

WiWell® TiO₂ -film adesivi fotocatalitici per ridurre la carica microbica nei microambienti interni del trasporto pubblico e garantire la biosicurezza ai tempi del COVID-19

I collegamenti dell'autore aprono il pannello di sovrapposizione [Tirelli Umberto](#) ^a [Luca Berto](#) ^b [Salvatore Chirumbolo](#) ^c

Mostra di più

Aggiungi a Mendeley

Condividere

Citare

<https://doi.org/10.1016/j.jpap.2022.100143> [Ottieni diritti e contenuti](#)

[Con licenza](#) Creative Commons

Accesso libero

Astratto

Una membrana adesiva fotocatalitica drogata con nanoparticelle di TiO₂-Ag nanodimensionata, recentemente brevettata come WiWell™ (WippyIdea®), è stata utilizzata nell'ambiente interno dei trasporti pubblici per ridurre il microbioma aereo e la carica microbica sulle superfici a portata di mano, per garantire un contesto sicuro alle persone che utilizzano e/o affollano il locale. Mentre il semplice processo di pulizia con disinfettanti chimici ha raggiunto una riduzione della contaminazione microbica interna fino al 40%, l'uso dei film fotocatalitici ha abbassato l'inquinamento microbico, misurato tramite bioluminescenza ATP, a valori $\geq 94\%$, garantendo interni molto più sicuri condizioni per le persone che viaggiano. Questo studio pilota, condotto sul campo, incoraggia ulteriori ricerche per supportare questa tecnologia brevettata e applicarla ovunque.

- [Articolo precedente](#) in questione

- **Prossimo** articolo in questione

introduzione

La necessità di sviluppare microambienti umani igienizzati per interni, in particolare per i taxi affollati dai viaggiatori di routine quotidiani come i trasporti pubblici, è diventata una questione cruciale di dibattito nell'era del COVID-19 [1 , 2]. Ad esempio, un uso indiscriminato di disinfettanti e disinfettanti chimici può rappresentare una seria preoccupazione per quegli spazi interni solitamente occupati dai bambini [3]. Inoltre, mentre la disinfezione di tali spazi può essere eseguita adeguatamente da personale esperto in completa assenza di clienti o utilizzando persone, questi ultimi non sempre sono sollecitati ad osservare eventuali avvertenze personali per mantenere un ambiente interno igienizzato mentre è affollato. Per rispondere a questa preoccupazione, oltre all'introduzione di disinfettanti chimici convenienti e più sicuri, l'uso di nanotecnologie eco-compatibili per igienizzare gli spazi interni, è una novità incoraggiante nel campo.

L'esistenza di semplici sistemi di rivestimento nanostrutturati, dotati di attività antimicrobica fotocatalitica-mediata, stanno caratterizzando il campo della sanificazione degli interni in particolare in quei microambienti come i mezzi di trasporto, particolarmente affollati da numerosi clienti. Molti di questi sistemi sono costituiti da uno strato di SiO_2 associato a uno strato di TiO_2 -anatasi mesoporoso o denso e nanoparticelle d'argento (Ag-NP) come droganti. E di solito, il rivestimento viene sintetizzato utilizzando una tecnologia sol-gel fondendo Ag-NP con sol di SiO_2 e TiO_2 [4] .

Sostanze polimerizzanti, come il polietilenglicole (PEG-600) [5] o il polietersulfone (PES) [6] e le nanoparticelle immobilizzanti di TiO_2 -Ag (NPs) con membrane di nanofiltrazione in poliammide sono ampiamente utilizzate per stabilizzare le nanoparticelle su una membrana e ridurre notevolmente il possibile dispersione di nanoparticelle metalliche nell'ambiente [7] .

Il biossido di titanio (TiO_2), il semiconduttore utilizzato nelle procedure fotocatalitiche, è una scelta ecologica per la disinfezione interna in diversi dispositivi tecnologici. Questo composto, a seguito di studi condotti utilizzando la risonanza paramagnetica elettronica e un 5,5-dimetil-1-pirrolina-N-ossido (DMPO), che è una molecola intrappolante in acqua o in etanolo, è in grado di indurre la formazione di specie reattive dell'ossigeno (ROS) dopo l'eccitazione della luce solare per almeno 20 minuti [8 , 9]. I componenti ultravioletti nella luce solare, insieme alle molecole d'acqua, sono in grado di produrre un tasso

iniziale di ROS (come OH. radicale) basso come $1,0 \times 10^{-8}$ mol radical $\text{sec}^{-1} \text{mg}^{-1}$, una quantità in grado di danneggiare e uccidere specie batteriche sia Gram-negative che Gram-positive, tra cui *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* ed *Enterococcus faecalis* [9]. Pertanto, in questi sistemi, i ROS si formano sulla superficie bioattiva del film polimero- TiO_2 e, interagendo con i microrganismi vicini, li inattivano in pochi minuti di esposizione alla luce.

Nonostante il numero crescente di studi sulle membrane autopulenti, la loro applicazione nel trasporto pubblico, in particolare in Italia, è ancora poco considerata.

La tecnologia è ampiamente accessibile, economica, innocua, ecologica e dotata di un buon profilo di sicurezza, è riutilizzabile e stabile dal punto di vista chimico, senza rischio di sottoprodotti che possono rivelarsi dannosi per la salute umana. Tuttavia, l'efficienza di questi sistemi di rivestimento nanostrutturati come catalizzatori è ancora oggetto di ricerca, al fine di ottenere ulteriori miglioramenti, solitamente drogando con metalli e non metalli e ottenere una proprietà autopulente ottimale [10]. L'intero processo può essere migliorato studiando altri aspetti di impatto come la fonte di irradiazione ultravioletta o i progetti e le configurazioni del reattore, che possono migliorarne l'efficienza. La sua applicazione è ad oggi ampiamente diffusa e può favorire importanti sviluppi in tali contesti legati alla salute ambientale: aria interna, fonti idriche (dall'acqua potabile, al trattamento degli effluenti e delle acque reflue), fitosanitaria, industria farmaceutica e alimentare, ambienti biologici e medici, come laboratori e ospedali e trasporti pubblici [11], [12], [13]. A parte i nostri studi, questa tecnologia, una volta brevettata, è ancora prevalentemente concepita per la filtrazione dell'acqua di mare e il trattamento delle acque reflue, molto raramente per ambienti interni ospitati dall'uomo [14]. Ad oggi le membrane autopulenti TiO_2 si stanno diffondendo ampiamente negli ambienti interni domestici grazie alle nostre recenti indagini innovative, che ci hanno permesso di mantenere fino ad oggi la leadership di mercato su questi dispositivi utilizzati negli spazi pubblici interni, nonostante siano ancora in fase di prototipazione. Dati recenti hanno mostrato che la fotocatalisi offre potenti soluzioni per disinfettare gli ambienti interni umani, anche per SARS-CoV2 [15], [16], [17], tuttavia il sistema sperimentale che stiamo descrivendo qui, valutando principalmente una bioluminescenza correlata all'ATP, non è attualmente in grado di garantire pienamente eventuali sistemi di trasferimento

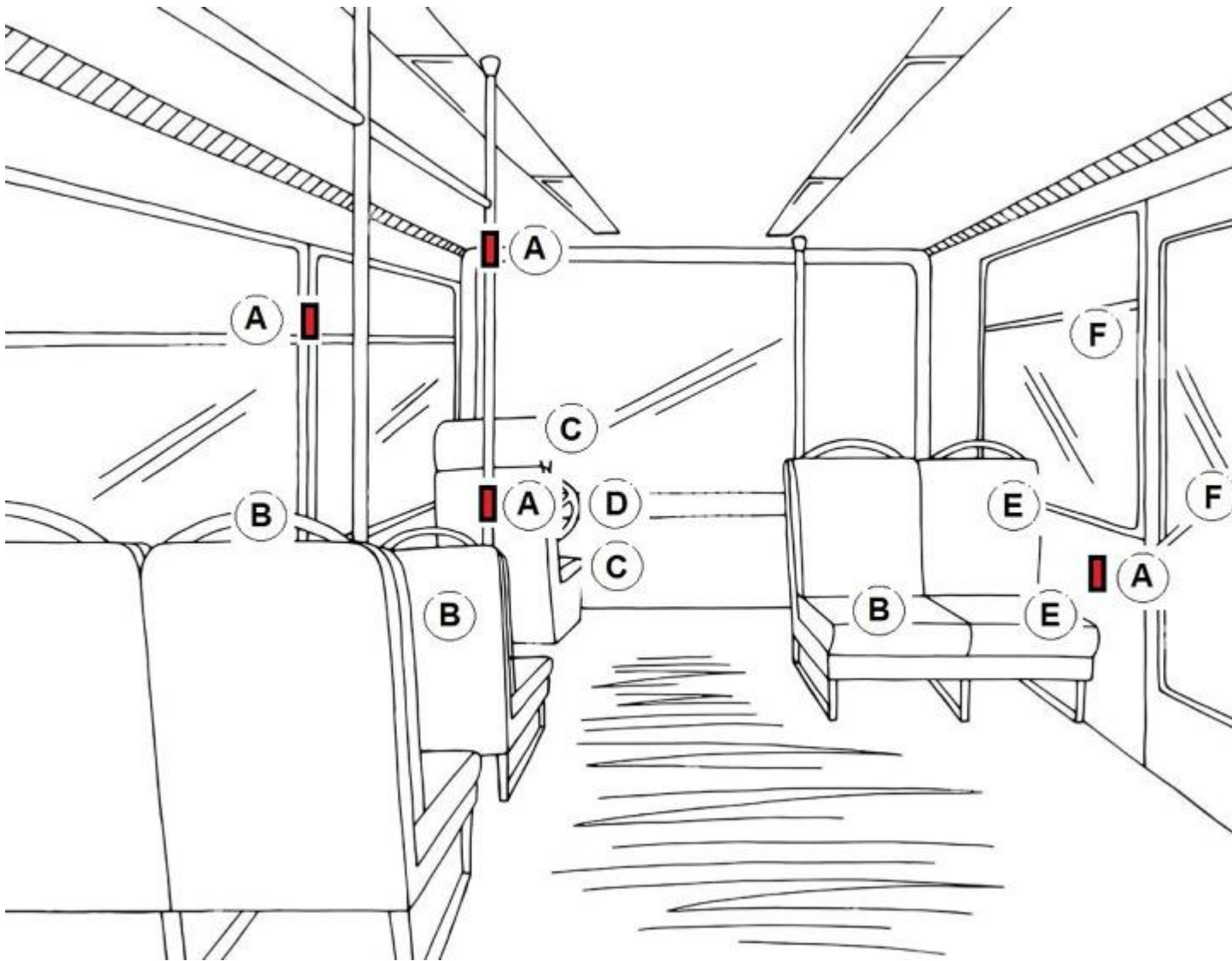
delle persone come i trasporti pubblici sulla completa sanificazione virale degli ambienti interni. Tuttavia, la sanificazione dalla presenza di batteri e lieviti sulle superfici di manipolazione in un ambiente interno, riducendo il microbioma dell'aria, riduce anche l'incidenza della diffusione indoor di SARS-CoV2 [18]. Questa capacità è particolarmente utile per sanificare i microambienti interni, come gli scuolabus, solitamente molto frequentati da alunni e studiosi, nonché i mezzi pubblici di persone, con elevata efficienza e rendendoli luoghi privi di microbi.

Poiché finora non è stata riportata una solida documentazione che descriva l'applicazione di una membrana autopulente economica e brevettata sui trasporti pubblici nel nostro Paese, in questo studio abbiamo eseguito (sul campo) una valutazione preliminare della capacità di un composito specifico ad alte prestazioni membrane fotocatalitiche (come film adesivi) a base di biossido di titanio (WiWell®) e dette anche WiGlass™, mediante saggio di bioluminometria e metodo Reed-Muench. Nonostante la diffusa conoscenza dei film adesivi TiO₂-fotocatalitici, il loro utilizzo in Italia è limitato alla filtrazione di acque industriali, mai in ambienti interni, quindi questo studio rappresenta la prima ricerca sul campo circa l'applicazione di una membrana autopulente brevettata su trasporto pubblico.

Materiali e metodi

Raccolta di campioni sui punti di campionamento

I campioni sono stati raccolti da uno di noi (LB), unito a tre assistenti, utilizzando un tampone sterile in almeno tre diverse repliche su punti diversi (Fig. 1) (lato centrale o mediale, laterale sinistro e laterale destro) delle seguenti superfici solitamente a stretto contatto con l'uomo: (a) pulsante di arresto chiamata (area mediale di pressatura); (b) sedile del passeggero (sedili e zone frontali a portata di mano); (c) prossimità del conducente; d) volante; e) sedile del passeggero con finestrino chiuso; (f) porte di ingresso e di uscita aree limitrofe. Il campionamento è stato eseguito alla stessa ora programmata, dopo 8-9 h dalla pulizia chimica delle superfici. In ogni periodo stagionale la stessa media di trasporto è stata campionata con lo stesso schema per almeno quattro volte.



1. [Download : Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(853KB\)](#)
2. [Download: scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

Fig. 1 . Pianta schematica interna dei punti di campionamento in un tipico mezzo di trasporto pubblico

Il monitoraggio microbiologico, un parametro della qualità dell'aria, viene generalmente eseguito per valutare la concentrazione microbica nell'aria e sulle superfici degli ambienti umani interni. Tale procedura consente inoltre di verificare l'efficacia della misura di contenimento con membrane fotocatalitiche che viene tempestivamente intrapresa e la correttezza delle procedure attuate al fine di eliminare o ridurre al minimo l'esposizione microbica.

La scelta del tipo di campionamento e delle matrici da analizzare richiede un attento studio preliminare delle tipologie di microrganismi presumibilmente presenti in funzione delle attività lavorative e delle presenze delle persone svolte e delle possibili vie di diffusione e infezione [19] . Solitamente la popolazione batterica bersaglio è quella dei batteri mesofili di origine umana con il

genere *Staphylococcus* come standard di riferimento, modificato dall'inquinamento atmosferico [\[20\]](#) .

Tipo di processo di monitoraggio e controllo

Abbiamo eseguito un campionamento e un monitoraggio in tempo reale della presenza batterica *in situ* (cioè sul campo) in tre diversi periodi stagionali e diversa esposizione alla luce solare (in termini di diverse condizioni meteorologiche giorno per giorno) al fine di ridurre i confondenti statistici dovuti alle differenze di leggerezza, temperatura, umidità relativa e affollamento di persone per la frequenza scolastica e/o lavorativa [\[21\]](#) . Questo studio pilota ha coinvolto tre diverse aree di trasporto in Veneto (Treviso, Venezia) e Friuli (Pordenone) (Italia nord-orientale). Le aree considerate, comprendenti circa 10-20 km ciascuna di trasporto in autobus (≥ 60 min), per standardizzare una quantità comparabile di permanenza indoor, sono indicate in [Fig. 2](#) .



1. [Download : Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(802KB\)](#)
2. [Download: scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

Fig. 2 . Area geografica dello studio di ricerca

Il periodo stagionale includeva aprile, giugno e settembre, come punti caldi del campionamento della ricerca, con vari gradi di affollamento delle persone e luce del sole. Sono stati eseguiti controlli microbiologici come CFU/ml in agar Mueller-Hinton (ciascuno per ogni periodo stagionale) e sono stati valutati l'assenza di crescita microbica, quando il bioluminometro ha raggiunto i valori più bassi in RLU.

Gli esperimenti sono stati tutti condotti sulla luce solare giornaliera, da 1000 lux (tipica giornata nuvolosa a mezzogiorno) a 120.000 lux (luce solare più intensa) contemporaneamente (15:00) [22] .

Perdita di nanoparticelle dalla membrana TiO₂-Ag-NPs e profili di tossicologia ambientale

Studi in vivo su animali da laboratorio hanno riportato che le NP TiO₂ non hanno causato effetti significativi di danno cellulare a intervalli di dose di 10-50 µg/ml (gli effetti compaiono a 100-250 µg/ml), mentre le NP Ag sono tossiche a 5-50 mg/ml [21]. Inoltre, studi *in vitro* hanno mostrato che IC₅₀ di TiO₂ NPs a 24 ore di esposizione era 211,3 µg/ml ±15,2 SD e 5408,8 µg/ml ±45,9 SD per la linea cellulare di condrosarcoma SW 1353 e la linea cellulare di osteosarcoma U-2-OS, rispettivamente [23].

Tuttavia, nonostante l'allarme allarmante sulla biotossicità delle nanoparticelle di TiO₂ potrebbe ancora rappresentare una preoccupazione interna, studi recenti hanno evidenziato profondamente il problema [24]. Dati recenti riportano che solo un'esposizione cronica e sovraccarica di questa materia può sviluppare forme gravi di danno d'organo, in particolare per i polmoni, negli animali da laboratorio. In particolare, nei lavoratori fortemente esposti a TiO₂, esiste una mancanza di correlazione statistica tra esposizione prolungata e patologie polmonari croniche cancerose o non cancerose [25]. Il TiO₂ è presente nei cosmetici e nei filtri solari ma studi sull'epidermide hanno riportato la mancanza di penetrazione delle particelle attraverso la pelle e inoltre anche l'esposizione orale di TiO₂ particelle con il cibo indicavano un assorbimento trascurabile da parte del tratto gastrointestinale di particelle nel flusso sanguigno [25]. Infine, studi di tossicità sui ratti hanno dimostrato che effetti di tossicità molto bassi sono attribuiti alle particelle di TiO₂, con un livello senza effetti avversi osservati (NOAEL) di 1000 mg/kg di peso corporeo/giorno [25]. Il nostro calcolo di laboratorio ha raggiunto la stima che, per ottenere un inquinamento indoor di TiO₂ NP vicino all'esposizione subcronica in grado di indurre seri danni alla salute, la membrana TiO₂-Ag-NP dovrebbe essere danneggiata per almeno il 30%, un evento del tutto impossibile da ottenere, in quanto sono visibili rotture minime come pellicola adesiva staccata, che dovrebbe costringere l'operatore a sostituire la membrana stessa sul posto al più presto.

Controllo qualità fotocatalisi

Per TiO₂, per la formazione di portatori di carica è richiesta luce ultravioletta (UV) sperimentale con energia maggiore o uguale all'Energy Gap (EG). In precedenza sono state effettuate valutazioni per quantificare le prestazioni fotocatalitiche della membrana WiWell® TiO₂.

A questo scopo viene solitamente impiegato un fotoradiometro quantistico Delta Ohm, modello HD 9021, che è uno strumento per prove di laboratorio per misurare le radiazioni emesse dalle lampade UV e quelle assorbite dal processo fotocatalitico. Il dispositivo è dotato di diverse sonde, che consentono di misurare diversi aspetti della luce, in base alle esigenze verrà utilizzata la sonda più adatta. Le sonde consentono di misurare: (a) illuminamento (lux); (b) l'irraggiamento (W/m^2); (c) la luminanza (cd/m^2) ($cd =$ candele). Utilizzando la sonda tipo HD 9021 UVA, una sonda radiometrica per la misura della potenza della radiazione, dell'irraggiamento, anche nel range UV-A (con una lunghezza d'onda di 315-400 nm), con un picco a 365 nm, il range di misura va da 10 nW/cm² a 200 mW/cm² espressa come potenza della radiazione elettromagnetica che colpisce la superficie per unità di area.

TiO₂ è un semiconduttore con un gap energetico pari a $EG = 3-3,3$ eV, l'energia richiesta varia con la forma allotropica utilizzata. Ad ogni modo, se TiO₂ viene irradiato con fotoni di energia maggiore di EG (cioè lunghezza d'onda, $\lambda \leq 390$ nm), un elettrone è in grado di superare il gap energetico ed essere promosso dalla banda di valenza a quella di conduzione di carica. In questo senso, la componente UV-A della luce solare naturale quotidiana è in grado di attivare la fotocatalisi della membrana WiWell® TiO₂.

Le lacune nella banda di valenza, sparse sulla superficie del fotocatalizzatore, reagiscono con le molecole d'acqua assorbite formando il radicale idrossile (.OH) o direttamente con eventuali composti organici adsorbiti. Sia il foro che il radicale idrossile possono ossidare le molecole organiche vicino alla superficie del fotocatalizzatore. Gli elettroni promossi nella banda di conduzione possono partecipare a processi di riduzione, generalmente reagendo con l'ossigeno molecolare disciolto in soluzione, o nell'aria, producendo il radicale superossido ($.O_2^-$).

La massima efficienza della membrana fotocatalitica (> 99%) si raggiunge con > 109.000 lux di luce solare, cioè durante la luce solare più intensa (120.000 lux) o con luce solare intensa (111.000 lux) ma l'efficienza di rimozione batterica (> 99,99%) si raggiunge dopo 90 minuti di attivazione a 2000 lux, cioè anche durante un mezzogiorno completamente coperto, poiché oltre il 90% dei raggi UV-A sono in grado di passare attraverso nuvole e finestre di vetro.

Marchi di membrana e profilo di sicurezza

I film adesivi WiWell® sono composti da una miscela di biossido di titanio, argento colloidale e altri componenti di dimensioni nanometriche come matrice

nanoparticellare, in grado di portare ad un processo di autopulizia sfruttando e stimolando un processo fotocatalitico, del tutto innocuo per la salute umana. L'emivita prevista di questo dispositivo fotocatalitico è di 24 ± 2 mesi. In generale, TiO_2 è considerato un nanomateriale sia inerte che sicuro, nonostante sia stata recentemente sollevata una questione controversa sulla biotossicità delle nanoparticelle di biossido di titanio [26 , 27]. La neurotossicità da TiO_2 , almeno negli animali da esperimento, è stata osservata per concentrazioni fino a 2,5 mg/kg di peso corporeo (TiO_2 sfuso) [28], nonostante l' EC_{50} della formulazione nanometrica di TiO_2 sia di circa 5,83 mg/L [29]. Tuttavia, i test tossicologici su *S. cerevisiae* non hanno mostrato tossicità da nanoparticelle di titanio anche a 20.000 mg/L [30]. Come accennato in precedenza, la tossicità delle NP TiO_2 dovrebbe essere trascurabile per le nostre membrane. Questi valori sono estremamente lontani dalla dispersione di nanoparticelle di TiO_2 nell'ambiente interno dalla membrana WiWell®, che viene sostituita regolarmente ogni settimana/mese o ogni 6 mesi, a seconda della frequenza di utilizzo.

Nel nostro studio, queste membrane adesive sono state applicate su superfici interne di finestre, pareti e oggetti interni, come sedili posteriori, ed esposte alla luce solare quotidiana, per almeno 6 ore.

Test di bioluminescenza

Al fine di verificare la sanificazione interna tramite l'attivazione della fotocatalisi, si è proceduto al campionamento tramite tamponi per la verifica quantitativa delle particelle organiche viventi (principalmente batteri) sulle superfici dove è stato applicato il prodotto, come precedentemente descritto. Per eseguire questo controllo abbiamo utilizzato un bioluminometro (modello Ensure™ Touch, modello Hygiene® Ultrasnap) ed è stata riportata una risposta immediata del risultato in un processo in tempo reale. Il sistema di monitoraggio garantisce un'elevata sensibilità (rileva fino a 0,1 femtomoli di ATP) e si traduce in soli 15 s di tempo di processo.

Considerando che il cut off utilizzato nella nostra indagine per considerare priva di microbi una superficie sottoposta a processo di pulitura è RLU (Relative Luminescence Units) ≤ 20 , una superficie con RLU da 21 a 59 viene semplicemente pulita, mentre $\text{RLU} \geq 60$ la superficie non è pulita o sporca.

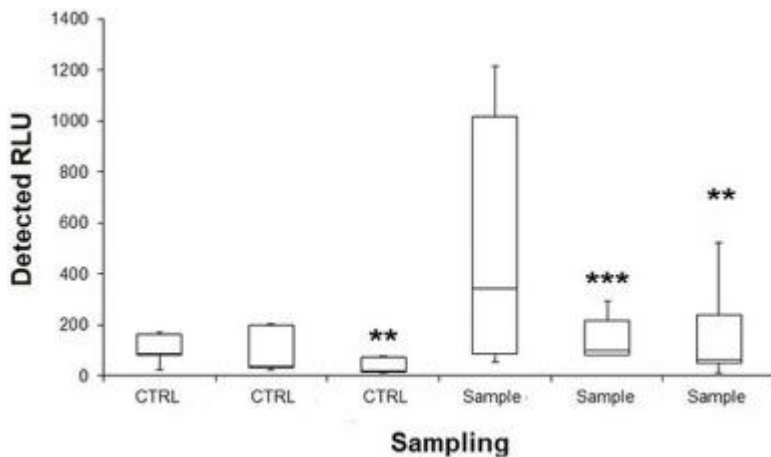
Tutti i test di cui sopra riportano il conteggio quantitativo delle particelle organiche presenti sulle superfici, e attraverso il confronto con il controllo (dati di riferimento sopra indicati), risultante dall'indagine, è possibile procedere alla

verifica dell'intervento di sanificazione. Non sono state analizzate sospensioni dirette in aria. L'ATP o adenosina trifosfato è una molecola di energia presente in tutti gli esseri viventi, il che lo rende un perfetto biomarcatore di contaminazione microbiologica, cioè se una superficie è pulita (igienizzata) o meno. Con un sistema di monitoraggio Hygiena®, l'ATP viene messo in contatto con il reagente brevettato, che è stabile nelle soluzioni tamponate del dispositivo di analisi (bioluminometro). La luce viene quindi emessa in proporzione diretta alla quantità di ATP presente nel campione (tampono inserito nel bioluminometro) fornendo informazioni sul livello di contaminazione (quantità) in secondi. Vengono utilizzati i tamponi modello Ultrasnap™, un metodo di raccolta semplice con un inserimento stabile del reagente che fornisce una risposta rapida con precisione. Il bioluminometro è dotato di certificazione CE ed è tarato da un esperto chimico specializzato e autorizzato almeno una volta l'anno; i tamponi vengono acquistati e forniti con certificazione di lotto e, essendo monouso (non riutilizzabili), non necessitano di controlli periodici. Il bioluminometro è dotato di certificazione CE ed è tarato da un esperto chimico specializzato e autorizzato almeno una volta l'anno; i tamponi vengono acquistati e forniti con certificazione di lotto e, essendo monouso (non riutilizzabili), non necessitano di controlli periodici. Il bioluminometro è dotato di certificazione CE ed è tarato da un esperto chimico specializzato e autorizzato almeno una volta l'anno; i tamponi vengono acquistati e forniti con certificazione di lotto e, essendo monouso (non riutilizzabili), non necessitano di controlli periodici. Statistiche

Le statistiche con media \pm deviazione standard (SD) hanno utilizzato un'ANOVA (post hoc di Tukey) per valutare la significatività a $p < 0,05$ e un box plot per i grafici (grafico Sigma 14,0).

risultati e discussione

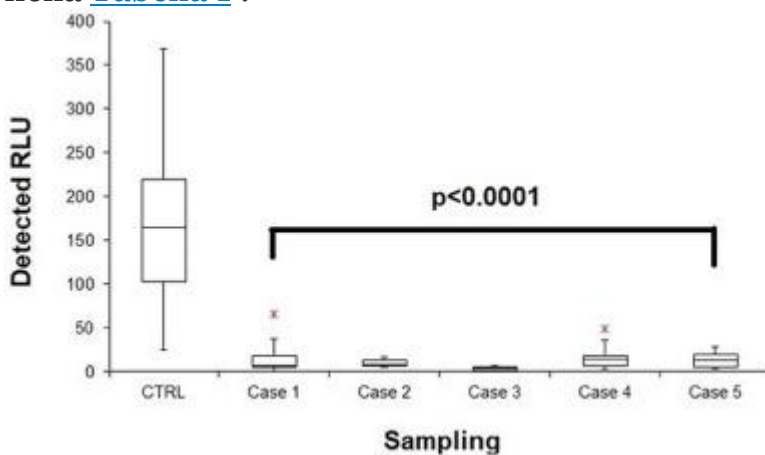
[La Fig. 3](#) mostra i valori RLU in tre giorni diversi su un autobus parcheggiato sottoposto a un processo di pulizia di routine con prodotti chimici igienizzanti al mattino presto. Può verificarsi una differenza significativa, a seconda della modalità di pulizia, del tempo, delle condizioni climatiche e così via. Questa variabilità è stata osservata anche su bus funzionante (campionamento effettuato alle ore 15, work-in previsto alle ore 9). I valori RLU più elevati sono stati osservati nel volante (218 RLU, 594 RLU) e nel sedile del passeggero (1214 RLU, 566 RLU, 294 RLU).



1. [Download : Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(97KB\)](#)
2. [Download: scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

Fig. 3 . Campioni bianchi e puliti nello studio di ricerca descritto. I confronti statistici tramite ANOVA / post hoc di Tukey) danno $p < 0,01$ (**) o $p < 0,001$ (***). Asterischi rossi: valori anomali.

Quando sono stati applicati i film fotocatalitici, i valori RLU sono scesi drasticamente entro i limiti di sanificazione ([Fig. 3](#)), a parte qualsiasi diversa condizione climatica esterna e/o interna, numero di persone, durata del viaggio. [La Fig. 4](#) riassume cinque diversi casi di dati cumulativi raccolti in diversi orari stagionali e diverse linee di autobus. La riduzione delle RLU è indicata nella [Tabella 1](#) .



1. [Download : Scarica l'immagine ad alta risoluzione \(97KB\)](#)
2. [Download: scarica l'immagine a grandezza naturale](#)

Fig. 4 . Dati tracciati sull'uso della membrana WiWell®. Caso 1: Dati delle prime due settimane di aprile 2019 (luce solare giornaliera prevalentemente nuvolosa e piovosa); Caso 2: prima settimana di giugno 2019 (luce solare intensa), Caso 3: ultima settimana di giugno 2019 (luce solare intensa); Caso 4: prima settimana di settembre 2019 (luce solare intensa/coperto); Caso 5: la scorsa settimana di settembre 2019 (coperto/luce solare intensa). Asterischi rossi: valori anomali.

Tabella 1 . . Prestazioni della membrana WiWell® TiO₂ in RLU

Etichetta	CTRL	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
min	25	0	5	0	3	3
Q1	102.5	5	6	1.5	6.75	4.75
Mediano	165	6	7	4	14	12.5
Q3	219.25	18	13	5	18.25	19.5
Massimo	369	65	17	6	49	28
IQR	116.75	13	7	3.5	11.5	14.75
Valori anomali superiori	0	1	0	0	1	0
Valori anomali inferiori	0	0	0	0	0	0

Q1 = primo quartile; Q3: terzo quartile; IQR = intervallo interquartile

La sanificazione interna tramite le pellicole WiWell® ha consentito una riduzione delle RLU ampiamente ≤ 20 RLU, entro l'orario previsto (9-15) degli autobus normalmente in funzione, raggiungendo una percentuale di riduzione del 94,7% ($\approx 95\%$) come mediana, molto più elevata rispetto alla sanificazione chimica ($\approx 40\%$). I tamponi molecolari RT-PCR sulle superfici al picco ($3,8 \pm 2,1$ giorni SD) per testare SARS-CoV2 presso i laboratori dell'Università hanno dato risultati negativi (≤ 150 copie/ml) [[\[31\]](#) , [\[32\]](#)].

I nostri risultati, mediante campionatura surface-spot, effettuata direttamente sulle superfici dei film, possono confermare l'attivazione della fotocatalisi che ha comportato un aumento del livello di sanificazione delle superfici interne, che sono una importante concausa nella diffusione di microbi quando non sufficienti e correttamente igienizzati e usati frequentemente [\[12\]](#) . Il lavoro di riduzione delle membrane TiO_2 WiWell® è durato più di una settimana, nelle nostre condizioni sperimentali ($9,7 \pm 1,2$ giorni SD).

Solo in un punto specifico, "punto due", sono stati rilevati livelli di RLU superiori al normale. La ragione di ciò, con alta probabilità, è che questo punto si trova in una posizione nascosta e in ombra, quindi l'attivazione della fotocatalisi è ritardata, risultando così in alcuni dati anomali nei nostri dati raccolti. Visti i risultati dei campioni di tampone, effettuati direttamente sulle superfici dei film, possiamo confermare l'attivazione della fotocatalisi dei film WiWell® TiO_2 , guadagnando un maggiore livello di sanificazione delle superfici interne e garantendo un ambiente interno privo di microbi.

Conclusioni

La membrana WiWell® (WiGlass™) TiO_2 ha mostrato una particolare efficacia nel ridurre la contaminazione microbica, garantendo ambienti interni privi di

microbi e consentendo alle persone di viaggiare in sicurezza e in salute sugli autobus pubblici dell'Italia nord-orientale.

Riferimenti

[1]

J Shen , H Duan , B Zhang , J Wang , JS Ji , J Wang , L Pan , X Wang , K Zhao , B Ying , S Tang , J Zhang , C Liang , H Sun , Y Lv , Y Li , T Li , L Li , H Liu , L Zhang , L Wang , X. Shi

Prevenzione e controllo del COVID-19 nei trasporti pubblici: esperienza dalla Cina

Ambiente. Inquinare. , 266 (Pt 2) (2020 nov) , Articolo 115291

[Articolo](#)[Scarica il pdf](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[2]

Team per la protezione e la disinfezione dei luoghi chiave di risposta alle emergenze COVID-19

Centro cinese per il controllo e la prevenzione delle malattie. [Linee guida sulla disinfezione dei trasporti pubblici durante l'epidemia di COVID-19]

Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi , 54 (4) (6 aprile 2020) , pagg . 344-346

[Google Scholar](#)

[3]

K Dhama , SK Patel , R Kumar , R Masand , J Rana , MI Yatoo , R Tiwari , K Sharun , RK Mohapatra , S Natesan , M Dhawan , T Ahmad , TB Emran , YS Malik , H. Harapan

Il ruolo dei disinfettanti e igienizzanti durante la pandemia di COVID-19: vantaggi ed effetti deleteri sull'uomo e sull'ambiente

Environ Sci Pollut Res Int , 28 (26) (2021 luglio) , pagg. 34211 - 34228

[_Visualizza PDF](#)

[CrossRef](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[4]

MV Roldán , P de

Oña , Y Castro , A Durán , P Faccendini , C Lagier , R Grau , NS. Pellegrini

Attività fotocatalitiche e biocidi di nuovi sistemi di rivestimento di nanoparticelle d'argento mesoporose e dense di TiO₂-anatasi

Mater Sci Eng C Mater Biol Appl , 43 (2014 ottobre) ,

pp. 630 - 640 , [10.1016/j.msec.2014.07.053](#)

[Articolo](#)[Scarica il pdf](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[5]

W Su , SS Wei , SQ Hu , JX. Codolo

Preparazione di colloidi TiO(2)/Ag con resistenza ai raggi ultravioletti e proprietà antibatteriche utilizzando glicole polietilenico a catena corta

J Hazard Mater , 172 (2-3) (30 dicembre 2009) , pp . 716-720

[Articolo](#)[Scarica il pdf](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

[6]

K Kothlao , W Pakade , F Mtunzi , R. Moutloali

Preparazione e caratterizzazione di membrane in polietersulfone (PES) modificato Ag-TiO₂ per potenziali applicazioni nel trattamento delle acque

Chemistry for a Clean and Healthy Planet, ICPAC: International Conference on Pure and Applied Chemistry , Springer , Paesi Bassi (settembre 2019) , pp . 331-349

[Google Scholar](#)

[7]

Z Habib , SJ Khan , NM Ahmad , HMA Shahzad , Y Jamal , I. Hashmi

Comportamento antibatterico della membrana di nanofiltrazione (NF) di poliammide composita modificata in superficie mediante l'immobilizzazione di nanoparticelle di TiO_2 drogata con Ag

Environ Technol , 41 (28) (2020 dic) , pagg. 3657 - 3669

[Visualizza PDF](#)

[CrossRefVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

[8]

K Sunada , T Watanabe , K. Hashimoto

Attività battericida del film sottile TiO_2 depositato in rame sotto una debole illuminazione a luce UV

Environ Sci Technol , 37 (20) (15 ottobre 2003) , pagg. 4785-4789

[Visualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

[9]

A Kubacka , MS Diez , D Rojo , R Bargiela , S Ciordia , I Zapico , JP Albar , C Barbas , VA Martins dos Santos , M Fernández-García , M. Ferrer

Comprensione del meccanismo antimicrobico dei film nanocompositi a base di TiO_2 in un batterio patogeno

Rep. Sci , 4 (19 febbraio 2014) , pag. 4134

[Google Scholar](#)

[10]

KA Razak , DS Che Halin , MMAB Abdullah , A Azani , MAA Mohd Salleh , N Mahmed , V Chobpattana

Proprietà autopulente di Ag/TiO_2 Thin Film

Mater. Sci. Foro , 1010 (2020) , pp . 397-404

[Visualizza PDF](#)

[CrossRefGoogle Scholar](#)

[11]

M Zhang , N Wu , J Yang , Z. Zhang

Piattaforma antibatterica fotoelettrochimica basata su nanofili neri TiO_2 dal design razionale per un'efficace inattivazione contro i batteri

ACS Appl Bio Mater. , 5 (3) (21 marzo 2022) , pagg. 1341 - 1347

[ArticoloScarica il pdfCrossRefGoogle Scholar](#)

[12]

WQ Wu , YF Xu , HY Chen , DB Kuang , CY. Su

Nanofili di Anatase Titania elaborati in soluzione: dalla progettazione iperramificata alle applicazioni optoelettroniche

Acc Chem Res , 52 (3) (19 marzo 2019) , pagg. 633 - 644

[Visualizza PDF](#)

[CrossRefVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

[13]

J He , A Kumar , M Khan , IMC. Lo

Revisione critica della disinfezione fotocatalitica dei batteri: dai metalli nobili e nanomateriali di carbonio ai compositi TiO_2 alle sfide delle caratteristiche dell'acqua e alle soluzioni strategiche

Sci Total Environ , 758 (1 marzo 2021) , articolo 143953

[ArticoloScarica il pdfVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

[1

4]

F Galiano , X Canzone , T Marino , M Boerrigter , O Saoncella , S Simone , M Faccini , C C haumette , E Drioli , A. Figoli

Nuove fibre cave fotocatalitiche PVDF/Nano- TiO_2 per il risanamento ambientale

Polimeri (Basilea) , 10 (10) (12 ottobre 2018) , p. 1134

[_Visualizza PDF](#)

[CrossRefVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

AM Nasir , N Awang , SK Hubadillah , *et al.*

Una rassegna sul potenziale della fotocatalisi nella lotta contro SARS-CoV-2 nelle acque reflue

Journal of Water Process Engineering , 42 (2021) ,

articolo 102111 , [10.1016/j.jwpe.2021.102111](#)

[ArticoloScarica il pdfVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

J Prakash , J Cho , JK. Mishra

Nanomateriali fotocatalitici di TiO₂ come potenziale agente antimicrobico e antivirale. Ambito di applicazione contro il blocco della diffusione SARS-CoV2

Micro e Nano Engineer , 14 (2022) , articolo 100100

[ArticoloScarica il pdfVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

R Nakano , A Yamaguchi , K Sunada , T Nagai , A Nakano , Y Suzuki , H Yano , H Ishiguro , M. Miyauchi

Inattivazione di vari tipi di varianti di SARS-CoV-2 da parte di un fotocatalizzatore a base di TiO₂ sensibile alla luce per interni

Sci Rep , 12 (1) (14 aprile 2022) , p. 5804

[_Visualizza PDF](#)

[Visualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

K Moelling , F. Broecker

Microbioma dell'aria e inquinamento: composizione e potenziali effetti sulla salute umana, inclusa l'infezione da coronavirus SARS

J Environ Public Health , 2020 (28 maggio 2020) , articolo 1646943

[_Visualizza PDF](#)

[Visualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

P Kumar , MA Kausar , AB Singh , R. Singh

Contaminanti biologici nell'ambiente dell'aria interna e loro impatto sulla salute umana

Air Qual Atmos Health , 14 (11) (2021) , pagg. 1723 - 1736

[_Visualizza PDF](#)

[CrossRefVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

SJK Hussey , J Purves , N Allcock , VE Fernandes , PS Monks , JM Ketley , PW Andrew , J A. Morrissey

L'inquinamento atmosferico altera i biofilm di Staphylococcus aureus e Streptococcus pneumoniae, la tolleranza agli antibiotici e la colonizzazione

Environ Microbiol , 19 (5) (2017 maggio) , pagg. 1868 - 1880

[_Visualizza PDF](#)

[CrossRefVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

T Kotilainen , PJ Aphalo , CC Brelford , H Book , S Devraj , A Heikkila , R Hernandez , A Kylling , AV Lindfors , TM. Robson

Modelli nella composizione spettrale della luce solare e rapporti spettrali fotonici biologicamente significativi come influenzati da fattori atmosferici

Agricult Forest Meteorol , 291 (2020) , Articolo 108041

[ArticoloScarica il pdfVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

R Molinari , C Lavorato , P. Argurio

L'evoluzione dei reattori a membrana fotocatalitica negli ultimi 20 anni. Una prospettiva allo stato dell'arte

Catalizzatori , 11 (2021) , pp . 775-819

[_Visualizza PDF](#)

[CrossRefVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

SM Hussain , KL Hess , JM Gearhart , KT Geiss , JJ. Schlager

Tossicità *in vitro* di nanoparticelle in cellule di fegato di ratto BRL 3A

Tossicolo in vitro , 19 (7) (2005 ottobre) , pp . 975-983

[ArticoloScarica il pdfGoogle Scholar](#)

B Sha , W Gao , Y Han , S Wang , J Wu , F Xu , T. Lu

Potenziale applicazione delle nanoparticelle di biossido di titanio nella prevenzione dell'osteosarcoma e della recidiva del condrosarcoma

J Nanosci Nanotechnol , 13 (2) (2013 febbraio) , pp. 1208 - 1211

[_Visualizza PDF](#)

[CrossRefVisualizza record in ScopusGoogle Scholar](#)

DB Wahrheit , EM. Donner

Strategie di valutazione del rischio per particelle di biossido di titanio su nanoscala e di dimensioni fini: riconoscimento dei problemi di esposizione e pericolo

Food Chem Toxicol (2015 novembre; 85) , pp. 138 - 147

[Articolo](#)[Scarica il pdf](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

M Skocaj , M Filipic , J Petkovic , S. Novak

Il biossido di titanio nella nostra vita quotidiana; è sicuro?

Radiol Oncol , 45 (4) (dic 2011) , pp. 227 - 247

[_Visualizza PDF](#)

[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

Fa Grande , P. Tucci

Nanoparticelle di biossido di titanio: un rischio per la salute umana?

Mini Rev Med Chem , 16 (9) (2016) , pp . 762-769

[_Visualizza PDF](#)

[CrossRef](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

Y Ze , R Hu , X Wang , X Sang , X Ze , B Li , J Su , Y Wang , N Guan , X Zhao , S Gui , L Zhu , Z Cheng , J Cheng , L Sheng , Q Sun , L Wang , F. Hong

Neurotossicità e profilo gene-espresso in topi con lesioni cerebrali causate dall'esposizione a nanoparticelle di biossido di titanio

J Biomed Mater Res A , 102 (2) (2014 febbraio) , pp . 470-478

[_Visualizza PDF](#)

[CrossRef](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

V Aruoja , HC Dubourguier , K Kasemets , A. Kahru

Tossicità delle nanoparticelle di CuO, ZnO e TiO2 per le microalghe Pseudokirchneriella subcapitata

Sci Total Environ , 407 (4) (1 febbraio 2009) , pp 1461-1468

[Articolo](#)[Scarica il pdf](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

K Kasemets , A Ivask , HC Dubourguier , A. Kahru

Tossicità di nanoparticelle di ZnO, CuO e TiO₂ per il lievito *Saccharomyces cerevisiae*

Tossico in vitro , 23 (6) (2009 settembre) , pp 1116 - 1122

[Articolo](#)[Scarica il pdf](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

T Moreno , RM Pintó , A Bosch , N Moreno , A Alastuey , MC Minguillón , E Anfruns-Estrada , S Guix , C Fuentes , G Buonanno , L Stabile , L Morawska , X. Querol

Tracciamento dell'RNA SARS-CoV-2 di superficie e aereo all'interno di autobus pubblici e treni della metropolitana

Environ Int , 147 (feb 2021) , articolo 106326

[Articolo](#)[Scarica il pdf](#)[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)

Ryosuke Matsuura , Chie-

Wen Lo , Satoshi Wada , Junichi Somei , Heihachiro Ochiai , Takeharu Murakami , *et al.*

SARS-CoV-2 disinfezione dell'aria e della superficie contaminata da danni mediati dal fotocatalizzatore TiO₂ alla morfologia virale, all'RNA e alle proteine

Virus , 13 (5) (2021) , p. 942 , [10.3390/v13050942](#)

[_Visualizza PDF](#)

[Visualizza record in Scopus](#)[Google Scholar](#)