

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DEL NIVEL DE INFILTRACIONES DE AIRE EN SISTEMAS HVAC/R.

Experimental determination and results of air infiltrations in HVAC/R systems.

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del estudio experimental realizado para estimar las fugas ó infiltraciones de aire en un local climatizado. Esta información es de gran utilidad en el cálculo de carga térmica en edificios y/o sistemas de refrigeración, para estimar la influencia de este parámetro en el balance térmico del recinto y su nivel de sellamiento. El estudio, se realiza sobre un banco de pruebas diseñado para recrear el comportamiento térmico de un local (recinto de prueba), inmerso dentro de un edificio, con sólo una pared exterior (fachada donde se ubica la ventana) sometida a condiciones climáticas reales registradas durante un año de mediciones.

NÉSTOR FONSECA DIAZ

Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
nfonseca@utp.edu.co

JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira

PALABRAS CLAVES: Infiltraciones, Fugas, Estudio experimental.

ABSTRACT

This article presents the results of the experimental study performed to obtain the leakage or infiltrations of air into a conditioned enclosure. This information is very important considering that could be useful to calculate the thermal load of the building and/or refrigeration systems in order to estimate the influence of this parameter on the conditioned space thermal balance. The study is performed on a test-bench specially designed to simulates the thermal behavior of an office, with a single wall exposed to outside climatic conditions where a window is located, the variables involved in the thermal balance of the window are monitored each minute, during one year.

KEYWORDS: *Infiltrations, Leakage, Experimental study.*

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo está enmarcado dentro de un proyecto de investigación, cuyo objetivo principal es desarrollar un banco de pruebas para ensayo de componentes térmicos en sistemas HVAC/R.

Inicialmente, se desarrolla una etapa de instrumentación y puesta en marcha de un banco de pruebas a escala natural. Este permite simular el comportamiento térmico de un local inmerso dentro de un edificio, con sólo un muro y ventana expuestos al ambiente exterior.

Se realizan básicamente dos tipos de experiencias: con calefacción (otoño, invierno) y sin calefacción (verano, primavera). En ellas se modificaron alternativamente algunas condiciones del banco de ensayos, como el tipo de elemento de protección en la ventana e inercia térmica del recinto.

Se consideran dos tipos de experiencias:

- Con temperatura interior mínima constante (situación típica de invierno y otoño)
- Con temperatura interior variando libremente (condiciones de verano y primavera)

Se espera de esta manera, obtener resultados representativos de una amplia gama de situaciones con las cuales analizar el comportamiento térmico del banco, respecto a su entorno, en especial el clima y elementos de protección interior utilizados en la ventana [1,2,3].

En el balance de calor sobre el recinto de ensayo las cargas térmicas mas representativas son los flujos de calor a través las paredes interiores, fachada y ventana además del efecto térmico de las fugas o infiltración de aire. Como se requiere un nivel bajo de infiltraciones considerando que se trata de enfocar los esfuerzos sobre lo que ocurre en la ventana y fachada, inicialmente se decidió sellar la cámara para minimizar el ingreso del aire exterior por las rendijas de la construcción. Como el resultado obtenido no fue satisfactorio, se decidió usar un sistema de impulsión de aire exterior, cuyo objetivo principal es medir la renovación del aire e impedir que fluctúe sin control. En este trabajo, se describe el procedimiento usado para determinar el nivel de sello de la cámara y las variables que influyen sobre su comportamiento [4,5].

Para reducir al máximo el efecto de las infiltraciones de aire en el balance termico de la camara, se cuenta con un

sistema de impulsión de aire exterior, con el cual se mantiene el recinto de prueba en sobrepresión mediante la inyección de un pequeño flujo de aire exterior. De esta forma, se puede controlar y medir la cantidad de aire exterior que ingresa al recinto e incluirlo como dato del problema. El flujo de aire inyectado en la cámara se fija en 0,02 kg/s, lo que implica infiltraciones del orden de 0,65 ren/h. Con esto, se logra (mediante el sello previo de la cámara) mantener una diferencia de presiones de 25 Pa, adecuada para este tipo de experiencias.

2. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS.

Se pretende recrear el comportamiento térmico de un local (recinto de prueba), inmerso dentro de un edificio, con sólo una pared exterior (fachada donde se ubica la ventana). En general, el diseño del banco de ensayos busca hacer que el intercambio de calor a través de la ventana sea significativamente mayor a los demás flujos de calor presentes en balance térmico del recinto, aumentando así la precisión en el balance térmico de la ventana. Para lograr este objetivo se implementan las siguientes medidas en su diseño:

Como se tienen intercambios de calor por radiación y convección y ambos son del mismo orden de magnitud, de la teoría de modelos se sabe que este problema no se puede trabajar a escala reducida, por lo tanto se construye el banco de ensayos a escala natural (1:1) (Figura 1).

La ubicación y orientación del banco de ensayos, elimina el efecto de sombra de otras construcciones y permite una mayor incidencia de la radiación solar sobre el recinto. Para simular los recintos adyacentes calefaccionados en un edificio, las paredes interiores incluso el techo y el piso, se encuentran rodeadas por un espacio de aire o entrecámara que simula los recintos adyacentes acondicionados. En ella, se hace circular aire mediante ventiladores y se controla su temperatura para que sea la misma del local, minimizando de esta forma las pérdidas de calor hacia la entrecámara y el efecto de la radiación solar. Además se obtiene una temperatura bien definida, que se utiliza como variable de entrada para el modelo matemático.

Para lograr un mayor flujo de calor por el panel de la fachada, este se compone de un tabique de madera con solo 5 cm de poliestireno expandido como aislante, mientras que las paredes interiores y exteriores de la entrecámara se aíslan con 9 cm.

Se cuenta con un sistema de impulsión de aire exterior, con el cual se mantiene el recinto de prueba en sobre presión, mediante la inyección de un pequeño flujo de aire exterior. De esta forma, se puede controlar y medir la cantidad de aire exterior que ingresa al recinto e ingresarlo como dato al problema.

El diseño del banco de ensayos permite finalmente, la modificación del tipo y tamaño de la ventana, así como las características del muro de la fachada y capacidad térmica en el interior del recinto. Esto se logra, mediante la implementación de un panel modular en la fachada que permite su fácil remoción, así como un sistema de fijación que permite instalar capas adicionales de diferentes materiales en el muro de fondo y el piso.

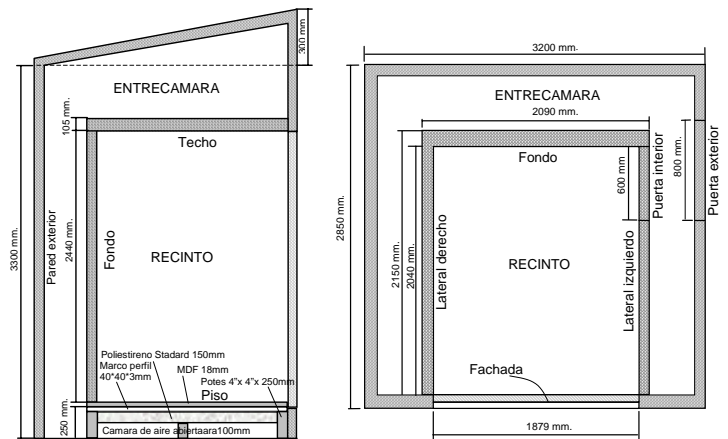


Figura 1. Planos y fotografía del banco de ensayos

En la segunda columna de la Tabla 1, se muestra el consumo total de energía de calefacción, normalizado por la diferencia de temperatura interior y exterior, para cada tipo de configuración en la ventana. En las demás columnas, se muestra el porcentaje de cada una de las pérdidas respecto a este valor.

Tabla 1 Consumo de calefacción y porcentaje equivalente de cada carga termica

Tipo protección	Q calefacción [Wh/°C]	Q ventana %	Q pared ex %	Q infiltraciones %	Q pared int %
SIN	49,2	30,16	42,54	16,30	10,99
PERSIANA	54,96	29,11	50,16	18,55	2,14
CORTINA	73,45	45,58	36,71	14,96	2,73
PLACA	58,73	23,48	52,90	14,43	9,17

Como era de esperarse, gracias al diseño experimental planteado, en general para los cuatro casos de protección en la ventana, las pérdidas más grandes ocurren a través del muro exterior y la ventana. Las pérdidas debidas al aire infiltrado varían relativamente poco: entre un 14 y 19%. Finalmente, las más bajas ocurren a través en las paredes interiores en el caso de la persiana y la cortina, siendo del orden del 3%.

3. MEDICIÓN DE INFILTRACIONES

Como medida de verificación, se determina en esta sección el nivel de infiltración de aire exterior cuando el sistema de impulsión de aire exterior no opera. Es decir la condición real en una vivienda, para determinar de esta forma, el nivel de sello de la cámara.

Para esta medición, se contaminó el interior de la cámara con monóxido de carbono (CO), el cual presenta las siguientes características:

- Densidad cercana a las del aire
- Se mezcla en forma relativamente homogénea con el aire.
- Permite detectar fácilmente su concentración.
- No reacciona químicamente con el aire ambiente ni es absorbido por las superficies.
- De relativamente baja concentración en el ambiente.

Luego, se mide la variación de su concentración en el tiempo, para calcular el flujo de aire que ingresa a la cámara como ventilación por los orificios. El flujo de aire de infiltración, se establece con base en el balance de masa sobre el recinto, el método propuesto es desarrollado en [6].

Balance de masa

En la Figura 2, se muestra un esquema de los flujos de masa de aire y concentraciones de contaminante dentro del recinto.

La velocidad de variación de la masa de contaminantes en el interior del recinto (C), correspondiente al esquema mostrado en la Figura 2, puede ser expresada como

$$C = A - B$$

Donde:

- A: masa de contaminantes que entra
- B: masa de contaminantes que sale

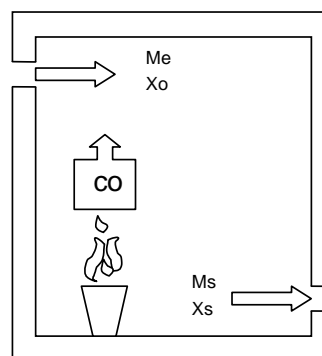


Figura 2. Esquema flujos de aire y concentración de contaminates en la camara

Reemplazando los valores de A, B y C por sus ecuaciones constitutivas se tiene:

$$MX_0 + G - MX_s = V \frac{dX}{dt} \tag{1}$$

Donde :

X: concentración de contaminante en el interior del recinto [mg/m³]

X₀: concentración de contaminante del aire que ingresa al recinto [mg/m³]

M: flujo de aire de ventilación [m³/s]

G: flujo de contaminante generado en el recinto [mg/s]

V: volumen del recinto [m³]

t: tiempo [s]

Reagrupando se tiene:

$$dX = \frac{M(X_0 - X) + G}{V} dt \tag{2}$$

$$dt = \frac{V}{M(X_0 - X) + G} dX \tag{3}$$

Si se efectúa la integración, considerando que a un tiempo t₁ se tiene una concentración X₁ (en el interior) y en un t₂ una concentración X₂, se tiene despejando X₂ la siguiente ecuación:

$$X_2 = X_0 + \frac{G(1 - e^{-(M/V)(t_2-t_1)}) + Me^{-(M/V)(t_2-t_1)}(X_1 - X_0)}{M} \tag{4}$$

Para el caso de la cámara se considera:

G = 0 es decir que la medición se inicia después de retirar la fuente generadora de contaminante.

X₀ = 0 es decir que se supone que el aire que se infiltra esta teóricamente limpio de contaminante.

Bajo estas condiciones la ecuación toma la siguiente forma:

$$X_2 = X_1 e^{-(M/V)(t_2-t_1)} \quad [5]$$

Conversión de unidades:

El sensor utilizado para la medición de la concentración de CO, entrega como resultado una cifra en [ppm] (partes por millón) de concentración en el aire ambiente.

La relación entre [ppm] y [mg/m³] se muestra en la siguiente ecuación [3]:

$$\frac{mg}{m^3} = \frac{0.1204[ppm]MP}{273.15 + T_a} \quad [6]$$

Donde:

M: peso molecular del gas contaminante

P: presión atmosférica [KPa]

Procedimiento experimental

Se diluye monóxido de carbono en el interior del local y se mide la variación de su concentración en el tiempo. Al determinar la velocidad de variación de la concentración del contaminante, se esta implícitamente determinando el flujo de aire de infiltración en la cámara. La técnica se encuentra estandarizada en ASTM estándar E741[6].

Los pasos realizados, para llevar a cabo el ensayo fueron:

- El instrumento utilizado para medir la concentración de CO ambiente, es un analizador de gases marca TESTO, con una resolución en la medición de CO ambiente de 0 a 500 ppm y precisión de ± 5 ppm (para 100ppm) y $\pm 5\%$ (para 500 ppm).
- El combustible quemado, como fuente de contaminación fue carbón vegetal, este asegura una rápida consecución de los niveles de concentración requeridos, sin generación excesiva de partículas (hollín).
- Se instaló el sensor del analizador de gases en el interior de la cámara, haciendo pasar el cable que conduce la señal al monitor del instrumento (ubicado en la entrecámara, ver Figura 3) por un orificio en la pared especialmente dispuesto para este efecto, luego este fue sellado para evitar alteración en las mediciones.
- Se inicializa el sensor del instrumento, sin remover la tapa protectora, para tomar el cero

como nivel de referencia, según recomendación del fabricante.

- Se destapa el sensor y se ingresa a la cámara la fuente de contaminación, luego se cierra.
- Al lograr un nivel de concentración preestablecido, se abre y se extrae la fuente, sellando definitivamente la cámara hasta el final del ensayo.
- Se inicia la medición aproximadamente 20 minutos después, cuando el efecto de la apertura y cierre de la puerta sea despreciable y la señal este totalmente estable.
- Luego de tomar la primera medición se cierra la puerta que comunica la entrecámara con el exterior, para sólo abrirla al final de cada intervalo de tiempo.

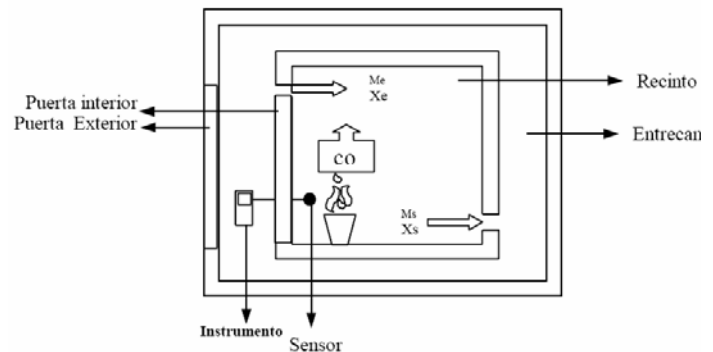


Figura 3. Montaje experimental para la medición de infiltraciones

Resultados:

Condiciones ensayo N°1:

- Duración 4 horas.
- Sistema de calefacción interior activado.
- Ventilación en la entrecámara, desactivado.
- Intervalo de tiempo utilizado entre mediciones de la concentración de CO ambiente: 30 minutos.
- Intervalo de tiempo utilizado entre mediciones de velocidad y dirección del viento: 1 minuto (promedios para cada 30 minutos).
- Intervalo de tiempo utilizado entre mediciones de temperatura interior y exterior:30 seg. (Promedios para cada 30 min.).

Los resultados para la velocidad y dirección del viento, son representados en esquema de barras, considerando que estas variables y por ende el flujo de infiltraciones son demasiado aleatorias, es decir no existe una relación de continuidad en el tiempo que las relacione. Los resultados por lo tanto representan promedios para un intervalo de tiempo determinado.

A partir de la ecuación [2] y las mediciones realizadas, se muestra en la Figura 4 los resultados de la variación de las infiltraciones, la diferencia de temperaturas (interior y exterior) en el tiempo y el comportamiento del viento durante el ensayo.

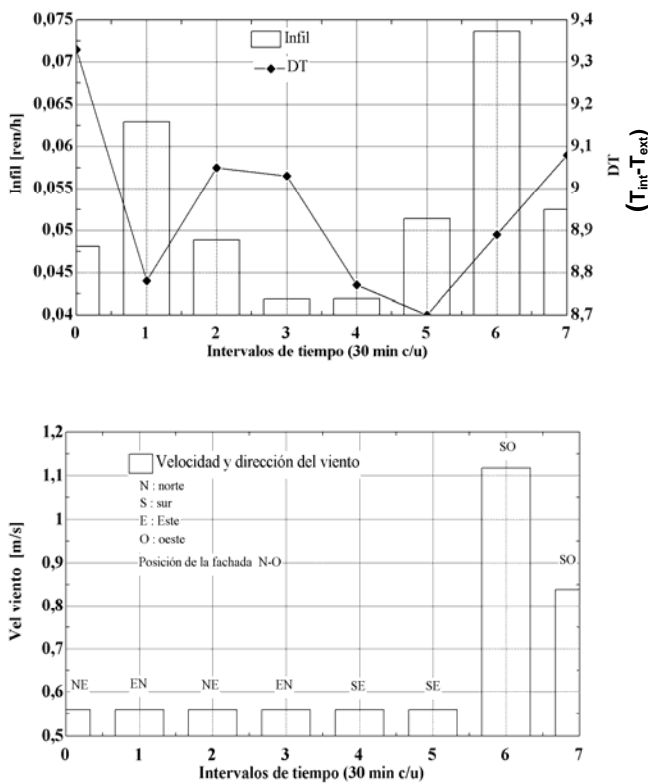


Figura 4. Resultados ensayo N°1

Como se observa, estos últimos factores están fuertemente relacionados con la variación en la cantidad de aire infiltrado, registrándose un máximo de 0.074 Ren/h, el cual es bastante bajo, (en este tipo de aplicaciones es del orden 0.2 Ren/h) considerando el tipo de construcción y sus características.

La variación de la concentración de contaminante en el tiempo, se observa en la Figura 5.

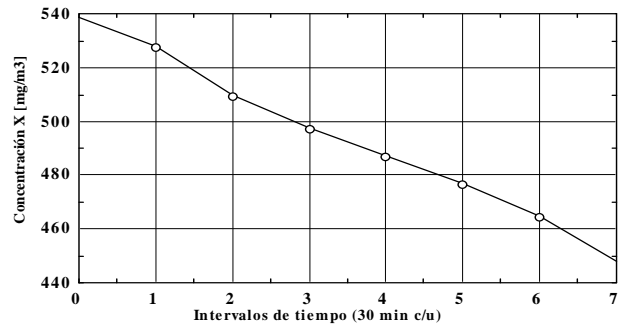


Figura 5. Variación de la Concentración de contaminante en el tiempo, ensayo N°1.

Condiciones ensayo N°2:

- Duración del ensayo 7 horas.
- Sistema de calefacción interior activado.
- Ventilación de la entrecámara activado.
- Intervalo de tiempo utilizado entre mediciones de la concentración de CO ambiente: 1 hora.
- Intervalo de tiempo utilizado entre mediciones de velocidad y dirección del viento: 1 minuto (se realizaron promedios para cada hora).
- Intervalo de tiempo utilizado entre mediciones de la diferencia entre la temperatura interior y exterior: 30 segundos (se realizaron promedios para cada hora)

Los resultados del ensayo N°2 se observan en la Figura 6.

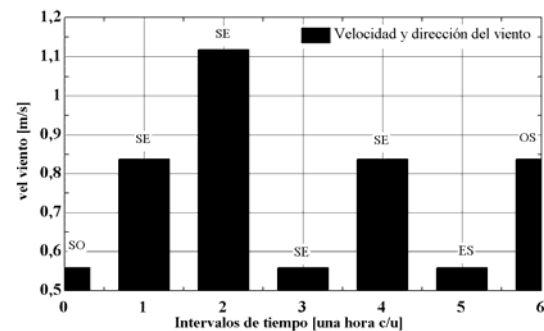
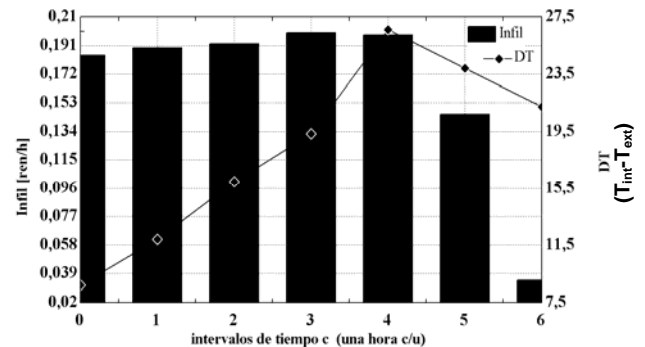


Figura 6. Resultados ensayo N°2

El comportamiento en el tiempo del nivel de concentración de contaminante en el aire se muestra en la Figura 7.

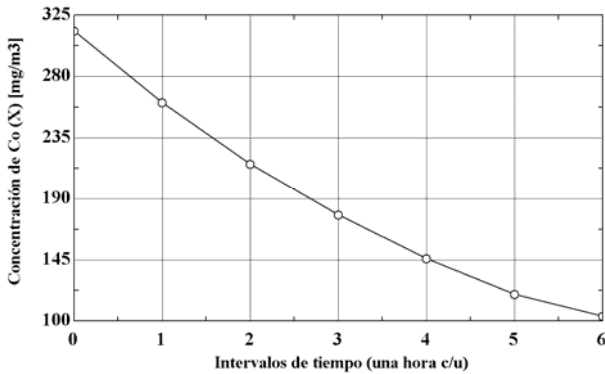


Figura 7. Variación de la Concentración de contaminante en el tiempo, ensayo N°2.

Se obtuvo un nivel de infiltraciones mucho mayor al registrado en el ensayo anterior. Esta vez del orden de 0.19 Ren/h, debido básicamente a que en este caso el sistema de ventilación en la entrecámara se activó. Generando un incremento en la cantidad de aire que ingresa al recinto. Se observa además que para una variación muy leve en la concentración durante el último intervalo (ver Figura 6), se genera una disminución drástica en el nivel del de aire infiltrado, por otro lado nuevamente el efecto de la diferencia de temperatura interior y exterior es evidente.

4. CONCLUSIONES

Se presenta en este artículo la metodología y resultados experimentales para la determinación del nivel de infiltración de aire exterior en una cámara de ensayos de componentes HVAC, cuando el sistema de impulsión de aire exterior no opera. Es decir la condición real en una vivienda, para determinar de esta forma, el nivel de sello de la cámara.

Los resultados experimentales obtenidos siguiendo la metodología propuesta en este trabajo indican que el nivel de sello de la cámara no es satisfactorio, por lo tanto se decidió usar un sistema de impulsión de aire exterior, cuyo objetivo principal es medir la renovación del aire e impedir que fluctúe sin control. De esta forma, se puede controlar y medir la cantidad de aire exterior que ingresa al recinto e incluirlo como dato del problema

Gracias al diseño experimental planteado, en general para los cuatro tipos de protección en la ventana experimentalmente verificados. Las pérdidas debidas al aire infiltrado varían relativamente poco: entre un 14 y 19%.

Como se requiere un nivel bajo de infiltraciones (considerando que se trata de enfocar los esfuerzos sobre lo que ocurre en la ventana), el flujo de aire inyectado en la cámara se fija en 0,02 kg/s, lo que implica infiltraciones del orden de 0,65 ren/h. Con esto, se logra (mediante el sello previo de la cámara) mantener una diferencia de presiones de 25 Pa, adecuada para este tipo de experiencias.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ernest O. Doebelin. 1990. Measurement systems application and design, Mc.Graw Hill. Boston.
- [2] James W. Dally. 1984. Instrumentation Engineering measurement, Wiley, New York.
- [3] Fonseca, Néstor. Estudio experimental del balance térmico de una ventana, Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002.
- [4] Saavedra, C y Fissore, A. Mottard, J. 2000. "Diseño de un banco de ensayos para la validación de un modelo de diseño térmico de ventanas", Congreso de ar condicionado, refrigeracao aquecimento e ventilacao do mercosul, Brasil, Mercofrio 2000.
- [5] Fissore, A. 2000. "Simulación térmica detallada de una ventana", Congreso de ar condicionado, refrigeracao aquecimento e ventilacao do mercosul, Brasil, Mercofrio 2000.
- [6] Guyon, G., Palomo, E. 1999. "Validation of two french building programs, part 1 -2", ASHRAE Trans. Vol .105 part 2, pp 695-735.