SITI IPOGEI TRA RICERCA E FRUIZIONE
Il caso del Teatro romano di Ercolano
tra archeologia e ingegneria

WEBINAR – 6 giugno 2023

Gli studi sui ricambi d'aria nel Teatro romano di Ercolano

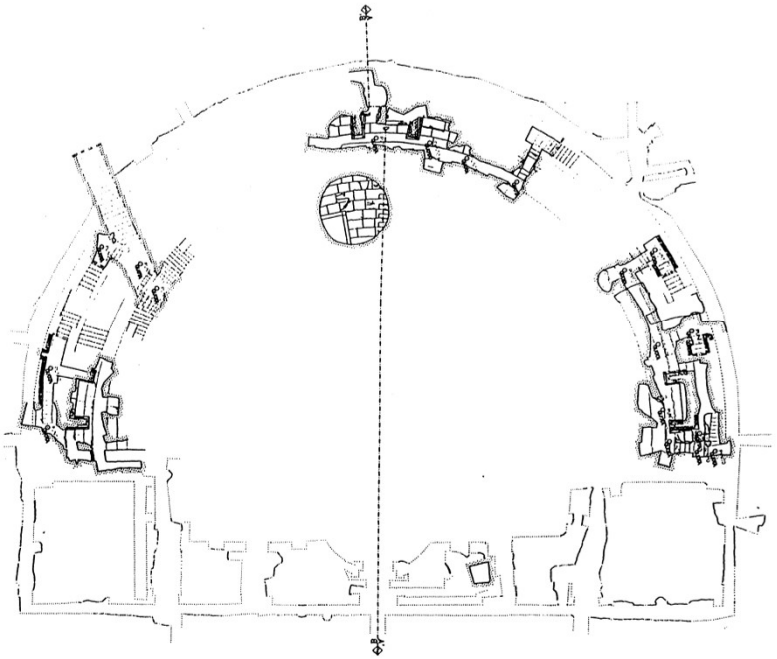
Giuseppe Riccio

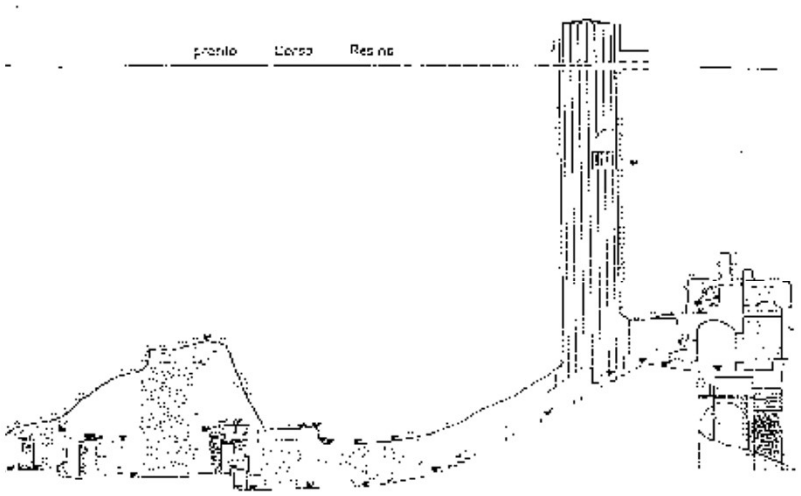
Università degli Studi di Napoli Federico II
DII - Dipartimento di Ingegneria Industriale
C.I.Be.C. - Centro interdipartimentale di Ingegneria per I Beni Culturali
TFdA-MASBC - Task Force di Ateneo "Metodologie Analitiche per la Salvaguardia dei Beni Culturali"

Nel 1997, la Soprintendenza Archeologica di Pompei richiese al C.I.Be.C. (Centro interdipartimentale di Ingegneria per I Beni Culturali) uno studio sugli accorgimenti da porre in essere per aprire al pubblico il teatro in condizioni di sicurezza per i visitatori e per il personale.

Lo studio riguardava la staticità della struttura, le infiltrazioni d'acqua, l'ambiente termico e **la ventilazione**.

Il teatro è un ambiente ipogeo in cui la ventilazione, naturale, era affidata ad un pozzo di 5,8 m di diametro ed alle due porte di accesso, principale e di sicurezza, normalmente chiuse e poste ad una quota di circa 25 m rispetto al piano della scena.





Per analizzare la ventilazione degli ambienti, si introducono gli *indicatori di portata* che dipendono dal volume dell'ambiente ventilato (V, m^3) e dalla portata di aria di rinnovo ($\dot{Q}$, m^3/h):

$$n = \frac{\dot{Q}}{V}$$ *numero di ricambi d'aria, h^{-1};*

$$\tau_n = \frac{V}{\dot{Q}}$$ *costante di tempo nominale di ventilazione, h.*

n: numero di sostituzioni, nell'arco di un'ora, dell'aria presente nell'ambiente.

Nel caso del teatro era richiesto di determinare il numero di ricambi d'aria.

La misura di n può essere effettuata:

- per ambienti dotati di impianto di ventilazione, misurando la portata d'aria immessa o con il metodo dei "gas traccianti";
- con il metodo dei "gas traccianti" per ambienti naturalmente ventilati.

Il metodo di misura con "gas traccianti" si basa nell'immissione in ambiente di una certa quantità di un gas e nello studio dell'andamento temporale della concentrazione dello stesso.

Questo metodo permette di ottenere informazioni sulla distribuzione dell'aria (sostanza tracciata) con la quale il tracciante si mescola.

Numero di ricambi d'aria

La misura di n mediante la tecnica dei gas traccianti è applicabile sia in spazi ventilati naturalmente che meccanicamente.

Il calcolo di n(t), al tempo t, si basa sulla risoluzione dell'equazione di conservazione della massa del gas tracciante:

$$V \cdot \frac{dC(t)}{dt} + n(t) \cdot V \cdot C(t) = q(t)$$

V = volume dell'ambiente, m^3;
q(t) = portata di gas tracciante immesso, all'istante t, kg/h;
C(t) = concentrazione di gas tracciante all'istante t, kg/m^3;
n(t) = numero di ricambi d'aria orari, h^{-1}.

Nella misura di n(t) è necessario mantenere una completa miscelazione del gas.

Gas tracciante

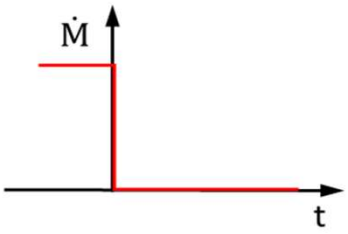
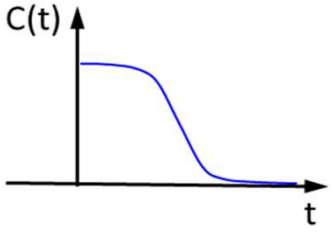
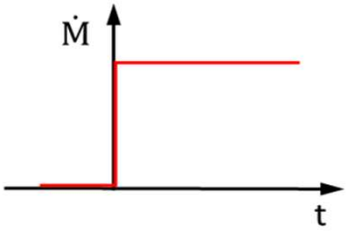
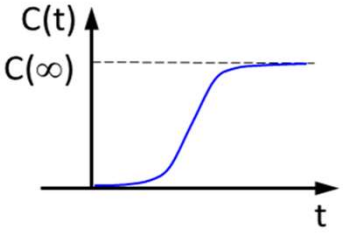
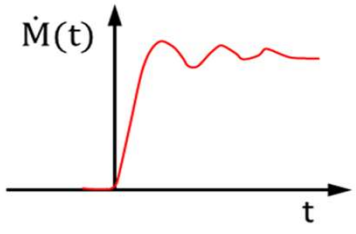
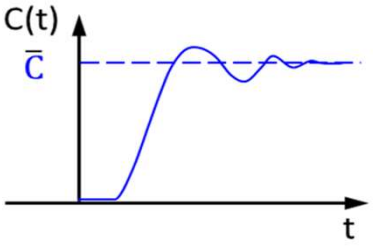
Qualsiasi tipo di gas misurabile può essere considerato come un gas tracciante. Un gas tracciante ideale:

- deve essere né reattivo e né infiammabile;
- non dovrebbe essere un costituente dell'aria ambiente (basse concentrazioni);
- deve essere facilmente misurabile;
- deve essere né tossico e né nocivo (impiegabile in ambienti occupati);
- deve salvaguardare l'ambiente ("amico dell'ambiente");
- deve essere economico.

Gas tracciante

Tracciante	Massa molecolare	Punto di ebollizione (°C)	Campo di rilevamento (ppm)	Concentrazione di fondo (ppm)
Anidride carbonica (CO_2)	44	-56,6	0,05-2000	Variabile
Diclorodifluorometano (CCl_2F_2 - R12)	121	-29,8	0,05-2000 0,001-0,05	
Protossido di azoto (N_2O)	44	-88,5	0,05-2000	0.03
Esafluoruro di zolfo (SF_6)	146	-50,8	0,05-2000 0,00002-0,5	
Perfluoroesano (C_6F_{14})	338	57,0	10^{-8}	

Iniezione del gas tracciante in ambiente

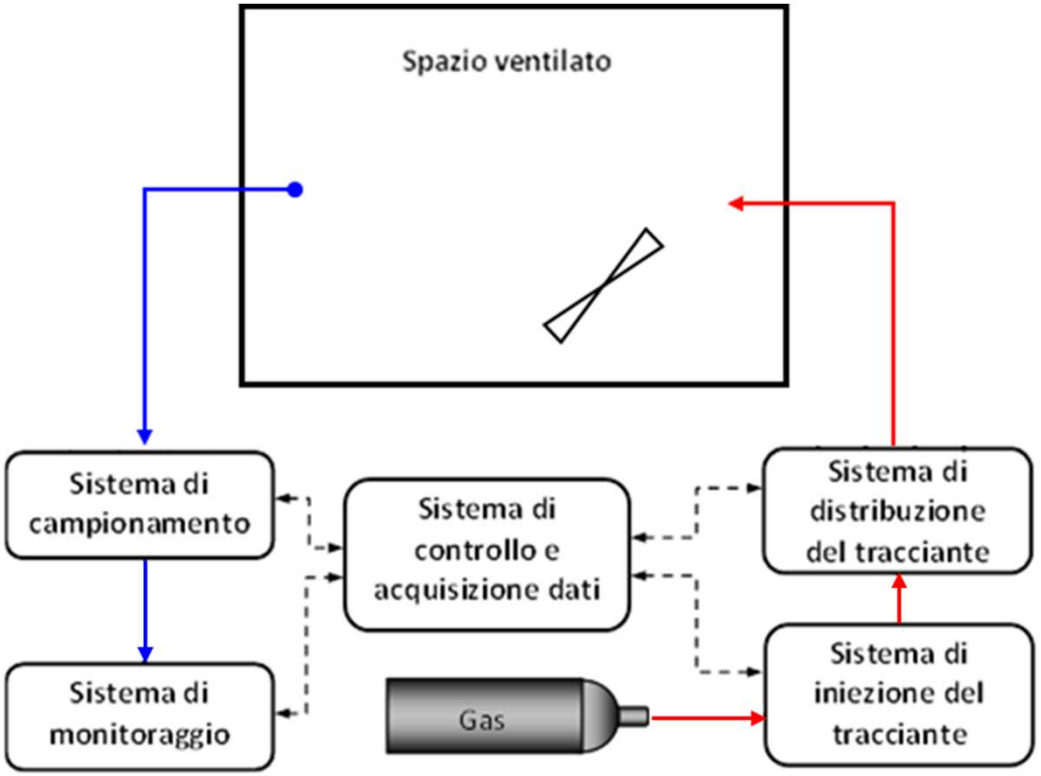
Metodo	Iniezione	Monitoraggio
Decadimento (step-down)		
Crescita (step-up)		
Concentrazione costante		

Numero di ricambi d'aria

Metodo	Ipotesi	Condizione iniziale	C(t)	Soluzione	Note
Decadimento (step-down)	q = 0 n = cost.	$C(0) = C_0$	$C(t) = C_0 \cdot e^{-n \cdot t}$	$n = \frac{lnC_0 - lnC(t)}{t}$	Il gas viene iniettato e premiscelato con l'aria.
Crescita (step-up)	q = cost. n = cost.	$C(0) = 0$	$C(t) = \frac{q}{nV} + \left(C_0 - \frac{q}{nV}\right) \cdot e^{-nt}$	$n = \frac{q}{V \cdot C(\infty)}$	Il tracciante è iniettato con una portata nota e costante, fino a una concentrazione costante C(∞).
Concentrazione costante	$C = \bar{C}$	–	$C(t) = \frac{q(t)}{V \cdot n(t)}$	$n(t) = \frac{q(t)}{V \cdot \bar{C}}$	Il tracciante è iniettato con una portata nota e modulabile per mantenere la concentrazione costante.

Calcolo di n(t) in funzione della modalità di rilascio del tracciante in ambiente

Numero di ricambi d'aria

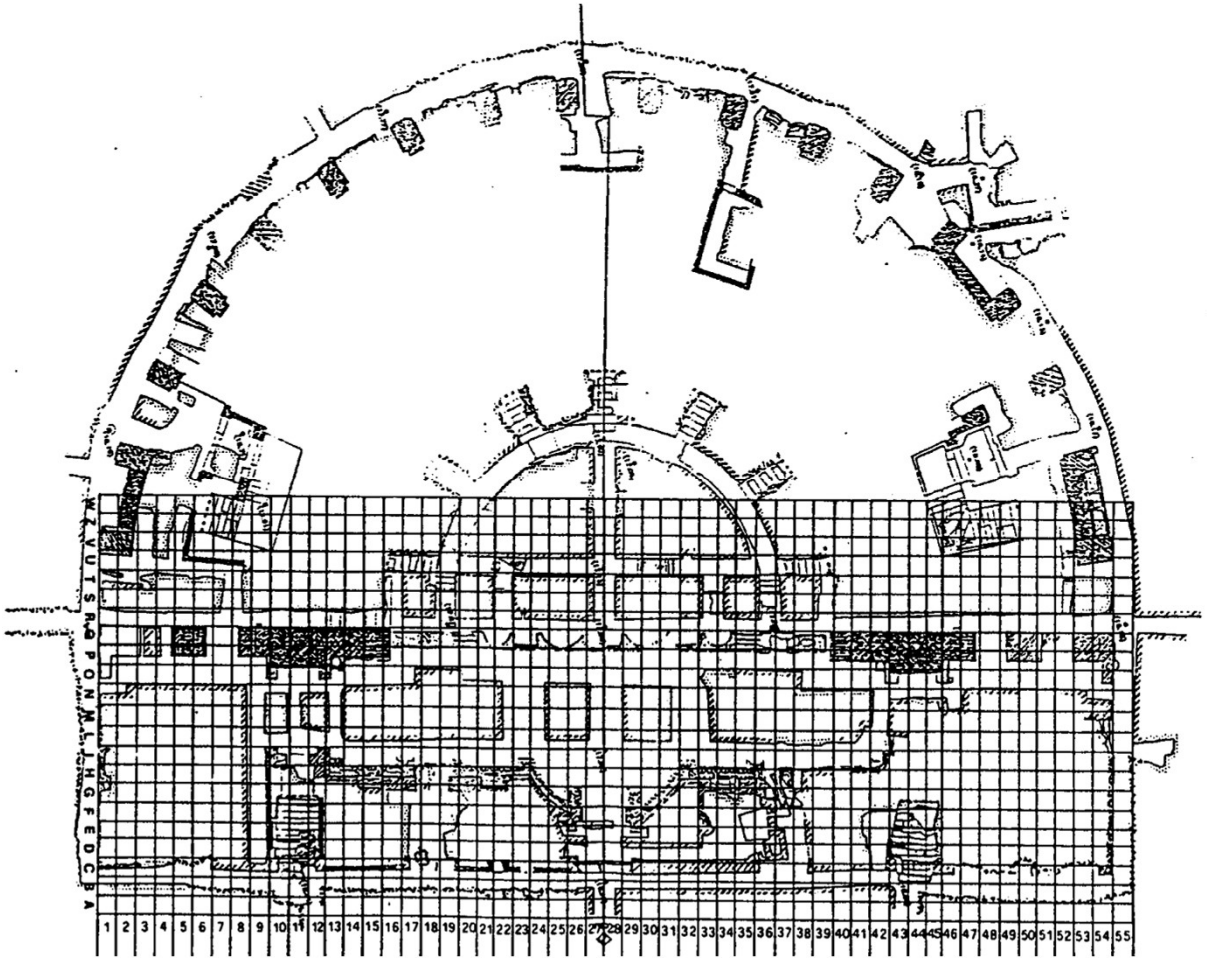


Misura del numero di ricambi d'aria nel Teatro di Ercolano

Data l'estensione e l'articolazione degli spazi accessibili nel Teatro, si decise di limitare l'indagine alla "ima cavea" che rappresenta la zona di maggiore interesse turistico.

L'applicazione del metodo del gas tracciante richiese la determinazione del volume dell'ambiente d'interesse, operazione che presentò notevoli difficoltà per via delle profonde irregolarità nei profili delle pareti e dei numerosi cunicoli ciechi.

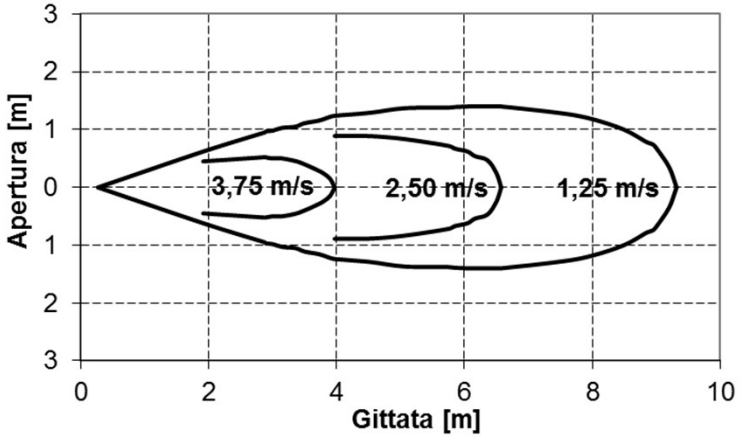
La misura del volume fu condotta sovrapponendo alla pianta dell'ima cavea un reticolo (a maglia quadrata di lato un metro) che si sviluppava lungo i 55 metri del piano del proscenio e per 20 metri in senso ortogonale; misurando l'altezza in corrispondenza del centro di ciascuna maglia si ottenne il volume della zona considerata.



Il volume della zona considerata fu valutato pari a 930 m^3, con un errore del $\pm 10\%$.

La determinazione di n, qualunque sia il metodo di iniezione del tracciante, richiede che esso sia ben miscelato con l'aria.

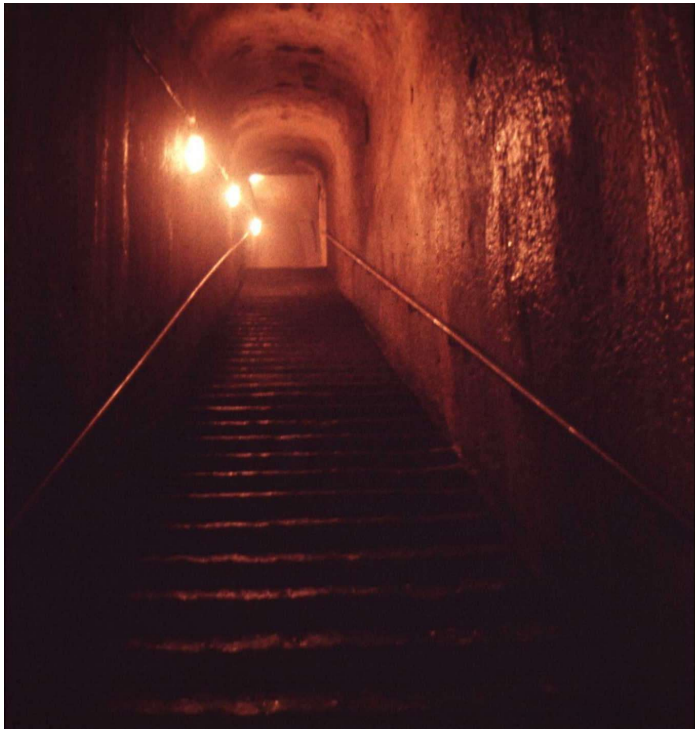
A tal fine, dopo un'estesa indagine, furono scelti due ventilatori trasportabili (massa inferiore a 60 kg), orientabili, potenza elettrica totale assorbita minore di un kilowatt (monofase), che garantivano un valore della velocità dell'aria di 0,50 m/s a 15 metri di distanza.



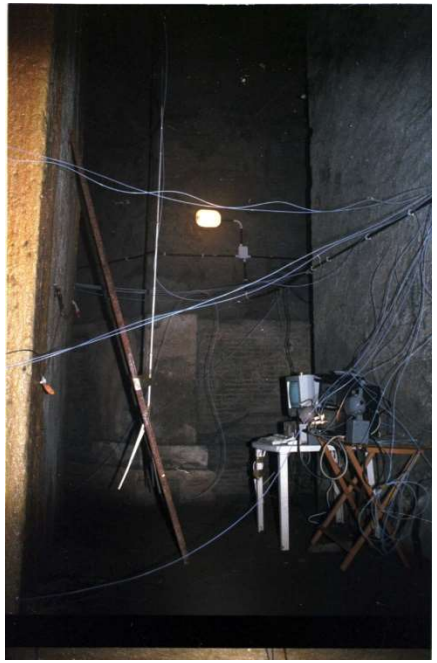
Il sistema di alimentazione del tracciante, di campionamento e monitoraggio era costituito da:

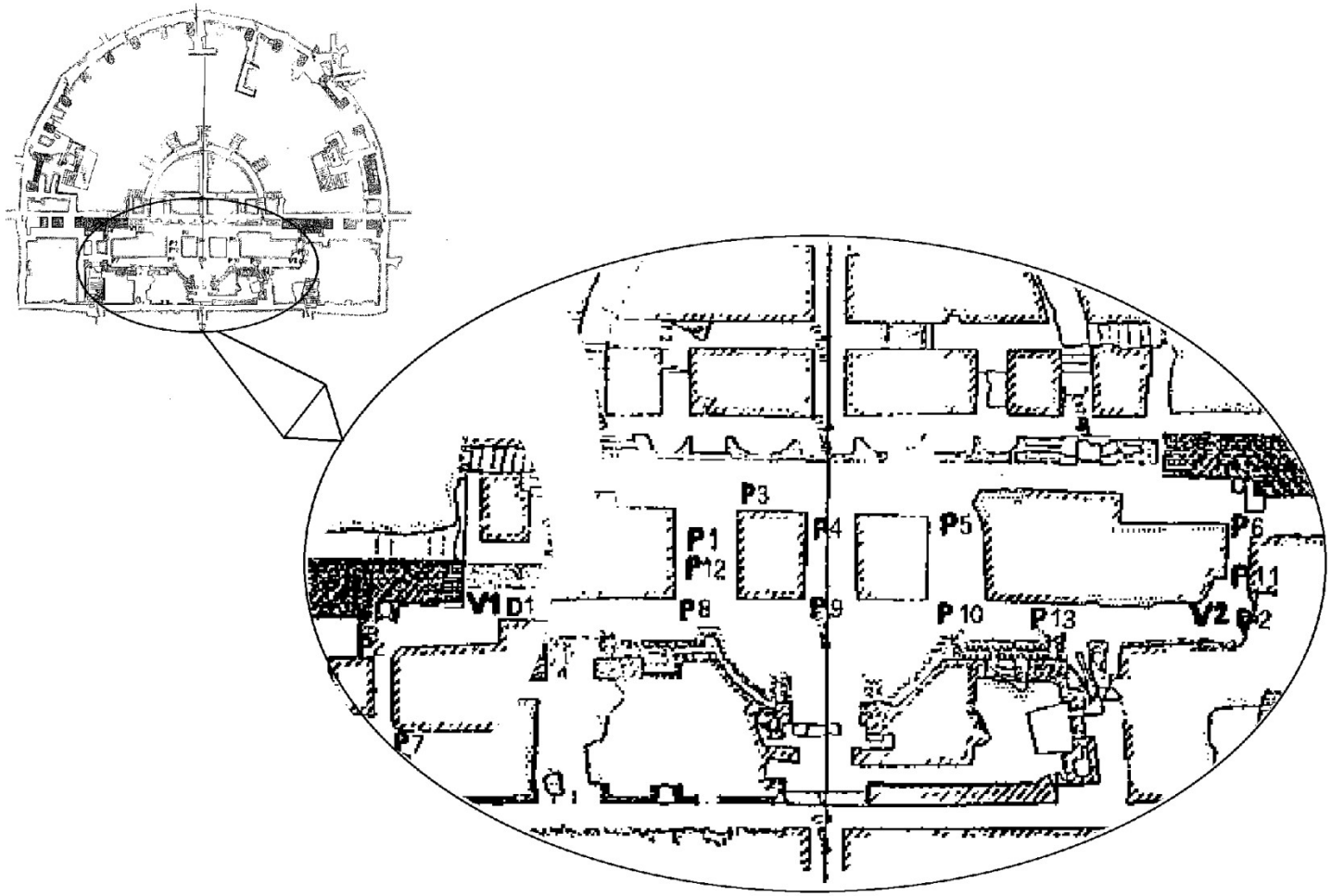
- due Monitor Multi-Gas Type 1302 Brüel & Kjær;
- un Multipoint Sampler and Doser Type 1303 Brüel & Kjær;
- un Multipoint Sampler Type 1303 Innova Air Tech Instrument;
- due PC con software 7620 Brüel & Kjær per la gestione dei sistemi.

L'esecuzione della misura ha richiesto il trasporto e l'installazione, oltre che dell'apparecchiatura di monitoraggio, di oltre un centinaio di metri di tubo in PTFE per il campionamento, della bombola di esafluoruro di zolfo, dei ventilatori, di tavoli d'appoggio e di supporti per i diversi campionatori.

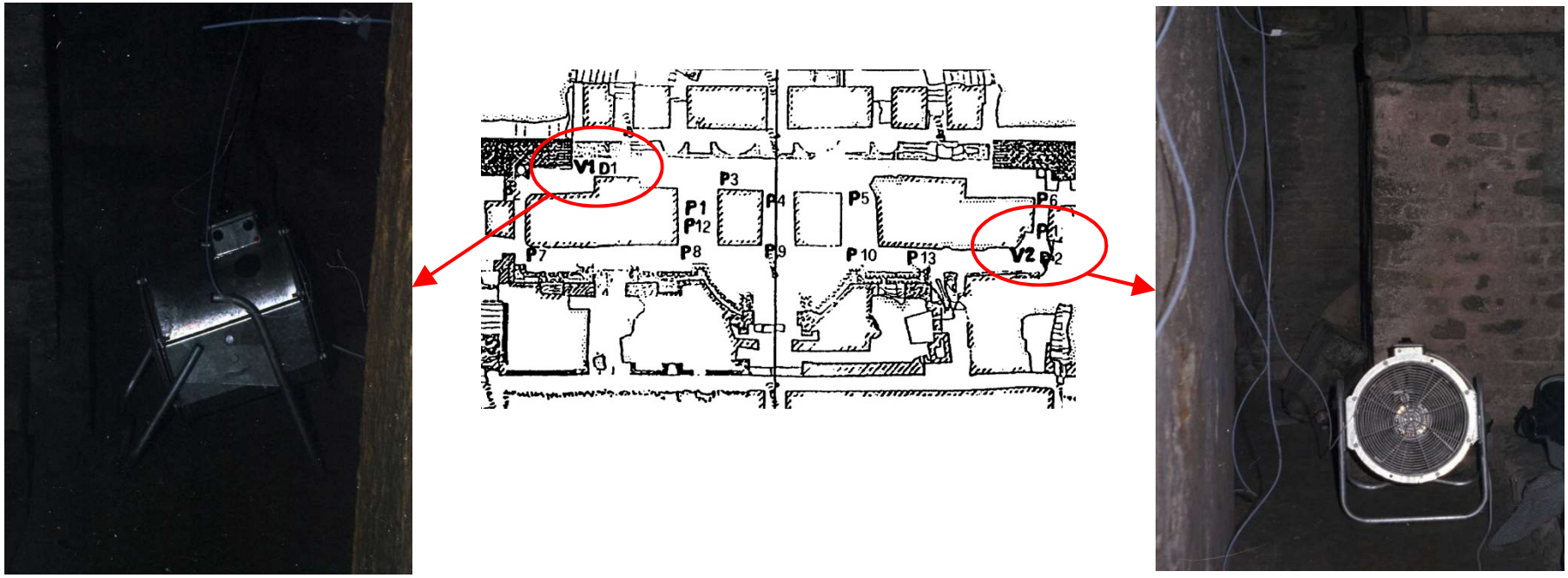


La Soprintendenza impose che le operazioni si svolgessero in una singola giornata e nell'orario di normale apertura al pubblico dell'area archeologica; ciò comportò, tenendo conto del tempo richiesto per il trasporto e l'installazione delle apparecchiature, una durata della misura relativamente breve.





Posizionamento dei campionatori e dei dosatori di SF_6.

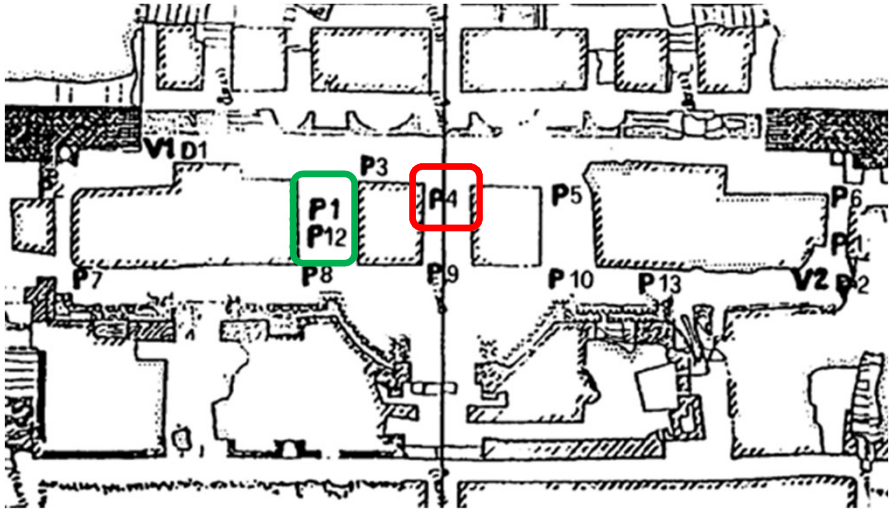


L'utilizzo di due Monitor 1302 e di due Sampler and Doser 1303 permise di campionare la concentrazione di esafluoruro di zolfo, immesso nell'ambiente, in tredici differenti punti. I tredici punti di misura furono concentrati nell'area del proscenio e della scena, mentre il dosaggio del tracciante fu effettuato in due punti posti alle estremità di questa area.

Tutti i punti di campionamento, ad eccezione di P1 e P12, furono posti alla quota di 1,50 m dal pavimento (zona di respirazione).

Per verificare la bontà della miscelazione, i punti P1 e P12 furono posizionati, rispettivamente, a 3,90 m e 0,20 m dal pavimento.

Il punto di campionamento P4, posto al centro della zona d'interesse, fu utilizzato dal sistema per il controllo della quantità di tracciante da alimentare.

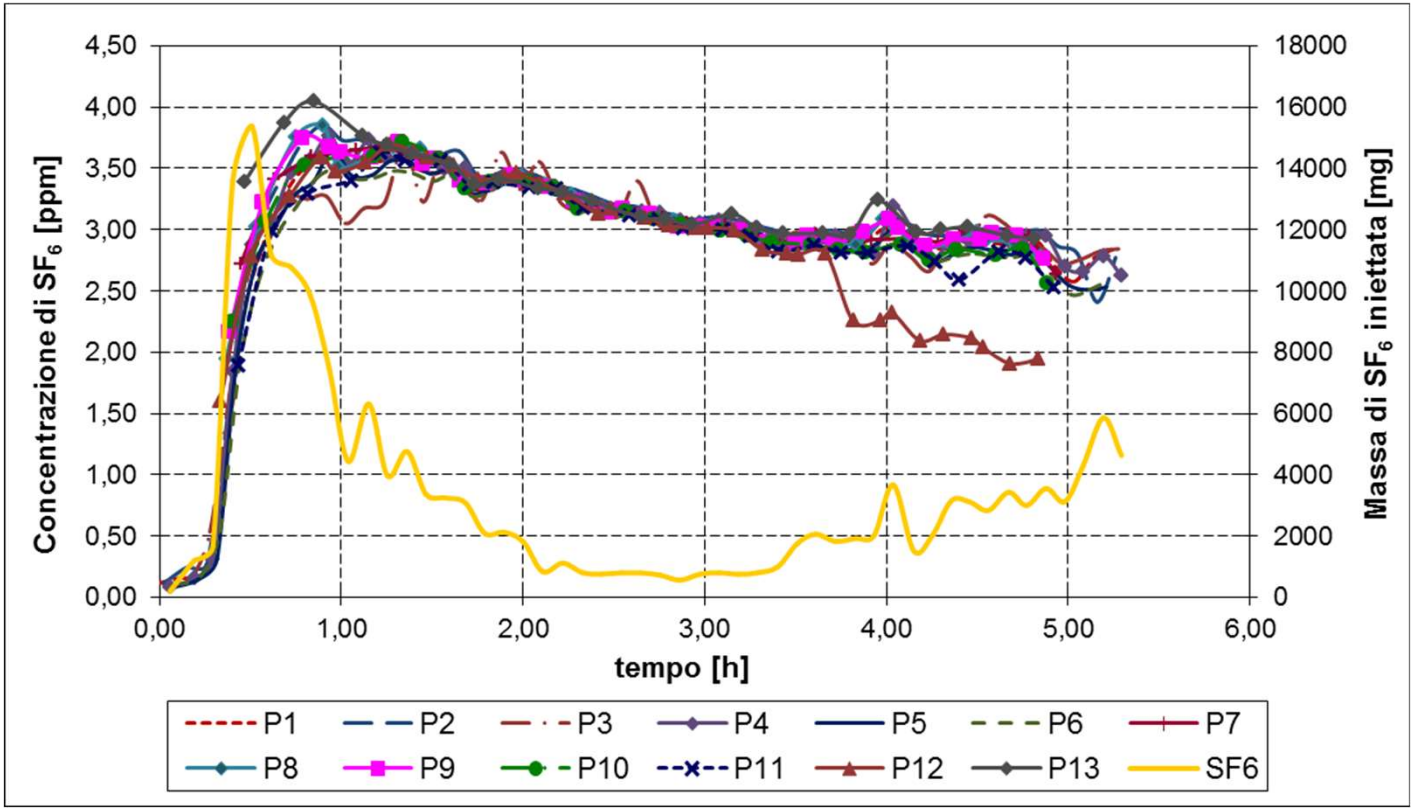


La misura dei ricambi d'aria fu effettuata il 9 Gennaio 1998, tra le 12:30 e le 18:00.

Conduzione della prova:

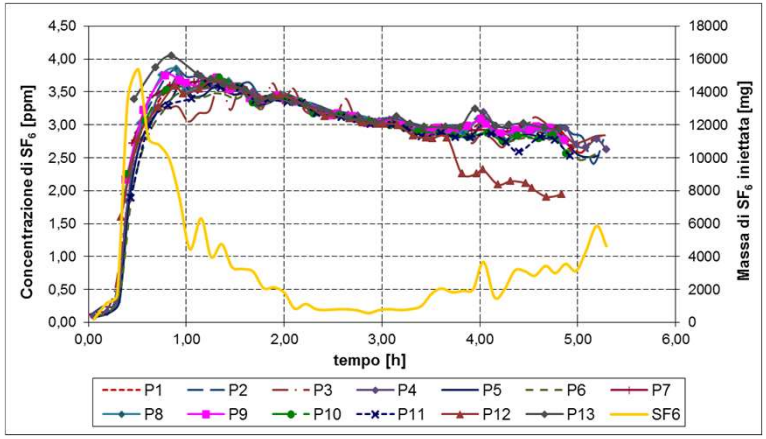
- fu fissato il metodo della "concentrazione costante" per l'iniezione del tracciante;
- fu impostato il valore di set-point di 3 ppm per la concentrazione di SF_6;
- il campionatore P12, intorno alle ore 16, fu spostato alla summa cavea, in prossimità del pozzo di aerazione;
- la misura fu interrotta alle ore 18 poiché le operazioni di sgombero del teatro richiesero all'incirca un'ora.

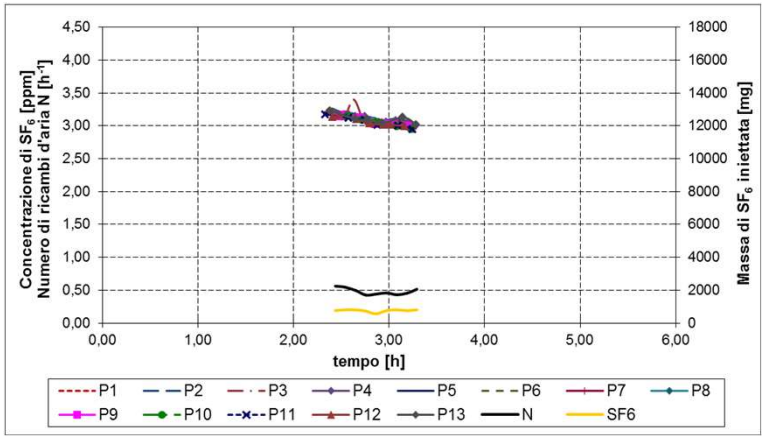
Risultati

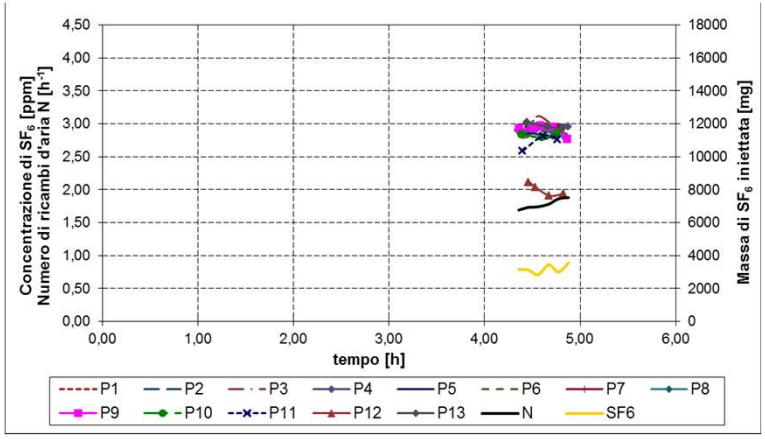

Concentrazione di SF_6 [ppm]
Massa di SF_6 iniettata [mg]
tempo [h]
4,50
4,00
3,50
3,00
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
18000
16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
0,00
1,00
2,00
3,00
4,00
5,00
6,00
P1
P2
P3
P4
P5
P6
P7
P8
P9
P10
P11
P12
P13
SF6

Risultati

Individuati gli intervalli di tempo in cui l'alimentazione di tracciante e le concentrazioni potevano essere considerate approssimativamente costanti fu possibile calcolare il numero dei ricambi d'aria.







Conclusioni

I ventilatori utilizzati ed il loro posizionamento consentì di realizzare una buona miscelazione tracciante – aria.

Non si raggiunse una effettiva condizione di regime stazionario, se non approssimativamente e per brevi intervalli di tempo.

Nel primo intervallo di "stazionarietà", tra le 14:30 e le 15:30, si calcolò un valore medio di $n = 0{,}4\ h^{-1}$; nel secondo intervallo, tra le 16:30 e le 17:00, si è ottenne $n = 1{,}9\ h^{-1}$.

Il risultato è da imputare, essendo l'ambiente ventilato naturalmente, al variare delle condizioni climatiche esterne nell'arco della giornata.

Una più accurata valutazione dei ricambi d'aria richiederebbe un monitoraggio di alcuni giorni da effettuarsi sia in inverno e sia in estate.

Grazie