

# Evaluation of discharge coefficients of large openable windows using full-scale samples in wind tunnel tests

## Evaluación de los coeficientes de descarga de grandes ventanas que se pueden abrir utilizando muestras a escala real en ensayos en túneles de viento

L. Fernandes <sup>1\*</sup>, M. Friedrich \*\*, D. Cóstola \*\*\*, E. Matsumoto \*\*\*\*, L. Labaki \*\*\*\*, F. Wellershoff \*\*

\* IMED – Passo Fundo, BRAZIL

\*\* University Hamburg – Hamburg, GERMANY

\*\*\* University of Strathclyde – Scotland, UNITED KINGDOM

\*\*\*\* State University of Campinas, UNICAMP – Campinas, BRAZIL

Fecha de Recepción: 19/06/2019

Fecha de Aceptación: 25/11/2019

PAG 203-214

### Abstract

*Discharge coefficients (C) are key input data in the evaluation of energy performance of naturally ventilated buildings. Such buildings are characterized by large openings (windows, grills, vents) for which accurate experimental data are rarely available in the literature or from manufacturers. In order to contribute with an experimental method for assessment and with new C<sub>v</sub> values from windows typically found in Brazil and Germany, this paper describes a set of experiments assessing the discharge coefficient of these windows for cross-ventilation. Experiments were carried out based on the standard BS EN 13141-1:2004 set-up in a wind-tunnel with full-scale models. The investigated sample also comprised windows whose C<sub>v</sub> values were known for the validation of the method. Results for known windows are in line with previous work. Results of discharge coefficients for innovative windows (not yet available in the literature) were found. The work reduces assumptions in natural ventilation studies, contributing to the reliability of building performance assessment.*

**Keywords:** Discharge coefficient; natural ventilation; wind-tunnel; energy performance; windows

### Resumen

Los coeficientes de descarga (C) constituyen un dato de entrada clave para la evaluación del desempeño energético de edificios con ventilación natural. Estos edificios se caracterizan por grandes aberturas (ventanas, rejillas y respiraderos), donde los datos experimentales raramente están disponibles en la literatura o por parte de los fabricantes. Con el objetivo de contribuir con un método experimental para la evaluación y nuevos valores de C<sub>v</sub> para ventanas de uso común en Brasil y Alemania, este artículo describe una serie de experimentos que evalúan el coeficiente de descarga de estas ventanas con ventilación cruzada. Se llevaron a cabo experimentos basados en la norma BS EN 13141-1:2004, configurando un túnel de viento con modelos a escala real. La muestra investigada presentó ventanas cuyos valores de C<sub>v</sub> se conocieron mediante el método de validación. Los resultados para las ventanas conocidas concuerdan con trabajos previos. Se encontraron resultados de C<sub>v</sub> para ventanas innovadoras (todavía no disponibles en la literatura). El trabajo reduce los supuestos planteados en estudios de ventilación natural, contribuyendo a la confiabilidad de las evaluaciones de desempeño de las edificaciones.

**Palabras clave:** Coeficiente de descarga; ventilación natural; túnel de viento; rendimiento energético; ventanas

## 1. Introducción

Los esfuerzos recientes para lograr una de las metas del diseño sustentable en proyectos de construcción hacen necesario estimar el comportamiento de las técnicas, materiales y componentes constructivos, con el objeto de mejorar su desempeño. Es necesario entender, calificar y cuantificar el desempeño de esos elementos y estrategias. La ventilación natural constituye una alternativa de energía térmica eficiente para lograr un ambiente cómodo y saludable. Por esta razón, se han utilizado criterios mundialmente conocidos de certificación y evaluación de desempeño, tales como LEED y BREEAM.

La preocupación respecto del diseño de un sistema de ventilación natural se asocia al concepto moderno de edificios inteligentes que se adaptan al medio ambiente y a los requerimientos de sus ocupantes (Etheridge, 2015). El proceso de diseñar edificios con ventilación natural se puede describir en cuatro etapas: (i) evaluación de la factibilidad técnica de la ventilación natural, (ii) elección de una estrategia de ventilación (por ej., ventilación en una sola fachada o de flujo cruzado), (iii) diseño técnico de las aberturas (tales como tamaño y ubicación) e (iv) investigación sobre el desempeño del sistema para que éste cumpla con el movimiento de aire interior (Etheridge, 2016).

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

IMED – Passo Fundo, BRAZIL

E-mail: luciana.fernandes@imed.edu.br



Por lo tanto, la dimensión de las aberturas en los edificios es algo que debe estudiarse en las fases preliminares del diseño. El principal parámetro a estudiar en un diseño de ventilación natural es la tasa de intercambio de aire entre el ambiente exterior e interior. Por ende, es necesario conocer la efectividad de una abertura para la ventilación. Esta propiedad se puede describir mediante el coeficiente de descarga  $C_D$ , el cual describe la relación entre: (a) el flujo real de aire y (b) el flujo máximo de aire, asumiendo que no hay disipación de energía en la abertura. El coeficiente de descarga es específico para cada tipo de abertura y depende de factores relacionados con el elemento mismo (por ej., su geometría), pero también con variables externas tales como el ángulo de incidencia del viento en la fachada. Debido a la dificultad que representa el cálculo de los valores del  $C_D$ , no se encuentran disponibles por parte del fabricante.

A pesar de todos estos factores que influyen en el  $C_D$ , gran parte de la literatura actual ha adoptado valores típicos de  $C_D$  entre 0,60-0,65 como valores por defecto para distintos tipos de ventanas, los que fueron obtenidos en experimentos de laboratorio con aberturas de bordes biselados (ASHRAE, 2009); (AWBI, 2003); (Aynsley, 1999); (Linden, 1999). Como lo señalan (Heiselberg y Sandberg, 2006), este valor no se aplica a la mayoría de las ventanas utilizadas en edificios reales y esta simplificación lleva a sobreestimar el flujo de aire cuando se utiliza en los análisis de desempeño de un edificio.

En los últimos años, los nuevos estudios sobre valores del coeficiente de descarga para ventanas han revelado variadas técnicas para su caracterización. Los valores de  $C_D$  se pueden obtener por distintas vías, tales como experimentos a pequeña escala, experimentos a escala real, simulación numérica, entre otros, los cuales se discuten en las siguientes secciones.

Con el objeto de contribuir a estos estudios sobre el desempeño energético de edificios con ventilación natural, este artículo demuestra la validación de un método para estudiar ventanas de tamaño real en un túnel de viento y además proporciona valores de  $C_D$  que hasta la fecha no se encuentran en la literatura. El método se aplica a diferentes tipos de ventanas de Brasil y Alemania y permite estudiar el desempeño de grandes aberturas ubicadas por fuera de una sección del túnel de viento. El propósito es que los datos obtenidos con este método se puedan utilizar en simulaciones del desempeño energético de edificios.

Este proyecto fue desarrollado gracias a la colaboración entre la Universidad Estatal de Campinas (Unicamp – Campinas, Brasil), la Hafencity Universität Hamburg (HCU – Hamburgo, Alemania) y los fabricantes de ventanas Lenderoth (Alemania) y MGM (Brasil). Estas empresas proporcionaron muestras de ventanas y los experimentos en túneles de viento se llevaron a cabo en Unicamp. Cabe mencionar que el objetivo de la investigación no es entregar asistencia técnica a las empresas, sino validar el método de evaluación ensayando las ventanas cuyo  $C_D$  es conocido y descubrir datos que aún no se encuentran documentados en la literatura. Estos datos resultan esenciales para respaldar una adopción segura de ventanas innovadoras en edificios con ventilación natural.

## 2. Análisis sobre los coeficientes de descarga

Los coeficientes de descarga son datos de entrada clave para evaluar el desempeño energético y la calidad del aire en interiores de edificios con ventilación natural (Karava et al., 2004). Estos edificios se caracterizan por tener grandes aberturas (ventanas, rejillas, respiraderos) en comparación con edificios sellados donde el intercambio de aire con el ambiente exterior se realiza por medio de grietas y a través de un sistema de ventilación mecánica destinado a ello. La caracterización de estas grandes aberturas en virtud de sus coeficientes de descarga resulta una tarea compleja. El coeficiente de descarga no es un valor constante (Heiselberg y Sandberg, 2006); (Wang et al., 2017), ya que depende de las propiedades de la ventana, tales como el tipo, la geometría y el área (Yi et al., 2018), así como de la presencia de mallas mosquiteras (Chu et al., 2017). También depende de factores externos como la diferencia de presión inducida por las gradientes de viento y temperatura, además de la dirección del flujo (hacia adentro/afuera) y el ángulo de incidencia del viento, la presencia de turbulencia y el número de Reynolds (Aynsley, 1999); (Cruz y Viegas, 2016); (Flourentzou et al., 1998); (Scarpa et al., 2014); (Yi; Li et al., 2019); (Yi et al., 2019). Esta combinación de factores impide una correcta evaluación de los coeficientes de descarga para ventanas grandes. El coeficiente de descarga se puede describir mediante la ecuación para orificios definida en la (Ecuación 1):

$$C_D = \frac{Q}{A} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} \quad (1)$$



Donde:

$C_D$  es el coeficiente de descarga (-)

$Q$  es el flujo de aire ( $m^3/s$ )

$A$  es el área de la abertura ( $m^2$ )

$\rho$  es la densidad del aire ( $kg/m^3$ )

$\Delta P$  es la diferencia de presión estática (Pa)

Los métodos para evaluar el coeficiente de descarga en aberturas para ventilación cruzada impulsada por el viento se han desarrollado a base de métodos empíricos, ensayos en túnel de viento, mediciones en edificios reales, pruebas de laboratorio y simulaciones numéricas utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) (Karava et al., 2004). Las bases de datos generadas por estos métodos para geometrías de ventanas comunes ayudan a los profesionales a adoptar valores de coeficientes de descarga. Estos datos se pueden encontrar en manuales y normativas sobre simulaciones del desempeño de edificios, libros de texto sobre ventilación (Allard y Santamouris, 1998); (Etheridge, 2012); (Tamura y Yoshie, 2016) y artículos científicos (Aynsley, 1999); (Belleri et al., 2014); (Chiu y Etheridge, 2007); (Chu et al., 2009); (Iqbal et al., 2015).

Una de las principales bases de datos de  $C_D$  fue desarrollada durante una larga serie de experimentos realizada por Idel'chik (1966). Esta base de datos incluye datos sobre coeficientes de resistencia del flujo ( $\zeta$ ) de elementos hidráulicos (tuberías y ductos), dispositivos para intercambio de calor, ventilación (diferentes tipos de configuración de ventanas), entre otros, los que se utilizan para calcular líneas hidráulicas. Una mayor resistencia del flujo disminuye el flujo y, por ende, el coeficiente de descarga también disminuye. Por lo tanto, el  $C_D$  se puede calcular en base a  $\zeta$  con la (Ecuación 2). Los datos relacionados con los coeficientes de resistencia del paso del caudal a través de los orificios se obtienen a través de ecuaciones de cálculo, datos experimentales y fórmulas teóricas. Sin embargo, mientras el coeficiente de descarga de los orificios depende de la distribución de la velocidad y del número de Reynolds, el de las ventanas depende de los parámetros geométricos y del flujo de aire que pasa a través de ellas (Heiselberg y Sandberg, 2006).

$$C_D = \sqrt{\frac{1}{\zeta}} \quad (2)$$

A pesar de la variedad de datos asociados a la caracterización de configuraciones de aberturas y ventanas, actualmente existen muchos otros tipos de ventanas que deben ser investigados. Según una revisión realizada por (Chen, 2009), los modelos a escala real y a pequeña escala se han utilizado para validar modelos analíticos, empíricos o numéricos con el fin de estudiar el desempeño de la ventilación en edificios, donde ambos están sujetos a aproximaciones de condiciones de frontera y geometría de flujo. Los modelos numéricos más utilizados son los CFD, pero aún hay trabajo pendiente si se quiere obtener resultados confiables para este método (Chen 2009); (Karava et al., 2004).

La geometría y los detalles de las ventanas reales que vemos en los edificios influyen en su desempeño con respecto a la ventilación; por lo tanto, la evaluación en el laboratorio de ventanas de tamaño real resulta un método más adecuado (Ohba et al., 2004). Muchos de los tipos de ventanas que se utilizan actualmente en los edificios no se caracterizan en relación a su  $C_D$ . Este hecho obliga a quienes realizan simulaciones de desempeño de edificios a usar valores genéricos que se encuentran en las bases de datos disponibles en la literatura. El uso de estos valores genéricos aumenta la incerteza en los resultados de la simulación (Chiu y Etheridge, 2007), lo que eventualmente compromete la adopción de soluciones de ventilación natural en el diseño de edificios. Por consiguiente, algunos esfuerzos recientes se han enfocado en reducir las incertezas al predecir la ventilación natural en las construcciones (Lamberti y Gorré, 2018), (Shirzadi et al., 2018). Dada la popularidad de los modelos CFD para la simulación del desempeño de edificios y la existencia de una clara necesidad de datos empíricos de  $C_D$  que alimenten las bases de datos, este artículo contribuye a la creación de una base de datos de valores de  $C_D$  y de un método para esta caracterización.

### 3. Materiales y método

Esta sección comienza con una descripción técnica del túnel de viento utilizado para las mediciones, seguida por los detalles de las muestras de ventanas de Brasil y Alemania. En la tercera sección se detalla la configuración del experimento para realizar las mediciones de diferencia de presión y velocidad del aire.

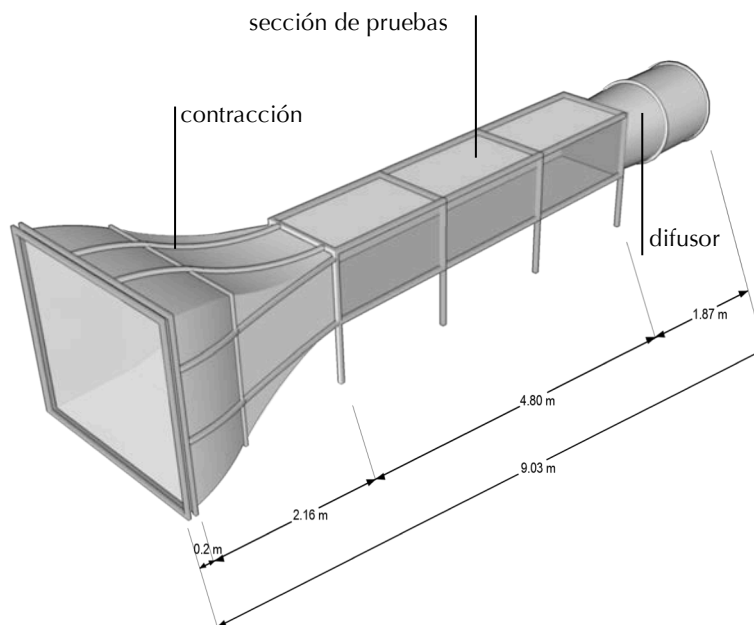


### 3.1 Túnel de viento

Con el fin de evitar los errores debidos a la compleja geometría de las ventanas, las mediciones se realizaron directamente en las ventanas reales instaladas en la entrada de un túnel de viento. La configuración se basa en la norma BS EN 13141-1:2004 (BSI, 2004), la cual otorga recomendaciones para medir la tasa de flujo del caudal a través de las aberturas. Se utiliza un túnel de viento lineal de circuito abierto de 9,03 m de largo, con una sección de pruebas de 4,8 m de largo (dentro de la distancia mínima entre la entrada y la salida de 0,5 m requerida por la norma). La sección transversal se reduce aproximadamente seis veces desde la entrada ( $4,2 \text{ m}^2$ ) para disminuir la turbulencia y para que el flujo se vuelva laminar, resultando en un área transversal de  $0,72 \text{ m}^2$ . La parte superior de la sección de pruebas se puede ajustar para regularizar la presión estática a lo largo de ella. Por último, el aire pasa a través de un difusor de 1,25 m de diámetro (Figura 1) y (Figura 2).



**Figura 1.** Vista del túnel de viento. A la izquierda, el cono donde el aire ingresa succionado por el ventilador de la derecha.



**Figura 2.** Componentes y dimensiones del túnel de viento.



Las ventanas se instalan en un tablero de MDF colocado en la sección de entrada del túnel de viento (Figura 3). El tablero de 15 mm de espesor es suficientemente rígido para evitar las vibraciones inducidas por el flujo de aire, pero no es tan grueso como una pared que pueda interferir con las mediciones.



**Figura 3.** Tablero colocado en la entrada del túnel de viento con un orificio de 40 x 40 cm.

### 3.2 Muestras de ventanas

El primer paso del experimento es validar el método, utilizando como referencia el trabajo de (Idel'chik, 1966) mencionado anteriormente. Con este propósito, se ensayaron algunas aberturas con  $C_D$  conocido: un orificio de 40 x 40 cm (Figura 3) y cinco ventanas adicionales. En total, se ensayaron siete ventanas para este estudio. Las fotos correspondientes se muestran en la (Tabla 1) y la (Tabla 2) de acuerdo a: tipo (nombre comercial o mecanismo de abertura), denominación (cómo se les llama en este artículo), área nominal y breve descripción sobre su funcionamiento.




La ventana proyectante (A) permite controlar el flujo de aire y en Brasil se utiliza generalmente para la ventilación de baños. El tipo guillotina (B) otorga una ventilación permanente y no se puede ajustar. Los tipos "veneciana" (C y D) se utilizan normalmente para iluminar y ventilar dormitorios y salas de estar en Brasil; los dos tipos de "veneciana" estudiados tienen 6 hojas: dos hojas fijas sin ranuras para que entre el aire, dos hojas correderas con vidrio y dos hojas correderas con ranuras para ventilación, las cuales diferencian ambos tipos de "veneciana". La ventana (C) tiene "lamas" ajustables para que entre el aire, mientras que el tipo "perforada" (D) tiene pequeños agujeros que permiten una ventilación permanente y no es ajustable.

**Tabla 1.** Descripción de las ventanas brasileñas ensayadas en el túnel del tiempo.

	Foto	Detalles
A	 <p>(a) (b)</p>	<p><b>Tipo</b> Máximo ar (Proyectante-deslizante)</p> <p><b>Denominación</b> (a) Proyectante 45° (b) Proyectante 90°</p> <p><b>Área Nominal</b> 0,16 m<sup>2</sup></p> <p><b>Descripción</b> Ventana proyectante hacia el exterior</p>
B		<p><b>Tipo</b> Boca de Lobo Fijo (Guillotina)</p> <p><b>Denominación</b> Guillotina</p> <p><b>Área Nominal</b> 0,16 m<sup>2</sup></p> <p><b>Descripción</b> Dos hojas paralelas, apertura permanente, espacio entremedio</p>
C		<p><b>Tipo</b> Veneciana Eco Flex</p> <p><b>Denominación</b> Celosía con lamas</p> <p><b>Área Nominal</b> 1,20 m<sup>2</sup></p> <p><b>Descripción</b> Paneles correderos con lamas ajustables</p>
D		<p><b>Tipo</b> Veneciana</p> <p><b>Denominación</b> Celosía perforada</p> <p><b>Área Nominal</b> 1,20 m<sup>2</sup></p> <p><b>Descripción</b> Paneles correderos perforados</p>



**Tabla 2.** Descripción de las ventanas alemanas ensayadas en el túnel de viento.

Foto		Detalles
E		<b>Tipo</b> PAF o Ventana paralela
		<b>Denominación</b> Paralela
		<b>Área Nominal</b> 1,00 m <sup>2</sup>
		<b>Descripción</b> Apertura paralela ajustable
F		<b>Tipo</b> DKF o Ventana oscilo-batiente
		<b>Denominación</b> Oscilo-batiente
		<b>Área Nominal</b> 1,00 m <sup>2</sup>
		<b>Descripción</b> Bisagra inferior, se desplaza hacia el interior
G		<b>Tipo</b> Ventana de techo
		<b>Denominación</b> Techo
		<b>Área Nominal</b> 1,00 m <sup>2</sup>
		<b>Descripción</b> Bisagra superior, se desplaza hacia el exterior

La apertura paralela (E) se puede ajustar para controlar el flujo de aire que pasa a través de ella. El mecanismo de apertura de la ventana oscilo-batiente (DKF) permite que la hoja se fije en la bisagra inferior o lateral. En este experimento se estudió la ventana con bisagra inferior. La ventana para techos (G) también se usa en edificios residenciales, principalmente para la iluminación y ventilación natural de mansardas o desvanes. Por lo general, se instala en techos inclinados de edificios residenciales. En estos experimentos, la ventana se instaló verticalmente y en el análisis se consideró con bisagra superior. Todas las ventanas alemanas presentadas en este estudio son de triple vidrio, lo que implica que la construcción del marco es compleja y éste debe ser resistente.

### 3.3 Mediciones de la diferencia de presión y la velocidad del aire

La diferencia de presión se midió a través de orificios ubicados en todo el perímetro exterior del tablero de la ventana a ras con la fachada (Figura 4) y (Figura 5) y en la superficie interior de las paredes del túnel de viento (Figura 6). Una configuración similar es descrita en el trabajo de (Chu et al., 2009). (Chiu y Etheridge, 2007) sugieren que las tomas de presión deben colocarse suficientemente lejos de la ventana como para que el flujo que pasa a través de la ventana no influya en la presión, pero lo suficientemente cerca como para minimizar el efecto de no uniformidad en el campo de presión. En consecuencia, las tomas de presión exteriores se distribuyeron de manera uniforme, siguiendo el mismo patrón en todas las mediciones: a 10 cm de los bordes de las ventanas y entre sí. Las distancias entre los bordes del tablero y los bordes de las ventanas fueron mayores a 0,3 m.

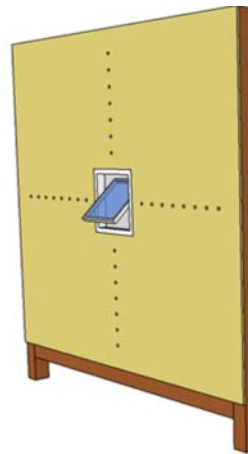


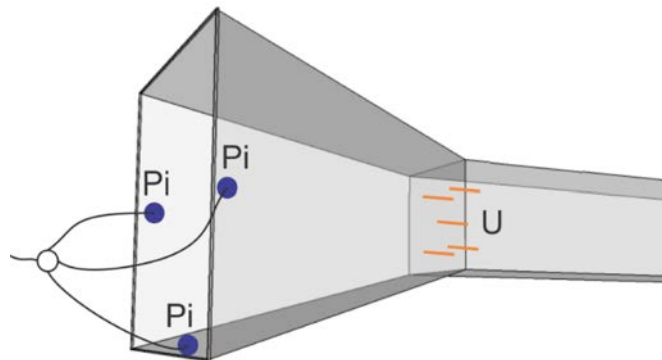
Figura 4. Esquema de la distribución de las tomas de presión en el perímetro de la ventana.



Figura 5. Tablero con una muestra de ventana y las tomas de presión a la izquierda.



Las tomas de presión interiores se instalaron en las superficies de la sección de contracción del túnel de viento (Figura 6) y se ubicaron detrás del tablero a media altura de la superficie vertical y a la mitad del ancho de la superficie horizontal. Todas las tomas estaban conectadas a un escáner de presión Pressure Systems modelo 16TC/DTC con 64 canales y al módulo de adquisición de datos DTC Initium.



**Figura 6.** Esquema de las tomas de presión y los sensores de velocidad dentro del túnel de viento.

Los anemómetros de hilo caliente se distribuyeron de manera uniforme a través de la sección de prueba para medir la velocidad media del aire. El set incluye un sistema multicanal CTA de Dantec Dynamics y un módulo para la adquisición de datos de National Instruments, modelo BNC-2110.

Las pruebas se realizaron con diferentes velocidades del ventilador y en todos los casos se obtuvo un flujo turbulento totalmente desarrollado. En virtud de que los resultados se obtuvieron independientemente del número de Reynolds, este artículo solo reporta los valores obtenidos a velocidad máxima. Los datos se registraron a una frecuencia de 330 Hz. Para evitar errores derivados de las fluctuaciones, se utilizaron los datos promedio para cada velocidad del ventilador.

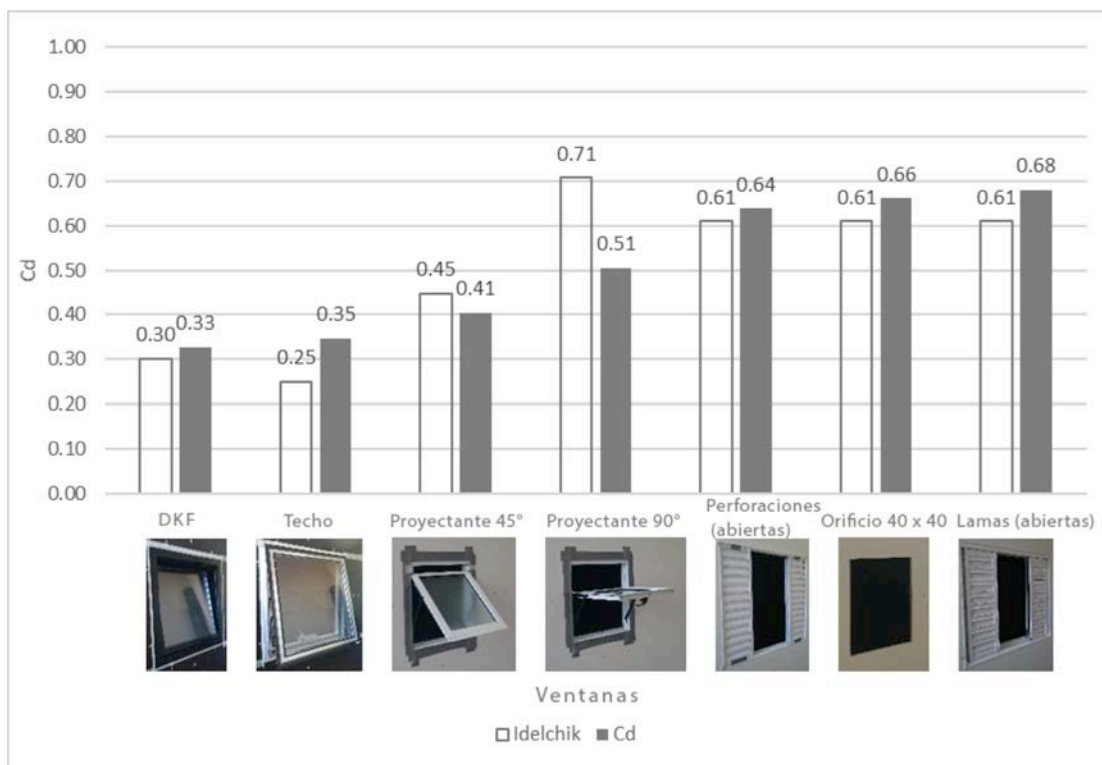
## 4. Resultados y discusión

Los coeficientes de descarga se calcularon mediante la ecuación para orificios a partir de los valores medidos de las diferencias de presión y los flujos de aire calculados. Como es difícil calcular el flujo de aire a través de las complicadas geometrías de las ventanas, se producen grandes incertezas (Heiselberg et al., 2001). Por consiguiente, para calcular el coeficiente de descarga se utilizó el área nominal de las ventanas en vez del área geométrica de las ventanas. Esta simplificación también facilita la entrada de datos para la simulación computacional y el  $C_D$  calculado ya toma en consideración la peculiaridad de la geometría. Los resultados se clasificaron en dos grupos: el primero representa la validación del método y los valores son comparados con datos de (Idel'chik, 1966). El segundo grupo presenta valores del coeficiente de descarga de ventanas que no se encuentran en la literatura.

En relación con el primer grupo (Figura 7), la mayoría de los valores son levemente superiores a los proporcionados en la literatura. Las ventanas denominadas "perforadas" (abiertas), "orificio" y "lamas" (abiertas) se compararon con orificios con bordes biselados. Sin embargo, es necesario aclarar que las ventanas ensayadas aquí no tenían bordes biselados, lo que sin duda constituye una diferencia con respecto a los orificios con bordes biselados en la literatura. El  $C_D$  de las ventanas ensayadas aquí es entre un 5% y un 12% más alto que el señalado en la literatura.

Las ventanas "oscilo-batientes o DKF" y "techo" se compararon con ventanas de celosía de una sola hoja con bisagra superior. El  $C_D$  de estas ventanas es un 9% y un 39% más alto, respectivamente, que el indicado en la literatura. Aquí también se espera que presenten valores diferentes a los que refiere la literatura. La "DKF" es una ventana con bisagra inferior que se abre hacia adentro y la ventana geoméricamente comparable encontrada en (Idel'chik, 1966) es una ventana de celosía de una sola hoja con bisagra superior que se abre hacia afuera. Por ende, se espera que haya algunas diferencias entre nuestros resultados y los resultados disponibles en la literatura.

Los valores de  $C_D$  para las ventanas proyectantes ( $45^\circ$  y  $90^\circ$ ) están subestimados. Ambas tienen hojas de un solo vidrio, pero su geometría es compleja, ya que posee bisagras laterales, lo que interfiere con el flujo de aire hacia el interior. Además, estas se abren de una manera levemente distinta a los ejemplos extraídos de Idel'chik. La hoja no tiene las bisagras exactamente en el centro, se desliza desde la parte superior del bastidor sostenida por las bisagras (Tabla 1), figuras (a) y (b)). Esto significa que su posición en el bastidor difiere de la presentada por Idel'chik. Considerando que la hoja obstruye el flujo de aire hacia el interior (Hult et al., 2012), también es esperable obtener resultados diferentes a los de la literatura.



**Figura 7.** Comparación de los valores del coeficiente de descarga calculados y los señalados en la literatura.

Los resultados del segundo grupo, cuyos valores de  $C_D$  no se encuentran en la literatura, se indican en la (Figura 8). La ventana con “perforaciones” (cerradas) se asemeja a una plancha perforada en una superficie rugosa, pero las perforaciones apuntan hacia abajo, lo que constituye un obstáculo para el aire que entra. Por lo tanto, esta presentó los menores valores de  $C_D$  (0,06). La ventana con “lamas” también tiene una superficie corrugada, pero tiene espacios más grandes que la ventana “perforada”. Tal como se esperaba, obtuvo un valor de  $C_D$  más alto (0,24). El paso del flujo de aire en la ventana “guillotina” es similar a una ventana rectangular. Sin embargo, sus hojas fijas paralelas obstruyen el flujo de aire, lo que las lleva a un valor bajo de  $C_D$  de 0,13. En resumen, es esperable que los resultados para estas tres ventanas sean más bajos que los del primer grupo, con respecto a su geometría y área efectiva de ventilación. Considerando que el valor de  $C_D$  para un orificio con bordes biselados es de alrededor de 0,61, resulta interesante destacar que la ventana paralela “PAF” presenta un  $C_D=0,55$ , un valor alto que indica bajos niveles de disipación de energía en este tipo de geometría de ventanas.



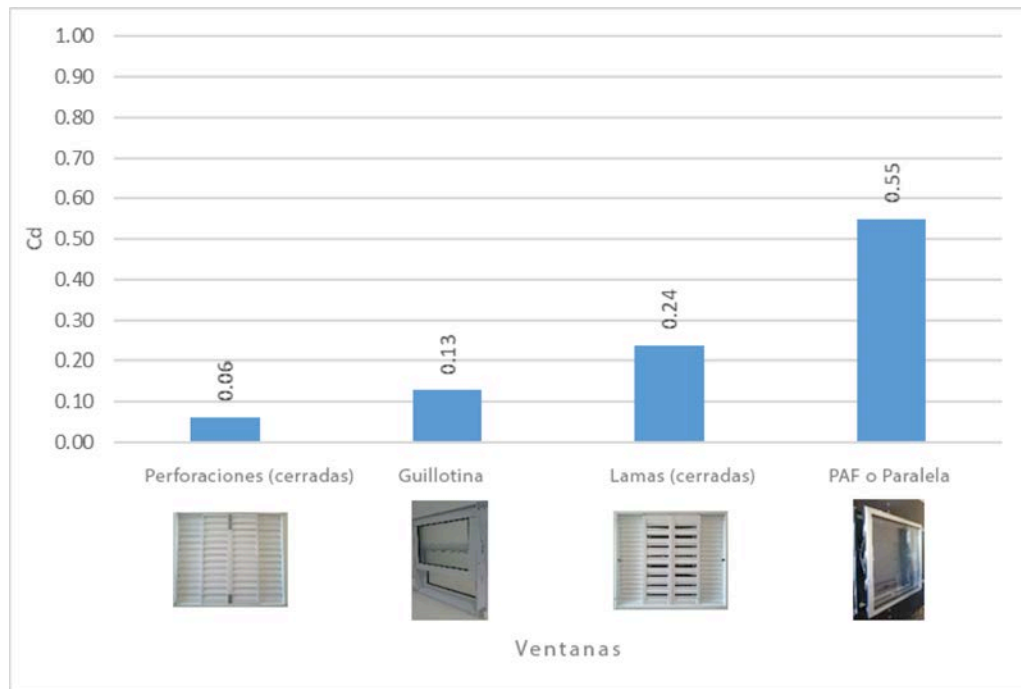


Figura 8. Coeficientes de descarga calculados para ventanas que no se encuentran en la literatura.

## 5. Conclusiones

Este trabajo describe un método para evaluar los coeficientes de descarga en ventanas a escala real, presentando valores anteriormente desconocidos para diferentes tipos de ventanas de uso común en Brasil y Alemania. El coeficiente de descarga es un dato de entrada clave para las simulaciones constructivas destinadas a evaluar el desempeño de los edificios con ventilación natural. Cuando se desconoce el coeficiente de descarga para un tipo de ventana determinado, el usuario del software de simulación debe asumir este importante dato de entrada. Obviamente, este método perjudica la confiabilidad del análisis. El objetivo de este artículo es ayudar a quienes realizan la simulación energética de edificios a obtener resultados más precisos en el análisis del desempeño de la ventilación de los edificios.

Considerando los supuestos adoptados en este trabajo, el método descrito fue validado mediante la comparación de los resultados de experimentos realizados con datos disponibles en la literatura. Las limitaciones y principales conclusiones se detallan a continuación:

- El experimento se limita a estudiar los valores de  $C_D$  para ventanas con ventilación cruzada. De estudios anteriores se sabía que la ventilación en una sola fachada devaluaría valores diferentes.
- Respecto de algunas de las ventanas ensayadas, no se encuentran tipos de ventanas comparables en la literatura. No obstante, existen construcciones similares que permiten hacerse una idea de la magnitud del  $C_D$ . A pesar de las diferencias encontradas entre los resultados y los valores de referencia, los resultados están en línea con la literatura, tomando en cuenta lo que se sabe sobre los fenómenos físicos de la mecánica de fluidos a través de aberturas.
- Los experimentos de laboratorio son costosos, pero entregan resultados precisos. Dada la popularidad de los modelos matemáticos para la simulación de fluidos, es necesario verificar estos modelos con datos confiables de experimentos.
- Se requieren mayores estudios sobre el desempeño de las aberturas, considerando las ventanas para ventilación en una sola fachada y el uso de mallas en Brasil, cuyas condiciones climáticas exigen ventilación natural para darle comodidad térmica a los usuarios y al mismo tiempo evitar el ingreso de insectos.

## 6. Agradecimientos

Esta investigación fue parcialmente financiada por CAPES, Fundação Meridional y DAAD. Los autores también quisieran reconocer el apoyo de GIZ y agradecer a las empresas Christophe Lenderoth GmbH y MGM por las muestras de ventanas proporcionadas para su ensayo en el túnel de viento. Asimismo, los autores agradecen a Felipe da Silva Duarte Lopes y Beatriz Arantes por su apoyo en la configuración de los experimentos y a Klaus Schweers por el análisis y cálculo del flujo de aire.

## 7. Referencias

- Allard, F.; Santamouris, M. (Eds.). (1998). *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. London: James & James Ltd.
- ASHRAE. (2009). *Handbook of fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE).
- Awbi, H. B. (2003). *Ventilation of Buildings*. London: Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203476307>.
- Aynsley, R. (1999). Unresolved issues in natural ventilation for thermal comfort. In *First International One day Forum on Natural and Hybrid Ventilation*. Retrieved from <http://www.hybvent.civil.aau.dk/puplications/report/aynsley.pdf>
- Belleri, A.; Lollini, R.; Dutton, S. M. (2014). Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance. *Building and Environment*, 81, 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.009>.
- BSI. (2004). *BS EN 13141-1: Ventilation for buildings - Performance testing of components/products for residential ventilation - Part 1: Externally and internally mounted air transfer devices*. London: BSI.
- Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44(4), 848–858. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025>.
- Chiu, Y. H.; Etheridge, D. W. (2007). External flow effects on the discharge coefficients of two types of ventilation opening. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(4), 225–252. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.06.013>
- Chu, C.; Lan, T.; Tasi, R.; Wu, T.; Yang, C. K. (2017). Wind-driven natural ventilation of greenhouses with vegetation. *Biosystems Engineering*, 164, 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.008>.
- Chu, C. R.; Chiu, Y. H.; Chen, Y. J.; Wang, Y. W.; Chou, C. P. (2009). Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation. *Building and Environment*, 44(10), 2064–2072. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.012>.
- Cruz, H.; Viegas, J. C. (2016). On-site assessment of the discharge coefficient of open windows. *Energy and Buildings*, 126, 463–476. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.051>
- Etheridge, D. (2012). *Natural ventilation of buildings: theory, measurement and design*. UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Etheridge, D. (2015). A perspective on fifty years of natural ventilation research. *Building and Environment*, 91, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033>
- Etheridge, D. (2016). *Design Procedures for Natural Ventilation*. In Y. Tamura & R. Yoshie (Eds.), *Advanced Environmental Wind Engineering* (pp. 1-24). Beijing: Springer
- Flourentzou, F.; Van der Maas, J.; Roulet, C. A. (1998). Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. *Energy and Buildings*, 27(3), 283–292. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00043-1).
- Heiselberg, P.; Sandberg, M. (2006). Evaluation of Discharge Coefficients for Window Openings in Wind Driven Natural Ventilation. *International Journal of Ventilation*, Volume 5, (1), 43-52. <https://doi.org/10.1080/14733315.2006.11683723>.
- Heiselberg, P.; Svdt, K.; Nielsen, P. V. (2001). Characteristics of airflow from open windows. *Building and Environment*, 36, 859–869. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00012-9).
- Hult, E. L.; Laccarino, G.; Fischer, M. (2012). Using Cfd Simulations To Improve Thermal modeling of window Discharge Coefficients. In *Proceedings of SimBuild 2012 Fifth National Conference of IBPSA-USA*, Madison, WI. (pp. 322–328).
- Idel'chik, I. E. (1966). *Handbook of Hydraulic Resistance, Coefficients of Local Resistance and of Friction*. Jerusalem: Monson.
- Iqbal, A.; Afshari, A.; Wigö, H.; Heiselberg, P. (2015). Discharge coefficient of centre-pivot roof windows. *Building and Environment*, 92, 635–643. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.034>.
- Karava, P.; Stathopoulos, T.; Athienitis, A. K. (2004). Wind Driven Flow through Openings – A Review of Discharge Coefficients. *International Journal of Ventilation*, 3(3), 255–266. <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683920>.
- Lamberti, G.; Gorlé, C. (2018). Uncertainty quantification for modeling night-time ventilation in Stanford's Y2E2 building. *Energy and Buildings*, 168, 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.022>.
- Linden, P.F. (1999). *The fluid Mechanics*. Annual. Review of Fluid Mechanics. V 31. Pp.201–38 <https://doi.org/0066-4189/99/0115-0201>.
- Ohba, M.; Kurabuchi, T.; Tomoyuki, E.; Akamine, Y.; Kamata, M.; Kurahashi, A. (2004). Local Dynamic Similarity Model of Cross-Ventilation Part 2 - Application of Local Dynamic Similarity Model. *International Journal of Ventilation*, 2 (4), 383–394. <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683680>.
- Scarpa, M.; Mazzali, U.; Peron, F. (2014). Modeling the energy performance of living walls: Validation against field measurements in temperate climate. *Energy and Buildings*, 79, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.014>.
- Shirzadi, M.; Mirzaei, P. A.; Naghashzadegan, M. (2018). Development of an adaptive discharge coefficient to improve the accuracy of cross-ventilation air flow calculation in building energy simulation tools. *Building and Environment*, 127 (July 2017), 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.019>.
- Tamura, Y.; Yoshie, R. (Eds.). (2016). *Advanced Environmental Wind Engineering*. Beijing: Springer.
- Wang, J.; Wang, S.; Zhang, T.; Battaglia, F. (2017). Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations. *Energy & Buildings*, 139, 762–779. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.070>.
- Yi, Q.; Li, H.; Wang, X.; Zong, C. (2019). Numerical investigation on the effects of building configuration on discharge coefficient for a cross-ventilated dairy building model. *Biosystems Engineering*, 182, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.003>.
- Yi, Q.; Wang, X.; Zhang, G.; Li, H.; Janke, D.; Amon, T. (2019). Assessing effects of wind speed and wind direction on discharge coefficient of sidewall opening in a dairy building model – A numerical study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162 (April), 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.016>.
- Yi, Q.; Zhang, G.; König, M.; Janke, D.; Hempel, S.; Amon, T. (2018). Investigation of discharge coefficient for wind-driven naturally ventilated dairy barns. *Energy & Buildings*, 165, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.038>.

