



54°

CONGRESSO NAZIONALE ATI
Associazione Termotecnica Italiana

ATTI

Università degli Studi - Facoltà di Ingegneria
Montelucio di Roio - L'Aquila, 14-17 Settembre 1999

Estratto

Vol. II

SGE EDITORIALI
PADOVA

MISURA DELLA VELOCITÀ DI EVAPORAZIONE DELL'ACQUA DA SUPERFICI LIBERE

F. Cotana - F. Asdrubali - F. Rossi

Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici (CIRIAF),
Università degli Studi di Perugia, Perugia

SOMMARIO

Il fenomeno dell'evaporazione dell'acqua da bacini chiusi quali laghi o piscine, benchè costituisca un problema di notevole interesse impiantistico e ambientale, non ha tuttavia avuto fino ad oggi un sufficiente sviluppo teorico e sperimentale.

Si è pertanto messo a punto un apparato sperimentale, di concezione originale, per la determinazione della velocità di evaporazione dell'acqua da una superficie libera, in funzione delle condizioni termoisometriche dell'aria (temperatura e umidità relativa), al variare della temperatura dell'acqua e per diversi regimi di moto.

I dati sperimentali, disponibili in un ampio intervallo di temperature e umidità relative, costituiscono un valido riferimento nella progettazione degli impianti degli ambienti piscina e nella valutazione delle portate di reintegro dei bacini chiusi.

INTRODUZIONE

Lo studio dell'evaporazione dell'acqua da superfici libere rappresenta un problema di notevole interesse dal punto di vista ambientale ed impiantistico, ed ha significative applicazioni sia negli ambienti confinati che nell'ambiente esterno.

Negli ambienti confinati come le piscine coperte, infatti, il carico termico più elevato è proprio quello dovuto all'evaporazione dell'acqua; una valutazione precisa della velocità d'evaporazione è perciò di fondamentale importanza, sia al fine di assicurare condizioni di benessere termoisometrico alle persone presenti [1], sia al fine di dimensionare correttamente l'impianto e ridurre i consumi energetici [2].

Pari importanza riveste il calcolo della velocità d'evaporazione nei bacini all'aperto (laghi, stagni, ecc...), in quanto da essa dipendono, oltre al clima locale, anche le condizioni di vita delle specie animali e vegetali presenti.

In Letteratura sono reperibili numerosi studi relativi all'evaporazione di acqua da bacini, in particolar modo per i bacini all'aperto [3], [4], [5]; il carattere empirico o semiempirico della maggior parte delle relazioni proposte, tuttavia, le rende applicabili solo alla specifica situazione per la quale sono state ricavate.

L'obiettivo principale della ricerca, effettuata presso il Laboratorio di Termotecnica e Controlli Ambientali del CIRIAF, è di sviluppare relazioni ed abachi, di validità generale, per il calcolo della velocità di evaporazione dell'acqua da bacini, a partire da indagini sperimentali.

Si è pertanto messo a punto un apparato sperimentale di concezione originale, che consente di misurare la velocità di evaporazione, al variare di diversi parametri ambientali (temperatura, velocità e umidità relativa dell'aria, temperatura dell'acqua); nel lavoro sono presentati i primi risultati e, relativamente all'applicazione specifica delle piscine coperte, è effettuato un confronto dei dati ottenuti con quelli forniti dai principali modelli reperiti in Letteratura.

APPARATO SPERIMENTALE E MODALITÀ DI EFFETTUAZIONE DELLE MISURE

Le misure sono state effettuate in una camera climatica, di fabbricazione Mazzali, che consente il controllo della temperatura dell'aria tra -40 e $+140$ °C e dell'umidità relativa tra il 15 e il 100%.

L'apparato sperimentale utilizzato per le prove è costituito da (fig. 1):

- una bilancia elettronica di precisione, con la quale si misura la quantità d'acqua che evapora dal contenitore;
- un contenitore di alluminio, che simula il comportamento del bacino, posto sulla bilancia e riempito con una quantità nota di acqua distillata; esso è isolato su tutte le pareti mediante schiuma poliuretanicca, in modo che lo scambio di calore avvenga principalmente attraverso la superficie libera dell'acqua;

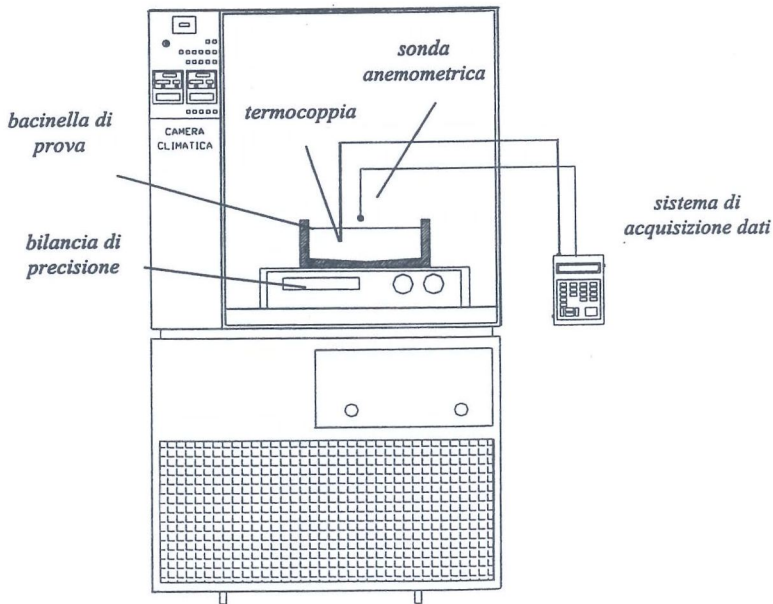


Figura 1. Rappresentazione schematica dell'apparato sperimentale.

- una termocoppia immersa nell'acqua e collegata ad un multimetro, per la misura della temperatura dell'acqua;
- un anemometro a filo caldo, collegato ad un multimetro, per la misura della velocità dell'aria.

Ciascuna misura si effettua impostando in camera climatica un valore prefissato di temperatura e umidità relativa dell'aria e consiste nell'acquisizione, in tempi successivi, dei valori di temperatura dell'acqua e di massa evaporata; al termine della prova è possibile valutare la quantità d'acqua complessivamente evaporata e calcolare il valore medio della velocità d'evaporazione.

Le misure sono state effettuate per i seguenti valori dei diversi parametri in camera climatica:

- umidità relativa dell'aria: 40%, 50%, 60% e 70%;
- temperatura dell'aria: 15°C, 20°C, 25°C, 30°C e 35°C;
- velocità dell'aria: 0.1 m/s, 0.3 m/s, 0.5 m/s e 0,7 m/s.

Nel sistema così costituito, i tre parametri menzionati sono controllati per mezzo della camera climatica, mentre la temperatura dell'acqua non è una variabile indipendente. Infatti in ciascuna prova essa, dopo un transitorio iniziale, si porta ad un valore di equilibrio, che dipende dai valori impostati di temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria (fig. 2). Le temperature di equilibrio dell'acqua, relative alle misure effettuate con una velocità dell'aria di 0.7 m/s, sono riportate, a titolo di esempio, in tab.1. In Fig. 3 è invece riportato un andamento tipico nel tempo della massa d'acqua evaporata.

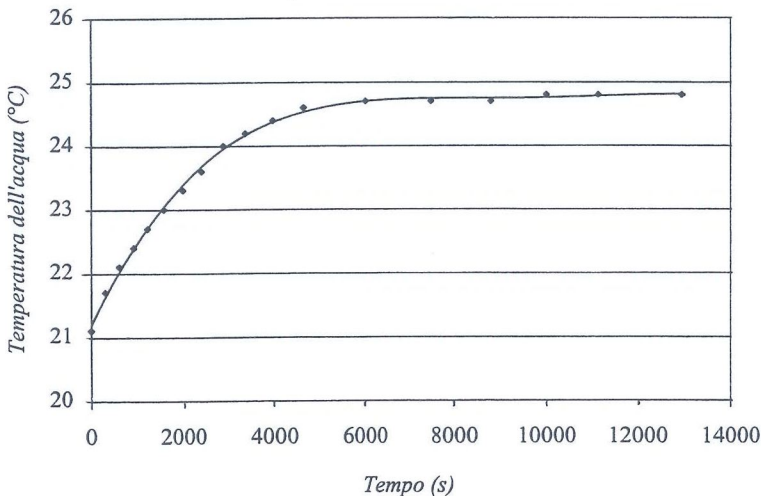


Figura 2. Andamento della temperatura dell'acqua nel corso di una misura (velocità dell'aria = 0.7 m/s; umidità relativa = 60%; temperatura dell'aria = 30°C).

ANALISI DEI RISULTATI

Come già detto in precedenza, la velocità d'evaporazione è calcolata al termine di ciascuna prova, misurando la quantità di acqua che evapora in un determinato intervallo di tempo, in condizioni di regime.

Tabella 1. Temperatura di equilibrio dell'acqua (°C) nelle prove con velocità di 0.7 m/s.

Umidità relativa	Temperatura dell'aria (°C)				
	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
30%	9,3	13	16,7	20,6	24,3
40%	10	14,1	17,9	22,1	26
50%	11	15,2	19,4	23,5	27,6
60%	11,8	16,5	20,4	24,8	29
70%	12,7	17,5	21,6	26,1	30,5

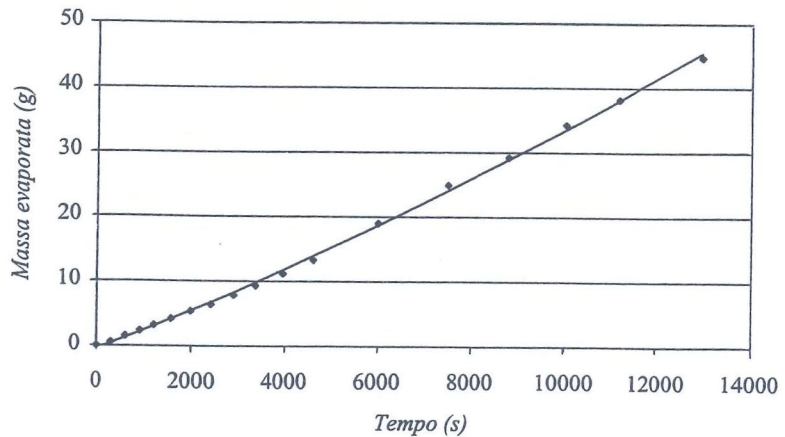


Figura 3. Andamento della massa d'acqua evaporata nel corso di una misura (velocità dell'aria = 0.7 m/s; umidità relativa = 60%; temperatura dell'aria = 30°C).

Ad esempio, in un intervallo di tempo di 30 minuti, i valori della massa d'acqua evaporata con una velocità dell'aria di 0.7 m/s sono quelli riportati in tab. 2.

I valori di tab. 2 permettono di calcolare per ciascuna prova il coefficiente di trasporto di massa k [6], [7]:

$$k = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \frac{l}{A(p_w(T_w) - \phi \cdot p_w(T_a))} \quad (1)$$

dove:

k = coefficiente di trasporto di massa, $Kg/Pa \cdot m^2 \cdot s$;

A = area della superficie evaporante, m^2 ;

Tabella 2. Valore medio della massa d'acqua evaporata (g), in un intervallo di tempo di 30 minuti, con velocità dell'aria di 0.7 m/s.

Umidità relativa	Temperatura dell'aria (°C)				
	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
30%	7,34	8,78	10,25	12,24	12,5
40%	6,22	7,4	8,74	9,8	11,56
50%	4,82	6,18	7,15	8,32	9,58
60%	3,88	5,17	5,49	6,54	7,55
70%	2,9	3,33	4,3	4,93	5,6

- p_w = pressione del vapor saturo, Pa;
 ϕ = umidità relativa dell'aria, %;
 T_a = temperatura dell'aria, °C;
 T_w = temperatura dell'acqua in condizioni di regime, °C;
 Δm = massa evaporata nell'intervallo di tempo Δt , Kg;
 $\Delta m/\Delta t = V$ = velocità d'evaporazione dell'acqua, Kg/s.

I valori di k , ottenuti a partire dai valori di massa d'acqua evaporata di tab. 2, sono riportati in tab. 3.

I dati sperimentali confermano, come previsto dalla teoria [6],[7], che il valore di k si mantiene costante nelle diverse prove di uno stesso ciclo di misure, a parità di geometria del sistema e di velocità dell'aria; il valore medio di k che risulta dai valori di tab. 3 è pari a $13.583 \cdot 10^{-8} \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$; in modo analogo si sono calcolati i valori medi di k relativi agli altri valori della velocità dell'aria (tab. 4).

I dati di tab. 4 possono essere impiegati, utilizzando la (1), per calcolare la velocità d'evaporazione dell'acqua $\Delta m/\Delta t$ in un ampio intervallo di valori di temperatura, velocità e umidità relativa dell'aria.

Tabella 3. Coefficiente di trasporto di massa, $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}) \cdot 10^{-8}$, con velocità dell'aria pari a 0,7m/s.

Umidità relativa	Temperatura dell'aria (°C)				
	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
30%	13,826	13,572	13,194	13,096	12,657
40%	13,951	13,58	13,750	12,896	12,84
50%	13,186	13,642	13,322	13,272	13,342
60%	13,173	12,685	13,870	13,79	14,702
70%	13,156	12,598	14,572	14,737	16,175

Tabella 4. Coefficiente di trasporto di massa per diversi valori della velocità dell'aria, $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}) \cdot 10^{-8}$

	Velocità media dell'aria (m/s)			
	0,1 m/s	0,3 m/s	0,5 m/s	0,7 m/s
Costante k	3,903	6,928	9.298	13.583

A partire dai valori di temperatura di equilibrio dell'acqua riportati in tab. 1, è possibile inoltre calcolare il coefficiente di convezione tra il pelo libero e l'aria, supponendo che lo scambio termico avvenga solamente attraverso la superficie evaporante.

Quando l'acqua ha raggiunto la condizione di equilibrio, infatti, il calore che in un intervallo di tempo $\Delta\tau$ si trasmette dall'aria alla bacinella è pari al calore necessario all'evaporazione della massa d'acqua Δm [8].

Pertanto, tenendo conto anche del calore scambiato per irraggiamento tra l'acqua e le pareti laterali della camera climatica, si può scrivere il seguente bilancio termico:

$$h \cdot A \cdot (T_a - T_w) + \sigma_0 \cdot \varepsilon_w \cdot A \cdot (T_a^4 - T_w^4) = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot r(T) \quad (2)$$

dove:

- h = coefficiente di convezione, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$;
- A = area della superficie evaporante, m^2 ;
- T_a = temperatura dell'aria, $^{\circ}\text{C}$;
- T_w = temperatura dell'acqua in condizioni di regime, $^{\circ}\text{C}$;
- Δt = intervallo di tempo nel quale evapora la massa d'acqua Δm , s;
- Δm = massa d'acqua evaporata nell'intervallo di tempo $\Delta\tau$, Kg.
- $r(T)$ = calore di evaporazione dell'acqua alla temperatura T , J/g ;
- σ_0 = costante di Stefan-Boltzman, $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$;
- ε_w = emissività globale dell'acqua.

A titolo di esempio, i risultati ottenuti dall'applicazione della (2) per la velocità di 0,7 m/s sono riportati in tab. 5.

Tabella 5. Coefficiente di convezione, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, calcolato tra il pelo libero dell'acqua e l'aria, con velocità dell'aria di 0.7 m/s.

Umidità relativa	Temperatura dell'aria ($^{\circ}\text{C}$)				
	15 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$	35 $^{\circ}\text{C}$
30%	33,13	31,53	30,98	32,54	32,08
40%	31,26	31,66	30,64	31,65	31,75
50%	31,07	32,49	32,35	31,81	31,76
60%	30,33	35,60	30,05	31,05	30,74
70%	32,36	38,23	31,41	31,10	30,64

Il valore medio di h che si ottiene in base ai valori riportati in tab. 5, risulta essere piuttosto elevato per la velocità di 0,7 m/s del flusso d'aria che lambisce il pelo libero dell'acqua. Valori così elevati di h sono in parte dovuti alla presenza di un flusso termico non trascurabile attraverso le pareti della bacinella e in parte a possibili fenomeni di turbolenza in prossimità del pelo libero dell'acqua. Le prove effettuate con gli altri valori della velocità dell'aria confermano questo risultato.

ABACHI PER IL CALCOLO DELLA VELOCITÀ DI EVAPORAZIONE

Al fine di poter utilizzare i dati sperimentali in applicazioni pratiche, si è ritenuto utile presentare i risultati delle misure sotto forma di abachi.

Si sono pertanto costruiti una serie di diagrammi che, per i diversi campi di moto, riportano l'andamento della velocità d'evaporazione in funzione della temperatura del bacino, per i diversi valori della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria ambiente.

Ragioni di spazio non rendono possibile presentare tutti i diagrammi; un esempio di essi è comunque presentato nelle figg. 4, 5, 6 e 7.

CONFRONTO CON ALTRI MODELLI

Il confronto dei risultati sperimentali con i modelli di calcolo reperiti in Letteratura è stato effettuato con riferimento al caso delle piscine coperte. I modelli disponibili consentono di calcolare la velocità d'evaporazione in funzione della temperatura dell'acqua, della velocità e delle condizioni termoigrometriche dell'aria che lambisce la superficie evaporante e sono stati sviluppati in modo specifico per la progettazione degli impianti di condizionamento delle piscine coperte [9], [10], [11].

In particolare, si sono prese in considerazione una correlazione proposta dall'ASHRAE ed una, più recente, dei ricercatori norvegesi Hannsen e Mathisen.

Nelle figg. 8-10 sono riportati i valori di velocità di evaporazione calcolati con i diversi modelli, in funzione della differenza tra l'umidità specifica X_w dell'aria saturata alla temperatura del bacino e l'umidità specifica dell'aria ambiente X_a .

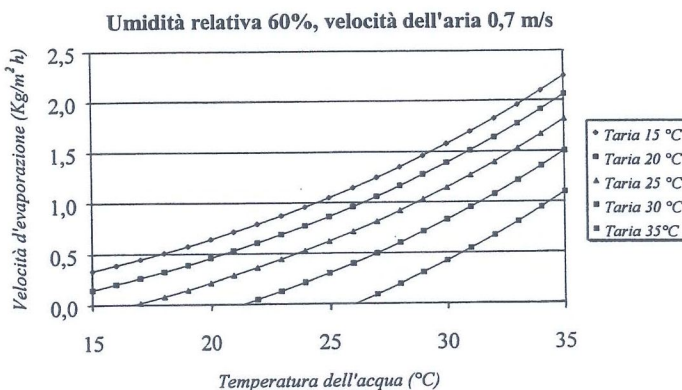


Figura 4. Andamento della velocità d'evaporazione, in funzione della temperatura dell'acqua, per diversi valori di temperatura dell'aria (umidità relativa =60%; velocità dell'aria =0.7 m/s).

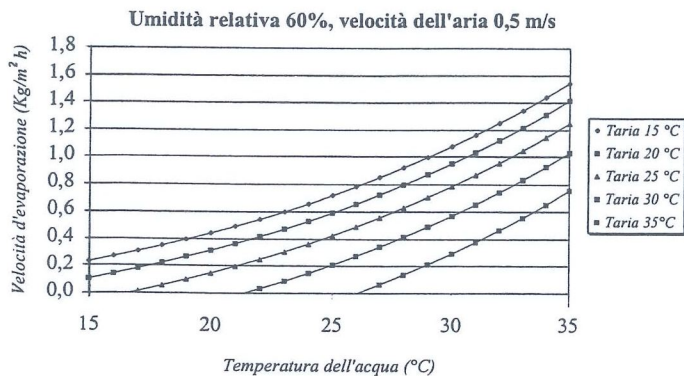


Figura 5. Andamento della velocità d'evaporazione, in funzione della temperatura dell'acqua, per diversi valori di temperatura dell'aria (umidità relativa =60%; velocità dell'aria = 0.5 m/s).

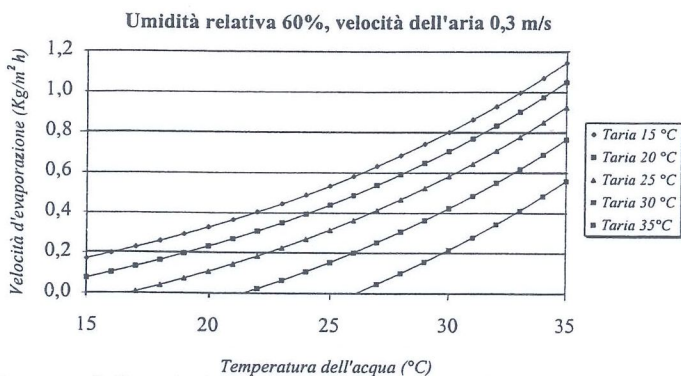


Figura 6. Andamento della velocità d'evaporazione, in funzione della temperatura dell'acqua, per diversi valori di temperatura dell'aria (umidità relativa = 60%; velocità dell'aria =0.3 m/s).

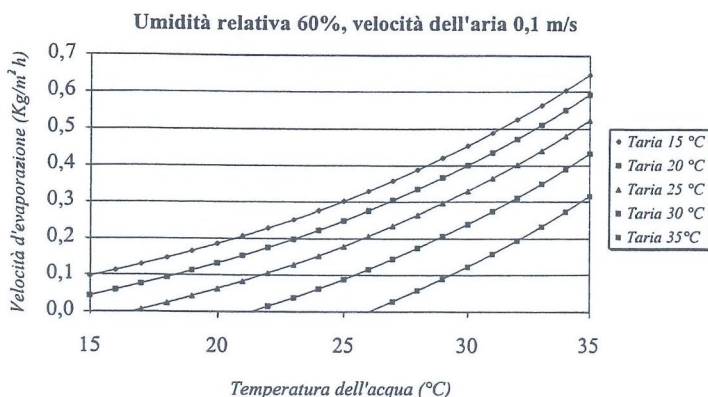


Figura 7. Andamento della velocità d'evaporazione, in funzione della temperatura dell'acqua, per diversi valori di temperatura dell'aria (umidità relativa = 60%; velocità dell'aria =0.1 m/s).

Il confronto è stato sviluppato considerando la situazione di piscina vuota, che è quella assimilabile alle prove di laboratorio effettuate, e velocità dell'aria di 0.5 m/s, 0.3 m/s e 0.1 m/s, anche se solo quest'ultima condizione di moto è tipica di una piscina coperta.

Per la velocità di 0.1 m/s il modello proposto nel presente lavoro è sostanzialmente in linea con quello ASHRAE, anche se, rispetto a quest'ultimo, fornisce valori di velocità leggermente inferiori; rispetto al modello di Hannsen e Mathisen il modello proposto tende invece a sovrastimare la velocità d'evaporazione. Per le velocità superiori a 0.1 m/s, il modello proposto fornisce valori di velocità di evaporazione superiori rispetto a tutti gli altri modelli; va però detto che, poiché i diversi modelli in Letteratura sono stati sviluppati per l'applicazione all'ambiente piscina, la loro estensione a velocità superiori a 0,1 m/s può comportare errori significativi [12].

VALUTAZIONE DEGLI ERRORI

L'errore che si commette nel calcolo del coefficiente di trasporto di massa dipende dall'errore nella misura delle grandezze che regolano il processo evaporativo, ed in particolare: temperatura dell'acqua, temperatura e umidità relativa dell'aria, massa d'acqua evaporata e tempo.

L'apparato sperimentale e la procedura seguita per la misura originano, per le suddette grandezze, gli errori assoluti indicati in tab. 6.

Tabella 6. Errore medio assoluto nella misura delle grandezze relative all'evaporazione dell'acqua

Grandezza misurata	Errore assoluto
Temperatura dell'acqua	+/- 0.5 (°C)
Temperatura dell'aria	+/- 0.4 (°C)
Umidità relativa dell'aria	+/- 3 (%)
Massa evaporata	+/- 0,03 (g)
Intervallo di tempo misurato	+/- 15 (s)

L'errore relativo su k si può calcolare, a partire dai valori indicati in tab. 4, applicando la teoria di propagazione degli errori alla relazione (1); tale errore non è costante, ma tende ad aumentare al diminuire della differenza di pressione $\Delta P = P_w(T_w) - \phi P_w(T_a)$, e varia da un minimo del 6,6% ad un massimo del 24,5%, con un valore medio pari al 13,8 %.

CONCLUSIONI

Si è effettuata una estesa campagna sperimentale, mediante un apparato di concezione originale, volta alla misura della velocità di evaporazione dell'acqua da bacini; i dati sperimentali, disponibili in un ampio intervallo di valori di temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria, sono stati correlati ed è stato calcolato il coefficiente di trasporto di massa nelle diverse configurazioni considerate. I dati sperimentali sono stati inoltre presentati sotto forma di abachi di facile lettura.

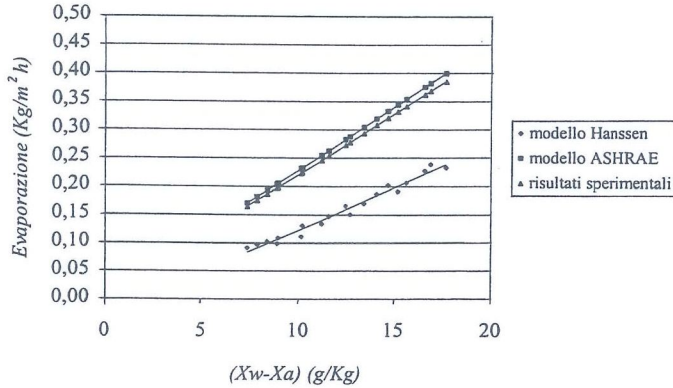


Figura 8. Confronto tra i dati sperimentali e due modelli per la stima della velocità d'evaporazione (velocità dell'aria = 0,1 m/s).

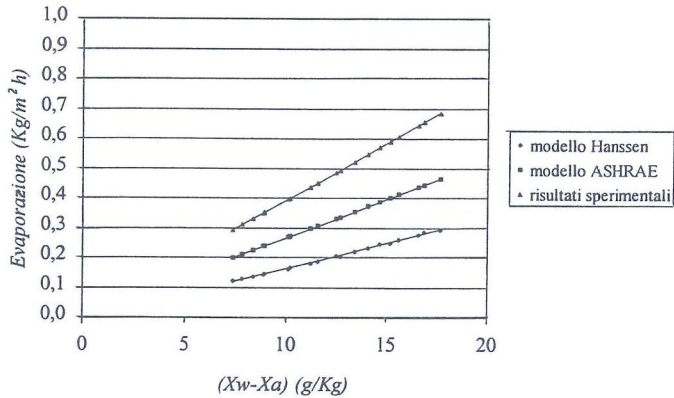


Figura 9. Confronto tra i dati sperimentali e due modelli per la stima della velocità d'evaporazione (velocità dell'aria = 0,3 m/s).

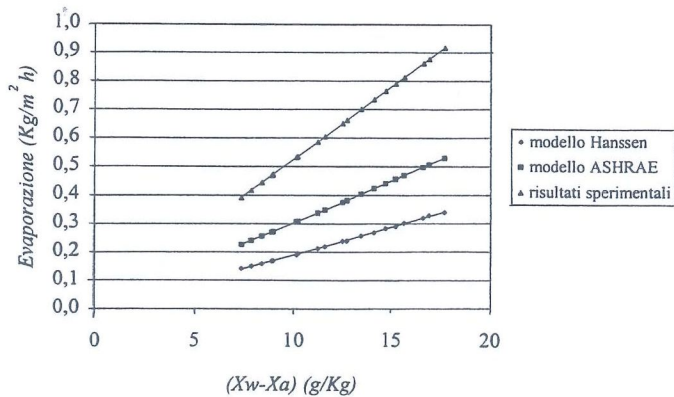


Figura 10. Confronto tra i dati sperimentali e due modelli per la stima della velocità d'evaporazione (velocità dell'aria = 0,5 m/s).

E' stato infine effettuato un confronto con i principali modelli per il calcolo della velocità di evaporazione dell'acqua negli ambienti piscina; i risultati incoraggiano la prosecuzione del lavoro, ad esempio con la verifica della possibilità di estendere i dati sperimentali anche ai bacini all'aperto.

LISTA DEI SIMBOLI

A	= area della superficie evaporante, m^2
h	= coefficiente di convezione, $W/m^2\text{ }^\circ C$
k	= coefficiente di trasporto di massa, $kg/Pa\ m^2\ s$
M	= massa, kg
p	= pressione, Pa
r	= calore di evaporazione, J/kg
t	= tempo, s
T	= temperatura, $^\circ C$
V	= velocità, m/s
X	= umidità specifica, g/kg

Pedici

a	= aria
s	= saturo
w	= acqua

Lettere greche:

ϕ	= umidità relativa, %
ε	= emissività
σ_0	= costante di Stefan Boltzman, $W/m^2\ .K^4$

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lazzarin R., Piccinini F., 1992, Studio del benessere nell'ambiente piscina, *Atti del Convegno AICARR, Bologna, 22 Ottobre 1992*, 183
- [2] Cirillo E., Fato I., Lazzarin R., Piccinini F., 1988, Aspetti energetici di benessere in ambiente piscina. Un approccio sperimentale, *Atti del 43° Congresso Nazionale ATI, Ancona, 1052*.
- [3] Dragoni W., Valigi D., 1994, Contributo alla stima dell'evaporazione dalle superfici liquide nell'Italia Centrale, *Geologica Romana*, vol. 30, 151.
- [4] Linsley R.K., Kohler M.K., Paulhus J.L.H., 1982, *Hydrology for Engineers*, Mc Graw Hill International Book Company.
- [5] Whitehead P.G., Robinson M., 1992, Experimental basin studis – an international and historical perspective, *Proceedings of the Conference on Methods of Hydrologic Basin Comparison, Oxford, U.K., October 1992*, 120.
- [6] Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., 1979, *Fenomeni di trasporto*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano.
- [7] Cussler E.L., *Mass transfer in fluid systems*, Cambridge University Press.

- [8] Holman J.P., 1989, *Heat Transfer, S.I. Edition*, Mc Graw Hill International Book Company.
- [9] Shah M.M., 1992, Calculating evaporation from a swimming pools, *Heating/Piping/Air Conditioning*, 12, 103-105.
- [10] ASHRAE Applications Handbook, 1991, Natatoriums, Atlanta, 151.
- [11] Hanssen S.O., Mathisen H.M., 1990, Evaporation from swimming pools, *Proc. Of Roomvent '90, Session B2-1, Oslo*.
- [12] Lazzarin R., Longo G.A., 1992, Analisi dei fabbisogni di piscine coperte, *Atti del Convegno AICARR, Bologna, 22 Ottobre 1992*, 205.

ABSTRACT

Water evaporation from basins, such as lakes, ponds or swimming pools, is a very interesting problem both from an environmental and from a technical point of view, but it has not yet had a satisfactory theoretical and experimental development. A new experimental apparatus to measure water evaporation speed from a free surface has been developed. The evaporation speed is measured within a climatic chamber, where the air temperature, speed and relative humidity can be varied; the experimental data have been correlated and presented in the form of diagrams. The paper is completed by a comparison of the experimental data with those obtained from the models in Literature, which evaluate the water evaporation speed in swimming pools.