

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1982

4) 04.82.13

**I CONGRESO LATINOAMERICANO
DE TRANSFERENCIA DE
CALOR Y MATERIA**

ACTAS

**I CONGRESSO LATINOAMERICANO
DE TRANSFERÊNCIA DE
CALOR E MATERIA**

ACTAS

**Ist. LATIN AMERICAN CONGRESS
ON HEAT AND MASS TRANSFER** | **PROCEEDINGS**

LA PLATA -R. ARGENTINA 31 de Octubre/4 de Noviembre

1 9 8 2

Volumen 2

ANALISIS ADIMENSIONAL DE LA TRANSFERENCIA TERMICA POR
RADIACION EN CAPAS DE CILINDROS

Sergio Pissanetzky y Claudia Slutzky
Centro Atómico Bariloche* e Instituto Balseiro#
8400 - S.C. de Bariloche, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se consideran configuraciones de cilindros idénticos a temperatura inicial T_0 , ubicados en capas planas regulares dentro de un horno a temperatura constante T_f , donde se ha efectuado vacío. Cada cilindro es isotérmico, despreciándose el contacto térmico entre cilindros adyacentes. La propagación de calor se produce sólo por radiación en todas las cavidades delimitadas por los cilindros entre sí y con el horno. El modelo utilizado permite realizar una formulación adimensional y obtener resultados numéricos generales tanto para la temperatura de cada cilindro en función del tiempo como para la potencia total entregada a la carga. Se consideran los casos de calentamiento ($T_0 > T_f$) y los de enfriamiento ($T_0 < T_f$) con sus correspondientes comportamientos asintóticos, para configuraciones con distinto número de capas de cilindros.

Introducción

Este trabajo forma parte de nuestra línea de investigación, cuyo objetivo es establecer tablas de diseño para

Pissanetzky, S.

apilamientos de cilindros o tubos colocados dentro de un horno, en que el calor se transmite únicamente por radiación. El comportamiento térmico de la pila depende de la forma del apilamiento, de la cantidad de cilindros y de sus propiedades físicas. Algunos estudios ya han sido presentados: apilamientos compactos con forma de medio exágono (Pissanetzky, 1980); diseño y control de hornos industriales (Pissanetzky et al. 1981a); descripción de cavidades de radiación a computadora (Callwood, Pissanetzky, 1981); solución automática de problemas de radiación de calor en cavidades con emisión, absorción y reflexión del calor (Pissanetzky, 1981); empleo de conductores del calor para acelerar el calentamiento de la pila (Pissanetzky, Almagro, 1979); hornos de recocido (Pissanetzky et al., 1981b); comparación con resultados experimentales (Pissanetzky et al., 1980); control de un horno industrial (Cingolani, Pissanetzky, 1980); diseño de hornos de recocido (Pissanetzky, Roddick, 1981); análisis adimensional en apilamientos compactos (Pissanetzky, Slutzky, 1981) y (Pissanetzky, Slutzky, 1982).

Con el propósito de sistematizar el estudio, se han definido algunas configuraciones básicas. Entre ellas, los arreglos exagonales compactos de cilindros han sido estudiados en (Pissanetzky, 1982) y en (Pissanetzky, Slutzky, 1982). Aquí presentamos los resultados para configuraciones de capas regulares infinitas de cilindros. Otras configuraciones a ser estudiadas en el futuro son las capas compactas infinitas y los arreglos rectangulares

regulares de cilindros. La idea central de estos estudios es que el comportamiento térmico de una configuración real podrá ser aproximado en muchos casos prácticos por interpolación entre los resultados para dos o más configuraciones básicas parecidas a la configuración real dada.

Las cinco configuraciones estudiadas en este trabajo se muestran en la Figura 1. Se han estudiado tanto casos de calentamiento ($T_0 < T_F$) como de enfriamiento ($T_0 > T_F$). Cada cilindro o tubo se supone isotérmico, y se considera que el calor se propaga por radiación en las cavidades determinadas por cilindros adyacentes o entre cilindros y el horno, despreciándose los contactos térmicos. Todos los cilindros tienen los mismos ϵ y C , independientes de la temperatura.

Teoría

En (Pissanetzky, Slutzky, 1982) se ha demostrado que la forma del horno dentro del cuál se coloca la carga de cilindros, es irrelevante, siempre y cuando el horno sea negro ($\epsilon_F=1$) o sea muy grande comparado con el espesor de la carga. Por lo tanto, los cálculos han sido hechos para el horno más simple posible: dos planos (no indicados en la Figura 1) apoyados en la parte inferior y en la superior de cada configuración, sin contacto térmico. En la misma publicación se han demostrado los siguientes resultados del análisis dimensional:

$$\frac{T}{T_F} = f_2 \left(\frac{t}{t_0}, \epsilon, \frac{T_0}{T_F} \right) \quad (1)$$

$$t_0 = C / (\sigma D T_F^3) \quad (2)$$

$$\frac{W}{W_0} = f_5 \left(\frac{t}{t_0}, \epsilon, \frac{T_0}{T_F} \right) \quad (3)$$

$$\frac{W_0}{\sigma D T_F^4} = Z(\epsilon) \left(1 - \frac{T_0^4}{T_F^4} \right) \quad (4)$$

En (Pissanetzky, Slutzky, 1982) se han considerado once tipos básicos de cavidad de radiación, que son suficientes para representar cualquiera de las configuraciones que nos interesan. Se ha demostrado también la siguiente expresión:

$$q_i = \sum_j P_{ij} (T_j - T_i)(T_j + T_i)(T_j^2 + T_i^2) \quad (5)$$

y se han dado los valores numéricos de las matrices de transferencia radiativa P_{ij} para los once tipos de cavidad y para varios valores de la emisividad ϵ . Las configuraciones de capas planas regulares de cilindros que nos interesan en el presente trabajo, se representan en términos de las cavidades tipo F y H, exclusivamente. El problema térmico se resuelve, entonces, en pasos de tiempo, utilizando la ecuación (5) en cada paso para evaluar los flujos térmicos, y logrando así calcular las funciones f_2 y f_5 de las ecuaciones (1) y (3).

Para el cálculo de la potencia inicial, ecuación (4), es necesario evaluar $Z(\epsilon)$. Utilizando los mismos procedimientos que en (Pissanetzky, Slutzky, 1982), el resultado es:

$$Z(\epsilon) = 4 f'(\epsilon) \quad (6)$$

para una longitud de horno igual a D , donde la función $f'(\epsilon)$ está tabulada en la publicación mencionada.

Comportamiento asintótico

Una pregunta importante que suelen plantear los ingenieros es la que se refiere al tiempo que tarda la carga, o un determinado cilindro para alcanzar una temperatura próxima a T_F . En (Pissanetzky, Slutzky, 1982) se ha demostrado que, para un cierto cilindro c y para un tiempo suficientemente largo:

$$\ln \left| 1 - \frac{T_c}{T_F} \right| = a_c - \frac{t/t_0}{t_d/t_0} \quad (7)$$

donde el tiempo de decaimiento $t_d > 0$ depende de la configuración, pero es el mismo para todos los cilindros de una determinada configuración. La ordenada al origen a_c , por su parte, es diferente para cada cilindro. El valor de t_d está dado por:

$$t_d/t_0 = -\sigma D/4\lambda \quad (8)$$

y puede obtenerse directamente diagonalizando P^G . En cambio a_c se obtiene trazando la asíntota en un gráfico

de la curva de la ecuación (1), dibujada en una escala logarítmica conveniente.

Es necesario definir dos parámetros más: t_1 y t_2 , que son importantes para aplicaciones de ingeniería. t_1 es el tiempo para el cuál la temperatura de un cilindro se aleja de T_0 en un 10% de la diferencia $T_F - T_0$

$$T_c(t_1) - T_0 = 0.1(T_F - T_0) \quad (9)$$

La definición de t_2 es:

$$|T_c(t_2) - T_{A,c}(t_2)| < 0.01 |T_{A,c}(t_2) - T_F| \quad (10)$$

Esta definición implica que para $t > t_2$, la temperatura T_c del cilindro c difiere de la asíntota $T_{A,c}$ en menos del 1% de la diferencia entre la asíntota y la temperatura final T_F , pudiéndose por lo tanto considerar que T_c se ha confundido con la asíntota.

Resultados numéricos

Los resultados numéricos obtenidos para las cinco configuraciones en estudio se presentan en las tablas, en todos los casos para cinco valores diferentes de la emisividad ϵ . Las asíntotas quedan definidas por la ecuación (7), donde los valores de t_d/t_0 están dados en la tabla I, y los de a_c en las tablas II á VI. El instante en que la temperatura real de cada cilindro se acerca a la asíntota, al 1%, queda definido por los valores de t_2/t_0 , dados tam-

bién en las tablas, II á VI. La tabla VII dá los valores de t_1/t_0 , que identifican el instante en que la temperatura del cilindro más interno de cada configuración se aleja de su valor inicial T_0 en un 10% de la diferencia $T_F - T_0$.

Símbolos

- a_c, a_1 ordenada al origen de la asíntota correspondiente al cilindro c o al cilindro 1 , respectivamente, definida por la ecuación (7).
- c índice que identifica un cilindro, ver la Figura 1.
- C capacidad calorífica por unidad de longitud de un cilindro.
- D diámetro de un cilindro.
- f_2, f_5 ciertas funciones de los argumentos indicados.
- $f'(\epsilon)$ una función de ϵ , tabulada en (Pissanetzky, Slutzky, 1982).
- \ln logaritmo natural.
- P_{ij} elemento i, j de la matriz de transferencia térmica radiativa de una cavidad.
- P^G matriz global de transferencia térmica radiativa para una configuración, obtenida ensamblando las matrices P de cada cavidad.
- q_1 potencia térmica neta que entra al cuerpo 1 .
- t tiempo.
- t_0 tiempo característico, definido por la ecuación (2)
- t_1, t_2 parámetros definidos por las ecuaciones (9) y (10).
- t_d tiempo de decaimiento definido por la ecuación (7).
- T temperatura de un cilindro cualquiera.
- T_c temperatura del cilindro c .
- $T_{A,c}$ temperatura asíntótica del cilindro c .
- T_0 temperatura inicial de todos los cilindros.
- T_F temperatura constante del horno.

- T_i, T_j temperaturas de los cuerpos i, j en una cavidad de radiación.
- W potencia térmica total que pasa del horno a la carga.
- W_0 potencia térmica total inicial.
- $Z(\epsilon)$ una función de ϵ , definida por la ecuación (6).
- ϵ emisividad superficial de todos los cilindros, supuesta independiente de la temperatura.
- ϵ_F emisividad superficial del horno a la temperatura T_F .
- λ máximo autovalor de P^G .
- $\sigma = 1.34 \times 10^{-12} \text{ cal cm}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ seg}^{-1}$ constante de Steffan.

Referencias

- * Comisión Nacional de Energía Atómica.
- # Comisión Nacional de Energía Atómica y Universidad Nacional de Cuyo.

- N. Callwood, S. Pissanetzky. "Automatic generation of two-dimensional enclosures between bodies in contact. Application to heat radiation. Program SPADE". Nota técnica CAB-NT 2/81 y CNEA-NT 4/81 (1981).
- H. Cingolani, S. Pissanetzky. "Modelo simplificado para el estudio del control térmico de un horno de recocido en alto vacío." IX Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, S.C. de Bariloche (1980).
- S. Pissanetzky. "Numerical simulation of the transient temperature distribution inside a close-packed array of cylindrical tubes during heating and cooling under high vacuum." Nuclear Eng. and Design 56, 359-368 (1980).
- S. Pissanetzky. "Automatic solution of heat radiation problems in two-dimensional diffuse gray enclosures." CAB-NT 1/81 y CNEA-NT 3/81 (1981).
- S. Pissanetzky, J.C. Almagro. "Empleo de elementos conductores del calor para asegurar el rápido flujo de calor hacia o desde un conjunto de piezas, partes o componentes que deban ser calentadas o enfriadas bajo vacío dentro de un horno." Patene solicitada (1979).

- S. Pissanetzky, R. Roddick. "Diseño térmico de hornos de recocido para la industria nuclear." Seminario del CAMAT, 23 y 24 de Abril de 1981, Buenos Aires. Cuaderno N°8 del CAMAT (1981).
- S. Pissanetzky, C. Slutzky. "Análisis adimensional de la transferencia térmica por radiación." X Reunión científica de la A.A.T.N., Bahía Blanca, 2-6 de Noviembre (1981).
- S. Pissanetzky, C. Slutzky. "Dimensionless analysis of radiation heat transfer in arrays of cylinders-I". Int. J. of Heat and Mass Transfer. A ser publicado (1982).
- S. Pissanetzky, R. Volpi, H. Cingolani, J.C. Almagro. "Modelo matemático y experimentos con un horno de alto vacío para recocido de vainas para elementos combustibles." IX Reunión científica de la A.A.T.N., S.C. de Bariloche (1980).
- S. Pissanetzky, H. Cingolani, R. Volpi. "Numerical modelling of high vacuum furnaces." Num. Meth. in Thermal Problems ed. Lewis, Morgan and Schreffler, Vol.II, p.862-872 (1981a).
- S. Pissanetzky, R. Volpi, H. Cingolani, J.C. Almagro. "Numerical simulation of the transient temperature distribution within the cladding material during annealing in a high vacuum furnace." Nuclear Eng. and Design 65, 141-150 (1981b).

TABLA I

Valores de t_d/t_0 para las configuraciones de capas regulares de cilindros.

ϵ	1CR	2CR	3CR	4CR	5CR
0.2	0.495	0.990	1.897	3.162	4.779
0.4	0.270	0.540	1.000	1.633	2.436
0.6	0.191	0.382	0.687	1.099	1.617
0.8	0.150	0.301	0.526	0.824	1.193
1.0	0.125	0.250	0.427	0.655	0.933

TABLA II

Valores de t_2/t_0 y de a_c para la configuración ICR.

ε		0.2		0.4		0.6		0.8		1.25		1.67		2.50		5.00	
		t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c
Cilindro	1	3.16	1.44	2.73	0.64	2.19	-0.22	1.47	-1.29	1.20	-1.76	1.44	-1.22	1.54	-1.01	1.59	-0.94
	1	1.45	1.44	1.30	0.64	1.07	-0.22	0.71	-1.29	0.56	-1.76	0.68	-1.22	0.72	-1.00	0.77	-0.93
	1	0.98	1.44	0.92	0.63	0.80	-0.22	0.64	-1.30	0.34	-1.76	0.54	-1.22	0.57	-1.01	0.63	-0.94
	1	0.81	1.45	0.76	0.64	0.56	-0.21	0.49	-1.29	0.27	-1.75	0.44	-1.21	0.47	-0.99	0.52	-0.93
	1	0.79	1.44	0.72	0.63	0.51	-0.22	0.45	-1.30	0.24	-1.76	0.39	-1.22	0.41	-1.01	0.46	-0.94
	1	0.6	0.98	0.92	0.63	0.80	-0.22	0.64	-1.30	0.34	-1.76	0.54	-1.22	0.57	-1.01	0.63	-0.94
	1	0.4	1.45	1.30	0.64	1.07	-0.22	0.71	-1.29	0.56	-1.76	0.68	-1.22	0.72	-1.00	0.77	-0.93

TABLA III

Valores de t_2/t_0 y de a_c para la configuración 2CR.

ϵ	Cilindro	c	T_0/T_F															
			0.2		0.4		0.6		0.8		1.25		1.67		2.50		5.00	
			t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c
0.2	1	5.40	1.46	4.73	0.65	3.55	-0.21	2.35	-1.29	2.97	-1.78	3.20	-1.25	3.31	-1.04	3.60	-0.97	
0.4	1	3.00	1.42	2.59	0.61	2.17	-0.24	1.61	-1.32	1.19	-1.77	1.34	-1.23	1.42	-1.02	1.52	-0.96	
0.6	1	2.00	1.49	1.88	0.68	1.64	-0.18	1.25	-1.27	0.60	-1.74	0.84	-1.20	1.00	-0.98	1.13	-0.92	
0.8	1	1.41	1.44	1.30	0.63	1.20	-0.23	0.58	-1.30	0.58	-1.77	0.72	-1.23	0.92	-1.02	1.00	-0.95	
1.0	1	1.22	1.44	1.13	0.63	0.97	-0.22	0.48	-1.29	0.55	-1.76	0.59	-1.23	0.82	-1.01	0.89	-0.95	

Valores de t_2/t_0 y de a_c para la configuración 3CR.

TABLA IV

ϵ	Cilindro	0.2		0.4		0.6		0.8		1.25		1.67		2.50		5.00	
		t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c
0.2	1	10.76	1.43	9.60	0.49	7.92	-0.45	6.22	-1.57	7.32	-2.15	7.62	-1.62	8.08	-1.47	8.30	-1.24
	2	11.80	1.99	10.22	1.05	9.28	0.11	8.24	-1.01	7.60	-1.50	8.16	-0.98	8.44	-0.77	9.30	-0.70
0.4	1	6.04	1.42	5.10	0.49	4.67	-0.45	3.78	-1.56	3.99	-2.05	4.32	-1.52	4.46	-1.30	4.60	-1.24
	2	5.42	1.95	5.00	1.02	4.36	0.09	3.67	-1.03	1.87	-1.52	2.31	-0.99	2.62	-0.73	2.93	-0.71
0.6	1	4.34	1.42	3.53	0.51	3.14	-0.41	2.58	-1.04	1.90	-2.03	2.15	-1.50	2.34	-0.84	2.67	-1.22
	2	4.06	1.89	3.60	0.98	3.01	0.07	2.37	-1.52	1.78	-1.58	2.03	-1.05	2.19	-0.84	2.56	-0.77
0.8	1	3.39	1.37	3.18	0.47	2.43	-0.43	1.54	-1.53	1.41	-1.99	1.59	-1.47	1.70	-1.26	1.83	-1.19
	2	2.74	1.77	2.46	0.87	2.05	-0.03	1.67	-1.12	1.01	-1.60	1.38	-1.07	1.54	-0.85	1.68	-0.79
1.0	1	2.44	1.37	2.10	0.48	1.79	-0.41	1.45	-1.50	1.27	-1.96	1.37	-1.43	1.46	-1.23	1.55	-1.15
	2	2.32	1.72	2.04	0.84	1.44	-0.07	1.07	-1.16	0.97	-1.62	1.31	-1.09	1.39	-0.88	1.48	-0.82

TABLA V

Valores de t_2/t_0 y de a_c para la configuración 4CR.

ϵ	Cilindro c	T_0/T_F															
		0.2		0.4		0.6		0.8		1.25		1.67		2.50		5.00	
		t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c	t_2/t_0	a_c
0.2	1	17.16	1.19	15.50	0.27	13.04	-0.67	10.13	-1.79	10.24	-2.42	10.98	-1.89	11.96	-1.69	12.16	-1.62
	2	16.70	2.06	15.30	1.14	12.84	0.20	9.22	-0.92	9.64	-1.71	10.14	-1.18	11.56	-0.98	12.02	-0.90
0.4	1	9.78	1.23	8.80	0.31	6.86	-0.63	6.36	-1.75	5.04	-2.32	5.20	-1.79	6.42	-1.59	6.81	-1.52
	2	10.50	1.97	10.00	1.05	6.74	0.11	5.92	-1.01	4.96	-1.65	5.04	-1.13	5.56	-0.92	6.75	-0.86
0.6	1	6.80	1.25	6.34	0.33	4.70	-0.59	3.57	-1.71	3.46	-2.24	3.88	-1.71	4.14	-1.50	4.64	-1.44
	2	7.76	1.90	7.07	0.99	6.26	0.06	5.21	-1.05	3.25	-1.64	3.54	-1.11	3.79	-0.91	4.48	-0.84
0.8	1	4.60	1.32	4.26	0.41	3.38	-0.52	2.27	-1.63	2.49	-2.15	3.06	-1.62	3.35	-1.41	3.42	-1.34
	2	5.20	1.88	4.86	0.98	4.53	0.05	3.39	-1.06	1.69	-1.61	2.55	-1.08	2.92	-0.87	3.20	-0.80
1.0	1	4.08	1.38	3.58	0.48	2.98	-0.44	2.06	-1.55	1.45	-2.07	1.86	-1.53	1.94	-1.32	2.33	-1.25
	2	4.31	1.88	4.14	0.98	3.80	0.06	3.35	-1.05	1.68	-1.60	2.24	-1.06	2.69	-0.85	2.95	-0.78

Valores de c_2/c_0 y de ϵ_c para la configuración 5CR.

TABLA VI

		T_0/T_F															
		0.2		0.4		0.6		0.8		1.25		1.67		2.50		5.00	
ϵ	Cilindro	c_2/c_0	ϵ_c	c_2/c_0	ϵ_c	c_2/c_0	ϵ_c	c_2/c_0	ϵ_c	c_2/c_0	ϵ_c	c_2/c_0	ϵ_c	c_2/c_0	ϵ_c	c_2/c_0	ϵ_c
0.2	1	29.12	0.93	24.32	0.03	20.20	-0.86	14.88	-1.98	12.72	-2.65	15.36	-2.12	17.20	-1.91	18.24	-1.85
	2	28.88	1.81	24.16	0.90	20.08	0.03	14.60	-0.98	12.40	-1.89	14.28	-1.36	16.09	-1.16	16.72	-1.09
	3	28.28	2.01	24.04	1.10	19.20	0.23	13.92	-0.74	11.56	-1.72	12.20	-1.20	15.80	-0.99	15.77	-0.92
0.4	1	14.12	1.04	12.24	0.11	10.36	-0.83	6.80	-1.95	6.80	-2.54	9.28	-2.01	9.60	-1.81	10.56	-1.74
	2	14.00	1.88	12.12	0.95	10.24	0.01	6.65	-1.11	6.72	-1.81	7.36	-1.29	8.28	-1.03	8.33	-1.02
	3	13.80	2.06	11.92	1.15	9.120	0.22	6.40	-0.90	6.30	-1.65	6.80	-1.12	8.04	-0.92	8.64	-0.85
0.6	1	10.00	1.09	8.96	0.16	7.32	-0.77	5.36	-1.89	5.04	-2.44	5.70	-1.93	5.94	-1.71	6.30	-1.64
	2	9.32	1.82	8.60	0.90	6.90	-0.03	5.10	-1.15	4.16	-1.77	4.30	-1.25	4.68	-1.04	5.00	-0.98
	3	9.24	2.01	8.50	1.08	6.80	0.15	4.84	-0.97	4.04	-1.62	4.12	-1.03	4.48	-0.88	4.74	-0.82
0.8	1	7.46	1.18	6.16	0.25	5.68	-0.68	4.16	-1.83	3.60	-2.32	4.04	-1.79	4.80	-1.58	4.68	-1.51
	2	7.30	1.83	6.03	0.90	5.26	-0.03	4.02	-1.15	2.96	-1.72	3.50	-1.19	4.10	-0.98	4.50	-0.91
	3	7.12	1.54	5.94	1.07	5.06	0.14	3.92	-0.98	2.33	-1.57	2.52	-1.04	3.72	-0.83	4.14	-0.76
1.0	1	5.92	1.22	5.15	0.29	3.89	-0.63	3.12	-1.75	2.18	-2.23	2.36	-1.70	3.26	-1.49	3.50	-1.42
	2	5.61	1.81	4.88	0.89	3.72	-0.03	2.90	-1.15	1.85	-1.72	2.20	-1.19	2.77	-0.98	3.24	-0.91
	3	5.25	1.96	4.60	1.04	3.23	0.12	2.29	-1.00	1.60	-1.58	1.90	-1.05	2.54	-0.84	2.83	-0.77

TABLA VII

Valores de t_d/t_0 para las configuraciones de capas regulares de cilindros correspondientes al cilindro más interno de cada configuración.

ϵ	T_0/T_F	1CR	2CR	3CR	4CR	5CR	
0.20	0.20	0.17	0.31	2.68	3.40	8.12	
	0.40	0.14	0.26	1.76	2.30	5.20	
	0.60	0.09	0.19	1.20	1.74	3.56	
	0.80	0.07	0.14	0.78	1.08	2.20	
	1.25	0.05	0.12	0.36	0.52	1.08	
	1.67	0.03	0.07	0.22	0.36	0.52	
	2.50	0.01	0.04	0.10	0.18	0.32	
	5.00	0.01	0.02	0.04	0.06	0.10	
	0.40	0.20	0.09	0.19	1.38	1.76	4.32
		0.40	0.07	0.14	0.90	1.22	2.72
0.60		0.05	0.11	0.61	0.84	1.72	
0.80		0.03	0.09	0.40	0.60	1.20	
1.25		0.03	0.05	0.20	0.30	0.68	
1.67		0.02	0.03	0.11	0.18	0.36	
2.50		0.01	0.02	0.06	0.09	0.20	
5.00		0.00	0.01	0.03	0.05	0.08	
0.60		0.20	0.06	0.13	0.98	1.18	2.78
		0.40	0.05	0.08	0.62	0.82	1.76
	0.60	0.04	0.07	0.35	0.58	1.18	
	0.80	0.03	0.03	0.29	0.39	0.80	
	1.25	0.02	0.03	0.14	0.19	0.36	
	1.67	0.01	0.02	0.09	0.11	0.22	
	2.50	0.01	0.01	0.05	0.07	0.11	
	5.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.05	
	0.80	0.20	0.05	0.10	0.70	0.95	2.06
		0.40	0.04	0.08	0.45	0.61	1.28
0.60		0.03	0.06	0.30	0.42	0.83	
0.80		0.02	0.05	0.21	0.30	0.53	
1.25		0.02	0.03	0.10	0.14	0.26	
1.67		0.01	0.02	0.06	0.09	0.13	
2.50		0.00	0.01	0.03	0.04	0.06	
5.00		0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	
1.00		0.20	0.04	0.08	0.59	0.74	1.60
		0.40	0.03	0.06	0.37	0.50	0.99
	0.60	0.03	0.05	0.26	0.35	0.64	
	0.80	0.02	0.03	0.16	0.25	0.41	
	1.25	0.01	0.03	0.09	0.13	0.20	
	1.67	0.01	0.02	0.05	0.08	0.11	
	2.50	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	
	5.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	

∞ - - - (1)(1)(1)(1) - - - ∞ 1CR

∞ - - - (1)(1)(1)(1)
(1)(1)(1)(1) - - - ∞ 2CR

∞ - - - (1)(1)(1)(1)
(2)(2)(2)(2)
(1)(1)(1)(1) - - - ∞ 3CR

∞ - - - (1)(1)(1)(1)
(2)(2)(2)(2)
(2)(2)(2)(2)
(1)(1)(1)(1) - - - ∞ 4CR

∞ - - - (1)(1)(1)(1)
(2)(2)(2)(2)
(3)(3)(3)(3)
(2)(2)(2)(2)
(1)(1)(1)(1) - - - ∞ 5CR

Figura 1

Las cinco configuraciones de capas regulares de cilindros estudiadas en este trabajo. Se indica el índice c asignado a cada cilindro.