PRODOTTI DECONTAMINANTI AMBIENTALI A BASE DI TiO₂: TEST SU MATERIALI LAPIDEI E VETRO

RAPPORTO FINALE

1. PREMESSA

Lo scorso aprile 2006, è stata avviata una sperimentazione finalizzata alla valutazione delle caratteristiche morfologiche e protettive degli strati di prodotti decontaminanti fotocatalitici a base di TiO₂ applicati su superfici lapidee (marmo di Candoglia, Travertino) e su vetri. Tale sperimentazione prevedeva l'applicazione da parte di tecnici di Eco Coating (fornitrice dei materiali) di alcuni prodotti con caratteristiche diverse, in presenza o meno di *primer*, sulla superficie di provini opportunamente preparati a nostra cura e l'esposizione degli stessi all'ambiente esterno senza alcuna protezione nei riguardi degli agenti atmosferici (vd. I Rapporto di Avanzamento del 16.05.2006).

Nel II Rapporto di Avanzamento (del 27.07.2006) erano stati riportati i risultati della caratterizzazione morfologica e microanalitica dei provini di marmo di Candoglia, Travertino e di alcuni vetri esposti per 1 e 3 mesi. Le evidenze sperimentali ottenute avevano permesso di concludere che se l'applicazione di questi prodotti nel settore dell'edilizia civile non presentano particolari criticità, nel caso dei materiali lapidei caratteristici del patrimonio storico monumentale erano necessarie ulteriori indagini condotte su provini esposti per tempi più lunghi.

Relativamente al marmo di Candoglia e al Travertino, erano stati messi in evidenza alcuni aspetti interessanti che si possono riassumere in:

- l'adesione dello strato protettivo (*primer* + TiO₂) varia a seconda del prodotto utilizzato;
- generale presenza di fratturazioni ed eventualmente distacchi localizzati dello strato di *primer* e di TiO₂, fenomeni la cui importanza varia in funzione del materiale utilizzato;
- azione protettiva da parte degli strati nei confronti dell'attacco da parte degli inquinanti presenti nell'aria (fenomeno importante nel caso di pietre calcaree quali quelle oggetto della sperimentazione), ma solo nel caso in cui sia presente il *primer*; in sua assenza, il solo strato di TiO₂ non assicura una protezione all'attacco degli inquinanti;
- necessità di effettuare una seconda campagna di indagini morfologiche e microanalitiche su provini esposti per tempi più lunghi.

Per quanto riguarda le applicazioni su vetro erano stati considerati soprattutto gli aspetti di omogeneità, pulizia e trasparenza, facendo rilevare come l'utilizzo del *primer* sia un fattore critico in quanto induce una evidente opacità alla superficie trattata.

Al fine di confermare quanto emerso dalle precedenti indagini, si è quindi ritenuto opportuno proseguire l'esposizione dei provini e procedere alla loro caratterizzazione morfologica e microanalitica dopo 6 mesi dall'applicazione degli strati decontaminanti fotocatalitici. I risultati di queste indagini sono riportati nel presente Rapporto che termina la sperimentazione.

2. PARTE SPERIMENTALE

In Tabella 1 si riporta l'elenco dei provini oggetto di analisi al 20/10/2006, per i prodotti PSO419 e KR, e al 04/11/2006 per il prodotti ATLS01G. Si ricorda che per comodità i provini sono identificati con la sigla Px-Yn dove x è il numero del pannello, Y è la colonna ed n è la riga di posizione del provino sul pannello (cfr. II Rapporto di Avanzamento). Nella discussione dei risultati si farà riferimento alle sigle identificative riportate in questa tabella.

2 mani KTP01+3mani 2 mani KTP01+3mani 2 mani KTP01+2mani **Trattamento PSO419** ATLS01G KR **Tipologia** Candoglia Travertino Candoglia Travertino Candoglia Travertino Sigla P2-H4 P2-G3 P2-E4 P2-D3 P3-D2 P3-D1

Tabella 1: Provini oggetto di analisi dopo sei mesi di esposizione

Le indagini morfologiche e microanalitiche sono state condotte con la strumentazione e le modalità riportate nel precedente Rapporto di Avanzamento.

3. RISULTATI

I campioni di materiale litoide sono stati raggruppati per trattamento e sono stati confrontati in funzione sia della tipologia di substrato carbonatico (marmo di Candoglia e Travertino) sia del tempo di esposizione; in particolare, i campioni esposti per 6 mesi vengono confrontati con gli analoghi esposti per 1 e 3 mesi.

3.1 APPLICAZIONE SUI MATERIALI LITOIDI

3.1.1 Trattamento KTP01 + PSO419

Marmo di Candoglia

Come si osserva nelle micrografie riportate nelle Figure 1 e 2, ed analogamente a quanto descritto per i campioni esposti per 1 e 3 mesi, sulla superficie del campione *P2-H4* è presente una patina discontinua caratterizzata da numerose fratturazioni che comportano distacchi della stessa dal substrato lapideo. Queste caratteristiche morfologiche degli strati deposti indicano una scarsa adesione degli stessi alla superficie del provino di marmo.

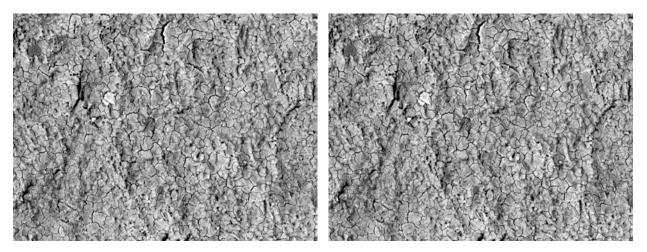


Figura 1: Micrografie SEM campione P2-H4 (dopo 6 mesi)

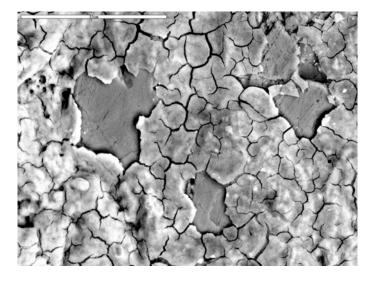


Figura 2: Micrografia SEM relativa al campione P2-H4 (dopo 6 mese).

In effetti si osservano ampie aree della superficie del marmo prive di patina (Figura 2). Ciò risulta ben evidenziato anche nelle mappe di raggi-X riportate in Figura 3, in cui il Ca indica il substrato di calcite (CaCO₃, principale costituente del marmo di Candoglia), mentre il Ti ed il Si, come discusso nel II rapporto, sono associati ai prodotti applicati.

Sulla superficie del provino in esame ci sono numerose aree non ricoperte dal prodotto decontaminante che corrispondono alle zone più chiare nella mappa di raggi-X del Ca, cioè quelle con maggiore presenza di questo elemento; viceversa, queste stesse aree sono scure nelle mappe di raggi-X del Ti e del Si per l'assenza di questi elementi sulla superficie del marmo. Il grado di solfatazione del provino risulta essere comunque basso come riportato in Tabella 2 in cui si confrontano le analisi sul provino esposto per 6 mesi con quelle relative a 1 e 3 mesi.

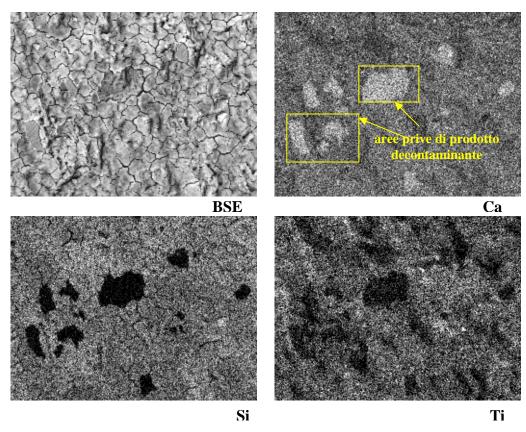


Figura 3: Mappe di raggi-X che illustrano la distribuzione degli elementi principali (Ca, Si, Ti) nell'area del provino P2-H4 (dopo 6 mesi) documentata nella micrografia BSE. Nei riquadri sono evidenziate le aree prive di prodotto decontaminante che appaiono più chiare nella mappa del Ca.

Tabella 2: Composizione superficiale media ottenuta con la microanalisi EDX espressa in % peso e normalizzata a 100

	P2-L4 P2-I4		P2-H4	
	(1 mese)	(3 mesi)	(6 mesi)	
CaSO ₄	3.8 (1.6)	6.5 (2.0)	3.6 (0.8)	
CaCO ₃	47.7 (1.9)	48.7 (2.0)	44.7 (0.7)	
SiO ₂	28.8 (1.6)	16.3 (1.8)	13.9 (1.5)	
TiO ₂	19.2 (2.0)	27.6 (2.3)	37.3 (1.7)	
Fe ₂ O ₃	0.5 (0.1)	0.6 (0.2)	0.5 (0.1)	

Dalla Tabella 2 si evince che, nonostante la disomogenea applicazione del prodotto e la sua discontinuità superficiale, il grado di solfatazione della superficie marmorea non è aumentato dopo sei mesi di esposizione. La disomogeneità di applicazione dei prodotti viene documentata anche dal diverso contenuto superficiale di SiO₂ (~14-29%) e di TiO₂ (~19-37%) rilevato nei tre diversi provini.

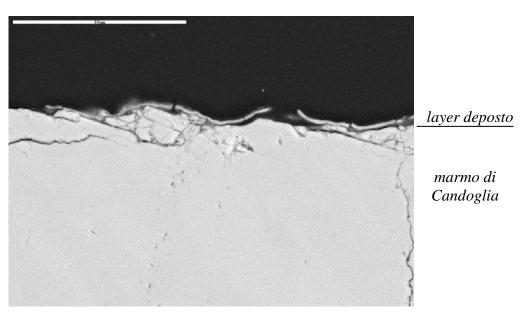


Figura 4: Micrografia SEM del provino P2-H4 in sezione: si osserva il parziale sollevamento dello strato di decontaminante

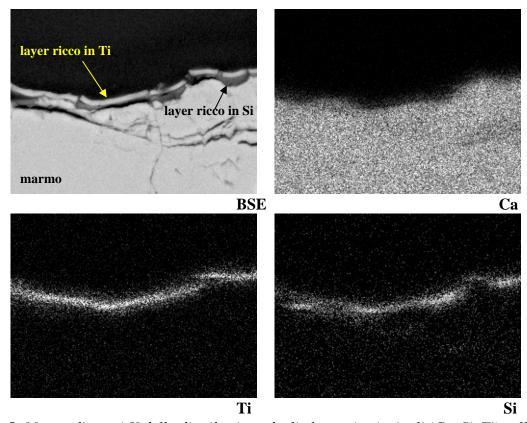


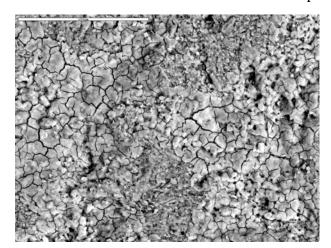
Figura 5: Mappe di raggi-X della distribuzione degli elementi principali (Ca, Si, Ti) nell'area della sezione del provino P2-H4 (dopo 6 mesi) documentata nella micrografia BSE.

Anche l'osservazione in sezione conferma la discontinuità dello strato di deposto sul provino *P2-H4* (Figura 4). In alcune aree è stato possibile distinguere lo strato di *primer* da quello di decontaminante (Figura 5). Nelle mappe a raggi-X riportate in Figura 5, infatti, il Si, elemento costituente del *primer*, è a diretto contatto del marmo, e lo strato di Ti, costituente del prodotto decontaminante, risulta sovrapposto.

Gli spessori misurati sono mediamente compresi tra 0.5 e 1.5 μm per il *layer* a base di TiO_2 e tra 0.3 ed 1.0 μm per il *primer*.

Travertino

Sul campione di Travertino, *P2-G3*, esposto per 6 mesi, si è riscontrata una situazione abbastanza simile a quella discussa per il marmo di Candoglia ed analoga a quanto già evidenziato dopo 1 e 3 mesi di esposizione. In effetti nelle micrografie di Figura 6, lo strato depositato risulta essere staccato dal substrato lapideo, formando un rivestimento discontinuo e molto fratturato con numerose aree di travertino esposte. È interessante notare nelle mappe di raggi-X (Figura 7) la perfetta corrispondenza tra Ti e Si, elementi associati al prodotto fotocatalitico: il deposito ricopre in maniera discontinua la superficie del travertino, come evidente dalla distribuzione del Ca (si ricorda che le aree chiare indicano assenza di prodotto decontaminante).



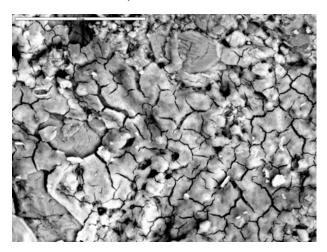


Figura 6: micrografie SEM relative al campione P2-G3 (dopo 6 mesi)

Tuttavia, i dati in Tabella 3 indicano che il grado di solfatazione dopo 6 mesi, seppur maggiore rispetto ad 1 mese di esposizione, è ancora contenuto, mentre risulta essere inferiore a quanto rilevato dopo tre mesi. Ciò potrebbe essere imputato ad una eterogeneità di solfatazione della superficie marmorea legata, probabilmente, anche ad una non omogenea applicazione dei prodotti da provino a provino.

Tabella 3: Composizione superficiale media ottenuta con microanalisi EDX espressa in % peso e normalizzata a 100. Tra parentesi viene riportata la deviazione standard.

	P2-L3	P2-I3	P2-G3
	(1 mese)	(3 mesi)	(6 mesi)
CaSO ₄	1.8 (0.2)	11.4 (8.6)	3.0 (0.4)
CaCO ₃	50.1 (6.9)	43.5 (5.3)	50.9 (3.4)
SiO ₂	13.2 (1.6)	15.8 (2.6)	12.2 (2.7)
TiO ₂	34.7 (5.3)	29.2 (1.4)	33.8 (4.6)
Fe ₂ O ₃	0.0 (0.0)	0.1 (0.2)	0.1 (0.1)

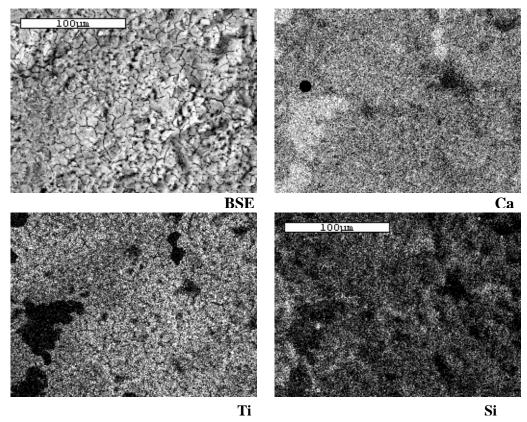


Figura 7: Mappe di raggi-X che illustrano la distribuzione delle elementi principali (Ca, Si, Ti) nell'area del provino P2-G3 (6 mesi) documentata nella micrografia BSE

Analogamente al marmo di Candoglia, le osservazioni sul provino in sezione evidenziano una certa discontinuità nei due *layer* deposti, come evidenziato in Figura 8. Su questa tipologia di campione sono stati riscontrati spessori più variabili del *primer*, compresi tra 0.2 e 1.5μm, mentre il *layer* a base di TiO₂ è caratterizzato da spessori compresi tra circa 0.8 e 1.2μm.

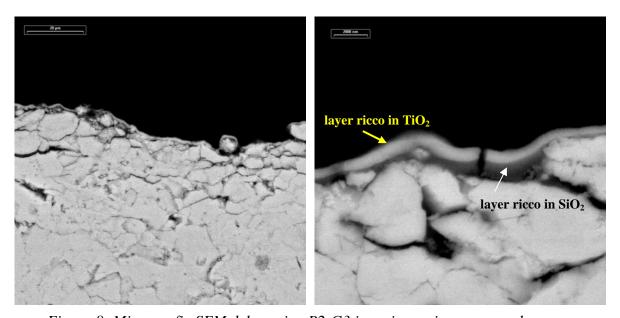


Figura 8: Micrografia SEM del provino P2-G3 in sezione: si osservano alcune discontinuità nei due strati deposti

3.1.2 Trattamento KTP01 + KR

Marmo di Candoglia

Analogamente a quanto discusso nel II rapporto, si osserva che lo strato di prodotto depositato presenta numerose fessurazioni, anche se i fenomeni di distacco sono meno marcati rispetto a quanto evidenziato per l'applicazione del prodotto PSO419 (Figura 9).

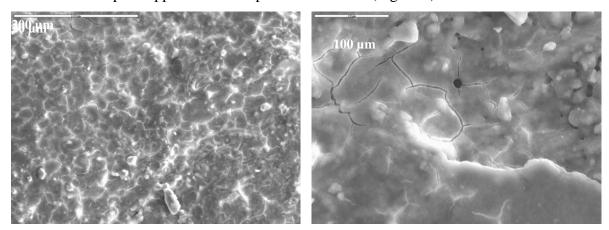


Figura 9: Micrografia SEM relativa al campione P2-E4 (dopo 6 mesi)

Tabella 4: Composizione superficiale media ottenuta con microanalisi EDX espressa in % peso e normalizzata a 100. Tra parentesi vieni riportata la deviazione standard.

	P2-A4	P2-B4	P2-E4
	(1 mese)	(3 mesi)	(6 mesi)
CaSO ₄	2.2 (0.6)	2.0 (0.8)	2.0 (0.3)
CaCO ₃	53.8 (3.6)	56.4 (5.1)	61.4 (4.1)
SiO ₂	32.9 (5.2)	28.9 (5.6)	20.0 (4.1)
TiO_2	10.8 (1.8)	12.3 (0.8)	16.0 (2.3)
Fe ₂ O ₃	0.3 (0.1)	0.5 (0.1)	0.5 (0.2)

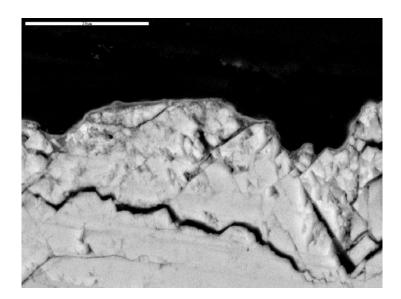


Figura 10: Micrografia SEM relativa al campione P2-E4 in sezione (dopo 6 mesi)

La maggiore adesione del prodotto KR sulla superficie del marmo è correlata anche al grado di solfatazione superficiale del provino che rimane sostanzialmente invariato dopo sei mesi di esposizione. Anche le osservazioni effettuate sulla sezione ortogonale testimoniano la buona adesione dei prodotti, sia *primer* che decontaminante, alla superficie marmorea (Figura 10).

Travertino

Sul travertino si riscontra una migliore adesione dello strato di deposito KR rispetto al prodotto KTP01+PSO419 (Figura 11), anche se fenomeni di distacco sono comunque sempre presenti. Il grado di solfatazione superficiale rimane contenuto dopo i sei mesi di esposizione.

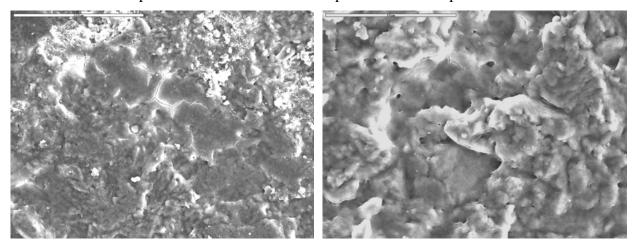


Figura 11: micrografia SEM relativa al campione P2-D3 (6 mesi).

Tabella 5: Composizione superficiale media ottenuta con microanalisi EDX espressa in % peso e normalizzata a 100. Tra parentesi vieni riportata la deviazione standard.

	P2-A3	P2-B3	P2-D3
	(1 mese)	(3 mesi)	(6 mesi)
CaSO ₄	2.6 (0.1)	4.8 (1.3)	3.4 (0.4)
CaCO ₃	64.4 (1.3)	53.7 (5.0)	66.2 (3.2)
SiO_2	23.2 (2.6)	25.8 (3.6)	19.3 (1.7)
TiO_2	9.7 (1.9)	15.7 (1.4)	11.0 (1.9)
Fe ₂ O ₃	0.0(0.0)	0.0 (0.1)	0.1 (0.1)

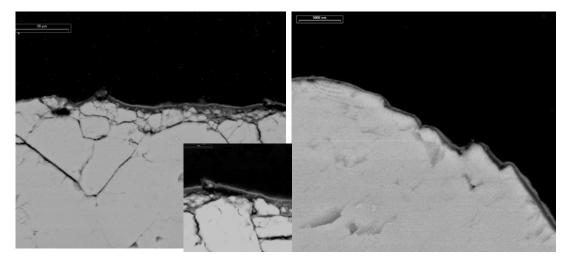


Figura 12: Micrografia SEM relativa al campione P2-E4 in sezione (dopo 6 mesi)

Dalle osservazioni del provino sezionato si evidenzia la buona deposizione ed adesione dei due prodotti al substrato lapideo. Il *primer* presenta spessori compresi tra 0.3 e 1.0 μm, il *layer* a base di TiO₂ è caratterizzato da spessori relativamente inferiori e compresi tra 0.2 e 0.5 μm.

3.1.3 Trattamento KTP01+ATLS01G

Marmo di Candoglia

Dall'osservazione della superficie del marmo di Candoglia questa applicazione sembra formare uno strato piuttosto regolare e continuo. Non si riscontrano significativi fenomeni di distacco dello strato depositato ma solo localmente alcune fratturazioni e distacchi della pellicola deposta (Figura 13 e Figura 14).

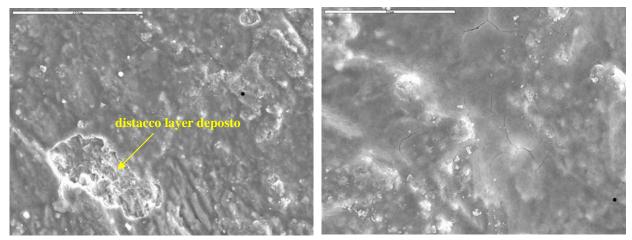


Figura 13: Micrografia SEM relativa al campione P3-D2 (6 mesi).

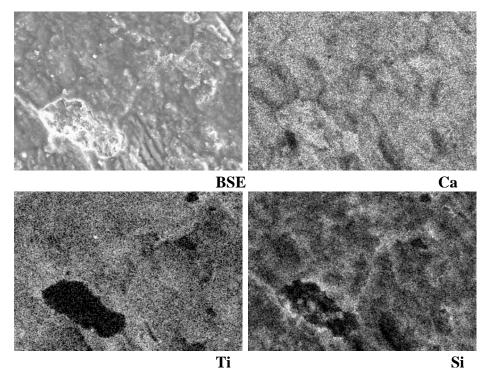


Figura 14: Mappe di raggi-X che illustrano la distribuzione delle elementi principali (Ca, Si, Ti) nell'area del provino P3-D2(6 mesi) documentata nella micrografia BSE

Tabella 6: Composizione superficiale media ottenuta con microanalisi EDX espressa in % peso e normalizzata a 100. Tra parentesi è riportata la deviazione standard.

	P3-C2 (1 mese)	P3-B2 (3 mesi)	P3-D2 (6 mesi)
CaSO ₄	3.6 (0.7)	8.5 (6.7)	3.7 (0.2)
CaCO ₃	61.9 (8.6)	51.2 (6.6)	50.1 (2.8)
SiO ₂	9.0 (1.8)	11.1 (2.0)	20.2 (3.3)
TiO ₂	25.5 (8.2)	28.5 (2.1)	25.6 (4.0)
Fe ₂ O ₃	0.0 (0.0)	0.8 (0.1)	0.3 (0.1)

Il grado di solfatazione risulta essere analogo a 1 mese di esposizione.

La buona applicazione del prodotto si osserva anche nelle sezioni ortogonali in cui si evidenzia sia lo strato di *primer* adeso al marmo che lo strato a base di Ti soprastante. Solo localmente entrambe gli strati non sono presenti sulla superficie lapidea (Figura 15).

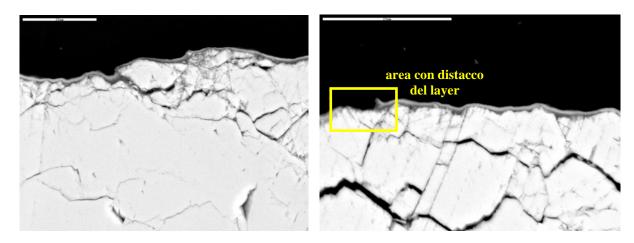


Figura 15: Micrografie SEM relative al campione P3-D2 in sezione (dopo 6 mesi)

Travertino

Per quanto riguarda il Travertino si osserva uno strato di deposito piuttosto continuo e non vengono evidenziati significativi fenomeni di distacco dal substrato lapideo (Figura 16).

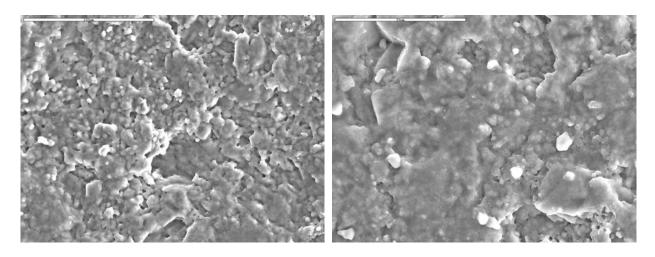


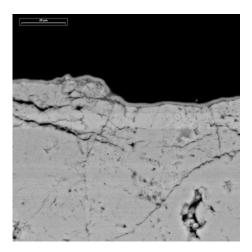
Figura 16: Micrografie SEM relative al campione P3-D1 (dopo 6 mesi).

La Tabella 7 indica, per quanto riguarda il grado di solfatazione una situazione sostanzialmente inalterata dopo sei mesi in atmosfera naturale.

Tabella 7: composizione superficiale media ottenuta con microanalisi EDX espressa in % peso e normalizzata a 100.

Tra parentesi è riportata la deviazione standard.

	P3-A1	P3-C1	P3-D1
CaSO ₄	3.6 (0.9)	3.3 (1.2)	3.3 (0.3)
CaCO ₃	55.3 (4.6)	46.4 (5.5)	58.4 (7.8)
SiO ₂	11.2 (0.8)	12.6 (1.9)	10.7 (2.9)
TiO ₂	29.9 (4.2)	37.6 (6.3)	27.5 (8.4)
Fe ₂ O ₃	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.1 (0.0)



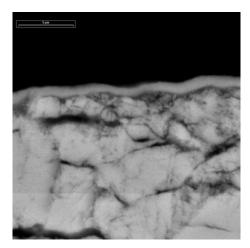


Figura 17: Micrografie SEM relative al campione P3-D1 in sezione (dopo 6 mesi)

La buona adesione del prodotto è evidente anche sul provino in sezione (Figura 17). Su questa tipologia di campione si è misurato uno spessore del *layer* (*primer*+decontaminate) compreso tra 0.5 e 2.0 µm.

3.1.4 Vetri

Dopo 6 mesi di esposizione è stata effettuata un'analisi visiva sulla lastra di vetro (Fig. 18) per verificare se le conclusioni tratte dopo 3 mesi fossero ancora valide.

Effettivamente si conferma quanto evidenziato nel II rapporto di avanzamento, cioè che l'applicazione del prodotto KR senza *primer* su vetro dà come risultato un materiale pulito e trasparente mentre l'applicazione con il prodotto PSO419 con *primer* dà come risultato una forte opacità.

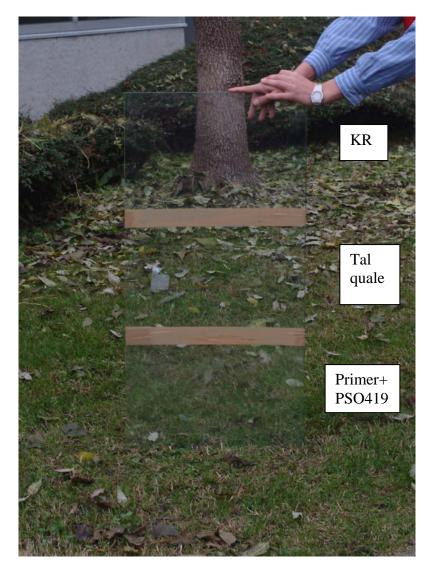


Figura 17: Fotografia della lastra di vetro a distanza di tre mesi dall'applicazione dei prodotti: 1 strato di KR (in alto), nessun trattamento (al centro), 1 strato di Primer e 1 strato di PSO419 (in basso).

4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Le indagini morfologiche e microanalitiche condotte sui provini di materiale lapideo confermano sostanzialmente quanto riportato nel II Rapporto di Avanzamento.

In particolare, relativamente ai diversi prodotti, si conferma che il trattamento con KR e con ATLS01G produce strati protettivi caratterizzati da una migliore adesione al substrato lapideo rispetto a quello ottenuto con il PSO419; per questo ultimo prodotto sono evidenti le fratturazioni ed i distacchi di parte dello strato protettivo, fenomeni osservati anche negli altri casi, ma di entità significativamente meno rilevante. Il grado di solfatazione del substrato lapideo, fenomeno che interviene nelle zone a scarsa adesione e di distacco dello strato protettivo, è più evidente nel caso del PSO419 su entrambi i substrati e, limitatamente al ATLS01G, sul solo marmo di Candoglia (Tabella 8).

Marmo di Candoglia					
trattamento	SiO ₂ *	TiO ₂ *	SiO ₂ /TiO ₂ **	CaSO₄ **	
KTP0+PSO419	13.9-28.8	19.2-37.3	0.8	4.6	
KTP0+KR	20.0-32.9	10.8-16.0	2.2	2.1	
KTP0+ATLS01G	9.0-20.2	25.5-28.5	0.5	5.3	
Travertino					
trattamento	SiO ₂ *	TiO ₂ *	SiO ₂ /TiO ₂ **	CaSO₄ **	
KTP0+PSO419	12.2-15.8	29.2-34.7	0.4	5.4	
KTP0+KR	19.3-25.8	9.7-15.7	1.9	3.6	
KTP0+ATLS01G	10.7-12.6	27.5-37.6	0.4	3.4	

Tabella 8: Composizione superficiale dei provini

Si vuole comunque sottolineare l'eterogeneità di applicazione/distribuzione dei prodotti, sia *primer* che decontaminante, come indicato dall'elevata variabilità composizionale di SiO₂ e TiO₂ indicata in Tabella 8. È certamente un aspetto importante quello relativo alle condizioni operative di applicazione dei prodotti in quanto da queste dipendono la qualità degli strati protettivi e, conseguentemente, l'efficacia dei trattamenti. Va a questo proposito rilevato come i provini esaminati durante la sperimentazione non presentino situazioni morfologicamente omogenee in termini di spessori degli strati, distribuzione degli strati di *primer* e di decontaminante fotocatalitico, penetrazione dei componenti nelle rugosità della superficie, ecc.

Malgrado le disomogeneità riscontrate, è positivo rilevare le poche differenze osservate tra i provini esposti per tempi diversi. Ciò sta a significare che, dopo una prima fase di assestamento, il sistema si stabilizza e non risente (o risente in maniera marginale) dell'influenza di fenomeni atmosferici quali precipitazioni, vento (con urti con particelle solide sospese), escursioni termiche, ... È significativo come il grado di solfatazione delle superfici lapidee non aumenti in modo significativo col tempo e sia, quindi, un fenomeno circoscritto alle zone che hanno subito il distacco dello strato protettivo. Questo può avere un riflesso sullo sporcamento della pietra in quanto è ben noto che, per le pietre carbonatiche, il processo di solfatazione della superficie produce uno strato di solfato di calcio che, durante la sua crescita, ingloba il particolato atmosferico organico principale responsabile della colorazione nerastra delle croste di alterazione. Limitare, quindi, la solfatazione significa limitare questo fenomeno e quindi lo sporcamente globale della superficie.

Per quanto riguarda la caratterizzazione visiva e al microscopio ottico effettuata sui provini di vetro si conferma come il trattamento con KR fornisca il risultato più interessante al fine dell'applicazione, in quanto il materiale risulta omogeneo, pulito e trasparente alla luce. Si ritiene, da quanto emerso finora, che questo prodotto sia adatto all'applicazione su vetri nel settore degli edifici civili.

^{*} range: valore minimo e massimo, indipendentemente dal tempo di esposizione

^{**} valore medi, indipendentemente dal tempo di esposizione

5. CONCLUSIONI

La sperimentazione condotta permette di trarre conclusioni che, sostanzialmente, ricalcano quelle riportate nel II Rapporto di Avanzamento. In particolare:

- l'applicazione di decontaminanti fotocatalitici a base di TiO₂ per il settore dell'edilizia civile non presenta particolari criticità a patto che la loro stesura sia preceduta dall'applicazione di un *primer* che ne migliora l'adesione al substrato.
- Fra i tre prodotti esaminati, il KR e l'ATLS01G sono quelli che mostrano strati più omogenei e meglio adesi al substrato; il prodotto PSO419, al contrario, mostra caratteristiche di adesione ed omogeneità inferiori a quelle degli altri prodotti.
- Per substrati di vetro, il trattamento con KR è il più idoneo e non necessita l'applicazione del *primer* che, peraltro, induce opacità alla superficie.
- L'applicazione dei decontaminanti fotocatalitici su litoidi a matrice carbonatica quali il marmo di Candoglia ed il Travertino (materiali, peraltro, di elevata importanza in campo storico monumentale) ha mostrato risultati interessanti; in particolare, su questa tipologia di materiali, è notevole l'azione protettiva nei confronti della superficie dall'attacco chimico da parte di inquinanti presenti nell'atmosfera; tale azione viene favorita dalla presenza del *primer* che migliora le caratteristiche di adesione al substrato.
- I fenomeni di attacco chimico della superficie lapidea da parte degli inquinanti presenti nell'aria sono risultati più marcati nel caso del marmo di Candoglia rispetto al Travertino; tuttavia, le variazioni morfologiche e composizionali esposti all'ambiente esterno fino a 6 mesi sono da considerarsi limitate, confermando quanto già osservato per tempi di esposizione più corti (1 e 3 mesi).
- In generale, l'osservazione dei diversi provini evidenzia una certa disomogeneità nello spessore degli strati, distribuzione degli strati di *primer* e di decontaminante fotocatalitico, penetrazione dei componenti nelle rugosità della superficie, ecc.; si ritiene, pertanto, necessaria un'ottimizzazione delle condizioni operative di applicazione (tipo di ugello, distanza dalla superficie, temperatura, ecc.) degli strati, così da poter migliorare l'efficacia del trattamento.