiovascolari;
- tumori

Non è facile stimare con esattezza le conseguenze che può portare l'elevato inquinamento atmosferico, ma secondo i dati riportati dal progetto Aphekomvi è stata stimata una riduzione della vita media di una persona pari a 8,6 mesi.

Il problema può essere esteso anche alla salvaguardia ambientale e in particolar modo alla biodiversità. A differenza degli esseri umani, le piante per crescere usufruiscono in grandi quantità di azoto. Questo elemento viene raccolto dagli organismi naturali dal terreno; quando però viene a mancare, gli agricoltori utilizzano fertilizzanti artificiali per garantire i nutrienti di cui le piante hanno bisogno. L'azoto però è presente anche nell'aria e con lei si deposita sui terreni: le piante quindi ricevono un eccessivo quantitativo di questo elemento andando ad alterare l'equilibrio delle specie naturali e danneggiando così la biodiversità della specifica area.

## 6) Progetto lampadario

### 6.1 Introduzione

Nelle pagine precedenti viene ampiamente evidenziato come l'inquinamento atmosferico sia un tema molto rilevante nei giorni nostri. È un fattore che determina in modo significativo il benessere cittadino e la salvaguardia ambientale.

In modo particolare negli ultimi anni sono stati introdotti sul mercato numerosi dispositivi volti alla depurazione dell'aria. Spesso però gli spazi interni di un'abitazione si presentano troppo ridotti per ospitare un prodotto di questo genere che, in molti casi, ha dimensioni poco contenute. Ecco allora che si è posta davanti l'esigenza di introdurre nel proprio ambiente domestico un oggetto funzionale all'arredo interno, ma che in qualche modo possa inglobare le proprietà depurative di un dispositivo di sanificazione dell'aria.

### 6.2 Ciò che non si vede

Cosa è possibile vedere nella **Figura 26**? La risposta sarebbe: nuvole.



**Figura 26**- Fotografia ritagliata di Johannes Plenio da Pexels [36]

Eppure questa fotografia ha in realtà un altro aspetto.

La **Figura 27** è la sua forma originale. Su internet vi sono moltissime immagini di questo genere, dove si vedono i gas di scarico fuoriuscire dalle industrie. Questa rispecchia particolarmente ciò che sta succedendo: l'inquinamento atmosferico non lo si riesce a vedere direttamente, ma si vedono solo le conseguenze, sulle persone e sulla natura. In questa fotografia i fumi si fondono con le nuvole e svaniscono dalla vista, ma rimangono invasori silenziosi del benessere cittadino.



**Figura 27-** Fotografia di Johannes Plenio da Pexels [36]

Questo scatto è affascinante ma allo stesso tempo sconcertante, poiché evidenzia la potenza distruttiva che hanno gli agenti inquinanti e la loro sconvolgente attività di essere ingannevoli ai nostri occhi.

### 6.3 Concept

*“Realizzazione di un prodotto per l’arredamento interno della propria abitazione che mantenga la propria funzionalità originale, con l’aggiunta di una nuova finalità ovvero la depurazione dell’aria”.*

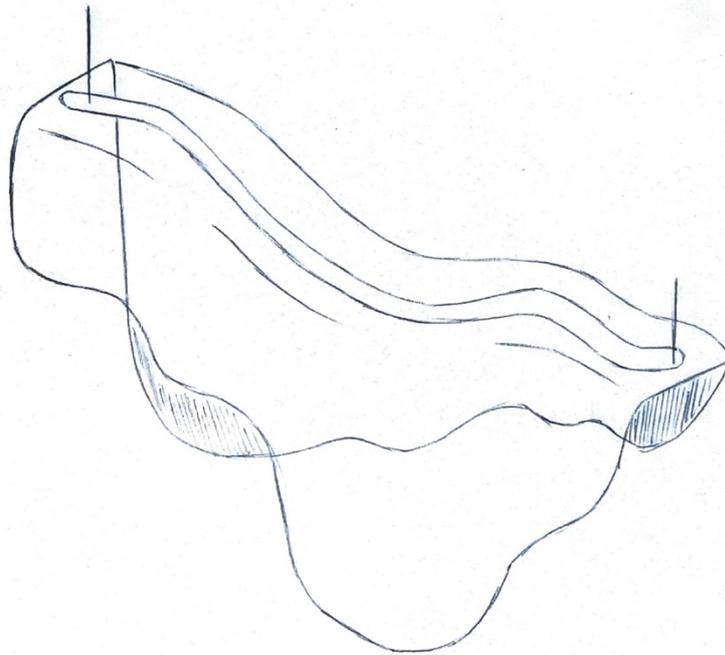


**Figura 28-** Schizzo di una nuvola

Un oggetto che può rispondere e soddisfare questa esigenza è sicuramente il lampadario, la cui forma in questo caso si ispira al profilo sinuoso delle nuvole, **Figura 28**. La dinamicità dei cambiamenti delle configurazioni delle nuvole si contrappone alla staticità immortalata dal lampadario. Quest’ultimo vuole mantenere la leggerezza che solo la nube naturale può trasmettere e per ottenerla si è pensato di utilizzare il vetro come materiale di base. Questo materiale con la sua trasparenza non appesantisce l’ambiente interno, rendendolo più libero e leggero a livello visivo. Infine anche la luce riprende il gioco d’onde della struttura e per questo, ad accompagnare e illuminare l’oggetto, la sorgente luminosa ne ripercorre il profilo.

## 6.4 *Light Waves*

Nella **Figura 29** è illustrato un primo schizzo della vista prospettica dell'oggetto: il lampadario può essere fissato al soffitto della propria abitazione, andando così ad illuminare l'ambiente interno che più si preferisce.

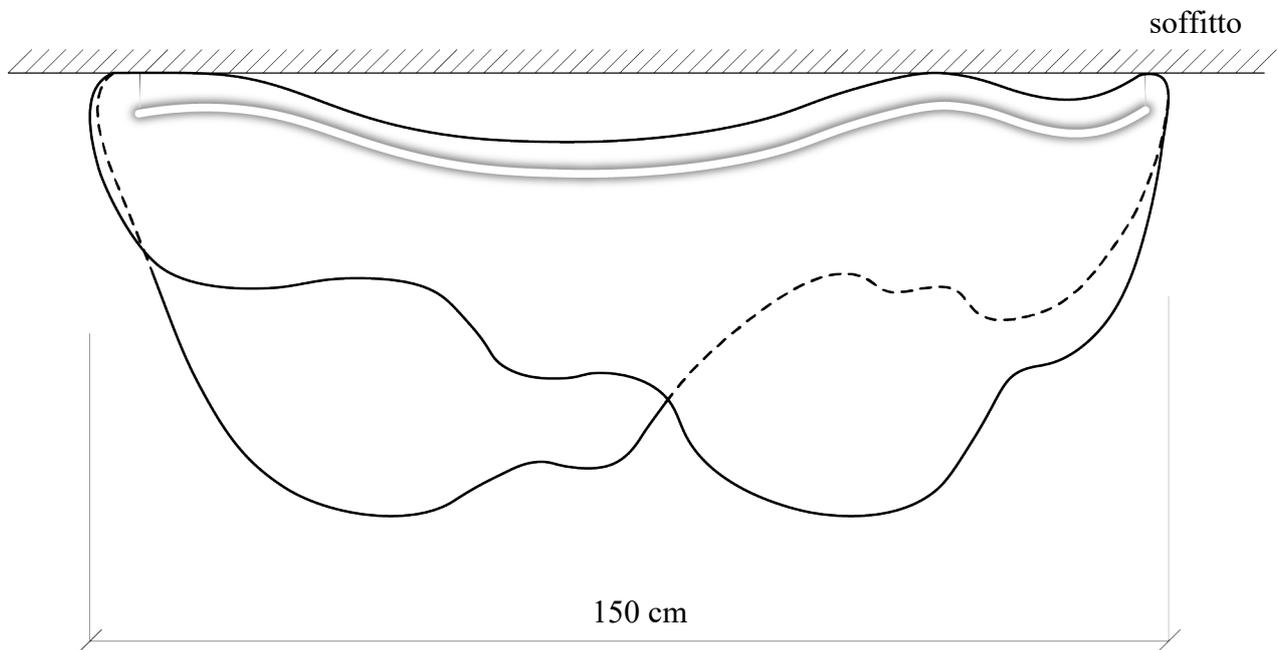


**Figura 29-** Schizzo della vista prospettica del lampadario

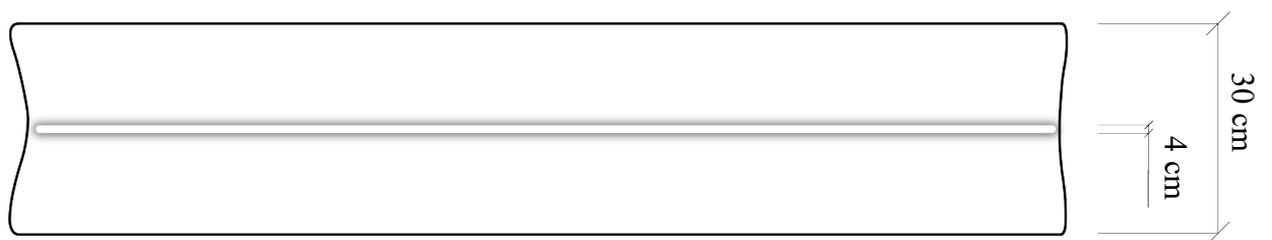
*Light Waves* è un lampadario a soffitto per interni realizzato in vetro ricoperto da un film fotocatalitico in  $WO_3$ . Il tubo led percorre tutta la lunghezza del lampadario e delinea le forme sinuose dell'oggetto. Il materiale utilizzato, ovvero il vetro, è trattato con il triossido di tungsteno, il quale attiva le proprie capacità fotocatalitiche sia in presenza della luce solare naturale, sia di quella artificiale. La sua funzione principale è quindi quella di illuminare l'ambiente in cui viene posto, ma racchiude anche la capacità di depurare l'aria circostante da batteri, funghi e muffe. L'elevata superficie di materiale fotocatalitico garantisce una maggiore attività depurativa degli spazi interni, favorendo un benessere abitativo migliore. La scelta di utilizzare il triossido di tungsteno come semiconduttore principale, anziché il biossido di titanio, è volta all'utilizzo finale dell'oggetto, il quale sarà per lo più esposto in ambienti dove la luce visibile è prevalente e il LED a basso consumo energetico può attivare in modo più ottimale le proprietà fotocatalitiche in assenza di una radiazione UV, nociva per la salute dell'uomo.

## 6.4 Dimensioni e quote

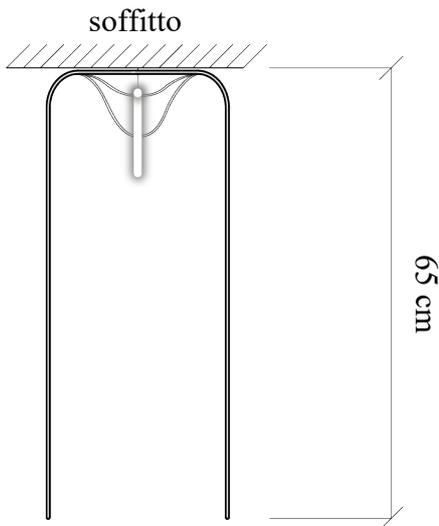
### PROSPETTO FRONTALE



### VISTA DALL'ALTO



## PROSPETTO LATERALE



Questo lampadario vuole essere non solo un oggetto per l'arredamento interno della propria abitazione, ma vuole porsi come inizio verso una visione d'insieme del proprio abitato, sfruttando al massimo le capacità e le proprietà dei materiali.

L'ottimizzazione degli spazi diventa l'elemento caratterizzante di questo lampadario, accompagnato dalla sua duplice funzionalità. Il concetto di possedere un oggetto di questa tipologia è ancora distante dalla visione odierna di arredamento, ma piccole accortezze come questa possono favorire uno sviluppo sempre maggiore nell'adozione di soluzioni innovative.



## 7) Conclusioni

È evidente che nel campo della fotocatalisi le scoperte sono ancora molto limitate e dal difficile legame con le scelte del mondo di oggi. È interessante però capirne le dinamiche e studiarne i comportamenti e le loro origini, spesso associate a fenomeni naturali, che per anni sono sopravvissuti nonostante le continue minacce dettate dall'attività umana.

Negli ultimi tempi la scienza sta ampliando i propri orizzonti verso una svolta più sostenibile nell'utilizzo delle risorse. Molte sono le ricerche avanzate per l'ampliamento delle possibilità *green*, anche nel settore chimico, ma poche sono le adozioni concrete di quest'ultime. Lo studio e la ricerca di materiali innovativi che possano migliorare l'ambiente può essere l'inizio di un percorso verso una riqualificazione dell'aria e, di conseguenza, verso un miglioramento effettivo dell'ambiente e della nostra salute. Questo scenario si prospetta ricco di opportunità e di sperimentazioni, utilizzabili in diversi settori d'impiego. L'aiuto da parte della scienza, accompagnata da una disciplina come il design, che si pone come intermediario tra i saperi di natura scientifica e artistica, è sicuramente un importante supporto per questo cambiamento. Il nostro contributo può ulteriormente sostenere questo percorso: il mondo purtroppo ha già iniziato e continuerà a sottostare all'inquinamento causato dalle attività antropiche e non è facile ai giorni nostri delineare uno stile di vita del tutto ecologico, forse è quasi impossibile. La frenesia della quotidianità e la difficoltà di abbandonare le proprie abitudini spesso sfociano in un sovra uso delle risorse che si hanno a disposizione. Quello che si può fare quotidianamente è cercare anche con delle semplici azioni di portare avanti delle piccole gestualità sostenibili, che però in grande possono realmente fare la differenza.

Robert Baden Powell, capo fondatore del movimento mondiale dello scoutismo, disse *“Lascia questo mondo un po' migliore di come lo hai trovato”*, questo personalmente è il motto che mi ripeto ogni giorno, nella speranza che ognuno faccia la propria parte e che porti come me l'augurio di poter fare la differenza.



*Ringrazio tutte le persone che mi vogliono bene,  
che mi hanno sostenuta fino ad oggi e  
che non mi hanno mai fatta sentire sola.  
Grazie di cuore.*



## 8) Bibliografia e sitografia

- [1] Dionysios D Dionysiou, Gianluca Li Puma, Jinhua Ye, Jenny Schneider, Detlef Bahnemann, “*Photocatalysis, Applications*”, Royal Society of Chemistry 2016
- [2] Jose M. Lagaron, Maria J. Ocio, Amparo Lopez-Rubio, “*Antimicrobial Polymers*”, Wiley 2012
- [3] Vincenzo Augugliaro, Vittorio Loddo, Mario Pagliaro, Giovanni Palmisano. Leonardo Palmisano, “*Clean by Light Irradiation, Pratical Applications of Supported  $TiO_2$* ”, Royal Society of Chemistry 2010
- [4] Shouqiang Wei, Yuyan Ma, Yuye Chen, Long Liu, Ying Liu, Zhongcai Shao, “*Fabrication of  $WO_3/Cu_2O$  composite films and their photocatalytic activity*” scritto in “*Journal of Hazardous Materials*”, 2011
- [5] H. Shinguu, M. M. H. Bhuiyan, T. Ikegami, K. Ebihara, “*Preparation of  $TiO_2/WO_3$  multilayer thin film by PLD method and its catalytic response to visible light*” scritto in “*Thin Solid Films*”, 2006
- [6] <https://www.showtechies.com/fotocatalisi/>
- [7] [https://www.refineair.it/wp-content/uploads/2021/04/compendio\\_tecnologia\\_per\\_odontoiatri-1.pdf](https://www.refineair.it/wp-content/uploads/2021/04/compendio_tecnologia_per_odontoiatri-1.pdf)
- [8] <https://www.chimicamo.org/chimica-fisica/conduttori-isolanti-e-semiconduttori/>
- [9] <https://www.chimicaindustrialeessenziale.org/prodotti-chimici-di-base/biossido-di-titanio/>
- [10] <https://www.caspanisrl.it/pittura-al-biossido-di-titanio/>
- [11] <https://www.airlite.com/2021/02/25/airlite-tecnologia-unica-nel-mondo/>
- [12] <https://www.caspanisrl.it/vernice-fotocatalitica/>
- [13] <https://www.youtradeweb.com/2016/05/ospedale-aria-citta-del-messico/>
- [14] <https://www.italcementi.it/it/palazzo-italia-expo-2015>
- [15] [https://www.archiportale.com/news/2018/11/architettura/hunting-pollution-il-murales-mangia-smog\\_66851\\_3.html](https://www.archiportale.com/news/2018/11/architettura/hunting-pollution-il-murales-mangia-smog_66851_3.html)
- [16] <https://www.lucenews.it/foglia-la-luce-ecosostenibile-fotocatalitica/>
- [17] <https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2013/articoli/12019aria-che-respiro>
- [18] [https://www.airqualitynow.eu/it/pollution\\_home.php](https://www.airqualitynow.eu/it/pollution_home.php)
- [19] <https://www.chimicamo.org/chimica-generale/tungsteno/>
- [20] <https://www.xpolymers.it/fotocatalisi%20battericida.html>

## 8.1 Riferimenti figure

- [21] [https://it.freepik.com/vettori-gratuito/grande-albero-verde-con-le-radici-sotterranee-su-bianco\\_7115340.htm#query=albero con radici&position=5&from\\_view=search](https://it.freepik.com/vettori-gratuito/grande-albero-verde-con-le-radici-sotterranee-su-bianco_7115340.htm#query=albero%20con%20radici&position=5&from_view=search)>Immagine di brgfx su Freepik
- [22] [https://www.researchgate.net/figure/Tetragonal-structures-of-crystalline-forms-of-rutile-anatase-and-brookite-TiO-2-NPs\\_fig1\\_332402328](https://www.researchgate.net/figure/Tetragonal-structures-of-crystalline-forms-of-rutile-anatase-and-brookite-TiO-2-NPs_fig1_332402328)
- [23] <https://www.fondazioneveronesi.it/magazine/articoli/alimentazione/biossido-di-titanio-e-171-cosa-sapere-sulladditivo-bocciato-dallefsa>
- [24] <https://www.chimicamo.org/chimica-fisica/lo-spettro-elettromagnetico-della-luce/>
- [25] [https://it.wikipedia.org/wiki/Triossido\\_di\\_tungsteno#/media/File:Kristallstruktur\\_WoIfram\(VI\)-oxid.png](https://it.wikipedia.org/wiki/Triossido_di_tungsteno#/media/File:Kristallstruktur_WoIfram(VI)-oxid.png)
- [26] [https://materialdesign.it/it/post-it/il-cemento-autopulente\\_13\\_143.htm](https://materialdesign.it/it/post-it/il-cemento-autopulente_13_143.htm)
- [27] <https://tegotaia.com/news/betonella-futura-una-scelta-responsabile/>
- [28] [https://materialdesign.it/it/post-it/i-trattamenti-autopulenti-materiali-fotocatalitici-e-effetto-loto-\\_13\\_124.htm](https://materialdesign.it/it/post-it/i-trattamenti-autopulenti-materiali-fotocatalitici-e-effetto-loto-_13_124.htm)
- [29] <https://www.cartexitalia.com/2021/02/22/effetto-loto/>
- [30] <https://www.showtechies.com/airlite-la-vernice-che-pulisce-laria/>
- [31] <https://www.youtradeweb.com/2016/05/ospedale-aria-citta-del-messico/>  
<https://www.yazu.it/architettura/innovare-architettando-e-architettare-innovando/>
- [32] <https://placetech.net/it/strategy/worlds-smartest-buildings-palazzo-italia-milan/>  
<https://www.italcementi.it/it/palazzo-italia-expo-2015>  
<https://structurae.net/en/media/240885-palazzo-italia-expo-2015>
- [33] [https://www.archiportale.com/news/2018/11/architettura/hunting-pollution-il-murales-mangia-smog\\_66851\\_3.html](https://www.archiportale.com/news/2018/11/architettura/hunting-pollution-il-murales-mangia-smog_66851_3.html)  
<https://www.pantografomagazine.com/iena-cruz-hunting-pollution/>  
<https://www.divisionenergia.it/news/il-piu-grande-murales-ecologico-deuropa>
- [34] <https://www.lucenews.it/foglia-la-luce-ecosostenibile-fotocatalitica/>
- [35] [https://www.repubblica.it/green-and-blue/2022/04/05/news/oms\\_inquinamento\\_aria\\_mondo-344241474/](https://www.repubblica.it/green-and-blue/2022/04/05/news/oms_inquinamento_aria_mondo-344241474/)
- [36] <https://cambiamenti-climatici.it/inquinamento/atmosferico>

