

Determinación experimental de los coeficientes locales de transporte de humedad en almacenes soterrados.

Ma. D. Andrade Gregori, R. Hernández Rubio, M. Piedra Díaz.

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas
Av. Salvador Allende y Luaces. Quinta de los Molinos
Municipio: Plaza de la Revolución. Apartado Postal: 6163
Ciudad de la Habana. Cuba
E-mail: _mdolores@rsch.isctn.edu.cu, mpiedra@rsch.isctn.edu.cu

(Recibido el 20 de Noviembre de 2005, aceptado el 15 de Febrero de 2006)

Resumen.

En el trabajo se fundamentan los mecanismos de transporte de humedad que tienen lugar en almacenes soterrados dadas las características climáticas y geohidrológicas de Cuba. Se establece una analogía con la ley de Fick y se propone un modelo teórico que describe este mecanismo de transporte hacia las cavidades. Se determinó experimentalmente los coeficientes locales de transporte de humedad para diferentes tipos de recubrimiento en paredes y diferentes formas geométricas de los almacenes.

Palabras claves: Almacenes, soterrado, humedad, conservación, coeficientes.

1. Introducción.

Desarrollar un proyecto de deshumidificación eficiente en una obra soterrada con el propósito de obtener un microclima que responda a las condiciones mínimas de almacenamiento pasivo de los medios que se conservan en las mismas tales como: Equipos ópticos y ópticos electrónicos de alta sensibilidad a la humedad, requiere del conocimiento de los mecanismos básicos de transporte humedad que rigen el comportamiento climático de estos locales.

Cualquier cavidad soterrada en ausencia de intercambio con el exterior posee unos parámetros de humedad y temperatura de equilibrio, que dadas las condiciones del subsuelo, pueden permanecer constantes en diferentes épocas del año. Esto se cumple según [1] para profundidades superiores a 2.40 m, en las que la influencia de la temperatura exterior se hace más sensible a medida que nos acercamos a la superficie.

Las particularidades climáticas y geohidrológicas de Cuba explican la elevada humedad existente en estas cavidades soterradas, de manera que si se elimina el intercambio con el aire exterior la humedad tiende a ser superior al 90 % de humedad relativa y la temperatura permanece constante en rangos entre 25-26 °C.

En Cuba más del 65% del territorio está constituido por macizos cársticos carbonatados, predominando el escurrimiento subterráneo sobre el superficial. Si no fuera por la humedad que aporta el subsuelo, las

condiciones de temperatura existente en una obra soterrada, harían de él un lugar ideal para el almacenamiento pasivo de la técnica a conservar.

Los proyectos de deshumidificación se llevan a cabo en los almacenes soterrados que se encuentran dentro de las obras soterradas. Estos almacenes son locales de gran volumen ubicados dentro de la obra, se aíslan completamente del pasillo central, utilizando puertas y conductos hermetizados, y se encuentran enclavados en un manto rocoso con una elevada tensión de vapor de agua. Estos tienen las mismas particularidades climáticas de toda cavidad soterrada con profundidades mayores a 2,40 m y desde el punto de vista constructivo no se destinan materiales impermeabilizantes o barreras de vapor que eviten las condensaciones internas en paredes no siendo esto factible ni técnica ni económicamente. El agua que proviene del manto rocoso se evacua a través de canales de desagüe que circulan por la obra.

En el trabajo se muestran los modelos de pronóstico que describen los mecanismos de transporte de humedad hacia las cavidades y se hace una comparación con los modelos que se utilizan en la literatura tradicional [1,2,3], estableciendo las limitaciones que imposibilitan su aplicación en condiciones de soterramiento. Se determinan los coeficientes locales de transporte de humedad, obtenidos experimentalmente para diferentes tipos de recubrimiento en paredes y forma geométrica de los almacenes.

Se dan criterios a tener en cuenta durante la etapa de proyecto constructivo de una obra en cuanto a la generalización de los modelos para ser aplicados a diferentes obras con diferentes formas geométricas y su influencia en el transporte de humedad.

2. Fundamentación teórica.

Las características climáticas, constructivas y geohidrológicas de estos almacenes soterrados en Cuba condicionan los valores de humedad mínima en los mismos, es decir, la contribución de humedad a los locales no es la misma en almacenes con paredes de hormigón armado con acabado o sin acabado, con gunitaje o simplemente sin revestimiento de hormigón.

Por lo que un proyecto de deshumidificación en estas obras está condicionado a la humedad mínima que puede proporcionar el local y los niveles de tolerancia establecidos para la técnica que se pretende conservar. El conocimiento detallado de ambas condicionantes evitaría trabajar inútilmente contra esta elevada carga de humedad que aporta el manto rocoso a la cavidad que para vencerla requeriría un tiempo de deshumidificación ilimitado lo cual sería inalcanzable desde el punto de vista técnico e incostruable desde el punto de vista económico.

Los modelos teóricos que se emplean en los métodos tradicionales de diseño de climatización dados en [2], están definidos para el caso de una pared de espesor finito y expresados en función de las emisiones de vapor a ambos lados de la pared, de la forma siguiente:

$$J = -\alpha_p \frac{x_i}{x_0} (e_1 - e_2)$$

Donde:

e_1 y e_2 : Tensión de vapor a ambos lados de la pared (Pa)

X_i : espesor de la pared para el coeficiente de permeancia reportado en la literatura (m)

X_0 : espesor de la pared para la cuál se quiere hacer el cálculo (m).

α_p : Coeficiente de permeancia (Kg /m² h Pa). [Para hormigón armado ($X = 0.025$ m) $\alpha_p = 0.66 \times 10^{-6}$ Kg/h-m².Pa)]

J : Flujo de vapor de agua que se transfiere por unidad de área perpendicular a la dirección de transferencia de humedad por unidad de tiempo a través de una pared de espesor finito, en Kg /m² h.

3. Desarrollo.

Este modelo teórico no se ajusta totalmente a las condiciones de soterramiento, su limitación fundamental está dada en el cálculo experimental del coeficiente de

permeancia, que como concepto no puede ser utilizado a estas condiciones. Los almacenes soterrados se encuentran enclavados dentro de un manto rocoso con un espesor de pared no definido y sometido a una elevada tensión de vapor dada la cantidad de agua que se acumula en el mismo, sin intercambio con el medio exterior posee unos parámetros de humedad y temperatura de equilibrio.

Teniendo en cuenta esta limitación se hace una analogía con la ley de Fick [4] para determinar la cantidad de vapor que se difunde por unidad de superficie y de tiempo desde las paredes hacia el interior de los almacenes, expresada por [5, 6]:

$$J = -\alpha(\rho_v - \rho_{vp}) \quad \text{Modelo teórico} \quad (I)$$

Donde:

ρ_{vp} : Densidad de vapor asociada a la pared, a las condiciones climáticas de equilibrio en Kg. / m³

ρ_v : Densidad de vapor en el local en Kg. / m³

α : Constante de proporcionalidad en m /s.

J Flujo de vapor de agua que se transfiere por unidad de área perpendicular a la dirección de transferencia de humedad por unidad de tiempo, en Kg. / m² h.

El coeficiente “ α ” es un coeficiente local de transporte de humedad que depende de la rugosidad de las paredes, del movimiento del aire alrededor de las mismas, de su temperatura, así como de las características geométricas del local.

El gradiente que promueve el transporte de humedad en los almacenes está dado por la diferencia de densidades de vapor asociada a la pared y a la del local. La densidad de vapor asociada a la pared queda determinada por las condiciones climáticas de equilibrio en cada local.

En esta modelo se emplea la densidad del vapor como magnitud física para facilitar la automatización de la carta sicométrica.

Cada almacén soterrado tiene un coeficiente de forma que caracteriza la forma geométrica de las cavidades que viene dada por:

$$\xi = \frac{S_p}{V}$$

Cuando la longitud de las cavidades es $L > 10/\xi$ como sucede en la mayoría de los almacenes se cumple que:

$$\xi = \frac{P_t}{S_t}$$

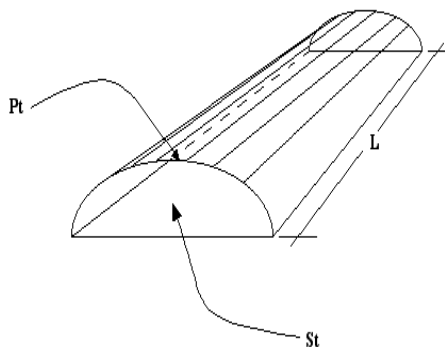


Figura 1. Representación esquemática de un almacén soterrado.

El diferente grado de humectación del revestimiento de la cavidad hace que la expresión analítica sea compleja, no obstante, en una primera aproximación se considera a esta magnitud como constante.

La masa de vapor que se incorpora al volumen en la unidad de tiempo viene dado por:

$$\frac{d\rho_v}{dt} = \frac{P_t}{S_t} J$$

La ecuación anterior toma la forma:

$$\frac{d\rho_v}{dt} = -\beta(\rho_v - \rho_{vp})$$

Siendo $\beta = \alpha\xi$

β : Coeficiente de transpiración de las paredes que se determina experimentalmente (h^{-1})

Considerando que inicialmente la densidad del vapor en el recinto es " ρ_{ov} ", entonces la solución de la ecuación diferencial anterior es simple, y tiene la forma:

$$\rho_v = \rho_{vp} + (\rho_{ov} - \rho_{vp})e^{-\beta t} \text{ Modelo de pronóstico (Ia)}$$

En el caso de que la densidad de vapor asociada a la pared sea mayor que la del aire, entonces estamos en presencia de un aumento de la densidad de vapor en el local que tiende asintóticamente al de la pared.

Si existe equilibrio térmico entre la pared y el recinto, entonces la razón de mezcla de saturación es la misma para ambas, y en general, se cumple la relación:

$$\rho_v = m_s H_R \rho_{as}$$

Donde:

ρ_{as} : densidad del aire seco (Kg./m^3)

m_s : razón de mezcla en Kg. de vapor de agua/ Kg. de aire.

H_R : humedad relativa (%).

Entonces el modelo de pronóstico (Ia) se reduce a:

$$Hr = Hr_p + (Hr_0 - Hr_p)e^{-\beta t}$$

Modelo de pronóstico (Ib)

Donde:

Hr : humedad relativa del local; (%)

Hr_p : humedad relativa asociada a la pared; (%)

Hr_0 : humedad relativa inicial en el local; (%)

Para comprobar el modelo teórico (I) se llevó a cabo un estudio experimental en 10 obras soterradas del país con diferentes condiciones climáticas y en almacenes con diferentes tipos de paredes, que permitió validar los modelos de pronóstico (Ia) y (Ib) anteriormente expuestos, que describen los mecanismos de transporte de humedad hacia las cavidades y el cálculo de los coeficientes locales de transporte de humedad.

3.1 Determinación de los coeficientes de transporte de humedad en almacenes soterrados.

Se utilizaron los datos registrados en cartas higrotermográficas durante la conexión y desconexión de los equipos de deshumidificación instalados en los almacenes soterrados para validar los modelos de pronóstico (Ia) y (Ib), y se procedió de la forma siguiente:

Se deshumidificó el local hasta una humedad relativa dada, deteniéndose la misma y esperando que el sistema llegue al equilibrio como se muestra en la figura 2, donde se muestra el comportamiento de la humedad relativa en el tiempo durante la desconexión del deshumidificador en un almacén soterrado y su curva de tendencia correspondiente al modelo de pronóstico (Ib).

Con los datos de humedad relativa en el tiempo y utilizando el modelo de pronóstico (Ib) se determinaron los coeficientes del transporte de humedad en los almacenes soterrados:

$$\ln(Hr - Hr_p) = \ln(Hr_0 - Hr_p) - \beta t$$

del modelo de pronóstico (Ib)

Siendo:

$$y = \ln(Hr - Hr_p)$$

$$x = t$$

Siendo:

$$m = -\beta : \text{Pendiente de la recta}$$

$$b = \ln(Hr_0 - Hr_p) : \text{intercepto}$$

Al aplicar un ajuste por mínimos cuadrados utilizando el programa Origin versión 5.0 a la ecuación linealizada del modelo (Ib) se obtienen los valores de pendiente e intercepto, siendo $\beta = -m$ (pendiente).

En la figura 3 se representa las líneas de tendencia de datos experimentales para evaluar los coeficientes de transpiración de las paredes de hormigón armado con y sin acabado.

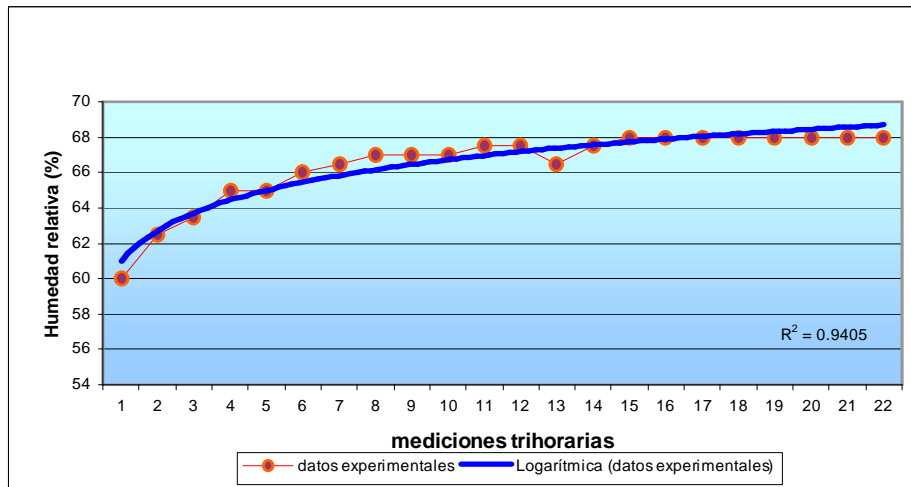


Figura 2. Carta higrotermográfica donde se refleja el comportamiento de la humedad relativa en el tiempo durante la desconexión del deshumidificador en un almacén soterrado.

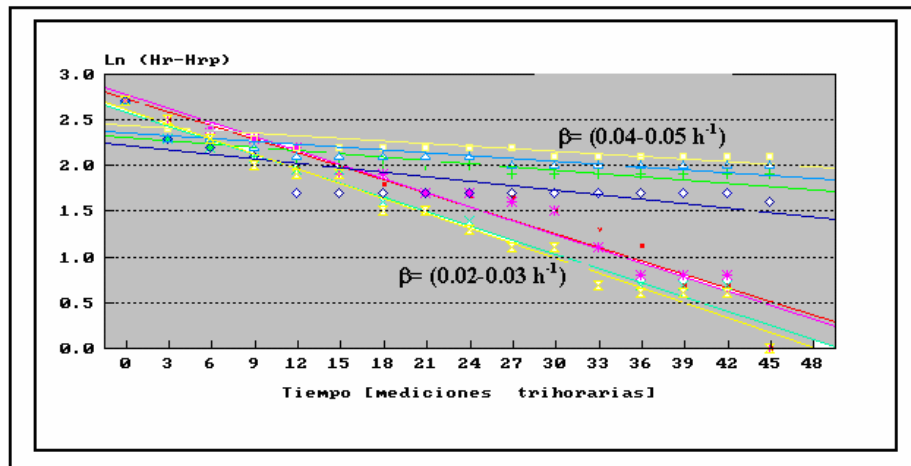


Figura no. 3. Líneas de tendencia de datos experimentales para evaluar los coeficientes de transpiración.

Se tabulan los valores de β estimados para diferentes tipos de paredes en los almacenes.

Tabla no 1. Valores de coeficientes de transpiración estimados para diferentes tipos de paredes en almacenes soterrados.

Tipo de pared en los almacenes	Coefficiente β (h^{-1})	Error (%)
Paredes de hormigón armado con acabado	0.02-0.03	5%
Paredes de hormigón armado sin acabado	0.04-0.05	5%

Los almacenes soterrados con gunitaje o sin revestimiento de hormigón aportan una carga de humedad tan elevada imposible de controlar con un simple sistema de deshumidificación. Por lo que en estos casos no queda otra alternativa que el empleo de

costosos contenedores de polietileno que recubran toda la técnica que se pretende conservar para realizar la deshumidificación.

3.2 Cantidad de vapor que se difunde por unidad de superficie y de tiempo desde la pared hacia el interior de los almacenes soterrados.

A la hora de seleccionar el equipamiento necesario para realizar la deshumidificación en los almacenes soterrados es importante calcular la cantidad de vapor que se difunde del manto rocoso hacia las cavidades soterradas.

Los principales factores que determinan este flujo de vapor (J) son: el gradiente de humedad entre las paredes del almacén y la del aire contenida en el local ($p_v - p_{vp}$) y los coeficientes locales de transporte de humedad (α).

En la tabla número 2 se muestran los coeficientes locales de transporte de humedad y el flujo de vapor que se difunde teniendo en cuenta las diferentes secciones típicas de los almacenes soterrados en el país, con su coeficiente de forma característico (ξ).

Este cálculo se realizó utilizando el modelo teórico I aplicado para locales con paredes de hormigón armado sin acabado y cuyo gradiente está dado para un intervalo de HR entre 60 y 80% con $T = 298 \text{ }^{\circ}\text{K}$.

Los resultados obtenidos muestran que aquellas secciones con mayores coeficientes de forma, es decir, mayor superficie de transporte de humedad por metro cúbico de volumen, tienen un mayor intercambio de humedad, lo cual no es conveniente desde el punto de vista climático. Criterio este a tener en cuenta si se quiere desarrollar un proyecto de deshumidificación eficiente.

Para iguales gradientes de humedad la sección T-32 transmite 5 veces más humedad que la T-15 por m^2 de superficie, quedando demostrada la importancia del elemento constructivo en el transporte de humedad y en la eficiencia del proceso de secado en los almacenes soterrados.

4. Conclusiones.

Los mecanismos de transporte de humedad en almacenes soterrados dadas las particularidades constructivas, climáticas y geohidrológicas de los mismos quedan fundamentados a partir del modelo teórico I validado experimentalmente y que se ajusta a las condiciones de soterramiento.

Para su comprobación se llevó a cabo un estudio experimental en 10 obras soterradas del país con diferentes condiciones climáticas y en almacenes con

diferentes tipos de paredes, que permitió validar los modelos de pronóstico (Ia) y (Ib) y el cálculo de los coeficientes locales de transporte de humedad.

A la hora de seleccionar el equipamiento necesario para realizar la deshumidificación en estos almacenes soterrados es importante conocer la cantidad de vapor que se difunde del manto rocoso hacia las cavidades soterradas y sólo esto se hace posible con la determinación experimental de los coeficientes locales de transporte de humedad.

5. Bibliografía.

1. ASHRAE Handbook on Fundamentals, Chapter 20, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1981.
2. Harriman I.; Lewis G.; 2000. "The Dehumidification Handbook" Segunda edición. Editorial Mason - Grant Company.
3. Carrier. 1998. "Handbook of air Conditioning System Design".
4. Incropera Frank.P, DeWitt David P. "Fundamentos de la transferencia de calor" Cuarta edición.
5. Andrade, M.D.1998. "Diseño de climatización de locales soterrados". Tesis de Maestría ISPJAE. CETER.
6. Hernández.R. 1998. "Consideraciones preliminares sobre la actividad climática en una obra soterrada". Presentado en XII Forum de Ciencia y Técnica.
7. Norma ASTM C355-64 .1991. "Determinación de la transmisión de vapor de agua en materiales gruesos utilizados como aislamiento".

Tabla no. 2. Coeficientes locales de transporte de humedad y flujo de vapor que se difunde hacia los almacenes teniendo en cuenta el coeficiente de forma característico de cada sección.

Secc.	$S_p(\text{m}^2)$	$\xi(\text{m}^2/\text{m}^3)$	$\beta(\text{h}^{-1})$	$J(\text{Kg}/\text{día})$	Secc.	$S_p(\text{m}^2)$	$\xi(\text{m}^2/\text{m}^3)$	$\beta(\text{h}^{-1})$	$J(\text{Kg}/\text{día})$
T-3	1.83	1.83	0.62	6.81E-02	T-26	0.89	0.89	0.30	3.31E-02
T-4	2.08	2.08	0.70	7.74E-02	T-28	0.63	0.63	0.21	2.34E-02
T-9	0.72	0.72	0.24	2.68E-02	T-29	0.9	0.9	0.30	3.35E-02
T-11	0.49	0.49	0.17	1.82E-02	T-30	1.58	1.58	0.53	5.88E-02
T-13	1.79	1.79	0.60	6.66E-02	T-31	2.6	2.6	0.88	9.68E-02
T-15	0.45	0.45	0.15	1.67E-02	T-32	1.74	1.74	0.59	6.48E-02
T-25	1.02	1.02	0.34	3.80E-02	T-33	1.91	1.91	0.64	7.11E-02

Experimental determination of local humidity transport coefficients in underground warehouses.

Abstract.

In this paper the mechanisms of humidity transport are explained. These mechanisms have place in underground warehouses according to the climatic and geohydrological characteristics of Cuba. An analogy with the Fick's law is stated and it intends a theoretical model that describes this mechanism of transport toward the cavities. It was determined the local coefficients of transport of humidity experimentally for different recover types in walls and different geometric forms of the warehouses.

Key words: Store, buried, humidity, conservation, and coefficients.