

RECUPERO DI UNA CAVITA' NATURALE: INDAGINE PRELIMINARE SU ASPETTI MICROCLIMATICI E ILLUMINOTECNICI PROPOSTA DI SOLUZIONI ECOCOMPATIBILI

C. Buratti¹, P. Ricciardi², M. Vergoni¹

¹CIRIAF, Sez. Fisica Tecnica e Inquinamento Ambientale, Università di Perugia, Via Duranti 67, 06125 Perugia

²CIRIAF, Sez. Inquinamento Acustico e da Emissioni Gassose, Università di Pavia, Via Ferrata 1, 27100 Pavia

SOMMARIO

Lo studio del comfort termoigrometrico e illuminotecnico in ambienti moderati di tipo convenzionale è da tempo oggetto di studio e numerosi sono i lavori presenti in Letteratura. Oggetto del presente lavoro è la fase preliminare di studio per rendere abitabile una cavità naturale situata nel comune di Sacrofano, in provincia di Roma. Il progetto nasce da un'idea del proprietario della grotta che ha coinvolto diverse figure tra cui l'Università di Perugia, l'amministrazione locale ed alcune aziende che operano nel settore di impianti eco-compatibili ed energie rinnovabili.

E' stata condotta una campagna di rilievi con lo scopo di valutare le attuali condizioni dell'ambiente, indagando i principali parametri microclimatici, di qualità dell'aria ed illuminotecnici. In fase di post-processing, si sono calcolati gli indici PMV e PPD e confrontati i valori con gli standard previsti sia dalla UNI EN ISO 7730 che dalla ISO-DIS 7730. Per il comfort visivo, i valori di Illuminamento e Luminanza misurati sono stati messi in relazione con quelli prescritti dalla norma UNI EN12464.

E' stata condotta parallelamente una ricerca finalizzata ad individuare i prodotti offerti dal mercato per climatizzare ed illuminare la grotta in maniera eco-compatibile: particolare interesse è stato rivolto all'impiego dell'energia solare e delle biomasse. Sono stati ipotizzati, inoltre, alcuni interventi strutturali ed architettonici per adeguare la cavità agli standard abitativi minimi e creare i presupposti per l'alloggiamento di impianti tecnologici ad impatto ambientale ridotto.

INTRODUZIONE

Il comfort in ambienti confinati ha coinvolto molteplici settori tecnico-scientifici che, con crescente enfasi, si sono sviluppati con il fine di rendere il più possibile gradevole la permanenza in ambienti confinati da parte degli occupanti. Gli aspetti microclimatici hanno avuto negli studi del fisico danese Fanger un impulso deciso e determinante nell'ispirare nuove normative e offrire spunti ai progettisti per migliorare le prestazioni degli impianti, ottimizzando anche le tecnologie disponibili. La presenza di luce poi, è uno dei fattori principali che influenzano l'abitabilità di un luogo chiuso: una buona illuminazione garantisce ai soggetti che si trovano ad occupare un ambiente, momentaneamente o in maniera stabile, un'elevata qualità della visione, cautelando la salute dell'organo della vista, offrendo una valorizzazione estetica dell'ambiente stesso, con conseguente benessere anche psicologico.

Molteplici sono gli studi presenti in Letteratura che trattano separatamente o congiuntamente il benessere termoigrometrico e illuminotecnico in luoghi quali residenze, uffici, scuole, attività commerciali: sono tutti spazi appositamente progettati e realizzati con destinazioni d'uso prestabilite e perciò subordinate a standard ormai consolidati.

Nel presente lavoro si espongono i risultati di uno studio preliminare indirizzato a recuperare e rendere vivibile una cavità naturale tufacea, per trasformarla in un ambiente salubre con l'impiego esclusivo di soluzioni architettoniche e tecnologiche eco-compatibili.

La cavità è situata nel comune di Sacrofano, in provincia di Roma: l'idea ha preso forma dalla volontà del proprietario di realizzare un ambiente pilota che funga da elemento trainante per sfruttare al meglio tali cavità, tipiche della zona, quasi sempre inutilizzate.

Il progetto ha coinvolto anche l'amministrazione comunale di Sacrofano e numerosi sono stati i contatti anche con operatori di mercato specializzati nella produzione di soluzioni impiantistiche eco-compatibili.

La cavità è stata dapprima studiata da altre figure professionali legate alla committenza, dal punto di vista architettonico, della stabilità strutturale e dei materiali.

Lo studio è articolato in una ricerca bibliografica mirata alle problematiche in esame, successivamente si è passati alla programmazione di una campagna di misure per valutare le attuali condizioni all'interno della grotta; l'elaborazione dei risultati ed il confronto con gli intervalli imposti dalle normative tecniche ha suggerito le prime indicazioni per intervenire sul sito, mediante alcune soluzioni impiantistiche ad impatto ambientale limitato, la cui progettazione preliminare costituisce il punto ultimo in questa fase del lavoro.

INQUADRAMENTO DEL SITO E LAYOUT DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

La grotta di Sacrofano

La grotta tufacea si trova all'interno del Parco Naturale Regionale di Veio, tra la Via Flaminia e la Via Cassia a nord di Roma; il territorio ha un andamento prevalentemente collinare (fig. 1), non vi sono rilievi accentuati e la gran parte delle alture derivano da crateri e depositi vulcanici. La grande valle di Sacrofano, infatti, è nata dalla depressione di piccole e grandi bocche crateriche e presenta pianure intervallate ad altopiani, gole e balze. Il tutto è stato creato dalla lenta erosione dei corsi d'acqua e dalla giovane stratificazione di rocce di tipo tufaceo.



Figura 1: il territorio di Sacrofano visibile dalla cavità naturale oggetto di studio.

Non è da sottovalutare l'aspetto storico - archeologico del sito, che ha rappresentato un centro di modesta importanza in diverse epoche. Gli edifici che dominano queste zone sono prevalentemente realizzati in tufo, un materiale povero che rappresenta ancora oggi la pietra locale più diffusa, grazie alla sua lavorabilità, creando dei blocchi di pietrame che, esposti all'aria, prendono maggior consistenza.

La cavità naturale si trova a circa 260 m su livello del mare, ha uno sviluppo prevalentemente longitudinale lungo l'asse sud-nord, con ingresso orientato a sud, che si affaccia su uno spazio aperto di circa 40 m²: tale superficie è delimitata dal muro di un'abitazione sul lato ovest, mentre ad est si apre lasciando spazio all'ingresso di un'altra grotta, di proprietà diversa.

E' possibile accedere alla cavità attraverso un cancello metallico sormontato da un arco e montato su una parete di blocchi di tufo che chiude l'apertura naturale della grotta, avanzando l'ingresso originario di circa un metro e mezzo.

All'interno della grotta si distinguono 5 zone: un piccolo ingresso (A), con pareti in blocchi di tufo; l'ambiente principale (B), il più ampio e maggiormente vivibile della grotta; un corridoio (C) sviluppato in lunghezza, per circa 8 metri, ma di larghezza variabile tra un minimo di circa 1,60 m e un massimo di 1,81 m, e due nicchie, una sulla parete est (D) di dimensioni maggiori, e una ad ovest (E) di dimensioni più contenute.

E' possibile, inoltre, osservare sulle pareti la presenza di piccole cavità, di varie dimensioni, tipiche della roccia tufacea, che vanno a costituire delle nicchie tondeggianti rialzate rispetto al pavimento e che probabilmente erano adibite a scaffali quando la grotta era utilizzata come cantina.

All'esterno, nella parte superiore all'ingresso della grotta, in posizione leggermente arretrata, si rileva la presenza di un'altra cavità di forma irregolare, con una superficie pari circa a 5 m² e altezza irregolare, mediamente pari a 1,80 m, che incide sulla volta della grotta principale.

Strumentazione di misura e pianificazione del rilievo

Gli strumenti impiegati nei rilievi microclimatici sono stati: due multiacquisitori della linea BABUC e le relative sonde conformi a quanto prescritto dalla UNI EN ISO 7726, montate in differenti configurazioni.

In particolare, le sonde connesse alle centraline hanno permesso il rilievo delle principali grandezze riportate nella UNI EN ISO 7730 e nella ISO/DIS 7730 quali:

- temperatura dell'aria secca e umida;
- umidità relativa;
- velocità dell'aria;
- temperatura del globotermometro;
- pressione atmosferica;
- temperatura asimmetrica radiante;
- temperatura del pavimento;
- concentrazione di CO₂.

Da tali valori, in automatico, o tramite software in post processing, lo strumento è in grado di determinare alcuni indici globali e locali di comfort:

- PMV;
- PPD;
- rischio da corrente d'aria;
- gradiente verticale di temperatura;
- percentuale di insoddisfatti da temperatura del pavimento.

Ai fini del rilievo illuminotecnica, si sono impiegati due strumenti della Konica Minolta, il luxmetro-colorimetro Chromameter CL-200 e il misuratore di Luminanza LS-100, in grado di misurare:

- illuminamento (lux);
- temperatura di colore (Kelvin);
- luminanza (cd/m²).

Mediante tali parametri è possibile valutare il comfort visivo secondo quanto previsto dalla UNI EN 12464.

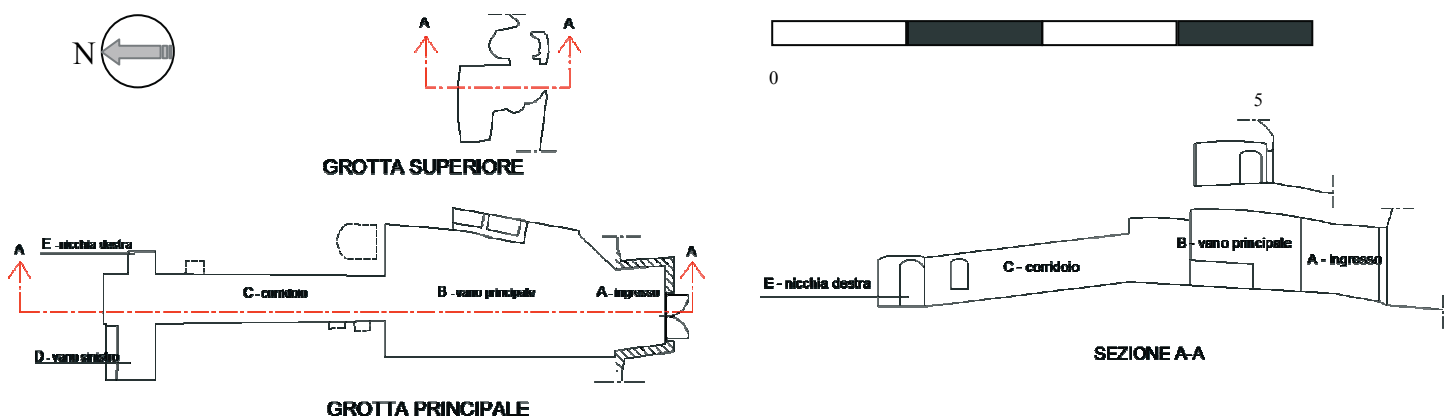


Figura 2: planimetria e sezione della cavità naturale.

Le misure sono state effettuate in una giornata dell'ottobre 2006 e consistono in un ciclo di misure mattutino e un pomeriggio.

In aggiunta, due termoigrometri a capelli sono stati posizionati rispettivamente nella grotta superiore (per rappresentare le condizioni esterne), e nell'ambiente principale all'interno della cavità: il rilievo ha avuto la durata di due settimane.

Per le due centraline BABUC sono state individuate 4 postazioni (fig. 3), una esterna e tre interne, così da relazionare i dati con la situazione meteorologica e climatica stagionale. Ciascun rilievo ha avuto la durata di 10 minuti in ogni posizione, con un intervallo di acquisizione pari a 20 secondi, per un totale di 30 valori istantanei.



Figura 3: centraline microclimatiche posizionate al termine del corridoio, sul lato nord, della cavità in corrispondenza delle nicchie D e E.

Allo stato attuale, la grotta non è dotata di impianto di illuminazione artificiale: per le misure di illuminamento sono stati individuati 16 punti, uniformemente distribuiti su tutta la superficie della grotta. Non essendo ancora stati definiti i compiti visivi, ci si è limitati a verificare le zone di passaggio ipotetiche, posizionando lo strumento ad un'altezza di 20 cm da terra. Le misure di luminanza (fig. 4) hanno riguardato il solo contributo imputabile alla riflessione di alcune superfici: si sono scelti 5 punti in corrispondenza della porta d'ingresso, valutati da tre diverse posizioni, e altri 5 punti sulla parete interna, valutati in una sola posizione.



Figura 4: Luminanzometro in prossimità di una parete all'interna alla cavità.

RISULTATI DEI RILIEVI DELLO STATO ATTUALE

Comfort microclimatico

L'analisi dei risultati si è basata sul confronto dei valori ottenuti per ogni postazione; successivamente gli stessi sono stati mediati per ottenere una sintesi delle condizioni termoigrometriche della cavità durante la sessione del mattino e quelle del pomeriggio. Ai fini del calcolo degli indici microclimatici, è stato necessario effettuare delle ipotesi circa l'attività metabolica svolta dai soggetti e la resistenza termica dell'abbigliamento (Tab.1), con un'ipotesi di rendimento meccanico pari allo 0%.

Tabella 1: ipotesi sull'attività metabolica e resistenza termica del vestiario.

Attività metabolica	Riferimento
M = 1,33 met (77,5 W/m ²), occupazione impiegato	(UNI EN 28996)
M = 1,20 met (70 W/m ²), attività sedentaria	
Resistenza termica del vestiario	
Composizione tipica autunno (uomo) 1,03 clo	(UNI EN ISO 9920)
Composizione tipica autunno (donna) 0,92 clo	

In tabella 2 e 3 sono riportati i valori delle principali grandezze ambientali rispettivamente per le sessioni mattutina e pomeridiana. I dati delle postazioni 2 e 3, rappresentativi dell'ambiente principale, sono stati raggruppati dal momento che sono stati rilevati valori pressoché coincidenti.

Tabella 2: sintesi dei parametri microclimatici (mattino).

	t _a (°C)	t _u (°C)	UR (%)	CO ₂ (ppm)	t _g (°C)	P _a (hPa)
Postazione 1 Esterno	21,82	17,18	61,76	474	-	978
Postazione 2/3	20,40	17,7	76,31	550	19,76	981
Postazione 4	17,92	16,85	89,73	663	17,10	982

Tabella 3: sintesi dei parametri microclimatici (pomeriggio).

	t _a (°C)	t _u (°C)	UR (%)	CO ₂ (ppm)	t _g (°C)	P _a (hPa)
Postazione 1 Esterno	22,59	17,91	62,6	510	-	982
Postazione 2/3	20,5	17,72	75,77	621	19,18	981
Postazione 4	17,64	16,82	92,04	708	17,15	982

Si osserva che l'umidità relativa è estremamente elevata, soprattutto in fondo alla cavità, con valori (punte oltre il 90%) che ricadono al di fuori degli intervalli imposti dalle norme.

La temperatura secca diminuisce notevolmente passando dalla postazione 1 alla 4, sia di mattina che di pomeriggio: c'è una differenza di 3,9 °C tra l'esterno e il fondo della grotta durante la mattina, mentre di pomeriggio l'escursione raggiunge i 5 °C.

La temperatura a bulbo umido, invece, si mantiene costante nelle tre diverse postazioni: l'escursione tra la posizione 2 e la 4 è sempre inferiore a 1°C.

La differenza di umidità relativa tra l'esterno e il lato nord della grotta è di circa il 28% nel ciclo di misura mattutino, 30% in quello pomeridiano. La massima escursione termica tra la temperatura interna e quella esterna è di 2°C di mattina e diventa di oltre 4°C nel pomeriggio.

I valori di temperatura esterna misurati non sono in linea

con i dati storico-statistici che si riscontrano usualmente in questo periodo, in quanto risultano ben al di sopra delle medie stagionali, soprattutto nelle ore più calde della giornata.

Passando all'analisi degli indici globali, in postazione 2 e 3 (Tab. 4), i valori PMV poco si discostano dalla neutralità termica, con una PPD attorno al 5% sia nel ciclo di misura mattutino che in quello pomeridiano.

Nella postazione 4, la PPD tende ad aumentare fino ad oltre il 15% nelle ore pomeridiane, a causa dell'umidità relativa particolarmente elevata e di temperature al di sotto di 18°C.

Tabella 4: valori medi degli indici PMV e PPD all'interno della cavità.

Postazione	2 e 3		4	
	PMV	PPD (%)	PMV	PPD (%)
Mattina	-0,16	5,54	-0,58	12,04
Pomeriggio	-0,24	6,29	-0,70	15,42

Relativamente al discomfort locale, si è ottenuta una PPD superiore al 5% per il gradiente di temperatura verticale nel ciclo di misure mattutino per le posizioni 2 e 3 (Fig. 5); in posizione 4, invece, tale indice si mantiene sempre al di sotto del 2%. Sempre nelle posizioni 2 e 3 è rilevante la percentuale di insoddisfatti da temperatura del pavimento, pari al 10,2% e 11,3% rispettivamente di mattina e di pomeriggio, in corrispondenza di una temperatura superficiale di circa 18°C (Fig. 6).

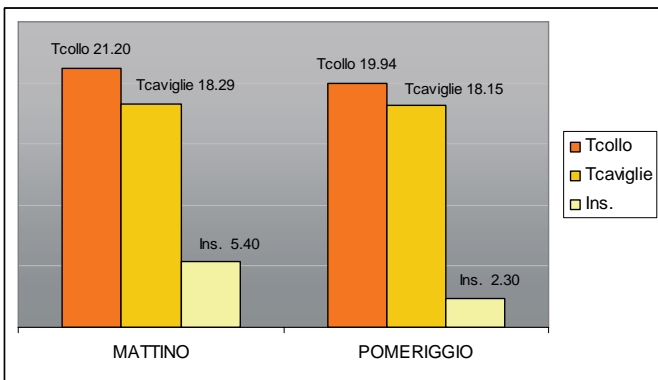


Figura 5: valori medi postazione 2 e 3 - Gradiente termico verticale e Percentuale Prevista di insoddisfatti.

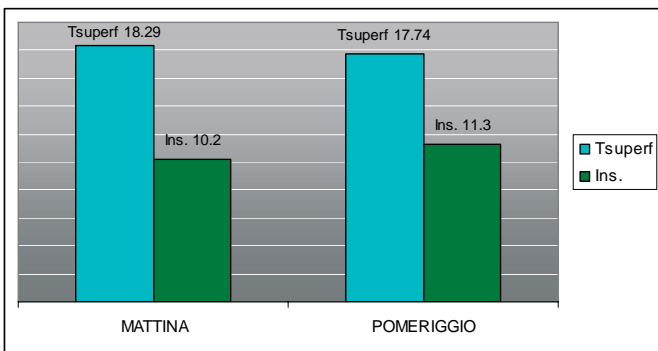


Figura 6: valori medi postazione 2 e 3 - Temperatura del pavimento e Percentuale Prevista di Insoddisfatti.

In postazione 4, la differenza di temperatura verticale è sempre al di sotto dei 3°C raccomandati dalla normativa, e la percentuale di insoddisfatti è sempre inferiore al 2% (Fig. 7)

La temperatura del pavimento (Fig. 8) è pari a 16,95°C e 17,40°C rispettivamente di mattina e di pomeriggio, e per questo la percentuale di insoddisfatti è vicina al 15% (13,9% e 12,5% rispettivamente).

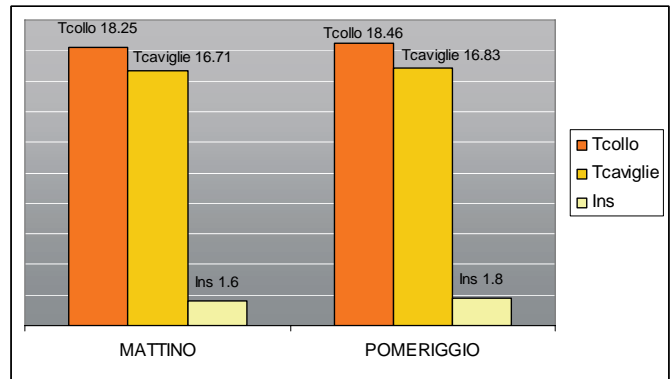


Figura 7: valori medi postazione 4 - Gradiente termico verticale e percentuale di insoddisfatti.

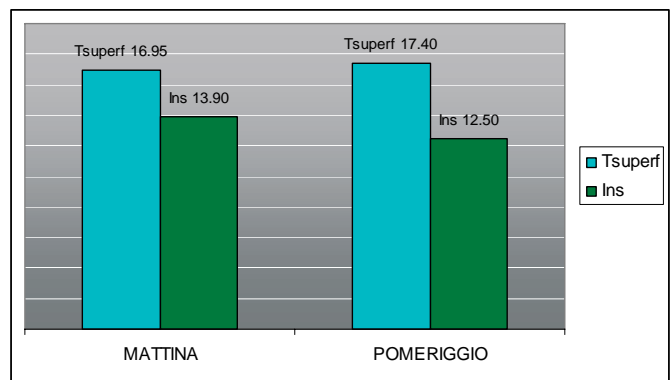


Figura 8: valori medi postazione 4 - Temperatura del pavimento e percentuale di insoddisfatti.

E' da sottolineare come, in ogni momento della giornata, siano nulli i valori del rischio da corrente d'aria: questo fatto è rappresentativo di velocità dell'aria e di intensità di turbolenza prossime allo zero in ogni ambiente della grotta, soprattutto nella parte più lontana dall'ingresso.

Per quel che riguarda la qualità dell'aria, misurata valutando la concentrazione di anidride carbonica, in postazione 2 e 3 la percentuale di insoddisfatti assume valori molto bassi, attorno al 2-3%; valori più elevati (6%), ma comunque contenuti negli standard qualitativi richiesti si hanno in fondo alla cavità.

Comfort illuminotecnico

Nella parte della cavità più lontana dalla porta d'ingresso (punti 1-6), il contributo della luce naturale è molto scarso, con valori inferiori a 5 lux (Tab. 5). Per quanto riguarda la parte restante, nelle ore mattutine si registra un andamento dei valori di illuminamento generalmente crescente man mano che ci si avvicina alla porta d'ingresso, passando dai 9 lux del punto 7 ai 6669 lux del punto 16, con alcune eccezioni causate

dalla presenza di oggetti d'ingombro all'interno della grotta e di rami di alberi, all'esterno, che muovendosi schermano la luce diretta del sole, come succede ad esempio nei punti 10 e 14, nei quali si ha un abbassamento rispetto ai punti precedenti rispettivamente da 14 a 10 lux e da 112 a 93 lux.

Analoghi risultati si hanno nelle ore pomeridiane, nelle quali, però, l'illuminamento assume valori generalmente più bassi, ad eccezione di alcuni punti (come ad esempio il 12, 14 e 15) che nel pomeriggio sono interessati da raggi solari diretti, grazie all'abbassamento del sole e che, quindi, presentano un innalzamento dell'illuminamento rispetto al valore mattutino da 50 a 56 lux per il punto 12, da 93 a 116 lux per il punto 14 e da 267 a 418 lux per il punto 15.

In figura 9 sono riportate le curve isolux durante la giornata di rilievo.

Tabella 5: valori di illuminamento all'interno della cavità

ILLUMINAMENTO		
Punto	Mattina	Pomeriggio
1	≤ 5	≤ 5
2	≤ 5	≤ 5
3	≤ 5	≤ 5
4	≤ 5	≤ 5
5	≤ 5	≤ 5
6	≤ 5	≤ 5
7	9	9
8	14	5
9	14	7
10	10	1
11	35	23
12	50	56
13	112	109
14	93	116
15	267	418
16	6669	3048

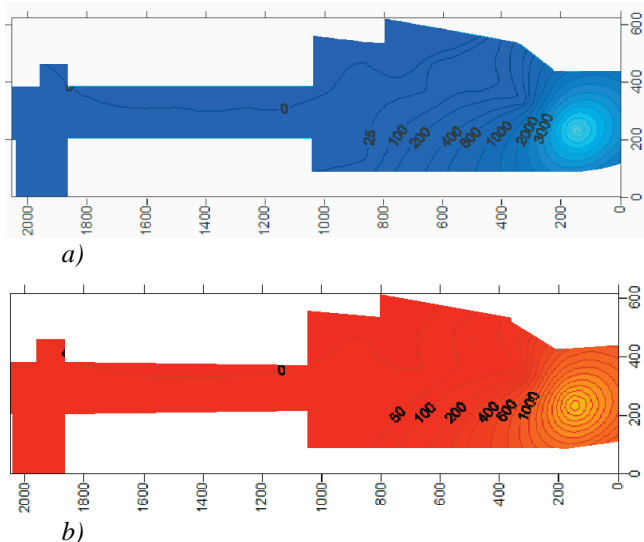


Figura 9: planimetria della cavità - Curve Isolux (mattina (a) pomeriggio(b))

Le misure di luminanza sono state effettuate su vari punti della porta di ingresso (unica sorgente di luce naturale), da tre diverse distanze dalla stessa, e sulla parete interna parallela all'ingresso.

Sono stati scelti i punti più significativi, tenendo conto della presenza dell'arco sovrastante che, nonostante le ridotte dimensioni, aumenta notevolmente l'apporto di luce all'interno della grotta.

Dai dati in tabella 6, si osserva come i valori di luminanza risultino strettamente correlati alla posizione relativa tra le postazioni di misura e il percorso compiuto dal sole rispetto all'orientamento dell'ingresso della cavità.

Il punto A, all'apice dell'arco, è l'unico ad essere irradiato direttamente dalla luce solare: nella postazione di misura si osservano valori costanti, nelle altre due posizioni si hanno valori più elevati nelle ore mattutine rispetto a quelle pomeridiane, con un picco di 4115 cd/m² misurato alla distanza di 5,5 m; la luminanza minore 152 cd/m², si registra a 10,20 m.

La luminanza del punto B nelle ore pomeridiane alla distanza di 2,50 m dalla porta d'ingresso è risultata la più elevata con un valore di 7372 cd/m², nettamente superiore a tutti gli altri misurati e determinato dalla posizione particolarmente favorevole della postazione di misura rispetto alla luce naturale filtrante dall'esterno. I valori mediamente più bassi sono stati misurati nei punti C e D che, trovandosi ai lati della porta, ricevono minore luce diretta a causa delle pareti degli edifici vicini e delle ante del cancello.

Nel punto E infine, si sono misurati valori costanti nella sessione mattutina mentre nel pomeriggio, nel punto più prossimo all'ingresso, il valore è risultato più basso rispetto a quello ottenuto per gli altri due, differenza spiegabile con l'ombra portata da una struttura limitrofa posta a destra del varco d'ingresso. Si riportano le curve di livello per visualizzare la luminanza sulla porta d'ingresso (Fig. 10) per la distanza intermedia di 5,50 m.

Tabella 6: valori della Luminanza sulla porta d'ingresso.

	Distanza Ingresso (verso l'interno)	2,50 m	5,50 m	10,20 m
	Punto A	Mattina	1021	4115
	Pomeriggio	1057	1801	152
Punto B	Mattina	1436	679	379
	Pomeriggio	7372	614	103
Punto C	Mattina	210	272	299
	Pomeriggio	392	1151	549
Punto D	Mattina	330	298	884
	Pomeriggio	147	256	348
Punto E	Mattina	1365	1346	1201
	Pomeriggio	745	1599	1515

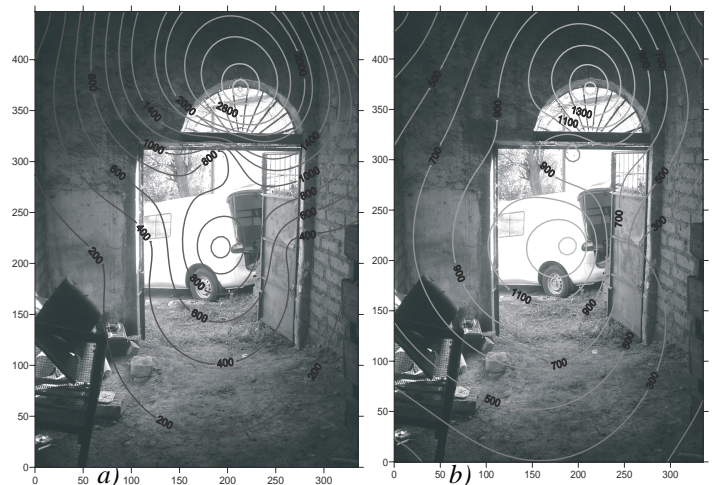


Figura 10: curve di livello della luminanza sulla porta d'ingresso (mattina (a) pomeriggio(b))

IPOTESI DI PROGETTO PRELIMINARE

Interventi strutturali ed architettonici

L'intervento mira a mantenere gli ambienti presenti senza separarli o crearne di nuovi, realizzando, però, alcune operazioni di modellamento e ampliamento, dopo aver effettuato opportune verifiche di consolidamento statico e strutturale. In particolare:

1. ampliamento dell'attuale ingresso e consolidamento della volta dove oggi sono presenti travi in acciaio;
2. pulizia del piano di calpestio da terra e materiale inerte e livellamento della pavimentazione;
3. realizzazione di una pavimentazione in pietra naturale sopraelevata, con opportuna impermeabilizzazione;
4. rimozione dei muretti in blocchi di tufo presenti sul lato ovest della grotta e pulizia della vasca che può fungere da serbatoio di acqua;
5. livellamento del piano di calpestio del corridoio che, attualmente, ha una pendenza di circa il 10 %;
6. ampliamento delle dimensioni del vano sinistro;
7. ampliamento della nicchia destra creando, così, due ambienti simmetrici e speculari;
8. ampliamento dell'ingresso e sostituzione parziale della muratura con materiali trasparenti.

Soluzioni per il comfort microclimatico

Per dotare la grotta di impianti ecocompatibili, le soluzioni individuate sono da ricercare nell'impiego di energia solare, termica e fotovoltaica integrata, per la parte termica, con energia da biomasse.

Si ipotizza la realizzazione di un impianto a pavimento al di sotto della pavimentazione rialzata. Il riscaldamento del fluido termovettore è ottenibile installando una serie di pannelli solari piani ai fianchi della cavità superiore, a ridosso del pendio. Una possibile disposizione delle tubazioni, può assumere la configurazione di figura 11, con interasse 20 cm, temperatura del fluido 30°C circa.

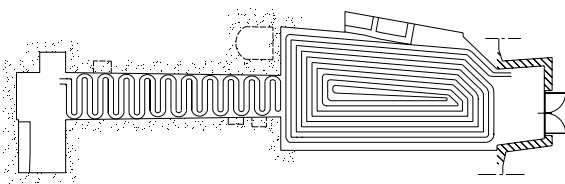


Figura 11: disposizione delle tubazioni per il riscaldamento a pavimento

Come integrazione al sistema solare termico, si prevede l'inserimento di una caldaia funzionante a biomasse, che per facilità di stoccaggio e rendimento di combustione può essere alimentata a pellet.

Un problema, da non sottovalutare è costituito dalle emissioni di radon: questo gas, estremamente pesante, tende ad accumularsi e, poiché la pressione all'interno di un ambiente è leggermente più bassa di quella esterna, l'aria tende a stagnare piuttosto che a rinnovarsi. Un metodo immediato per evitare l'accumulo di questo gas è l'aerazione degli ambienti, soprattutto nei casi in cui questi siano interrati o a contatto diretto con il terreno, come nel caso in esame.

Una corretta e continua ventilazione può contrastare l'aumento della concentrazione di radon; questa tecnica risulta

spesso, però, insufficiente o inefficace e, specialmente nei mesi invernali, dispendiosa in termini di riscaldamento dei locali.

La pavimentazione rialzata, inoltre, garantisce l'annullamento delle radiazioni di radon dal pavimento nell'ambiente.

Infine, si pensa di dotare la cavità di sistemi specifici per eliminare l'umidità che risale per capillarità nei muri, al fine di migliorare le condizioni di vita e ridurre i costi di riscaldamento.

Ipotesi per il comfort illuminotecnico

Le ipotesi correttive consistono in primo luogo nell'integrazione di sistemi di captazione e trasporto della luce naturale all'interno della grotta con un impianto di illuminazione artificiale.

Il mercato offre molteplici sistemi per la captazione della luce naturale:

- lucernari: servono per condurre la luce all'interno dell'edificio attraverso il tetto;
- tubi di luce: sono condotti verticali o orizzontali, con pareti interne ad alta riflessione, che trasmettono la luce dall'esterno all'interno;
- light pipes: simili ai tubi luce, sono costituiti da una serie di specchi collegati ad un eliostato;
- sistemi fotovoltaici;
- fibre ottiche: sistemi di lenti di Fresnel che filtrano la luce solare captata da un eliostato.

In particolare, si sono rivelati interessanti i *Captatori Solari* dell'azienda **BRIXIA SOLAR** (Fig. 12). Sono piccoli congegni emisferici, caratterizzati da un sistema di captazione ottica: sono costituiti da un captatore posto all'interno della calotta emisferica all'estremità, che direziona la luce solare e la incanala in un condotto ad alta riflessione, che può seguire percorsi obliqui, orizzontali, trasportando la luce nell'ambiente desiderato, dove un diffusore, applicato all'altezza del soffitto, la diffonde all'interno dell'ambiente. E' presente anche un sistema di ricambio d'aria.

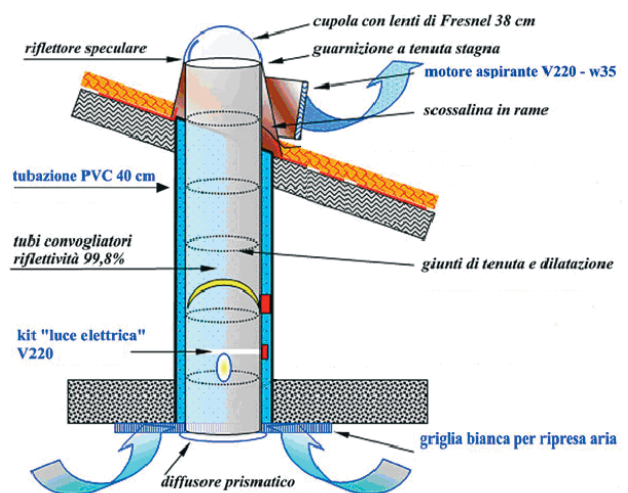


Figura 12: captatori solari Brixia Solar – Schema costruttivo

Per la grotta in esame il diametro individuato è di 520 mm, che può illuminare superfici tra 25 e 36 m², con un flusso luminoso pari a 15000 lumen. Nel posizionamento, occorre tener conto che la luce in uscita dal condotto dipende

fortemente dall'intensità luminosa del sole e diminuisce in relazione alla lunghezza del condotto, per cui è consigliabile posizionare il captatore sulla copertura della grotta, alternandolo con i pannelli solari necessari al riscaldamento, ma arretrato il più possibile rispetto all'ingresso, in modo tale da raggiungere facilmente il fondo della grotta con un condotto più breve possibile. E' inoltre possibile captare una maggiore radiazione luminosa, senza variare la posizione, elevando i captatori mediante Torrette Solari in rame.

Considerata la superficie della grotta, di circa 65 m², e per garantire un valore puntuale dell'illuminamento di almeno 100 lux è necessario un flusso luminoso totale di circa 6550 lm. La scelta percorribile è quella di lampade ad alogeni per tensione di rete ad attacco doppio, che soddisfano i requisiti flusso, temperatura di colore, durata e risparmio energetico: si prevede l'impiego di 9 lampade con 50 W di potenza ciascuna, adeguatamente distribuite (Fig. 13).

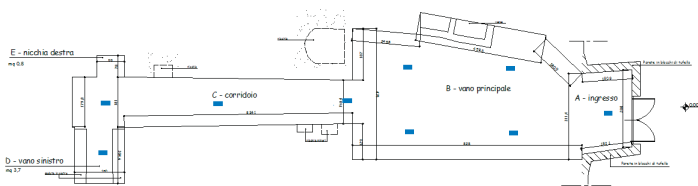


Figura 13: ipotesi di posizionamento delle lampade.

CONCLUSIONI

In Letteratura esistono molteplici studi volti all'indagine delle condizioni di benessere per gli occupanti di ambienti moderati convenzionali, progettati e realizzati per garantire qualità ottimali in spazi confinati.

Il presente studio ha come oggetto la valutazione delle condizioni termoisometriche ed illuminotecniche all'interno di una cavità naturale per rendere la stessa abitabile e rispondente alle esigenze di comfort. Il progetto nasce da un'idea del proprietario della grotta che ha coinvolto diverse figure tra cui l'Università di Perugia, l'amministrazione locale ed alcune aziende che operano nel settore di impianti eco-compatibili ed energie rinnovabili.

Il lavoro ha portato alla definizione del comfort termoisometrico e illuminotecnico all'interno di una cavità naturale situata nel territorio di Sacrofano in provincia di Roma. Attraverso una campagna di misure è stata valutata la possibilità di recuperare la grotta tufacea, oggi in disuso, per trasformarla in un ambiente vivibile impiegando esclusivamente soluzioni a ridotto impatto ambientale.

Dal punto di vista microclimatico, in linea generale si può affermare che la cavità, nonostante sia distante dall'idea classica di luogo confortevole e sia attualmente allo stato di abbandono, non offre uno standard qualitativo eccessivamente inferiore a quelli previsti dalla normativa tecnica. I risultati sono stati comunque ottenuti in una giornata con condizioni esterne favorevoli e dunque, per avere un quadro più rappresentativo, occorrerebbe monitorare i parametri con maggiore continuità.

I punti di misura individuati all'interno della cavità sono l'ambiente principale (postazione 2 e postazione 3) e il lato nord della cavità: in fondo alla grotta (postazione 4).

All'interno dell'ambiente principale non si sono riscontrati particolari valori fuori norma; tuttavia, si sono evidenziati tre

aspetti su cui è opportuno soffermarsi:

- l'umidità relativa riscontrata risulta costantemente superiore al 70% (in media è pari al 76%);
- il gradiente verticale di temperatura riscontrato raggiunge il limite di 3°C, con una PPD che supera il 5%;
- facendo una media tra le temperature del pavimento, rilevate nel ciclo di misura mattutino e in quello pomeridiano, si riscontra una temperatura media superficiale di 18°C, a cui corrisponde una percentuale prevista di insoddisfatti media di 11%.

E' importante notare che, mentre il problema legato all'eccessiva umidità dell'aria è riscontrato in ognuna delle due postazioni individuate all'interno della grotta, l'elevato gradiente di temperatura verticale costituisce un evento singolare, che non si è ripetuto in corrispondenza del lato nord della cavità, dove si ha una differenza di temperatura media di 1,5 - 1,6°C. Particolare attenzione va posta alla temperatura del pavimento, che è in media pari a 18°C, a causa dell'elevata umidità del suolo, e ricade al di fuori dell'intervallo imposto dalla normativa (19-26°C): gli insoddisfatti da temperatura superficiale, quindi, superano sempre il 10%. Per quel che riguarda la qualità dell'aria, non si sono riscontrate percentuali di insoddisfatti da concentrazione di anidride carbonica superiori al 20%, inoltre non si hanno insoddisfatti da asimmetria radiante e anche il draft risk (DR) è costantemente nullo.

In fondo alla grotta, sia di mattina che di pomeriggio, le percentuali di insoddisfatti aumentano notevolmente per l'elevato grado di umidità, lo scarso irraggiamento solare e il non adeguato ricambio d'aria. Infatti, sono state rilevate le seguenti problematiche:

- l'umidità relativa media è pari al 91%;
- gli insoddisfatti da temperatura del pavimento sono in media pari al 13,2%, la temperatura superficiale è pari a 17°C;
- la temperatura dell'aria è pari, in media, a 17,5°C.

Si sono ipotizzate soluzioni tecnologiche ed architettoniche; i criteri fondamentali su cui si è basato il progetto sono la razionalizzazione dell'assetto distributivo, l'ottimizzazione della struttura e del sistema tecnologico e l'applicazione di soluzioni eco-sostenibili alternative. Le risorse energetiche impiegabili sono l'energia solare e la bioenergia derivante dalle biomasse. Una progettazione più accurata degli interventi necessita di un'estensione del rilievo a periodi in cui si hanno le condizioni esterne più gravose (pieno inverno e pieno estate).

In merito ai rilievi illuminotecnici, le misure di illuminamento hanno interessato 16 punti dislocati su tutta la superficie della cavità, mentre la luminanza è stata misurata in 5 punti sulla porta d'ingresso (unica fonte luminosa naturale per l'ambiente), da tre diverse distanze, in modo da variare l'angolazione con cui la luce solare entra nella cavità, e sulla parete interna.

Dall'analisi dei dati è emerso che, per quanto riguarda l'illuminamento, si riscontrano valori sostanzialmente crescenti a partire dai punti sul fondo della grotta fino a quelli più vicini all'ingresso, con alcune eccezioni causate dalla presenza di ingombri non rimovibili. Si è osservato che, dal fondo alla fine del corridoio che porta alla sala principale, l'illuminamento assume valori inferiori a 5 lux, quindi quasi trascurabili e molto inferiori rispetto agli oltre 6500 lux misurati di fronte all'ingresso. Si sono misurati valori di illuminamento più elevati la mattina rispetto al pomeriggio in quasi tutti i punti, per il fatto che l'ingresso della cavità è esposto a sud.

Per quanto riguarda, invece, la luminanza sulla porta d'ingresso, si sono riscontrati valori diversi sui medesimi punti, dalle tre diverse distanze (2,5; 5,5; 10,2 m) in stretta correlazione con il percorso del sole sulla linea di orizzonte e dall'orientamento dell'ingresso della cavità. Nei punti laterali si sono misurati valori più bassi dal momento che non sono colpiti da luce diretta e parzialmente schermati dagli edifici confinanti e dalle ante del cancello.

I valori della luminanza sulla parete interna, invece, si sono rivelati bassi, assumendo anche valori prossimi allo zero, poiché non è presente alcuna superficie riflettente o sorgente luminosa in quella direzione.

Dai dati emersi dalla campagna di misura in sito, si è riscontrata la necessità di proporre delle soluzioni per ovviare all'evidente scarsità di luce naturale, soprattutto nelle zone più interne della cavità, non solo mediante un impianto di illuminazione artificiale, ma anche con sistemi di captazione della luce naturale da sfruttare nelle ore diurne, consentendo un notevole risparmio energetico. Oltre al contributo dei sistemi solari fotovoltaici, che potrebbero alimentare un sistema di 9 lampade ad alogeni, si è studiato l'inserimento nel contesto di captatori solari capaci di convogliare all'interno la luce naturale incidente su dispositivi a torretta.

NOMENCLATURA

CO₂ = concentrazione di anidride carbonica (ppm);
Ins. = insoddisfatti a causa di discomfort locale (%);
Pa = pressione atmosferica (hPa);
PMV = voto medio previsto;
PPD = percentuale prevista di insoddisfatti (%);
T = temperatura (°C);
UR = umidità relativa (%).

Pedici:

a = aria secca;
g = globotermometro
u = aria umida.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. FELLI M., Lezioni di Fisica Tecnica 1, Termodinamica, Macchine, Impianti, Nuova edizione a cura di Francesco Ascdrubali, Morlacchi Editore, Perugia, Maggio 2004.
2. FELLI M., Lezioni di Fisica Tecnica 2, Trasmissione del calore, Acustica, Tecnica dell'illuminazione, Nuova edizione a cura di Cinzia Buratti, Morlacchi Editore, Perugia, Ottobre 2004.
3. FANGER P.O., Thermal comfort, McGraw Hill, New York, 1970.
4. MONCADA LO GIUDICE G., COPPI M., Benessere termico e qualità dell'aria interna. Roma: Masson. 1997.
5. ALFANO G., D'AMBROSIO F.R., RICCIO G., La valutazione delle condizioni termoigrometriche negli ambienti di lavoro: comfort e sicurezza. Napoli: CUEN. 1997.
6. ASHRAE. Physiological principles, comfort and health. In: ASHRAE Fundamentals, capitolo 8. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2001.
7. MONCADA LO GIUDICE G., Principi di illuminotecnica, PEG, Milano, 1975
8. AGHEMO C., LO VERSO V., Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale, AIDI 2003
9. BONOMO M. e BUCCIANTI R., Guida Tecnica per l'Illuminazione degli Interni
10. BARDUCCI I., Fotometria e Colorimetria, ESA, Roma 1982
11. FELLIN L. e FORCOLINI G. e PALLADINO P., Manuale di Illuminotecnica, Tecniche Nuove, Settimo Milanese (MI), 1999
12. ISO, 2003. Ergonomics of thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort. ISO/DIS 7730. Geneva: International Standardization Organization, 2003.
13. UNI-EN-ISO 10551- Ergonomia degli ambienti termici -Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico mediante scale di giudizio soggettive. Gennaio 2002.
14. ASHRAE, 2004. "Thermal Environment Conditions for Human Occupancy - ASHRAE Standard 55/2004". Geneva, 2003.
15. UNI, "Ergonomia - Determinazione della produzione di energia termica metabolica", Norma UNI-EN 28996, Unificazione Italiana, Milano, 1995.
16. UNI, "Ambienti termici - Strumenti e metodi per la misura delle grandezze fisiche", Norma UNI-EN 27726, Unificazione Italiana, Milano, 1996.
17. UNI-EN-ISO 9920 - Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativi dell'abbigliamento. Marzo 2004.
18. ASHRAE Standard 62.1/2004 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
19. Standard ASTM 6245-98, Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations of Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, May 1998.
20. UNI 10380, Illuminotecnica. Illuminazione di interni con luce artificiale, 1994
21. UNI 10380/A1, Illuminotecnica. Illuminazione di interni, 1999
22. UNI EN 12464-1, Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro interni, 2004