



25 SET
al
27 2019
Montevideo



II CONGRESO DE AGUA
AMBIENTE Y ENERGÍA
AUGM



Determinación de la permeabilidad al aire de edificios según norma ISO 9972:2015, estudio de casos en Uruguay

Juan Rodríguez^{1,2}, Andrea Sevrini², Gunnar Gil², Italo Bove³

mail de contacto: jrodriguez@unorte.edu.uy

¹ *Laboratorio de Energía Solar (LES), Depto. de Física, CENUR LN, UdelaR, Uruguay*

² *Departamento Regional Norte de Arquitectura CENUR LN, UdelaR, Uruguay*

³ *Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay*

RESUMEN: En múltiples investigaciones se ha probado que las infiltraciones de aire tienen un impacto significativo en el consumo de energía final de los edificios. Existen diversos métodos para determinar la permeabilidad al aire de los edificios, en la norma ISO 9972:2015 se presenta uno de ellos. Este método es ampliamente usado en Europa y Estados Unidos pero lamentablemente no existe mucha experiencia a nivel nacional. En este trabajo se muestran los resultados de tres ensayos realizados sobre edificios en Uruguay de acuerdo al estándar mencionado.

PALABRAS CLAVE: medio ambiente; eficiencia energética; infiltraciones de aire

1. INTRODUCCIÓN

El sector edilicio es responsable del 30 % del consumo de energía mundial [1], mientras que en Uruguay dicho sector representa aproximadamente 25 % del consumo de energía [2]. Gran parte de este consumo se debe a los sistemas de calefacción y refrigeración los cuales dependen de varios factores, entre ellos las infiltraciones de aire exterior.

La infiltración de aire en un edificio se define como el ingreso no deseado de aire exterior y normalmente se expresa en renovaciones del volumen total de aire del edificio por hora. Dicha tasa depende de diversas variables como por ejemplo la velocidad y dirección del viento, la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, la tipología del edificio, etc. Evidentemente, dada la variabilidad inherente de la velocidad del viento y la temperatura ambiente, la tasa de infiltración no es constante a lo largo del año. No obstante, en la práctica se suele considerar una tasa constante (promedio anual). En diversos estudios se ha podido constatar que las infiltraciones de aire son responsables de entre un 10 % y un 30 % de la demanda de refrigeración y calefacción [3] y [4].

De lo expuesto anteriormente se deduce la importancia de contar con métodos que permitan identificar y cuantificar las fuentes de infiltraciones en la envolvente de los edificios. En la norma ISO 9972:2015 [5] se presenta un método para determinar la permeabilidad al aire de edificios. Este método no mide directamente la tasa de infiltración de aire de un edificio, no obstante, en las referencias [8-9] se proponen diferentes modelos para derivar dichas tasa (promedios anuales) a partir de los resultados del ensayo. Cientos de ensayos se han llevado a cabo en países como Estados Unidos, Canadá, España, en algunos países Nórdicos de Europa y en Chile [3-4,6-7,11], lo cual da la pauta de la gran aceptación que tiene este método. Sin embargo, a nivel nacional, no existen muchas experiencias documentadas.

En este trabajo se presentan los resultados de una serie de ensayos realizados en edificios en Uruguay. Los ensayos se realizaron de acuerdo a la norma ISO 9972:2015 y los valores obtenidos se compararon con el estándar Passivhaus [10].

2. MÉTODO DE ENSAYO

2.1 Fundamentos

En la norma ISO 9972:2015 la permeabilidad al aire del edificio viene dada por la ecuación:

$$q_{env} = C_{env}\Delta p^n \quad (1)$$

En donde q_{env} (m^3/h) es el caudal de aire a través de la envolvente del edificio y Δp (Pa) es la diferencia de presiones entre el aire exterior e interior, C_{env} ($m^3/h.Pa^n$) se denominan coeficiente de caudal y n coeficiente de presión. El coeficiente de presión está asociado al tipo de flujo y normalmente se encuentre entre los valores $n = 1/2$ (turbulento) y $n = 1$ (laminar). La determinación de la permeabilidad al aire de un edificio se reduce a determinar los coeficientes de caudal y presión.

Dada la no linealidad de la ecuación (1) resulta conveniente realizar el siguiente cambio de variable:

$$Y = \ln(q_{env}) \quad (2)$$

$$X = \ln(\Delta p) \quad (3)$$

Entonces la ecuación (1) se puede describir:

$$Y = \ln(C_{env}) + nX \quad (4)$$

Para determinar los coeficientes C_{env} y n se deben tomar diferentes medidas de q_{env} y Δp para luego realizar un ajuste lineal de la ecuación (4).

2.1 Equipo Blower Door

Los ensayos que se describen en este trabajo se realizaron con un equipo Blower Door modelo Minneapolis Blower Door System: 2 Fan System de la empresa estadounidense The Energy Conservatory.

La diferencia de presiones entre el exterior-interior del edificio se induce de forma mecánica con dos ventiladores en paralelo. Según como se instalen los ventiladores se puede inducir una sobrepresión o depresión en el edificio. El flujo a través de los ventiladores se puede regular de dos formas, con variadores de velocidad y/o reducciones en la entrada de los ventiladores las cuales generan una pérdida de presión adicional.

El equipo además cuenta con dos sensores de presión diferencial, uno por cada ventilador. Cada sensor de presión diferencial cuenta con dos canales (canal A y B), en uno de los canales se registra la diferencia de presión exterior-interior (canal A) y en el otro la diferencia de presión entre la succión e impulsión del ventilador (canal B). Con esta última medida (una por cada ventilador) y las curvas características de los ventiladores se infiere el caudal de aire que circula a través de la envolvente del edificio q_{env} . Dichas curvas son proporcionadas por el fabricante y dependen de la reducción que se utilice en cada caso. La incertidumbre de las medidas de presión es de un 1% según lo declarado por el fabricante.

Todo el equipamiento antes mencionado se instala sobre un marco de aluminio y una manta de nylon roja en una puerta exterior como se ilustra en el **Figura 1**.



Figura 1. Equipo Blower Door

2.3 Procedimiento

La norma propone tres métodos, la elección de que método usar depende del propósito del ensayo. El edificio se debe preparar previamente según el método escogido. En la **Tabla 1** se brinda mayor detalle sobre el estado de las aberturas del edificio durante el ensayo.

- Método 1: es el ensayo del edificio en un edificio en uso.
- Método 2: es el ensayo de la envolvente del edificio.
- Método 3: es el ensayo del edificio para un propósito específico.

Una vez preparado el edificio se procede a determinar la diferencia de presión a caudal cero. Para este paso se deben apagar y tapar los ventiladores. Luego se debe registrar la diferencia de presión exterior-interior durante un periodo de al menos 30 segundos. El promedio de los valores positivos Δp_{01+} , el de los valores negativos Δp_{01-} y el de todos los valores Δp_{01} sobre este periodo no deben superar los 5 Pa, en caso contrario el ensayo se declara no válido.

Para alcanzar una diferencia de presión exterior-interior a caudal cero aceptable (menor a 5Pa) se recomienda que la velocidad del viento no alcance 3 en la escala Beaufort y que la diferencia de temperatura exterior-interior multiplicada por la altura del edificio sea menor a 250 m.K.

Una vez determinada la diferencia de presión exterior-interior a flujo cero se destapan y se encienden los ventiladores y se procede medir diferentes caudales de aire a distintas diferencias de presión exterior-interior. Las medidas de diferencia de presión exterior-interior deben estar espaciadas 10 Pa máximo, el valor mínimo debe ser de 10 Pa y el valor máximo debe ser de al menos 50 Pa pero se recomienda extender el rango hasta 100 Pa. La norma recomienda realiza dos series de mediciones, una para presurización y otra para despresurización sin embargo se admite que se realice solo un serie de medidas. Al final de estas series de medida se debe determinar nuevamente la diferencia de presión a caudal cero poniendo fin de esta manera al ensayo.

Tabla 1. Condiciones de las aberturas durante el ensayo

Clasificación de las aberturas del edificio	Método 1	Método 2
Aberturas para ventilación natural	Cerradas	Selladas
Aberturas para ventilación mecánica o aire acondicionado (uso continuo)	Selladas	Selladas
Aberturas para ventilación mecánica o aire acondicionado (uso intermitente)	Cerradas	Selladas
Ventanas y puertas exteriores	Cerradas	Cerradas
Aberturas no destinadas a la ventilación	Cerradas	Selladas

3. CASOS DE ESTUDIO

Se ensayaron tres edificios según el método 1 descrito en la sección anterior. El caso 1 y 3 se ubican en la ciudad de Salto mientras que el caso 2 en la ciudad de Paysandú. En la **Tabla 2** se presentan algunas de las características constructivas de los casos considerados. En todos los casos el sistema constructivo era tradicional (mampostería de ladrillo). Vale la pena destacar además que el caso 3 contaba con una chimenea.

Tabla 2. Características de los casos de estudio

Caso	Sector	Año de construcción	Volumen (m ³)	Área de envolvente (m ²)	Área de piso (m ²)	Cantidad de plantas	Ventanas exteriores	
							Área	Tipo
1	Residencial	2018	83.0	64.3	34.6	1	9.3	A ¹
2	Servicios	1975	256	378.7	98.6	1	-	H ²
3	Servicios	1968	436	359.3	172.4	2	48.7	PVC ³ , H, A

¹ Marcos de aluminio, ² Marcos de hierro, ³ Marcos de PVC

Para los casos 1 y 3 se realizaron series de medidas de despresurización mientras que para el caso 2 se realizó una serie de medidas de despresurización y otra de presurización.

4. RESULTADOS

En todos los casos la velocidad del viento durante el ensayo fue menor a 3 en la escala Beaufort. En el caso 2 y 3 la diferencia de temperatura exterior-interior multiplicada por la altura del edificio era menor a 250 K.m mientras que para el caso 1 no se realizaron medidas de temperatura. Sin embargo, en los tres casos se logró una diferencia de presión exterior-interior a caudal cero aceptable (< 5 Pa).

En la **Tabla 3** se muestra el coeficiente de caudal C_{env} , el coeficiente de presión n y el coeficiente de correlación r^2 . En los tres casos se observa una buena concordancia entre el modelo dado por la ecuación (1) y los datos experimentales ($r^2 > 0.99$).

Para comparar la permeabilidad al aire de diferentes edificios normalmente se utiliza las renovaciones hora a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pascales. Para ello primero se debe calcular el caudal a través de la envolvente del edificio a partir de la ecuación (1) y luego se debe dividir dicho caudal por el volumen del edificio, como se muestra en las ecuaciones (5) y (6). Los resultados se muestran en la **Tabla 3**.

$$q_{50} = C_L 50^n \quad (5)$$

$$n_{50} = q_{50}/V \quad (6)$$

En donde q_{50} (m³/h) es el caudal a través de la envolvente a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pa, n_{50} las renovaciones por hora a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pa, V (m³) es el volumen interior del edificio y C_L es el coeficiente de fuga de aire el cual se calcula corrigiendo el coeficiente de caudal C_{env} como se indica en las fórmulas (7) y (8), para despresurización y presurización respectivamente.

$$C_L \cong C_{env} (T_0/T_e)^{1-n} \quad (7)$$

$$C_L \cong C_{env} (T_0/T_{int})^{1-n} \quad (8)$$

En donde T_e y T_{int} son las temperatura exterior e interior durante el ensayo (expresadas en Kelvin) y T_0 la temperatura del aire en condiciones estándar (20 °C).

Tabla 3. Resultados

Caso	Método	r ²	C _{env}	C _L	n	n ₅₀
1	D ¹	0.994	14.9	14.9	0.588	1.8
2	D ¹	0.992	594	594	0.564	21.0
2	P ²	0.998	450	450	0.649	22.8
3	D ¹	0.999	1386	1386	0.604	33.8

¹ Despresurización, ² Presurización

En caso 2, como se mencionó antes, se realizó una serie de medidas de despresurización y otra de presurización. Como se puede ver en la **Tabla 3** los resultados de ambos ensayos son muy parecidos, sin embargo en el ensayo de presurización el valor de n_{50} resultó mayor.

En la referencia [3] representan una serie de ensayos realizados sobre 32 viviendas de nueva construcción de tipo ligera (entre 2003-05) en Estonia en los cuales se realizaron series de despresurización y presurización para todos los edificios considerados. No se observó grandes diferencias entre los ensayos de presurización y despresurización y no se observó que los resultados de uno prevalezcan sobre el otro, de hecho los valores tienden a igualarse cuando la hermeticidad del edificio es alta. En ese mismo trabajo el valor mínimo medido de n_{50} fue de 0.7 h⁻¹, el valor máximo de 13.6 h⁻¹ y el valor promedio de 4.9 h⁻¹.

En la referencia [11] se presentan los resultados de 216 ensayos realizados sobre edificios del sector residencial y el sector terciario construidos en 2007 y en 2010 en Chile. Los resultados se agruparon de acuerdo a la materialidad de los muros. En el caso de muros de ladrillo se observó un valor medio de n_{50} de 11.8 h⁻¹ con una desviación estándar de 3.6 h⁻¹ para el sector residencial y una media de 13.7 h⁻¹ con una desviación estándar de 5.2 h⁻¹ para el sector terciario.

En el estándar Passivhaus se exige que n_{50} sea menor de 0.6 h⁻¹. En nuestro estudio ninguno de los casos considerado cumple con dicho estándar. El caso que más se aproxima es el 1 con $n_{50} = 1.8$ h⁻¹. Sin embargo, si bien este estándar es de amplio uso algunos países nórdicos de Europa y Estados Unidos (climas fríos) su utilización en climas templados como el de Uruguay está en discusión.

4. CONCLUSIONES

Se determinó con éxito la permeabilidad al aire de tres edificios en Uruguay de acuerdo al estándar ISO 9972:2015. El coeficiente de correlación entre los datos experimentales y el modelo propuesto por dicha normativa fue mayor a 0.99 en los tres casos.

Ninguno de los tres casos considerados cumple con lo dispuesto por el estándar Passivhaus ($n_{50} < 0.6 \text{ h}^{-1}$) pero, como se dijo anteriormente, este estándar puede ser algo rigurosos en climas templados como el de Uruguay.

Si se comparan los resultados con los del estudio realizado en Estonia [3] se observa que el valor de n_{50} del caso 1 se ubica por debajo del valor promedio (4.9 h^{-1}) mientras que los valores de n_{50} de los casos 2 y 3 se ubican bastante por encima del valor máximo (13.6 h^{-1}). Un comportamiento similar se observa si se compara los resultados con los del estudio realizado en Chile [11] para el caso de muros de ladrillos, el valor de n_{50} del caso 1 se ubica por debajo del promedio menos la desviación estándar para el sector residencial mientras que los casos 2 y 3 se ubican por encima del valor promedio más la desviación estándar para el sector terciario.

En vista de lo expuesto anteriormente se podría concluir que el nivel de permeabilidad al aire del caso 1 es bastante bueno mientras que el de los casos 2 y 3 es malo. Se recuerda que el caso 1 corresponde a una vivienda de construcción nueva con ventanas de aluminio mientras que los casos 2 y 3 son construcciones de más de 40 años con ventanas con marcos de aluminio, hierro y PVC.

La variación de los resultados obtenidos entre sí y con la bibliografía existente, muestra la necesidad de continuar con estos ensayos para poder tener un mejor entendimiento del parque edilicio nacional en este aspecto.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (2016). Final Energy Consumption in the World. Recuperado de <https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption>
- [2] International Energy Agency (2016). Final Energy Consumption in Uruguay. Recuperado de <https://www.iea.org/Sankey/#?c=Uruguay&s=Final%20consumption>
- [3] Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, 42(6), 2369-2377.
- [4] Feijó-Muñoz, J., Pardal, C., Echarri, V., Fernández-Agüera, J., Assiego de Larriva, R., Montesdeoca Calderín, M., Poza-Casado, I., Padilla-Marcos, M.A., Meiss, A. (2019). Energy impact of air infiltration in residential building in the Mediterranean area of Spain and the Canary islands. *Energy and Building*, 188, 226-238.
- [5] ISO (2015). Thermal performance of buildings – determination of the air permeability of buildings – fan pressurization method. ISO Standard 9972. Geneva: International Organization of Standardization.
- [6] d'Ambrosio Alfano, F.R., Dell'Isola, M., Ficco, G., Tassini, F. (2012). Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using fan pressurization method. *Building and Environment*, 53, 16-25.
- [7] Feijó-Muñoz, J., González-Lezcano, R.A., Poza-Casado, I., Padilla-Marcos, M.A., Meiss, A. (2019). Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain. *Building and Environment*, 148, 299-308.
- [8] Sherman, M.H. and Modera, M.P. (1986). Comparison of Measured and Predicted infiltration Using the LBL Infiltration Model. *Measured Air Leakage of Buildings*, ASTM STP 904, H.R. Trechsel and P.L. Lagus, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 325-347.
- [9] Sherman, M.H. (1987). Estimation of Infiltration from Leakage and Climate Indicators. *Energy and Buildings*, 10, 81-86.
- [10] Siddall, M. (2013). *PassivHaus*. London: Earthscan.
- [11] Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío (2014). Manual de hermeticidad al aire de edificaciones. Recuperado de http://construccionsustentable.uc.cl/images/Documentos/Manual_de_hermeticidad_al_aire_de_edificacions.pdf