

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ANEXOS

**Diseño de un dispositivo de medición de la conductividad
térmica de materiales de edificación según la norma ASTM
C1043**

ALUMNO: ARTURO MANUEL VIZCARRA SOTO

ASESOR: ING. ENRIQUE BARRANTES PEÑA

Lima, diciembre del 2015

LISTADO DE ANEXOS

N°	Código	Descripción
01	Anexo 1	Características de los materiales de construcción
02	Anexo 2	Elementos de máquinas I: "Tornillos de traslación"
03	Anexo 3	Elementos de máquinas I: "Ejes y árboles"
04	Anexo 4	Elementos de máquinas I: "Uniones entre eje y cubo"
03	Anexo 5	Cálculo de engranajes según DIN 3990
04	Anexo 6	ASTM C1043: "Standard Practice for Guarded-Hot Plate Design Using Circular Line-Heat Sources"
05	Anexo 7	ASTM C177: "Standard Test Method for Steady State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus"
06	Anexo 8	EN 12664: "Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor"

ANEXO 1

Tabla 1.3 Conductividad térmica de materiales de construcción C

Hormigón de ladrillo triturado	1600	0,76
	1800	0,93
Hormigón normal con escoria de alto horno	2200 a 2400	1,40
Hormigón de arcilla expandida	700	0,22
	800	0,29
	900	0,35
	1000	0,42
	1400	0,57
	1600	0,89
Hormigón con vermiculita	500	0,14
	600	0,16
Hormigón celular (Incluye hormigones gaseosos y hormigones espumosos)	600	0,16
	800	0,22
	1000	0,30
	1200	0,40
	1400	0,50
Hormigón con cascara de arroz y canto rodado	1100	0,37
	1300	0,45
	1600	0,63
	2000	1,09
Hormigón con poliestireno expandido	300	0,09
	500	0,15
	1000	0,26
	1300	0,35
Hormigón con cifras celulósicas	300	0,09
	400	0,14
Hormigón con fibras de vidrio (resistente a los álcalis)	2100	1,11

Tabla 1.4 Conductividad térmica de materiales de construcción D

Hormigón refractario	900	0,18
Hormigón con carbón	600	0,13
Hormigón con viruta de madera	400	0,14
	500	0,16
Paneles o placas		
De yeso	600	0,31
	800	0,37
	1000	0,44
	1200	0,51
De fibrocemento	600	0,15
	700	0,26
	800	0,30
	1200	0,39
	1300	0,45
	1400	0,51
	1500	0,58
	1700	0,70
	1800	0,87
	1800 a 2200	0,95
Mampostería de ladrillos y bloques macizos		
Ladrillos cerámicos macizos	1600	0,81
	1800	0,91
	2000	1,10
Bloques de suelo cemento macizos	1800	0,62
Vidrio para ventanas	2400 a 3200	0,58 a 1,05
Vidrio armado con malla metálica	2700	1,05
Vidrio resistente al calor	2200	1,00 a 1,15

Tabla 1.5 Conductividad térmica de materiales de construcción E

Plásticos rígidos en planchas			
Resina acrílica		1140	0,20
policarbonato		1150	0,23
Polietileno de baja densidad		920	0,35
Polietileno de alta densidad		960	0,50
polipropileno		915	0,24
Poliestireno		1050	0,17
Poli cloruro de vinilo, rígido		1350	0,16
Maderas			
Fresno	Paralelo a las fibras	740	0,30
	Perpendicular a las fibras	740	0,17
Haya	Paralelo a las fibras	700 a 900	0,35 a 0,37
	Perpendicular a las fibras		0,21 a 0,27
Abedul, alerce, balsa	Perpendicular a las fibras	680	0,13
		600	0,14
		100 a 200	0,047 a 0,066
		200 a 300	0,081 a 0,110
Caoba	Paralelo a las fibras	700	0,31
	Perpendicular a las fibras		0,15
Arce	Paralelo a las fibras	700	0,42
	Perpendicular a las fibras		0,16
Roble		650	0,24
Pino spruce, abeto	Paralelo a las fibras	400 a 600	0,28
	Perpendicular a las fibras		0,13 a 0,19
Teca	Paralelo a las fibras	720	0,16
	Perpendicular a las fibras		0,14
Nogal		700	0,27
Madera dura		1200 a 1400	0,34
Madera terciada		600	0,11

Tabla 1.6 Conductividad térmica de materiales de construcción F

Madera enchapada		600	0,15
Tableros de partículas aglomeradas en general		200	0,060
		300	0,069
		400	0,078
		500	0,087
		600	0,090
		700	0,11
		800	0,13
		900	0,15
		1000	0,17
Tableros de partículas aglomeradas en lino		300	0,073
		400	0,081
		500	0,11
		600	0,12
		700	0,15
Tableros de fibra de partículas aglomeradas		200	0,047
		300	0,054
		350	0,056
Tableros lignocelulosicos de partículas aglomeradas mediante resinas sintética (con o sin impregnación en aceite)		100	0,24
Laminado plástico decorativo	En una cara	1400	0,49
	En ambas caras	1400	0,44
Pisos			
Baldosas	Cerámicas		0,70
	De hormigón	2100	1,15
	De plástico	1000	0,51
	De corcho	530	0,08

Tabla 1.7 Conductividad térmica de materiales de construcción G

Caucho	800	0,11
	1300	0,13
	1500	0,19
Parquet	500	0,17
	700	0,23



ANEXO 2

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

INGENIERÍA MECÁNICA

ELEMENTOS DE MÁQUINAS 1

TORNILLOS DE TRASLACIÓN



KURT F. PAULSEN MOSCOSO

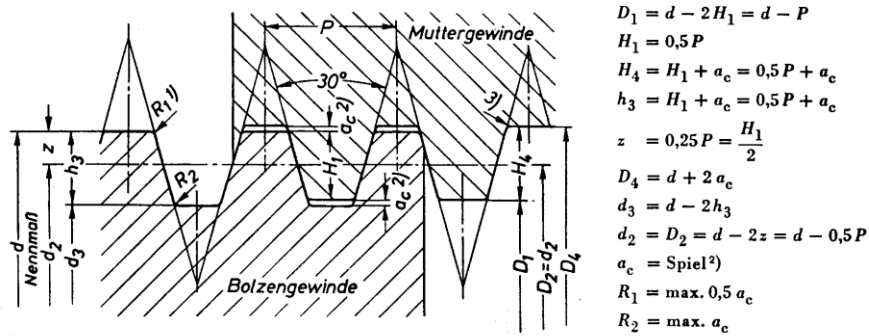
2012-1

USO INTERNO

Tornillos de traslación

Se denominan tornillos de traslación a aquellos tornillos que se utilizan para transformar el movimiento giratorio en otro de traslación axial. Se les denomina también tornillos de potencia o husillos. El elemento que realice el desplazamiento axial puede ser el tornillo o la tuerca, según se requiera.

En las uniones atornilladas se utilizan roscas de perfil triangular que se caracterizan por su paso pequeño. Para los tornillos de traslación se utilizan roscas de perfil trapezoidal y de diente de sierra, ambos tienen un paso relativamente mayor a las triangulares. El perfil trapezoidal métrico está normalizado en DIN103 (figura 1); el diente de sierra en DIN513.



(Muttergewinde: rosca de la tuerca / Bolzenschraube: rosca del tornillo)

Figura 1

Se pueden utilizar también las roscas de perfil cuadrado, las cuales trabajan con menos rozamiento, pero presentan dificultades en la fabricación.

Las roscas diente de sierra se utilizan cuando la carga axial actúa en un solo sentido. Como el flanco de presión está dispuesto casi perpendicularmente al eje del husillo, ofrecen menor rozamiento que los trapeziales.

En caso se desee mayor desplazamiento axial por cada vuelta del tornillo se utilizan tornillos de varias entradas. En la figura 2 se muestran roscas triangulares de una, dos y tres entradas.

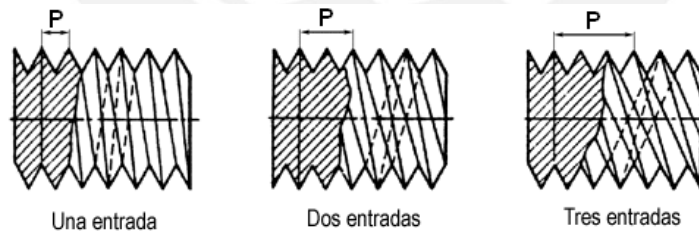


Figura 2

El paso de la hélice P es:

$$P = n h$$

donde n es el número de entradas y h, el paso del tornillo o distancia entre dos crestas consecutivas (paso aparente)

La tabla de la siguiente página es un extracto de DIN103, con las dimensiones principales y los pasos correspondientes.

Se consiguen mejores condiciones de deslizamiento en los flancos utilizando tuercas de bronce o bien tuercas de fundición gris. Los tornillos son de acero templado o endurecido.

TABLA. Extracto de la Norma DIN 103, para roscas trapecoidales

Gewinde-Nennendurchmesser <i>d</i>			Steigung <i>P</i>	Flanken- durchmesser <i>d₂ = D₂</i>	Außen- durchmesser <i>D₄</i>	Kerndurchmesser	
Reihe 1	Reihe 2	Reihe 3				<i>d₃</i>	<i>D₁</i>
8			1,5	7,250	8,300	6,200	6,500
	9		1,5 2	8,250 8,000	9,300 9,500	7,200 6,500	7,500 7,000
10			1,5 2	9,250 9,000	10,300 10,500	8,200 7,500	8,500 8,000
	11		2 3	10,000 9,500	11,500 11,500	8,500 7,500	9,000 8,000
12			2 3	11,000 10,500	12,500 12,500	9,500 8,500	10,000 9,000
	14		2 3	13,000 12,500	14,500 14,500	11,500 10,500	12,000 11,000
16			2 4	16,000 14,000	16,500 16,500	13,500 11,500	14,000 12,000
	18		2 4	17,000 16,000	18,500 18,500	15,500 13,500	16,000 14,000
20			2 4	19,000 18,000	20,500 20,500	17,500 15,500	18,000 16,000
	22		3 5 8	20,500 19,500 18,000	22,500 22,500 23,000	18,500 16,500 13,000	19,000 17,000 14,000
24			3 5 8	22,500 21,500 20,000	24,500 24,500 25,000	20,500 18,500 15,000	21,000 19,000 16,000
	26		3 5 8	24,500 23,500 22,000	26,500 26,500 27,000	22,500 20,500 17,000	23,000 21,000 18,000
28			3 5 8	26,500 25,500 24,000	28,500 28,500 29,000	24,500 22,500 19,000	25,000 23,000 20,000
	30		3 6 10	28,500 27,000 25,000	30,500 31,000 31,000	26,500 23,000 19,000	27,000 24,000 20,000
32			3 6 10	30,500 29,000 27,000	32,500 33,000 33,000	28,500 25,000 21,000	29,000 26,000 22,000
	34		3 6 10	32,500 31,000 29,000	34,500 35,000 35,000	30,500 27,000 23,000	31,000 28,000 24,000
36			3 6 10	34,500 33,000 31,000	36,500 37,000 37,000	32,500 29,000 25,000	33,000 30,000 26,000
	38		3 7 10	36,500 34,500 33,000	38,500 39,000 39,000	34,500 30,000 27,000	35,000 31,000 28,000
40			3 7 10	38,500 36,500 35,000	40,500 41,000 41,000	36,500 32,000 29,000	37,000 33,000 30,000
	42		3 7 10	40,500 38,500 37,000	42,500 43,000 43,000	38,500 34,000 31,000	39,000 35,000 32,000
44			3 7 12	42,500 40,500 38,000	44,500 45,000 45,000	40,500 36,000 31,000	41,000 37,000 32,000
	46		3 8 12	44,500 42,000 40,000	46,500 47,000 47,000	42,500 37,000 33,000	43,000 38,000 34,000
48			3 8 12	46,500 44,000 42,000	48,500 49,000 49,000	44,500 39,000 35,000	45,000 40,000 36,000

En la figura 3 se muestra un tornillo de traslación cuya tuerca está impedida de girar con el fin de que se desplace axialmente mientras gire el husillo. Sobre la tuerca actúa una carga (F).

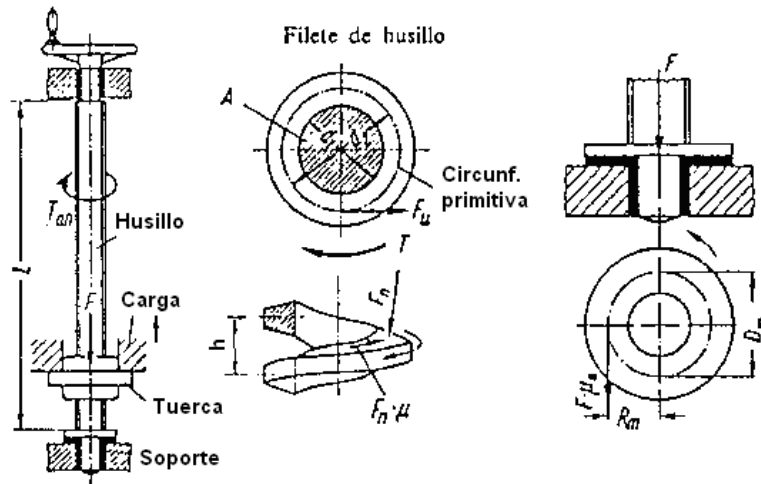


Figura 3

Los flancos de la rosca de la tuerca presionan sobre los flancos de la rosca del husillo. Se puede asumir que todos ellos soportan una presión uniforme y además que equivale a una fuerza distribuida sobre la línea coincidente con la circunferencia primitiva de diámetro d_2 .

Para vencer la carga F, se debe aplicar un momento torsor al husillo. Ello implica una fuerza tangencial F_t sobre los flancos de la rosca, que se asume que actúa sobre la circunferencia primitiva de diámetro d_2 , originando el momento torsor $M_{t,r}$ en la rosca.

$$M_{t,r} = F_t \frac{d_2}{2}$$

$$F_t = F \operatorname{tg}(\rho' + \varphi)$$

Además, se sabe que:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P}{\pi d_2}$$

$$\operatorname{tg} \rho' = \frac{\mu}{\cos \beta}$$

Donde: $\mu = 0.03 \dots 0.05$ para flancos bien mecanizados y engrasados

$$\beta = 15^\circ \text{ para roscas trapeciales } \left(\beta = \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$\beta = 3^\circ \text{ para roscas en diente de sierra}$$

Rendimiento o eficiencia mecánica en la tuerca durante la elevación

Al girar el husillo una vuelta, la carga se eleva una distancia igual al valor del paso P ejerciendo un trabajo efectivo o útil

$$W_{\text{útil}} = F \cdot P$$

Para hacer girar el husillo, habrá que aportar un trabajo igual o mayor al anterior:

$$W_{\text{gastado}} = F_t \cdot \pi \cdot d_2 = 2 \cdot M_{t,r} \cdot \pi$$

La relación entre ambos trabajos es el rendimiento en la tuerca durante la elevación:

$$\eta_{r,e} = \frac{F P}{F_t \pi d_2} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} (\varphi' + \varphi)}$$

Cuando no actúa momento de giro alguno (es decir, cuando no se acciona el volante) la fuerza F tiende a hacer girar el husillo en sentido contrario. La fuerza circunferencial en el descenso será:

$$F_t = F \operatorname{tg} (\varphi - \rho')$$

El trabajo útil es: $W_{\text{útil}} = F_t \cdot \pi d_2$

Y el trabajo efectuado: $W_{\text{gastado}} = FP$

De donde el rendimiento en el descenso es:

$$\eta_d = \frac{F_t \pi d_2}{FP} = \frac{\operatorname{tg} (\varphi - \rho')}{\operatorname{tg} \varphi}$$

Si $\rho' \geq \varphi \rightarrow \operatorname{tg} (\varphi - \rho') \leq 0$ de manera que $\eta_d \leq 0$

Esto significa que por más grande que sea la fuerza F, no podrá hacer girar el husillo en sentido contrario. A esta condición se le denomina autobloqueo

Por lo tanto, el descenso solamente podrá efectuarse si se aplica un momento de giro contrario al de elevación, al igual que ocurre al aflojar los tornillos de fijación. El autobloqueo se aprovecha, con frecuencia, como seguridad contra movimientos de retroceso.

Torque total para elevar una carga

Además del torque en la rosca de la tuerca $M_{t,r}$ es necesario vencer la fricción en el apoyo o soporte axial. Este apoyo equilibra la carga o fuerza F y al girar el husillo una fuerza de fricción $F \cdot \mu_a$, que origina el momento torsor por fricción en el apoyo axial $M_{t,a}$:

$$M_{t,a} = F \cdot \mu_R \cdot \frac{D_m}{2}$$

$$\text{Donde: } \mu_a \begin{cases} \approx 0.05 & \text{para un buen engrase} \\ \approx 0.005 & \text{si el apoyo es un rodamiento} \end{cases}$$

D_m es el diámetro medio del cojinete o del rodamiento (ver figura 3).

Por tanto, para elevar la carga (fuerza F), debe aplicarse al volante el momento torsor de accionamiento siguiente:

$$M_t = M_{t,r} + M_{t,a} = F \operatorname{tg} (\varphi' + \varphi) \frac{d_2}{2} + F \cdot \mu_R \frac{D_m}{2}$$

Durante dicha elevación, por cada vuelta del husillo se realiza un trabajo útil igual a $F \cdot P$; y es necesario accionar el volante aportando el trabajo:

$$F_t \pi d_2 + F \mu_R \pi D_m .$$

La relación entre ambos da el rendimiento total del tornillo durante la elevación:

$$\eta_T = \frac{1}{\frac{\operatorname{tg}(\phi' + \phi)}{\operatorname{tg} \phi} + \frac{\mu_R \pi D_m}{P}}$$

Si el husillo está en posición horizontal se entiende por “elevación” cuando la carga o fuerza actúa en sentido contrario al sentido de desplazamiento de la tuerca.

En lugar del volante manual se puede instalar cualquier otro tipo de accionamiento accionado por un motor.

Resistencia del Tornillo

A consecuencia de la sollicitación axial y del momento torsor, el tornillo estará sometido a esfuerzo axial y a esfuerzo de cizallamiento por torsión. Se debe analizar con cuidado el tornillo y calcular la sección crítica.

$$\sigma = \frac{F}{A_s} ; \left(A_s = \frac{\pi}{4} d_s^2 \right)$$

$$\tau = \frac{16 M}{\pi d_s^3}$$

Hay que tener cuidado en el valor del momento M que se tome para el cálculo (M_t , M_{tr} o M_{ta}).

$$M_t = M_{tr} + M_{ta} = F \operatorname{tg}(\phi' + \phi) \frac{d_2}{2} + F \cdot \mu_R \frac{D_m}{2}$$

Aplicando la teoría de la energía de distorsión (Von Mises) para determinar el esfuerzo equivalente, se debe cumplir:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_{adm}$$

donde σ_{adm} se toma de la siguiente tabla:

	TIPO DE CARGA	
	PULSANTE	ALTERNANTE
Rosca Trapecial	0.2 σ_B	0.13 σ_B
Rosca diente de sierra	0.25 σ_B	0.16 σ_B

Donde σ_B es la máxima resistencia a la tracción del material del tornillo o husillo. (Maschinen-elemente Band 1 - Gustav Niemann – Springer Verlag)

Verificación al pandeo

En los husillos a compresión cuya relación L/d_3 sea mayor o igual a 15 se recomienda analizar la posibilidad de pandeo y asegurar que no suceda.

El cálculo por pandeo de husillos de acero se puede realizar empleando el método europeo u otro método conocido. El factor de seguridad depende del grado de esbeltez del husillo. Para husillos de acero:

$$\sigma_{Lim 1} = a_1 - a_2 \lambda \quad \text{si } 60 \leq \lambda \leq 100$$

$$\sigma_{Lim 2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad \text{si } 100 \leq \lambda$$

$$a_1 = 2,5 \sigma_F - 310,89 \quad \text{N/mm}^2$$

$$a_2 = 0,025 \sigma_F - 5,18 \quad \text{N/mm}^2$$

$$E = 2,1 \times 10^5 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_F \quad \text{en N/mm}^2$$

$$\sigma \quad \text{esfuerzo de compresión}$$

$$\sigma = F/A_3$$

Se debe cumplir que el factor de seguridad FS

$$FS = \sigma_{Lim} / \sigma \geq FS_R$$

$$FS_R = 6 \text{ a } 8$$

El grado de esbeltez efectivo o equivalente es igual a

$$\lambda = L_p / i$$

$$i = d_3 / 4$$

donde d_3 es el diámetro de raíz

Para la determinación de la longitud de pandeo se debe tener en cuenta el tipo de apoyo o sujeción del tornillo. La figura 4 muestra algunos de los casos que suelen presentarse.

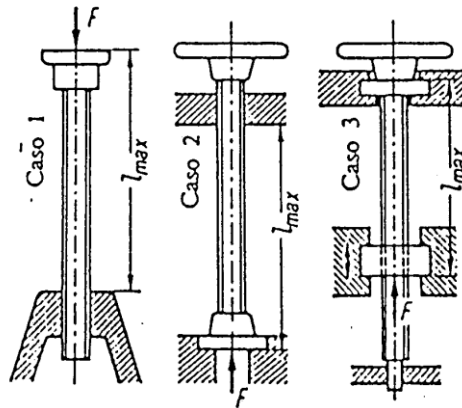


Figura 4

- Caso 1: Un extremo libre y el otro empotrado

$$\lambda = \frac{L_p}{i_{min}} = \frac{2 L_{max}}{d_3/4} = \frac{8 L_{max}}{d_3}$$

- Casos 2 y 3: Ninguno de los extremos es libre y uno o ambos parecen empotramientos. LA condición de empotramiento se debe verificar
Se considerará empotramiento si se cumple que la relación m/d es mayor al coeficiente K , donde m es la longitud del apoyo o la tuerca según corresponda y d es el diámetro nominal. El coeficiente K está entre 1,5 y 2.
Si la relación m/d es menor o igual a este coeficiente, se considerará apoyo articulado.

Es decir podría darse el caso de empotrado en ambos extremos ($L_p = L_{\max} / 2$) o empotrado en uno y articulado en el otro ($L_p = 0,7 L_{\max}$).

Presión de aplastamiento

Puesto que los flancos de los filetes del tornillo y de la tuerca deslizan uno contra otro, se desgastan con el uso. Por ello, para mantener el desgaste dentro de unos límites tolerables, se aconseja no sobrepasar una cierta presión admisible y garantizar una lubricación adecuada.

Esta presión se puede calcular tomando en cuenta el área proyectada de z filetes contenidos en la tuerca, obteniéndose:

$$p = \frac{Fh}{m d_2 \pi H_1}$$

donde: F : fuerza axial del servicio
 z : número de filetes en la tuerca
 h : paso aparente del tornillo
 m : altura de la tuerca
 d_2 : diámetro de los flancos del filete
 $H_1 = 0,5$ Paso : profundidad portante de la rosca (figura 1)

Y se debe cumplir que

$$p \leq p_{\text{adm}}$$

$p_{\text{adm}} = 3$ a 8 N/mm^2 para tuercas de fundición gris
 $p_{\text{adm}} = 5$ a 15 N/mm^2 para tuercas de bronce .
(Maschinen-elemente Band 1 - Gustav Niemann – Springer Verlag)

Frecuencia natural

Con el fin de evitar la resonancia debido a la flexión del tornillo sometido a velocidades de giro cercanas a alguna frecuencia natural, es necesario hacer la verificación correspondiente.

La frecuencia natural angular (ω_j) de orden j de una barra de sección constante, con apoyos simples distanciados L , está dada por:

$$\omega_j = (j^2 \pi^2) \sqrt{(EI/\rho AL^4)}$$

(Mecanismos y dinámica de maquinaria / Mabie . Ocvirk / Limusa 1990; pág. 591)

Para un tornillo:

$$I = \pi d_s^4 / 64 \quad (\text{momento de inercia})$$

$$A = \pi d_s^2 / 4 \quad (\text{área de la sección transversal de diámetro resistente } d_s)$$

$$d_s = (d_2 + d_3)/2$$

Y para el acero:

$$E = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{modulo de elasticidad del acero})$$

$$\rho = 7,85 \text{ kg/dm}^3 \quad (\text{densidad del acero})$$

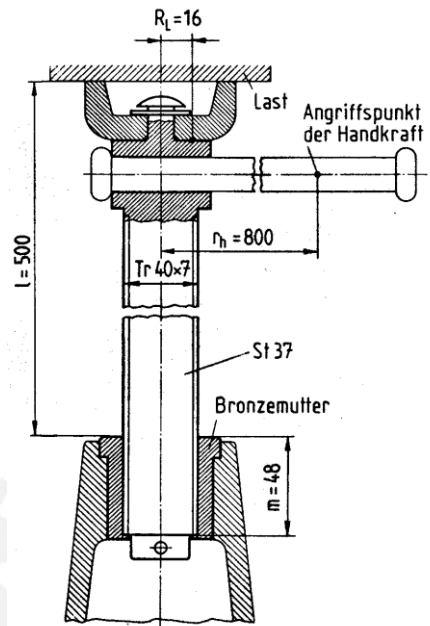
EJEMPLO DE APLICACIÓN:

La gata manual, representada en la siguiente figura en su estado de final de carrera, se destina a elevar cargas hasta un máximo de **15 kN**.

Debe calcularse la resistencia del husillo (acero St 37) y su resistencia al pandeo, así como la presión en los flancos de la tuerca (bronce). Además, se debe determinar con qué rendimiento trabaja el husillo y que fuerza manual debe efectuarse para la elevación y el descenso. El coeficiente de rozamiento entre la garra porta carga y el resalte del husillo puede estimarse en **0,1**, el mismo valor se puede estimar para los flancos de la rosca, debido a que no puede mantenerse una buena lubricación.

Puesto que se producen cargas y descargas se asumen esfuerzos pulsantes

Se observa que el tornillo es trapecoidal de **40 mm** de diámetro nominal (exterior) y paso de hélice **7 mm**.



$$F = 15\,000\text{ N}$$

$$L_p = 2L = 2 \times 500 = 1000\text{ mm (suponiendo apoyos libre-empotrado)}$$

$$d_3 = 32,0\text{ mm}$$

$$d_2 = 36,5\text{ mm}$$

$$d_s = 0,5 (d_2 + d_3) = 34,25\text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{8 L_{\max}}{d_3} = 125 > 100$$

$$\sigma = F/A_3 = 15000 / 804,25 = 18,65\text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Lim}2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = 132,65\text{ N/mm}^2$$

$$FS = \sigma_{\text{Lim}2} / \sigma = 7,11 \dots \text{ valor que está dentro del rango del FS recomendado; confiable}$$

El ángulo de la hélice es:

$$\text{tg } \varphi = \frac{P}{\pi d_2} = 0,061 \rightarrow \varphi = 3,5^\circ$$

Para rosca trapecial se tiene que $\alpha = 30^\circ$, luego:

$$\text{tg } \rho' = \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} = 0,1035 \rightarrow \rho' = 5,91^\circ$$

El momento tangencial para la elevación es:

$$M_t = F \operatorname{tg} \left(\phi' + \phi \right) \frac{d_2}{2}$$

$$M_t = 45\,368 \text{ N.mm}$$

Esfuerzo equivalente en la sección efectiva (d_s) del husillo:

$$\sigma = F/A_s = 15000 / 921,32 = 16,28 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{16 M}{\pi d_s^3} = 5,75 \text{ N/mm}^2 \text{ con } M = M_t$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 19,08 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} = 0,2 \sigma_B = 74 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{eq} = 19,08 < 74 = \sigma_{adm} \quad \dots \quad \text{confiable con aparente sobredimensionamiento.}$$

Presión en los filetes de la tuerca

$$H_1 = P/2 = 3,5 \text{ mm}$$

$$m = 48 \text{ mm}$$

$$p = F h / (m d_2 \pi H_1) = 5,45 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \quad \text{menor al promedio del rango admisible (5 a } 15 \text{ N/mm}^2)$$

Momento torsor total necesario para girar el husillo y elevar la carga . Para vencer la fuerza de fricción entre el porta carga y el resalte del husillo, se requiere un momento de rozamiento M_R :

$$M_R = F \mu_R \frac{D_m}{2} = 24000 \text{ N.mm} \quad \text{para } D_m = 32 \text{ mm}$$

$$M_A = M_t + M_R = 69368 \text{ N.mm}$$

La fuerza manual necesaria en la palanca

$$F_p = M_A / 800 = 86,71 \text{ N}$$

Rendimiento mecánico en la elevación

$$\eta_T = \frac{1}{\frac{\operatorname{tg} \left(\phi' + \phi \right)}{\operatorname{tg} \phi} + \frac{\mu_R \pi D_m}{P}} = 0,24 \quad \text{es decir } 24\%$$

Esta separata ha sido preparada sobre la base del material preparado originalmente por el profesor Ing. Miguel Alvarez.

ANEXO 3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

SECCIÓN INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE DISEÑO

ELEMENTOS DE MÁQUINAS 1

EJES Y ÁRBOLES

KURT F. PAULSEN MOSCOSO

2012-1

USO INTERNO

EJES Y ÁRBOLES

Son elementos de máquinas generalmente de sección circular y eventualmente con tramos de sección poligonal. Portan ruedas, engranajes, poleas, cojinetes, rodamientos y otros elementos. La característica común de éstos es el giro; ya sea sobre el eje o en conjunto con el árbol o eje de transmisión.

Designaremos como ejes a los que no transmiten potencia y trabajan únicamente a flexión. Los árboles además de girar, transmiten torsión, pudiendo o no trabajar a flexión.

Los árboles pueden ser rectos o acodados. Los acodados, tal como un cigüeñal, no se tratan en este curso.

En la figura 1 a la izquierda se muestra un eje que gira y a la derecha uno que no lo hace. Ambos tienen la función principal de portar un par de ruedas de un carro. Ninguno de los dos transmite potencia.

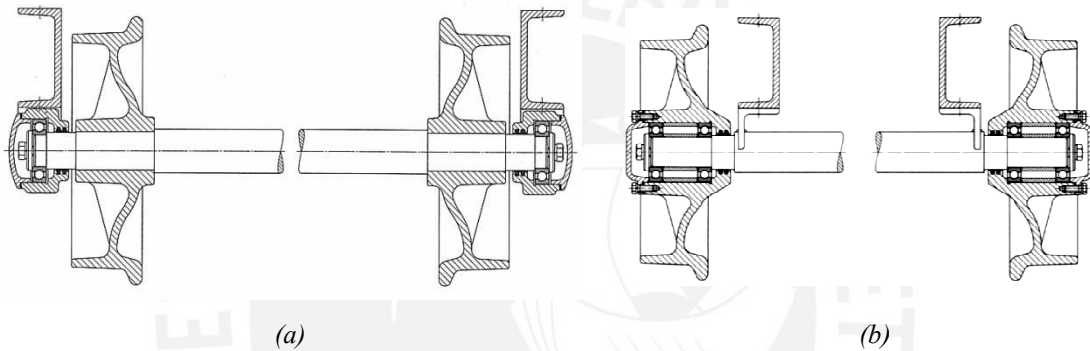


Figura 1

Los árboles o ejes de transmisión de la figura 2 son semejantes en cuanto a que tienen dos apoyos intermedios y la entrada y salida de carga en los extremos. En el de la figura (a) sólo hay fuerzas en el extremo izquierdo sobre el engranaje cónico y en el otro extremo sólo hay momento torsor aplicado por intermedio de un acoplamiento. En la figura (b) hay fuerzas en ambos extremos, debido al corte sobre la sierra de disco a la izquierda y sobre la polea debido a la faja a la derecha. Son árboles porque además de girar hay transmisión de torque.

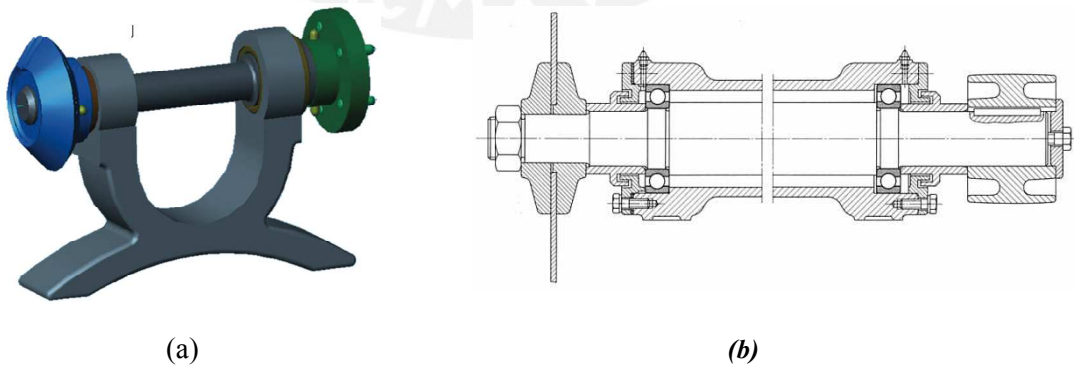


Figura 2

La figura 3a de la siguiente página nos muestra una caja de reducción con engranajes cilíndricos de dientes helicoidales. Se observan tres árboles apoyados sobre rodamientos cónicos. En la figura 3b se muestra uno de los árboles. También se muestra en las figuras 3c y 3d.

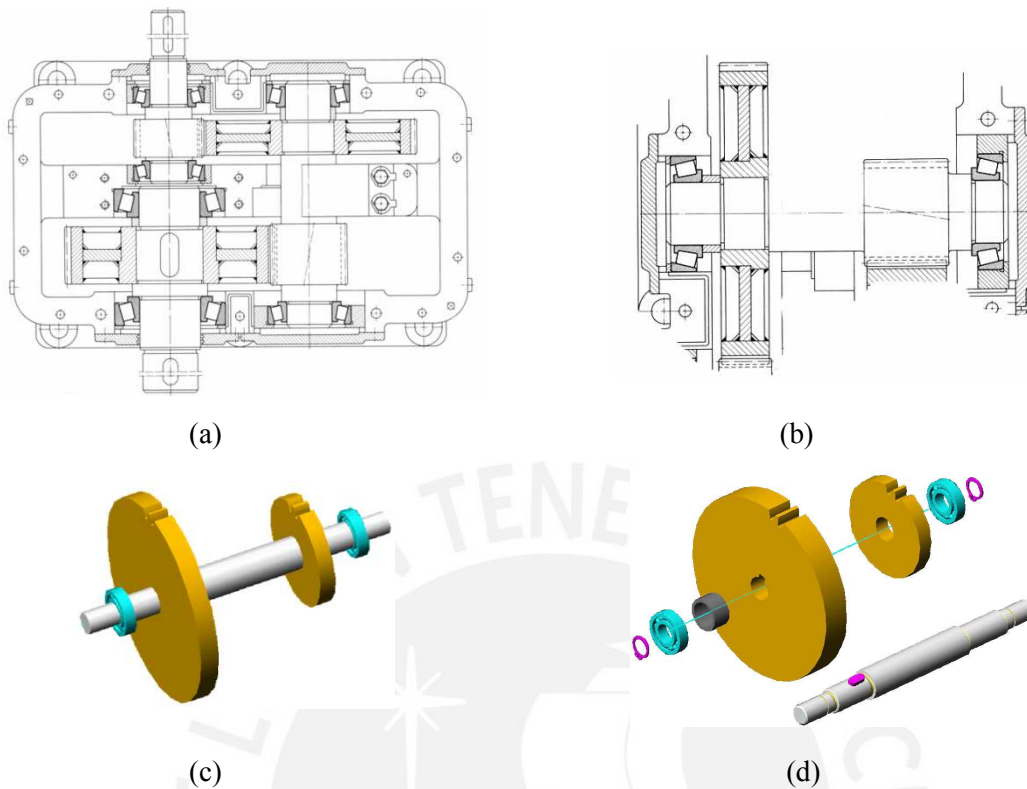


Figura 3

En la bicicleta de la figura 4 podemos reconocer tres conjuntos giratorios: las dos ruedas y los pedales. De acuerdo a lo que el lector conoce de las bicicletas ¿podría identificar si los ejes giran o no lo hacen?, además ¿transmiten potencia? ¿cuál es la fuente de energía?.



Figura 4

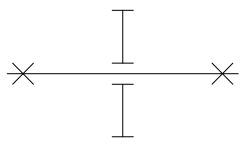
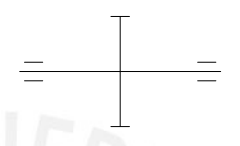
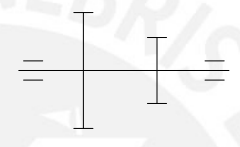
Análisis de ejes y árboles.

Los ejes y árboles se deben diseñar para que trabajen en forma confiable cumpliendo su función. Los cálculos que implican este diseño deben evitar percances en el sistema debido a la falla del eje por cualquier motivo previsible. Ello implica que se deben realizar cálculos en los siguientes aspectos:

- Resistencia a la fluencia y a la fatiga
- Deformaciones transversal y angular
- Deformación torsional
- Velocidad de giro y frecuencia natural del sistema. Resonancia por deformación transversal y por deformación torsional.

Cálculo por resistencia

El cálculo por resistencia debe cubrir tanto la resistencia a la fluencia como la resistencia a la fatiga; para ello es útil el cuadro resumen siguiente.

<i>Elemento</i>	<i>Situación</i>	<i>Esquema</i>	<i>Solicitud</i>
EJE	Fijo		Flexión estática ⁽¹⁾
	Giratorio		Flexión alternante
ARBOL	Giratorio		Flexión alternante y torsión ⁽¹⁾ ó Torsión ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Aunque la sollicitación aparente es estática, se considera variable tipo pulsante en los cálculos.

Como se puede apreciar en el cuadro anterior, en todos los casos los esfuerzos son o se consideran fluctuantes en el tiempo por lo que siempre se deberá realizar la verificación por resistencia a la fatiga.

El cálculo por fatiga se puede realizar descomponiendo los esfuerzos en sus componentes alternante (σ_a) y medio (σ_m) y luego aplicar los diagramas de Smith, Goodman o Haigh para la verificación del factor de seguridad; incluyendo claro está los coeficientes de fatiga (factor de tamaño, factor de acabado superficial, factor de concentración de esfuerzos y otros).

El factor de seguridad recomendado (STEINHILPER – RÖPER / Konstruktionselemente 3 – Springer 1996) es:

$$FS_R = 1,2 \dots 1,8$$

Como una alternativa que no requiere descomponer los esfuerzos en sus componentes alternante y medio, para ejes y árboles, podemos emplear la expresión de C. Bach,

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3(\alpha_o \tau_t)^2}$$

$$\alpha_o = \frac{\sigma_{fAL}}{1,73 \tau_{tPUL}}$$

σ_{fAL} : resistencia a la fatiga en flexión alternante

τ_{tPUL} : resistencia a la fatiga en torsión pulsante

No olvidando los coeficientes de fatiga:

β_f : factor de concentración de esfuerzos efectivo a la flexión

β_t : factor de concentración de esfuerzos efectivo a la torsión

C_s : coeficiente por acabado superficial

C_t : coeficiente por tamaño (diámetro de la sección)

C_{temp} : coeficiente por temperatura (del eje durante el trabajo)

Es decir, la expresión de C. Bach, sería:

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(\sigma'_f)^2 + 3(\alpha_o \tau'_t)^2} \leq \frac{\sigma_{fAL}}{FS_R} \quad \text{ó} \quad FS = \frac{\sigma'_{eq}}{\sigma_{fAL}} \geq FS_R$$

$$\sigma'_f = \frac{\beta_f}{C_s \cdot C_t \cdot C_{temp}} \sigma_f$$

$$\tau'_t = \frac{\beta_t}{C_s \cdot C_t \cdot C_{temp}} \tau_t$$

Esta verificación se debe hacer en los puntos críticos de todas las secciones más cargadas. Con el fin de facilitar la determinación de estas secciones, se sugiere: hacer el diagrama de cuerpo libre, calcular las reacciones y dibujar los diagramas de momentos y fuerzas internas. Todo esto sin perder de vista la geometría del eje (diámetros, cambios de sección, canales chaveteros, etc.).

Es oportuno comentar que estos cálculos sólo se podrán realizar si se conocen la geometría, el material y las cargas sobre el eje. En los casos que se desee proyectar un eje, no se conocen sus características ni cargas y no será posible hacerlos por no tener la información completa. Para diseñar un eje se sugiere darle forma tentativa, calcularlo y modificarlo hasta que satisfaga todas las exigencias o requerimientos. Con el fin de dar forma inicial al eje, es buena práctica realizar un cálculo previo.

Cálculo previo.

Debe quedar claro que este es un cálculo en borrador, que se realiza en una o más secciones del eje, con el fin de tener idea de los diámetros y así darle una forma inicial. Esto se hace teniendo en cuenta los distintos elementos que irán sobre el mismo.

En el cálculo previo no se emplean los coeficientes de fatiga y en su lugar se aplica un factor de seguridad más alto al recomendado anteriormente.

Finalmente, luego del cálculo previo, con la geometría y las cargas definidas ya se pueden verificar las secciones críticas.

Expresiones útiles

$$\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi d^3} \quad \text{esfuerzo máximo en una sección de diámetro } d, \text{ debido a la flexión}$$

$$\tau_t = \frac{32M_t}{\pi d^3} \quad \text{esfuerzo máximo en una sección de diámetro } d, \text{ debido a la torsión}$$

Caso 1. Eje fijo

$$\sigma_f \leq \sigma_{fAdm}$$

$$\sigma_{fAdm} = \frac{\sigma_{fPUL}}{FS_R^*}$$

$$FS_R^* = 3 \dots 5$$

Caso 2. Eje giratorio

$$\sigma_f \leq \sigma_{fAdm}$$

$$\sigma_{fAdm} = \frac{\sigma_{fALT}}{FS_R^*}$$

$$FS_R^* = 4 \dots 6$$

Caso 3. Árbol. Conocidos la potencia y la velocidad de giro.

$$\tau_t \leq \tau_{tAdm}$$

$$\tau_{tAdm} = \frac{\tau_{tPUL}}{FS_R^*}$$

$$FS_R^* = 3 \dots 5 \quad \text{si trabaja solo a torsión}$$

$$FS_R^* = 10 \dots 15 \quad \text{si trabaja a torsión y flexión simultáneas}$$

Caso 4. Árbol. Conocidas las dimensiones y fuerzas radiales (producen flexión)

$$\sigma_f \leq \sigma_{fAdm}$$

$$\sigma_{fAdm} = \frac{\sigma_{fALT}}{FS_R^*}$$

$$FS_R^* = 4 \dots 6$$

Caso 5. Árbol. Conocidos la potencia, velocidad de giro y fuerzas (flexión)

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_{fAdm}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3(\alpha_o \tau_t)^2}$$

$$\sigma_{fAdm} = \frac{\sigma_{fALT}}{FS_R^*}$$

$$FS_R^* = 3 \dots 5$$

Simplificación del cálculo previo

Como se trata de un cálculo “en borrador”, la expresión del esfuerzo equivalente se puede simplificar.

Sabiendo que $\alpha_o = 0,6 \dots 0,8$; se obtiene $3\alpha_o^2 = 1,1 \dots 1,9$.

Por tanto se puede escribir

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 2(\tau_t)^2}$$

STEINHILPER – RÖPER / Konstruktionselemente 3 – Springer 1996
G. Köhler – H. Rögnitz / Maschinenteile 2 – B.G. Teubner Stuttgart 1973

DEFORMACIÓN TRANSVERSAL POR FLEXIÓN

Al deformarse el eje por flexión se deben verificar que tanto la deformación lineal como la deformación angular no sobrepasen valores admisibles. Se pueden determinar las expresiones matemáticas de ambas deformaciones a lo largo del eje o calcular puntualmente la deformación en una sección específica.

- Determinación de la ecuación de la elástica
Se parte de la siguiente expresión y se integra una primera vez para obtener los desplazamientos angulares y una segunda para tener los desplazamientos lineales o transversales

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{E \cdot I(x)}$$

- Teorema de Castigliano
Con esta ecuación se obtiene la deformación en la sección que se aplica la sollicitación.

$$\delta(F) = \frac{\partial U}{\partial F}$$

$$\varphi(M) = \frac{\partial U}{\partial M}$$

Deformaciones admisibles

Como se ha mencionado, las deformaciones no deben sobrepasar valores recomendados. En el cuadro siguiente la deformación transversal admisible está dada en milímetros por metro de longitud entre apoyos.

δ^*_{Adm} (mm/m)	Aplicación
0,5	Árboles de transmisión
0,3	Máquinas en general
0,2	Máquinas herramientas

Si en la sección analizada hay un engranaje, la deformación transversal debe estar limitada por una fracción del módulo (m) del diente.

$$\delta_{Adm} = 0,01 \text{ m}$$

En los apoyos se debe calcular el desplazamiento angular, teniendo en cuenta si son cojinetes de contacto plano o rodamientos. Si son rodamientos se recomienda utilizar el valor recomendado por el fabricante del rodamiento.

φ_{Adm}	Aplicación
$0,2 \times 10^{-3}$ radian	Cojinete de contacto plano
2 a 10 minutos	Rod. Rígido de bolas
1,5 a 3 grados	Rod. De bolas a rótula
3 a 4 minutos	Rod. De rodillos cilíndricos
1,5 a 3 grados	Rod. De rodillos a rótula

DEFORMACIÓN TORSIONAL

Debido al momento torsor el árbol se deforma torsionalmente, pudiéndose calcular el ángulo relativo de giro entre dos secciones distanciadas una longitud conocida. El valor calculado no deberá sobrepasar el recomendado.

$$\frac{\varphi}{L} = \frac{M_t}{GI_o}$$

$$\frac{\varphi}{L} \leq \left(\frac{\varphi}{L}\right)_{Adm}$$

$(\varphi/L)_{Adm}$	Aplicación
(0,25 a 0,5) °/m de longitud	Árboles en general
1° para una longitud de husillo L*	Para husillo de taladro

* L = (20 a 25) D con D el diámetro del husillo

VERIFICACIÓN DINÁMICA

Con el fin de evitar que se produzca el fenómeno de resonancia; es decir deformaciones excesivamente grandes en el rango plástico del material, se debe verificar que la velocidad de giro no esté cerca de la velocidad de giro propia del sistema (frecuencia natural).

Velocidad crítica a la flexión:

El centro de gravedad de las masas giratorias en un eje, por lo general, no coinciden con el eje de giro; razón por la cual se originan fuerzas dinámicas que originan que el eje se deforme transversalmente.

Se deduce que :

$$\frac{y}{e} = \frac{\omega^2}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

Donde:

- y : deformación transversal
- e : excentricidad de la masa (distancia entre el centro de masa y el centro de rotación)
- ω : velocidad angular del eje

ω_n : velocidad angular propia del sistema (frecuencia natural) $\omega_n = \sqrt{c_f/m}$

m : masa de la rueda

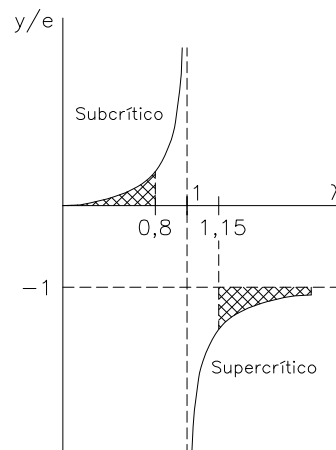
c_f : constante de rigidez del eje a flexión, calculada en la sección de la rueda.

Se puede reescribir la expresión, haciendo $\lambda = \omega/\omega_n$

$$\frac{y}{e} = \frac{\lambda^2}{1 - \lambda^2}$$

Se recomienda que:

- | | | |
|---|-----------------|-------------------------|
| y | $\lambda < 0,8$ | en el lado subcrítico |
| | $\lambda > 1,5$ | en el lado supercrítico |



Velocidad crítica a la torsión:

En los casos en que la sollicitación (trasmisión de torque) tenga una frecuencia, podría presentarse la resonancia torsional.

Este tipo de trasmisión ocurre generalmente cuando hay un acoplamiento entre el árbol y la carga.

La velocidad de giro propia del sistema estaría dada por:

$$\omega_n = \sqrt{c_t / J_m}$$

Donde:

- ω_n : velocidad angular propia del sistema (frecuencia natural)
- c_t : constante de rigidez a la torsión calculada en el lugar de la masa
- J_m : momento de inercia de la masa giratoria

CONSTANTE DE RIGIDEZ

La constante de rigidez se define como

$$c_f = F/\delta \quad \text{ó} \quad c_t = M_t/\varphi$$

Donde:

- c_f : constante de rigidez a la flexión
- c_t : constante de rigidez a la torsión
- F : fuerza aplicada al eje en la sección que se quiere determinar la constante de rigidez
- δ : desplazamiento transversal en el punto de aplicación de la fuerza F y en dirección de ésta.
- M_t : momento torsor aplicado en el tramo del eje que se quiere determinar la constante de rigidez
- φ : deformación angular por torsión en la sección donde se aplica el momento M y en el mismo plano que se aplica éste.

ANEXO

Resistencia alternante y pulsante de aceros

Acero	Flexión (N/mm ²)		Torsión (N/mm ²)	
	σ_{fPUL}	σ_{fALT}	τ_{tPUL}	τ_{tALT}
Al carbono DIN EN 10025 (DIN17100)				
S 235 JR (St 37-2)	340	200	170	140
S 275 JR (St 44-2)	360	220	180	150
E 295 (St 50-2)	420	260	210	180
E 335 (St 60-2)	470	300	230	210
E360 (St 70-2)	520	340	260	240
Bonificado DIN EN 10083 (DIN17200)				
C 22, Ck 22	480	280	250	190
C 35, Ck 35	550	330	300	230
C 45, Ck 45	620	370	340	260
40 Mn4, 25 CrMo4, 37 Cr4, 46 Cr2	750	440	450	300
41Cr4, 34 CrMo4	820	480	550	330
42 CrMo2, 50 CrV4	940	530	630	370
30 CrNiMo8, 36 CrMoV4, 32 CrMo12	1040	600	730	420

Ejemplo.

Se trata de un árbol apoyado en sus extremos sobre rodamientos del mismo tamaño.

En toda su longitud salvo los extremos es un eje estriado con acabado superficial $R_t = 10 \mu\text{m}$

El acero a emplear es un **E335**.

Entre los dos engranajes se transmitirá **28,5 kW** girando a **684 rpm**.

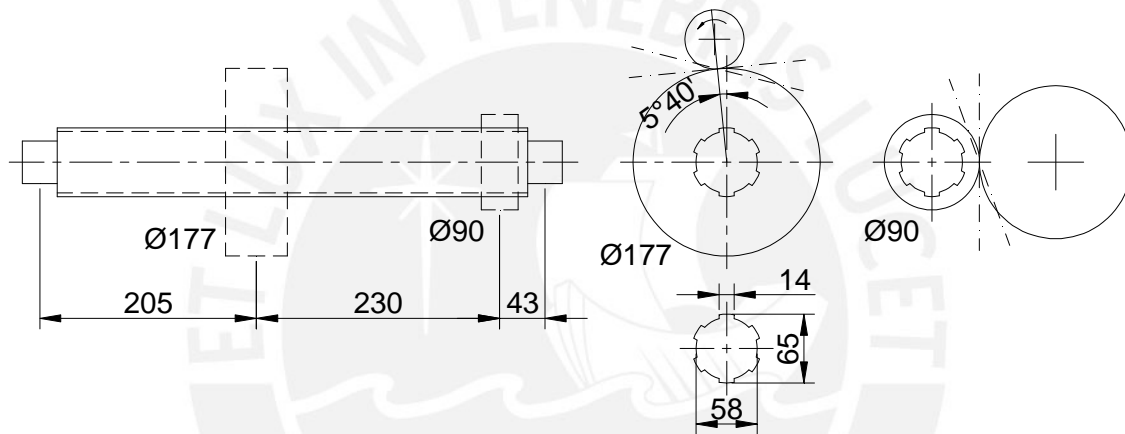
Los engranajes son cilíndricos de dientes rectos de módulo **3** con **59** y **30** dientes respectivamente.

La rueda motriz engranará con el engranaje de 59 dientes. La línea que une los dos centros forma **5°40'** con el plano vertical.

Al trabajar alcanzará como máximo una temperatura de **45°C**

Se pide:

- ¿Diámetro máximo del agujero del rodamiento a emplear?
- Verificar el árbol por resistencia.



Información necesaria:

- Factores de concentración de esfuerzo efectivos para flexión y torsión
 $B_f = 1,8 \dots 2,0$ $\beta_t = 2,0 \dots 2,5$
- Coeficiente de tamaño
 $C_t = 0,65$
- Coeficiente de acabado superficial
 $C_s = 0,90$
- Coeficiente de temperatura
 $C_{temp} = 1,0$

ANEXO 4

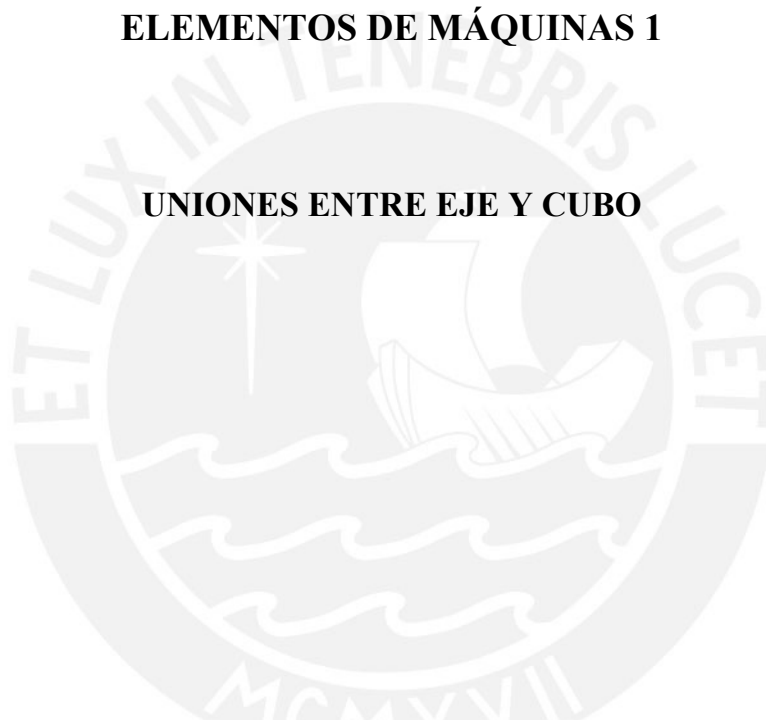
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

SECCIÓN INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE DISEÑO

ELEMENTOS DE MÁQUINAS 1

UNIONES ENTRE EJE Y CUBO



KURT F. PAULSEN MOSCOSO

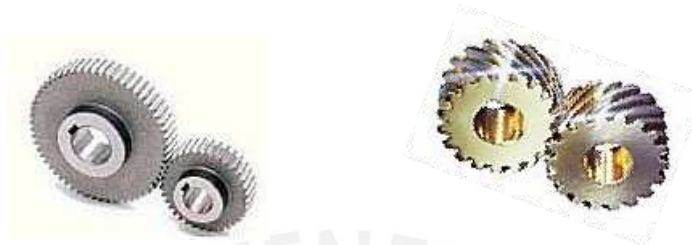
2011-2

USO INTERNO

Unión entre eje y cubo.

Un eje suele estar apoyado en cojinetes o rodamientos y soporta ruedas u otros elementos. La zona de la rueda, cercana y en contacto con el eje se le denomina cubo. Entre el cubo y el eje puede haber un cojinete que permita el giro relativo o en su lugar haber una unión.

Una unión entre eje y cubo tiene como objetivo fundamental la transmisión de torque entre la rueda y el eje.



Tipos de unión.

Podemos distinguir tres tipos de unión: por forma, por fricción y soldadas.

En las uniones por forma la transmisión del momento torsor se logra por la geometría en las zonas de contacto entre cubo y eje. En las uniones por fricción se requiere que en la zona de contacto entre el cubo y el eje exista una presión que origina una fuerza normal.

En este capítulo se desarrollan uniones por forma (chavetas, ejes estriados y ejes poligonales) y las uniones por fricción (ajuste por contracción y anillos de expansión). La unión soldada se trata en el capítulo de uniones soldadas.

1.1.- UNIONES POR FORMA CHAVETAS – EJES ESTRIADOS – EJES POLIGONALES

Se utilizan para transmitir movimiento o momento torsor entre un eje y una rueda, leva, volante, acoplamiento, palanca u otro elemento. Como su nombre lo indica, la transmisión se realiza debido a la forma de los elementos en la zona de contacto. Usualmente un elemento empuja mientras que el otro es empujado; los elementos más usuales suelen ser chavetas con los canales chaveteros respectivos.

En el primer grupo de la figura 1.1/1 se muestra una clavija inclinada que atraviesa el eje (a), varios tipos de chavetas (b, c y d), dos ejes estriados (e y f) y un eje triangular (g). En el segundo grupo de la misma figura se observa una clavija cónica axial (a) y chavetas inclinadas.

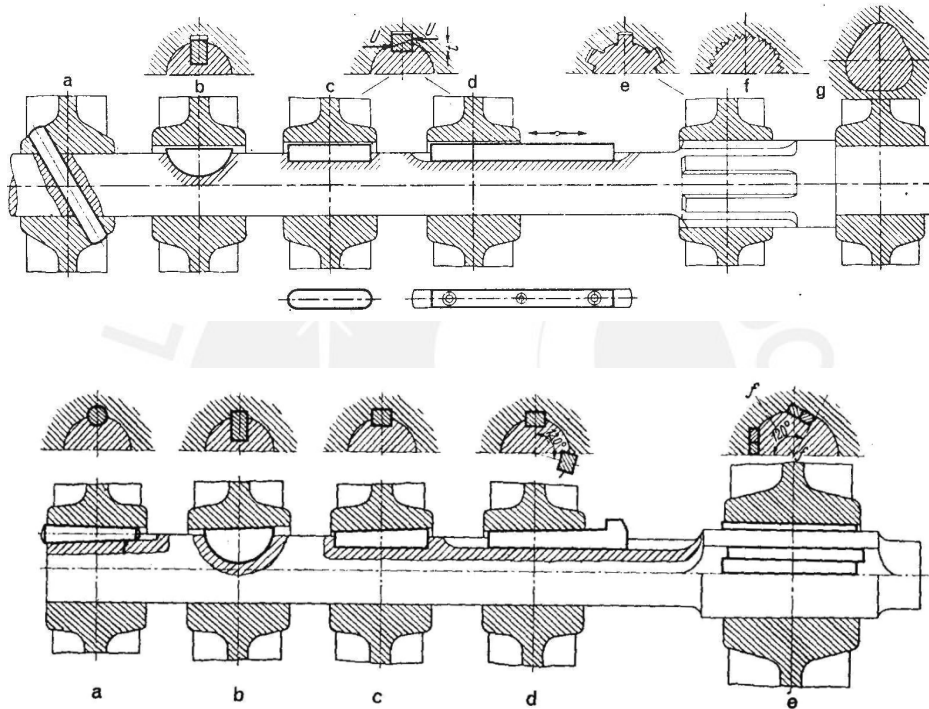


Figura 1.1/1

UNION POR CHAVETA.

Las chavetas o lengüetas, son elementos de sección rectangular o cuadrada, se colocan en el canal chavetero del eje y en el canal chavetero del cubo (ver figura 1.1/2). De no ser por la chaveta, la rueda giraría deslizando sobre el eje; la chaveta impide el giro relativo entre ambos elementos y de esta manera transmite torque o potencia.

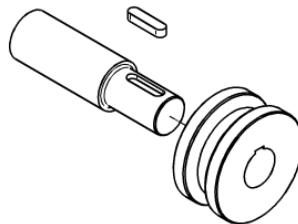


Figura 1.1/2

Las chavetas paralelas, chavetas de disco y las chavetas tangenciales pertenecen al tipo de uniones por forma.

a) **Chavetas paralelas (planas):** DIN 6885 hoja 1 y hoja 2.

Estas chavetas son de sección rectangular uniforme y se introducen a presión o con juego en un canal chavetero practicado tanto en el eje como en el cubo. Su función es transmitir torque o potencia a través de los flancos.

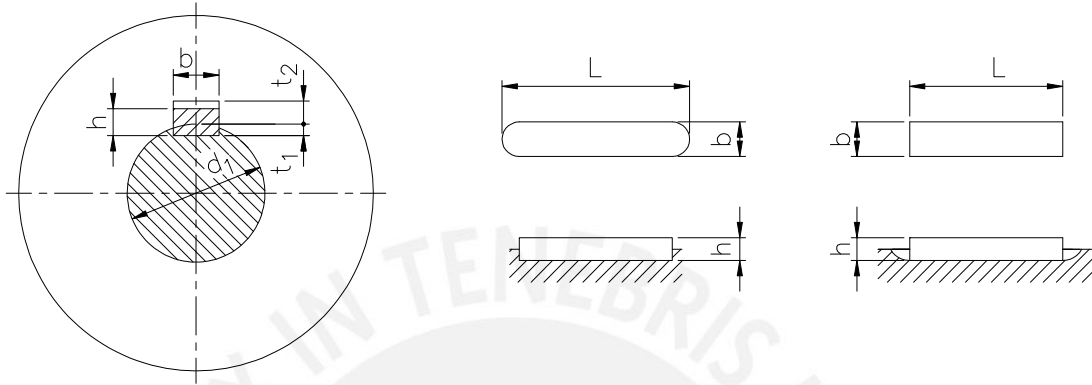


Figura 1.1/3

Su uso es apropiado en todo tipo de máquinas y están normalizadas según el diámetro del eje. La norma DIN 6885 hoja 1 (anexo 1.1/1) se usa para máquinas en general y la hoja 2 está reservada para máquinas herramienta.

El ancho **b** de las chavetas tiene una tolerancia **h9**, mientras que para los canales chaveteros del eje y del cubo se recomiendan las siguientes tolerancias.

Ancho (b)	Ajuste fijo	Ajuste ligero	Deslizante
Canal en el eje	P9	N9	H9
Canal en el cubo	P9	JS9	D10

La potencia puede ser transmitida del eje al cubo o viceversa. El torque es transmitido a través de la presión de contacto que existe entre los flancos de la chaveta y el cubo o eje, como se muestra en la figura 1.1/4.

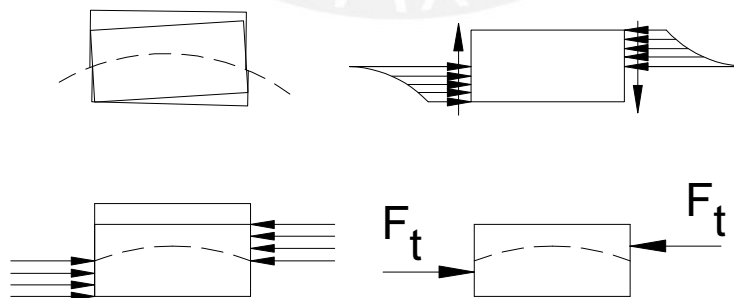


Figura 1.1/4

Como consecuencia del juego que se puede presentar entre la chaveta y uno o ambos canales chaveteros, la chaveta se inclina ligeramente (en la figura se muestra esta inclinación en forma exagerada). Al no estar paralelas las caras del canal con las de la chaveta, la distribución de fuerza de interacción no es uniforme, sino variable (ver figura 1.1/4).

Para el cálculo se asume que la presión (p) entre chaveta y alojamiento es uniforme y que la fuerza resultante F_t en el canal del cubo es tangente al eje.

Esta presión de contacto debe ser menor que la presión admisible del material correspondiente.

$$p = \frac{F_t}{t \cdot L_{ef}} \leq p_{adm}$$

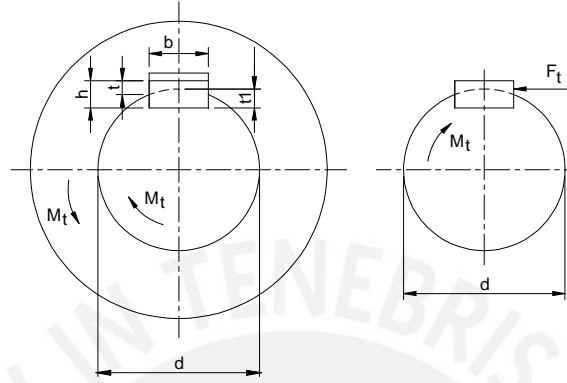


Figura 1.1/5

Dado que la fuerza se asume que es tangencial al eje, se tendrá

$$F_t = \frac{M_t}{d/2}$$

L_{ef} = longitud de contacto efectiva de la chaveta

t = profundidad que penetra la chaveta en el cubo ($t \approx h - t_1$)

p = presión

$$p = \frac{M_t}{\frac{d}{2} \cdot t \cdot L_{ef}} = \frac{2M_t}{d \cdot t \cdot L_{ef}} \leq p_{adm}$$

Por tanto:

$$L_{ef} \geq \frac{2M_t}{d \cdot t \cdot p_{ad}}$$

En base a esta longitud se tendrá la longitud L normalizada de la chaveta (figura 1.1/6).

$$L \geq L_{ef} + b .$$

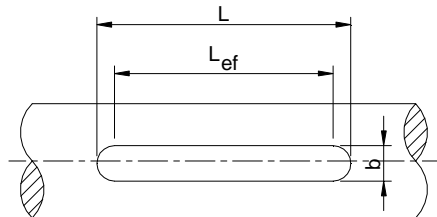


Figura 1.1/6

La **presión admisible del cubo** depende del material menos resistente, que suele ser el del cubo. Se pueden admitir los siguientes valores:

Para el hierro fundido GG: $p_{adm} = 40 \text{ a } 50 \text{ N/mm}^2$
 Para acero St y acero fundido GS: $p_{adm} = 90 \text{ a } 100 \text{ N/mm}^2$

Se debe tener presente que las dimensiones de la sección transversal de la chaveta, así como de los canales chaveteros están normalizadas en función del diámetro del eje. Si se respetan estas dimensiones y el material para la chaveta (St50), generalmente no será necesario verificar la chaveta por esfuerzo de corte.

Si se requiere verificar por corte, se tendría:

$$L_{ef} \geq \frac{2M_t}{b d \tau_{adm}}$$

Se debe tener cuidado en la longitud del cubo L_c sea algo mayor que la longitud de la chaveta. A continuación se consignan algunas proporciones prácticas para longitud L_c y el diámetro exterior D_c del cubo, en función del diámetro del eje d .

	L_c	D_c
Cubo de acero	(1 a 1.3) d	(1.8 a 2) d
Cubo de hierro fundido	(1.5 a 2) d	(2 a 2.2) d

b) Chavetas de disco (planas): DIN 6888 (Woodruff).

Tiene la forma de un segmento de círculo (Figura 1.1/7). Su uso es limitado a la sujeción de elementos que ocasionan muy bajos esfuerzos, debido a que su montaje debilita el eje. Se usa para fijar volantes de mano y en algunos casos para transmitir bajos torques.

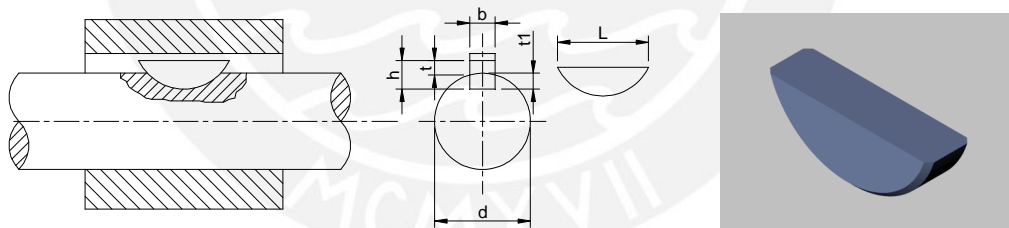


Figura 1.1/7

Las dimensiones de la chaveta y canales chaveteros, también están en función del diámetro del eje (Anexo 1.1/2). Si consideramos que la parte que trabaja es $(h - t_1)$ y el eje trasmite un torque M_t , debemos verificar la presión admisible o de contacto para no dañar el cubo.

$$p = \frac{F_t}{(h - t_1) L} \quad \text{y como } F_t = \frac{M_t}{d/2}$$

$$p = \frac{2 \cdot M_t}{d (h - t_1) L} \leq p_{Adm}$$

Considerando: $p_{adm} = 40 \text{ a } 50 \text{ N/mm}^2$ para cubos de hierro fundido.
 $p_{adm} = 90 \text{ a } 100 \text{ N/mm}^2$ para cubos de acero y acero fundido.

También se puede calcular el momento que puede transmitir la chaveta sin que esta falle por

$$\text{corte } M_t \leq \frac{\tau_{adm} d b L}{2}$$

Estas chavetas son fabricadas de acero St. 60 ó St. 80. Mayor información sobre la geometría, en la norma DIN6888.

Cálculo aproximado de chavetas paralelas

El cálculo aproximado no debe reemplazar en ningún caso al descrito anteriormente. El resultado del cálculo aproximado es útil para el dimensionado previo o aproximado del eje. Luego será necesario verificar la chaveta con el procedimiento descrito en el acápite de chavetas paralelas.

Teniendo en cuenta las proporciones promedio de las dimensiones de las chavetas paralelas según DIN6885 en función del diámetro d del eje, se puede encontrar la capacidad de transmisión del torque por unidad de longitud efectiva de chaveta; así

$$h = (0,15 \text{ a } 0,20) d$$

$$t_l = h - t = 0,6 h$$

Tenemos la presión en el cubo en función del torque y diámetro.

$$p = \frac{2M_t}{d t L} \leq p_{adm}$$

De donde resulta el torque admisible a transmitir por unidad de longitud de chaveta:

$$\frac{M_t}{L} = \frac{d t p_{ad}}{2} \approx \frac{d \times 0,07 d}{2} p_{ad}$$

$$\frac{M_t}{\ell} = 0,035 \cdot d^2 p_{ad}$$

Chavetas múltiples

Cuando el espacio axial disponible es reducido, se pueden usar 2 ó 3 chavetas igualmente espaciadas, ampliando así la capacidad de torque a transmitir, esto puede practicarse siempre y cuando el eje lo permita, si aún así no se puede transmitir el torque podríamos recurrir a utilizar ejes estriados.

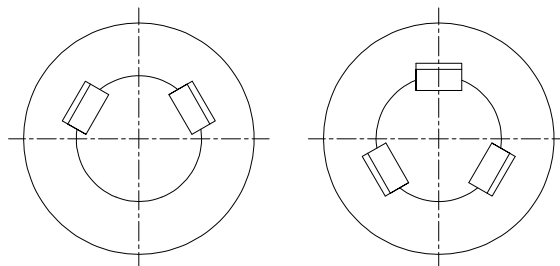


Figura 1.1/8

Ejes estriados

El eje estriado cumple doble función; la de transmitir el momento torsor y la posibilidad de que el cubo puede deslizar axialmente sobre el eje.

El momento torsor a transmitir como es obvio es bastante más alto que el logrado con chavetas múltiples.

Los hay de flancos paralelos y de flancos evolventes. Los de flancos paralelos están normalizados según DIN 5462, DIN5463 y DIN5464 (serie ligera, media y pesada, respectivamente)

Los **ejes estriados para máquinas herramientas**, están normalizados en DIN 5471 para ejes de 4 ranuras y DIN 5472 con 6 ranuras.

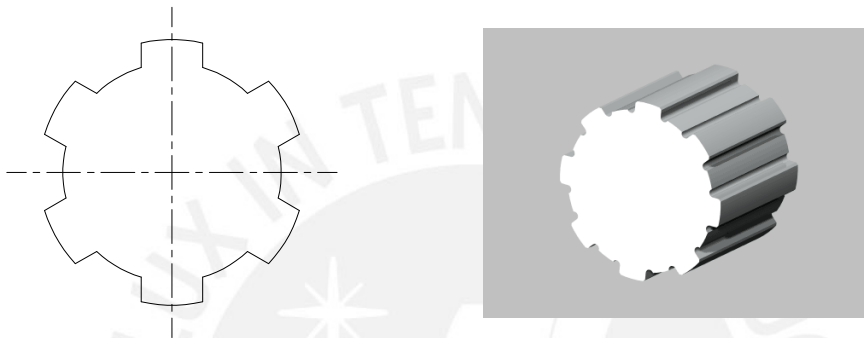


Figura 1.1/9

En cuanto al cálculo se procede igual que en las chavetas paralelas teniendo en cuenta la hipótesis de que sólo el 75% de las estrías trabajan en forma efectiva, entonces la determinación de la longitud para transmitir el momento torsor será:

$$L \geq \frac{2M_t}{D_m h' 0,75 z p_{adm}}$$

donde: D_m = diámetro medio

h' = altura del nervio resistente

$$h' = \frac{d_2 - d_1}{2} \text{ - (redondeos o chaflanes)}$$

z = número de nervios o estrías

p_{adm} = presión admisible

$p_{adm} = 54 \text{ a } 60 \text{ N/mm}^2$ para cubos de fierro fundido.

$p_{adm} = 90 \text{ a } 100 \text{ N/mm}^2$ para cubos de acero y acero fundido

En el caso de que hubieran choques durante la transmisión se debe considerar un factor de choque de **1,43** aplicado al momento torsor.

La capacidad de transmisión por unidad de longitud (de contacto) de estos ejes se pueden evaluar aproximadamente con las siguientes expresiones.

- Serie Ligera DIN 5462 $\frac{M_t}{L} = 0,131 d_2^2 p_{adm}$
- Serie Media DIN 5463 $\frac{M_t}{L} = 0,192 d_2^2 p_{adm}$

- Serie Pesada DIN 5464

$$\frac{M_t}{L} = 0,354 d_2^2 p_{ad}$$

El uso de estas expresiones no debe remplazar en ningún caso al cálculo descrito anteriormente. Se entiende que se utilizan para un cálculo rápido sin necesidad de tablas y con el fin de poder realizar el dimensionamiento aproximado del eje. Las constantes de estas expresiones son valores promedio obtenidos de las dimensiones de la siguiente tabla.

Diámetro interior d_1 mm	Serie Ligera DIN 5462			Serie Media Din 5463			Serie Pesada DIN 5464		
	Número de ranuras z	d_2 mm	b mm	Número de ranuras z	d_2 mm	b mm	Número de ranuras z	d_2 mm	b mm
11	-	-	-	6	14	3	-	-	-
13	-	-	-	6	16	3,5	-	-	-
16	-	-	-	6	20	4	10	20	2,5
18	-	-	-	6	22	5	10	23	3
21	-	-	-	6	25	5	10	26	3
23	6	26	6	6	28	6	10	29	4
26	6	30	6	6	32	6	10	32	4
28	6	32	7	6	34	7	10	35	4
32	8	36	6	8	38	6	10	40	5
36	8	40	7	8	42	7	10	45	5
42	8	46	8	8	48	8	10	52	6
46	8	50	9	8	54	9	10	56	7
52	8	58	10	8	60	10	16	60	5
55	8	62	10	8	65	10	16	65	5
62	8	68	12	6	72	12	16	72	6
72	10	78	12	10	82	12	16	82	7
82	10	88	12	10	92	12	20	92	6
92	10	98	14	10	102	14	20	102	7
102	10	108	16	10	112	16	20	115	8
112	10	120	18	10	125	18	20	125	9

Uniones de ejes y cubos con secciones poligonales

En muchos casos, se necesita unir manivelas, palancas o poleas en extremos de los ejes, para lo cual este tipo de uniones son muy útiles.

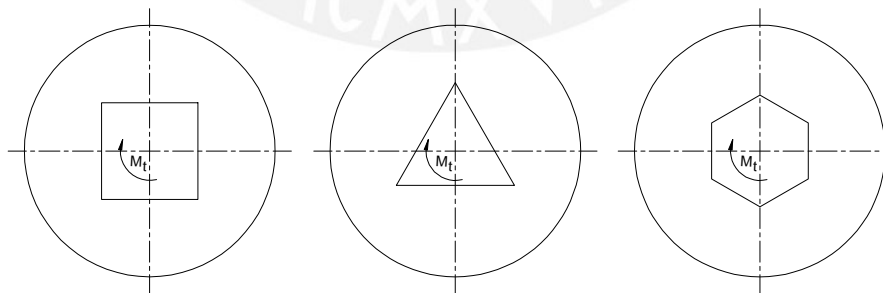


Figura 1.1/10

La capacidad de transmisión de torque se puede evaluar admitiendo una presión admisible en el cubo al igual que en caso de las chavetas.

$$M_t = \frac{1}{6} L \cdot a^2 \frac{z}{2} \cdot p_{ad}$$

donde: L = longitud de contacto
 a = lado del polígono de la sección del eje
 z = número de lados del polígono de la sección
 p_{ad} = Presión admisible

A continuación se presenta el análisis de cuatro casos particulares: sección cuadrada, sección con dos caras paralelas, sección hexagonal y sección triangular.

- **Caso de una sección cuadrada**

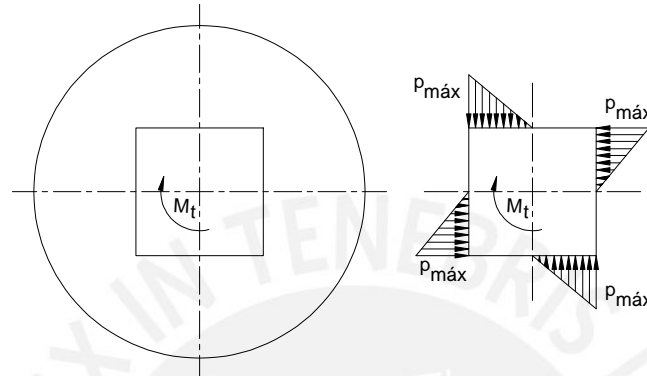


Figura 1.1/11

Asumiendo una distribución de fuerza triangular (figura 1.1/11). Si a es el lado del cuadrado y D , el diámetro de la circunferencia circunscrita

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{2} D \quad \text{y} \quad z = 4$$

de donde:
$$M_t = \frac{1}{6} L \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} D \right)^2 \frac{4}{2} p_{ad}$$

$$M_t = \frac{1}{6} L D^2 p_{ad}$$

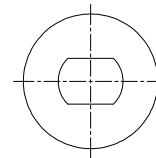
- **Caso de sección con dos caras paralelas**

Cada uno de los lados tienen una de dimensión a (igual al lado del cuadrado inscrito en el eje), por tanto tendremos:

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{2} D \quad \text{y} \quad z = 2$$

de donde
$$M_t = \frac{1}{6} L \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} D \right)^2 \frac{2}{2} p_{ad}$$

$$M_t = \frac{1}{12} L D^2 p_{ad}$$



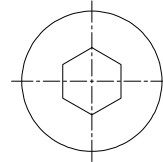
Expresión previsible comparándola con la del cuadrado por tener solo dos lados en lugar de cuatro.

- Caso de sección hexagonal

Para este caso, tendremos:

$$a = \frac{1}{2} D \text{ y } z = 6$$

de donde
$$M_t = \frac{1}{6} L \left(\frac{1}{2} D \right)^2 \frac{6}{2} p_{ad}$$



$$M_t = \frac{1}{8} L D^2 p_{ad}$$

- Caso de sección triangular

Se procede de igual manera que anteriormente;

$$a = \frac{3}{2} D \text{ y } n = 3$$

$$M_t = \frac{1}{6} L \left(\frac{3}{2} D \right)^2 \frac{3}{2} p_{ad}$$

$$M_t = \frac{3}{16} L D^2 p_{ad}$$



1.1.- UNIONES POR FORMA PASADORES - CLAVIJAS

PASADORES

Los pasadores o bulones se emplean como elementos de unión entre piezas que articulan entre sí. Para lograr la articulación se debe tener cuidado con el ajuste de juego necesario. Debido a este juego hay que evitar que el pasador se salga previendo un ajuste o un seguro físico (pasador de aletas, anillo elástico, arandelas de seguridad u otros).

Sirven principalmente para articular eslabones, cabezas y horquillas de tirantes. También se usan como “fusibles” para casos de sobrecargas.

Generalmente se fabrican de acero St 60 o de similar resistencia y por lo general sus propiedades mecánicas son mejores que los otros elementos con los cuales interactúan..

CLAVIJAS

Las clavijas tienen entre sus funciones: unir, fijar, arrastrar, retener, alinear, centrar, asegurar, cerrar, etc., elementos de máquinas. Pueden emplearse para fijar resortes, trinquetes (clavija de botón), tuercas, pasadores, etc.

Las clavijas se usan también para evitar el giro o el desplazamiento relativo entre piezas, es decir se puede ubicar una pieza en una posición exacta respecto de otra.

Pueden ser cilíndricas o cónicas con una conicidad 1:50. A su vez pueden ser partidas (o elásticas), hendidas, ranuradas, etc.

CÁLCULO DE LAS UNIONES CON PASADORES Y CLAVIJAS

Las clavijas y pasadores se deben calcular de tal manera que trabajen en forma confiable a flexión ($\sigma_f \leq \sigma_{fAdm}$) y corte ($\tau_{cAdm} \leq \tau_{cAdm}$). Además los agujeros, donde se alojan estos, no se deben deformen plásticamente ($p \leq p_{Adm}$).

En los siguientes ejemplos se muestran algunos de estos elementos, sus diagramas de cuerpo libre, distribución de esfuerzos y presiones. De acuerdo a éstos se puede decidir qué cálculos son necesarios.

En el anexo 1.1/3 , se incluyen tablas de esfuerzos admisibles a flexión (σ_{fAdm}), corte (τ_{cAdm}) y presión (p_{Adm}). En el cálculo por aplastamiento se debe tener cuidado si el ajuste es de interferencia o deslizante, pues el valor de la presión admisible depende de ello.

Pasadores transversales en tirantes

Se recomiendan las siguientes proporciones entre las dimensiones características

$$\frac{b}{d} = 1.5 \dots 1.7 \quad ; \quad \frac{t_1}{b} = 0.3 \dots 0.5$$

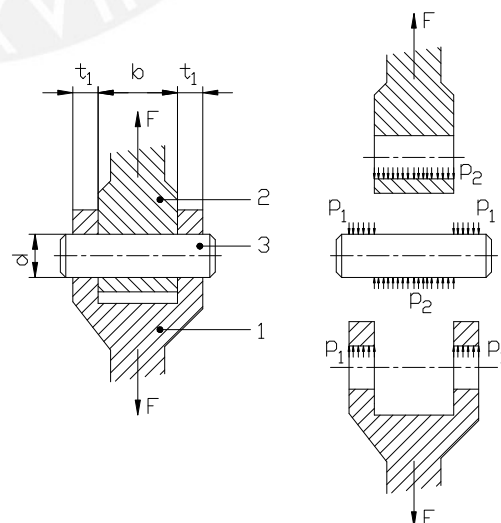


Figura 1.1/12

- Verificación por flexión (asumiendo cargas puntuales)

$$M_{f \max} = \frac{F(b + t_1)}{4}$$

$$\sigma_{f \max} = \frac{32 M_{f \max}}{\pi d^3} \leq \sigma_{f \text{ Adm}}$$

- Verificación por corte

$$F_c = \frac{F}{2}$$

$$\tau_c = \frac{4 F_c}{\pi d^2} \leq \tau_{c \text{ Adm}}$$

- Verificación por aplastamiento

$$p_1 = \frac{F}{2 t_1 d} \leq p_{\text{Adm1}} \quad (\text{en el agujero de longitud } t_1)$$

$$p_2 = \frac{F}{bd} \leq p_{\text{Adm2}} \quad (\text{en el agujero de longitud } b)$$

Clavijas

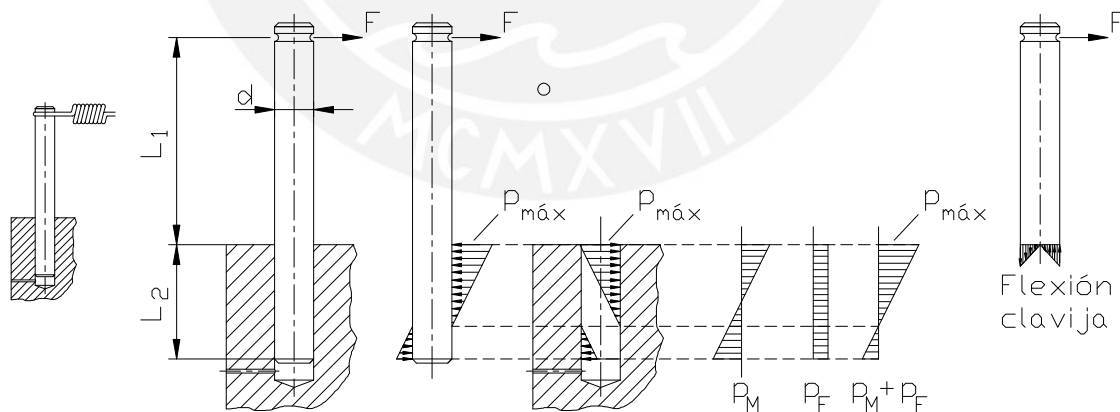


Figura 1.1/13

- Verificación por flexión

$$M_{f \max} = F L_1$$

$$\sigma_f = \frac{32 M_f}{\pi d^3} \leq \sigma_{f Adm}$$

- Verificación por aplastamiento

$$p_F = \frac{F}{d L_2} ; \text{ presión debido a la fuerza directa (F/A)}$$

$$M = F \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right)$$

$$p_{M \max} = \frac{6 M}{d L_2^2} ; \text{ presión máxima debido al momento}$$

Obteniéndose finalmente la presión máxima por superposición de ambos efectos

$$p_{\max} = p_F + p_{M \max} \leq p_{Adm} ;$$

Clavija transversal

Se recomiendan las siguientes proporciones entre las dimensiones características

$$\frac{d}{D_e} = 0.2 \dots 0.3$$

$$\frac{D_c}{D_e} \geq 2 \text{ Para cubos de acero o acero fundido}$$

$$\frac{D_c}{D_e} \geq 2.5 \text{ Para cubos de hierro fundido (Fe Fdo)}$$

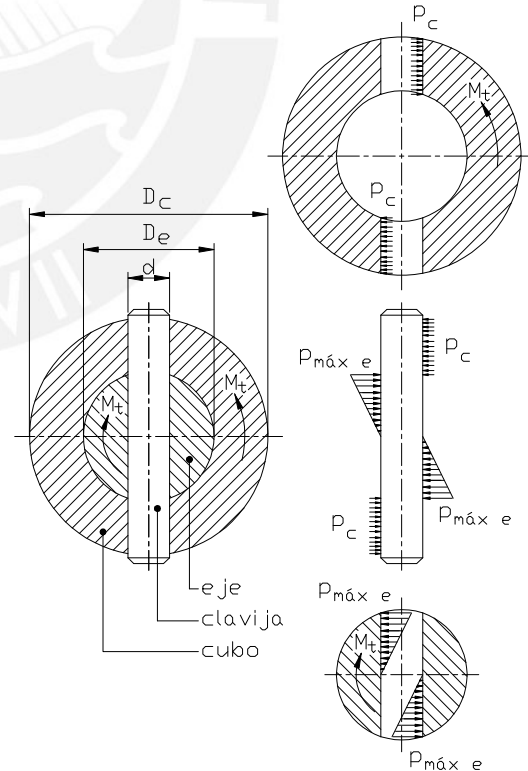


Figura 1.1/14

- Verificación por corte

$$F_c = \frac{M_t}{D_e}$$

$$\tau_c = \frac{4 \cdot F_c}{\pi d^2} \leq \tau_{cAdm}$$

- Verificación por aplastamiento

$$p_c = \frac{4 M_t}{(D_c^2 - D_e^2) \cdot d} \leq p_{Adm c} ; \text{ presión en el agujero del cubo}$$

$$p_{máx e} = \frac{6 M_t}{d \cdot D_e^2} \leq p_{Adm e} ; \text{ presión máxima en el agujero del eje}$$

Clavija axial

Este elemento se coloca paralelo al eje. La longitud de contacto entre la clavija y las superficies del agujero es igual a L.

Como se puede apreciar la presión en el agujero tiene la misma magnitud tanto en la superficie del eje como del cubo. Esta no debe ser mayor a la menor presión admisible de los materiales involucrados.

$$p = \frac{2 F_t}{L \cdot d} \leq p_{Adm}$$

$$p_{Adm} = \min[p_{Adm c} , p_{Adm e}]$$

$$\tau_c = \frac{F_t}{L \cdot d} \leq \tau_{cAdm}$$

Donde

$$F_t = \frac{2 M_t}{D_e}$$

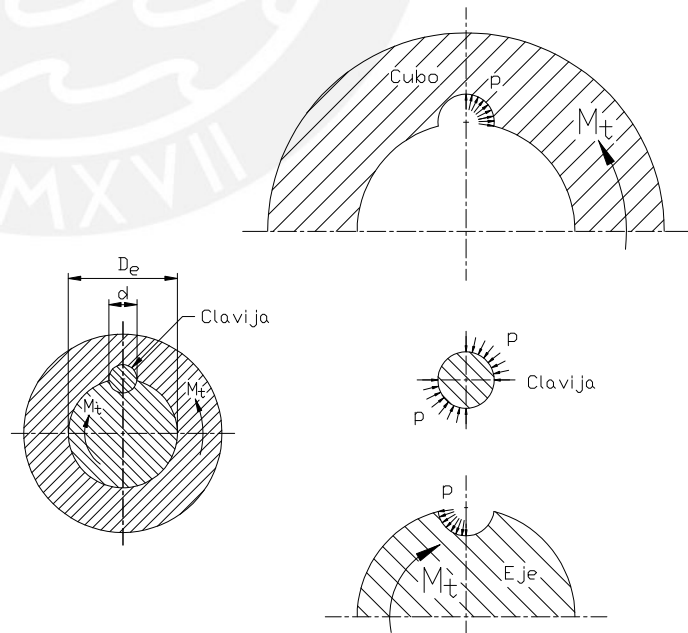


Figura 1.1/15

1.2.- UNIONES POR FRICCIÓN AJUSTE POR CONTRACCIÓN

AJUSTE POR CONTRACCIÓN O ZUNCHADO

En el ensamble mostrado en la figura 1.2/1 las tolerancias H7/p6 entre el cubo y el cojinete producen un ajuste de interferencia, mientras H8/e7 entre el cojinete y el eje producen ajuste de juego. Estos ajustes garantizan que el movimiento relativo tenga lugar entre cojinete y eje.

El ajuste por interferencia se conoce como ajuste por contracción o de apriete y se dice que los elementos están zunchados.

La interferencia geométrica implica que ambos elementos se deforman diametralmente, el eje se contrae y el cubo se expande, originando entre ambos una presión en dirección radial, normal a ambas superficies en contacto. Esta fuerza normal a la superficie origina la aparición de una fuerza de fricción que se puede aprovechar para transmitir una fuerza axial o una fuerza circunferencial entre eje y cubo.

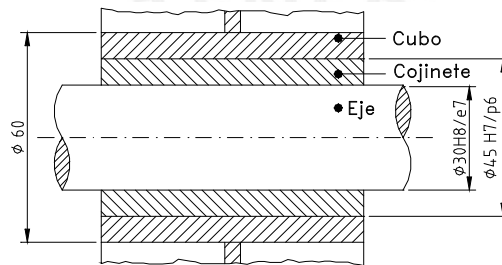


Figura 1.2/1

En la figura 1.2/2 se muestra un eje hueco de radios a y c , un cubo de radios c y b y el conjunto ensamblado.

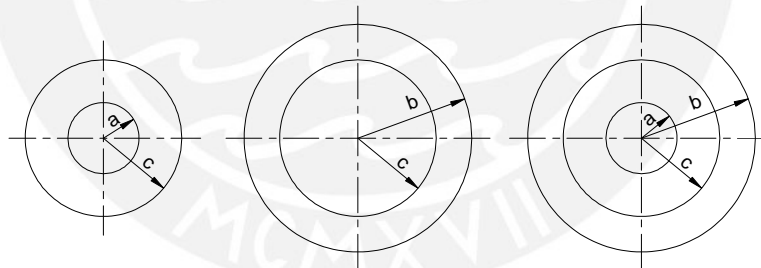


Figura 1.2/2

Las dimensiones mostradas son las nominales. Las reales se conocen una vez fabricados, las cuales deben estar dentro del rango de tolerancias de cada una de las dimensiones. Si se desea una unión por contracción entre el eje y el cubo, las tolerancias seleccionadas deberán ser tales que con cualquier dimensión real (dentro del rango de tolerancias) siempre se obtenga interferencia geométrica entre la superficie exterior del “eje” y la interior del “cubo”.

La interferencia (diametral) está dada por la diferencia entre los diámetros reales del eje (d_{re}) y del agujero del cubo (d_{rc}) ($I = d_{re} - d_{rc}$).

Para proceder con el montaje se deberá dilatar (calentar) el cubo o contraer (enfriar) el eje. Una vez realizado el montaje y equilibradas las temperaturas, el diámetro del eje habrá disminuido y el del agujero aumentado; es decir los radios habrán variado:

- variación del radio de la superficie exterior del eje: u_{eo} (valor negativo)
- variación del radio del agujero del cubo: u_{ci} (valor positivo)

Cumpléndose que $\delta = u_{ci} + (-u_{eo}) = u_{ci} - u_{eo}$, donde δ es la interferencia radial, cuyo valor será la mitad de la interferencia I.

Esta deformación origina una presión entre las caras en contacto, denominada presión de contacto (en la superficie de radio c) p_c . Para el eje será una presión exterior que lo comprime y para el cubo, una presión interior que lo expande.

Se puede calcular una expresión matemática entre la presión de contacto y los desplazamientos de la superficie exterior del eje (u_{eo}) y de la superficie interior de agujero (u_{ci}). Subíndices e para el eje y c para el cubo.

$$u_{eo} = \frac{-p_c c}{E_e} \left(\frac{c^2 + a^2}{c^2 - a^2} - \nu_e \right)$$

$$u_{ci} = \frac{p_c c}{E_c} \left(\frac{c^2 + b^2}{b^2 - c^2} + \nu_c \right)$$

Estas expresiones se pueden deducir fácilmente o consultarlas en V.I. Feodosiev - Resistencia de Materiales / Editorial MIR

Trabajando con estas relaciones y la interferencia radial δ se obtiene el valor de la presión de contacto:

$$p_c = \frac{\delta}{c \left[\frac{1}{E_c} \frac{b^2 + c^2}{(b^2 - c^2)} + \frac{1}{E_e} \frac{c^2 + a^2}{(c^2 - a^2)} + \frac{\nu_c}{E_c} - \frac{\nu_e}{E_e} \right]}$$

Donde E es el módulo de elasticidad y ν , el coeficiente de Poisson para los materiales involucrados. Si se emplea el mismo material para la fabricación del eje y del cubo, se obtendrá:

$$p_c = \frac{E \delta (c^2 - a^2) (b^2 - c^2)}{2 c^3 (b^2 - a^2)}$$

En la siguiente figura se puede observar la distribución de los esfuerzos radial σ_r y tangencial σ_t en el cilindro interior (eje) y en el cilindro exterior (cubo).

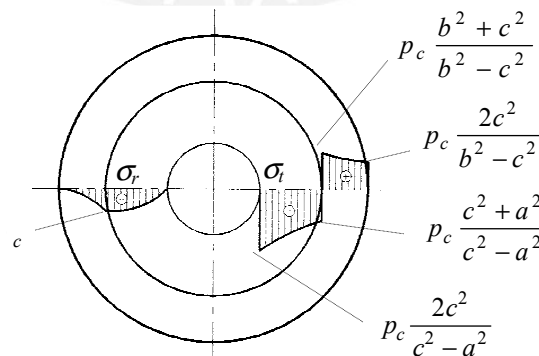


Figura 1.2/3
(Feodosiev - Resistencia de Materiales Fig. 319)

La interferencia se elegirá de tal manera de lograr una presión de contacto que origine la fuerza de fricción necesaria para poder transmitir (por fricción) la fuerza o momento torsor entre el eje y el cubo.

Para esta elección se debe tener en consideración el asentamiento de las superficies, que se tratará más adelante.

Además se deberá verificar que tanto el cubo como el eje no fallen por resistencia al estar sometidos a esfuerzos.

Capacidad de transmisión.

La unión se diseña para que transmita un torque (M_t), una fuerza axial (F_a) o ambos simultáneamente. Estos deben ser menores a la fuerza axial (F_{af}) o el torque máximo (M_{tf}) que se pueden transmitir por fricción, con el fin de garantizar que la unión no resbale durante la operación. Para ello se emplea el coeficiente de servicio C_s ; así:

$$F_{af} \geq C_s F_a$$

$$M_{tf} \geq C_s M_t$$

C_s : coeficiente de servicio ²

$C_s = 1,2 \dots 1,5$ con carga suave y constante

$C_s = 2,0 \dots 4,0$ con carga con vibraciones o golpes

La fuerza de fricción axial máxima que se puede transmitir por fricción está dada por:

$$F_{af} = \mu p_c \pi L_c d$$

Si la fuerza de fricción es circunferencial produce un momento torsor por fricción

$$M_{tf} = \mu p_c \pi L_c d^2/2$$

μ : coeficiente de fricción entre los materiales en contacto (Anexo 1.2/1)

p_c : presión de contacto entre el eje y el cubo

L : longitud de la zona de contacto

d : diámetro del eje (agujero) en la zona en contacto ($d = 2c$; c es el radio)

En el caso de fuerza axial (F_a) y momento torsor (M_t) simultáneos, se deberá trabajar con la fuerza resultante sobre la superficie de contacto. Esta resultante F_R estará compuesta de la fuerza axial y de la fuerza circunferencial (tangencial).

Con el fin de evitar el deslizamiento, esta resultante debe ser menor a la fuerza de fricción originada por la presión de contacto.

$$F_f \geq C_s F_R$$

$$F_f = \mu p_c \pi L_c d$$

En este caso, si se produjera deslizamiento, el movimiento relativo entre el eje y el cubo describiría una trayectoria helicoidal.

En resumen, como se ha visto, para lograr transmitir la fuerza o momento torsor, se requiere una presión de contacto. Y para obtener esta presión se necesita una interferencia I que tenga en cuenta a su vez el asentamiento de las superficies.

Asentamiento de las superficies

Las superficies en general tienen una rugosidad como consecuencia del proceso de mecanizado. En este caso particular las superficies en contacto (exterior del eje e interior del agujero) tienen su acabado superficial, que se puede caracterizar por la profundidad de la rugosidad R_t .

R_t : profundidad de la rugosidad (Anexo 1.2/1)
 R_p : altura por encima del perfil medio $R_p \approx 0,6 R_t^3$

Debido a la presión de contacto, la superficie se asentará, es decir las crestas ocuparán parcialmente los valles. La dimensión radial del eje disminuirá en la magnitud R_{pe} , y aumentará la del agujero en la magnitud R_{pc} . Esto significa que la interferencia radial disminuirá en la magnitud correspondiente al asentamiento en conjunto; es decir la interferencia radial resultante será:

$$\delta = I/2 - (R_{pe} + R_{pc}) = I/2 - 0,6 (R_{te} + R_{ta})$$

Donde I es la interferencia diametral calculada con los diámetros del eje y del agujero antes del montaje.

Verificación por resistencia de cada elemento

Es recomendable trabajar por debajo de la fluencia en materiales dúctiles y bastante por debajo de la rotura en los frágiles. Es decir, trabajar con un factor de seguridad confiable:

$$FS = \sigma_{Lim} / \sigma_{eq} \geq FS_R$$

Donde:

σ_{Lim} : resistencia a la fluencia o a la rotura según sea el caso (material dúctil o frágil)
 σ_{eq} : esfuerzo equivalente en función de los esfuerzos radial σ_r y tangencial σ_t , calculado con la teoría de falla adecuada para el tipo de material
 FS_R : factor de seguridad recomendado ⁽¹⁾

$FS_R = 1,1 \dots 1,3$ para metales dúctiles

$FS_R = 2,0 \dots 3,0$ para metales frágiles

Se podría admitir que la unión trabaje en el rango plástico, pero para esto habría que calcular la presión de contacto conociendo el diagrama σ - ϵ del material en el rango plástico.

Dilatación/contracción para el montaje

Como se ha mencionado, con el fin de poder realizar el montaje del eje con el cubo, hay que conseguir cierta holgura diametral entre estos. Para ello, como se ha mencionado, se calienta el cubo o enfría el eje. Esto significa que el diámetro del cubo aumente o el del eje disminuya, obteniéndose finalmente un juego adecuado.

En caso se caliente el cubo, la dilatación necesaria Δ para realizar el montaje tiene que ser superior a la interferencia I . Una recomendación es que por lo menos sea mayor en un milésimo del diámetro del eje. Es decir

$$\Delta = I + J_{ad}$$

$$J_{ad} = d / 1000 \quad (4)$$

El aumento o disminución de la temperatura necesaria, se calcula con la conocida expresión de la dilatación

$$\Delta t = \Delta / (\alpha d)$$

Donde α es el coeficiente de dilatación térmica (Anexo 1.2/1) y d , el diámetro del eje.

Temperatura de trabajo

Si los materiales del eje y del cubo tuvieran distinto coeficiente de dilatación térmica, es importante tener en cuenta la temperatura de trabajo de la unión, debido a que puede causar dilatación o contracción de los elementos y variar la interferencia y por tanto la presión de contacto.

POSICIÓN Y MAGNITUD DE LA TOLERANCIA

Para poder transmitir el torque requerido, como se ha mencionado, se logra con una interferencia adecuada entre eje y cubo. Con el fin de obtener esta interferencia se deben asignar las tolerancias adecuadas al diámetro exterior del eje y al diámetro interior del cubo.

Con las tolerancias asignadas se puede calcular un rango para la interferencia diametral. Y garantizar que fabricados el eje y el cubo, la interferencia que se obtenga sea mayor o igual a la interferencia necesaria.

En el anexo 1.2/2 se han incluido una tabla de posiciones de r a z para la tolerancia de ejes y otra de la magnitud de la tolerancia hasta la calidad IT18.

De emplear esta tabla de posiciones se entiende que la posición de la tolerancia para el agujero es H ; es decir agujero único.

V.I. Feodosiev – Resistencia de Materiales – MIR

¹ G. Köhler/H. Rognitz – Maschinenteile. Tomo 1 – B. G. Teubner Stuttgart 1976 - p98

² G. Köhler/H. Rognitz – Maschinenteile. Tomo 1 - B. G. Teubner Stuttgart 1976 - p98

³ Tochtermann / Bodestein - Konstruktionselemente des Maschinenbaues. Tomo 1 – Springer Verlag 1968 - p. 99

⁴ Tochtermann / Bodestein - Konstruktionselemente des Maschinenbaues. Tomo 1 – Springer Verlag 1968 - p. 102

1.2.- UNIONES POR FRICCIÓN ANILLOS DE EXPANSIÓN

ANILLOS DE EXPANSIÓN

Tal como en los casos anteriores, la función de los anillos de expansión es transmitir momento torsor entre el eje y el cubo, utilizando la fuerza de fricción que se origina entre los elementos en contacto.

Entre el eje y el cubo se colocan los conos de expansión (denominados anillos de expansión) uno interior y el otro exterior; además de un elemento que provea la fuerza axial necesaria, generalmente tornillos y una placa de presión.

Al ajustar los tornillos, los dos conos deslizan entre sí acercándose axialmente. Este deslizamiento o movimiento relativo entre anillos origina que el anillo interior se cierre y el exterior se expanda; ajustándose el primero sobre el eje y el segundo sobre el cubo. Esta fuerza o presión sobre el eje y sobre el cubo originan las fuerzas normales necesarias para producir la fuerza de fricción.

En la figura 1.2/4 se muestra el cono interior sobre el eje. El exterior es similar.

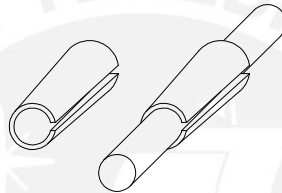


Figura 1.2/4

Configuraciones con y sin resalte en el eje.

En la figura 1.2/5 se muestran dos configuraciones para los anillos de expansión. Una de ellas requiere que el eje tenga un resalte, en el cual apoya el cubo y sobre éste el anillo o cono interior. La otra, como se puede ver, no tiene resalte en el eje.

Observe la función de los tornillos y los elementos que son ajustados axialmente en cada una de las configuraciones.

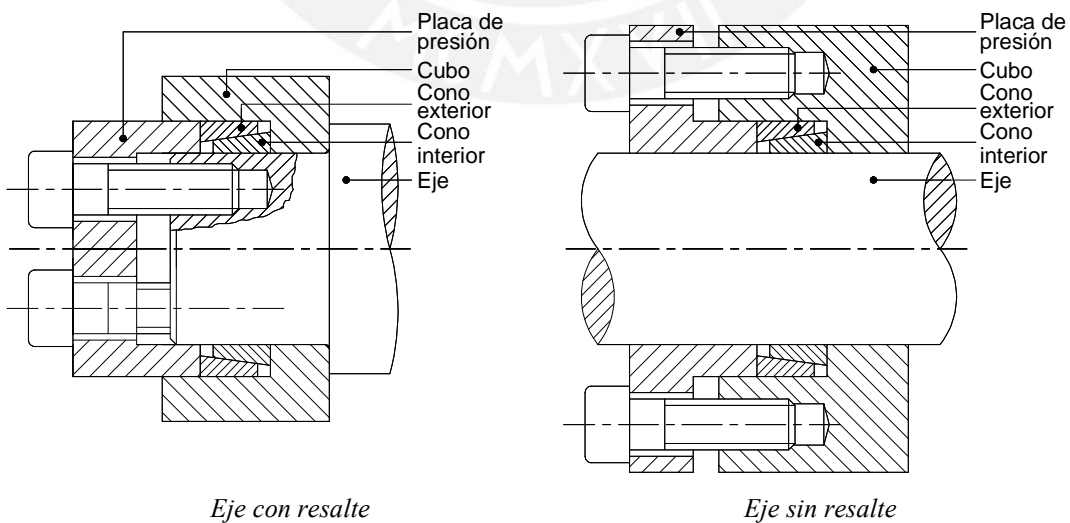


Figura 1.2/5

El torque a transmitir es directamente proporcional al diámetro. Cuando se requiere transmitir un torque mayor, manteniendo el diámetro de eje, se pueden utilizar varios pares de anillos de expansión colocados en serie, tal como se muestra en la figura 1.2/6. En ésta se observan tres pares de anillos en serie.

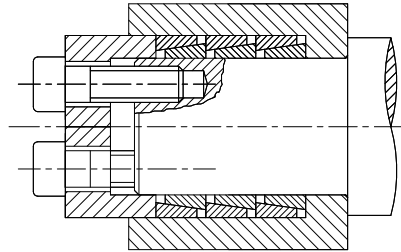


Figura 1.2/6

CAPACIDAD DE TRASMISIÓN Y FUERZAS EN LOS ANILLOS DE EXPANSIÓN

A continuación se desarrolla el análisis de las fuerzas en los anillos (conos) interior y exterior y el torque que se podría transmitir por fricción, tanto para la configuración con eje con resalte como sin resalte.

Al final se presenta el caso de anillos en serie para la configuración con resalte.

Configuración eje con resalte.

Las expresiones siguientes han sido deducidas a partir del polígono de fuerzas que actúan en el par de anillos y las fuerzas que actúan en cada uno de ellos. Estos gráficos de fuerzas se presentan en la página siguiente.

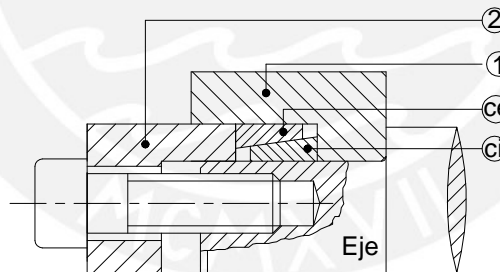


Figura 1.2/7

La capacidad de trasmisión o momento torsor que se puede transmitir por fricción está dada por

$$M_{tf} = F_{f\ e/ai} \cdot \frac{d}{2} = \mu_{e.ai} \cdot F_{N\ e/ai} \cdot \frac{d}{2}$$

Donde $F_{f\ e/ai}$, $F_{N\ e/ai}$ y $\mu_{e.ai}$ son la fuerza de fricción, la fuerza normal y el coeficiente de fricción entre el eje y el anillo interior. El eje tiene diámetro d .

Recurriendo al polígono de fuerzas podemos calcular el valor de la fuerza normal.

$$tg(\phi + \beta_{ae.ai}) = \frac{F - F_{f\ c/ae}}{F_{N\ e/ai}} = \frac{F - F_{N\ e/ai} \cdot tg\ \beta_{c.ae}}{F_{N\ e/ai}}$$

Donde $\beta_{ae.ai}$ es el ángulo de fricción entre los dos anillos, es decir $tg\ \beta_{ae.ai} = \mu_{ae.ai}$
 $F_{f\ c/ae}$ es la fuerza de fricción entre el cubo y el anillo exterior

$\beta_{c.ae}$ es el ángulo de fricción entre cubo y anillo exterior $\text{tg } \beta_{c.ae} = \mu_{c.ae}$

La fuerza normal estará dada por

$$F_{N_{e/ai}} = \frac{F}{\text{tg}(\phi + \beta_{ae.ai}) + \text{tg} \beta_{c.ae}}$$

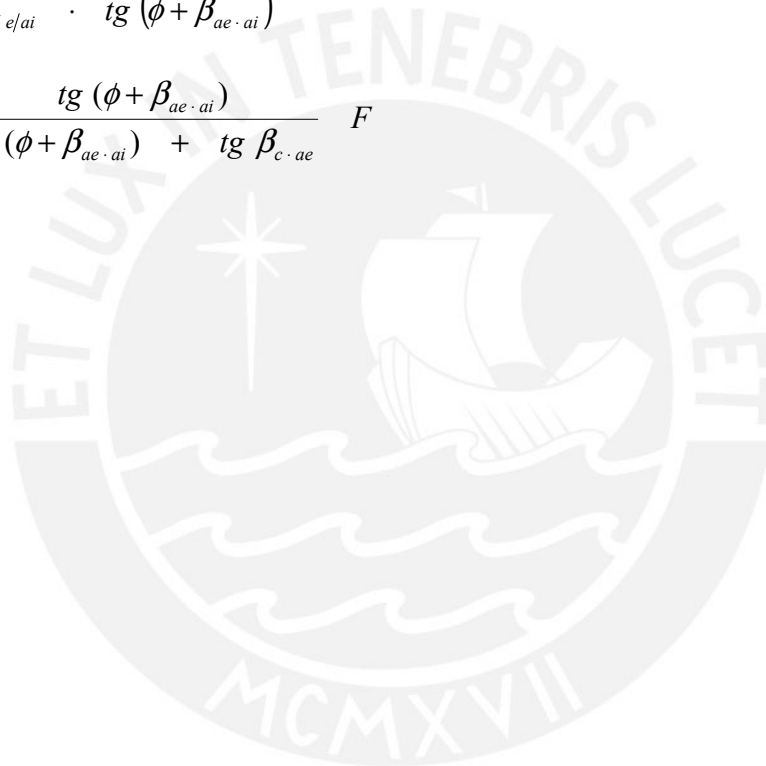
Remplazando en la expresión del torque, nos da la capacidad de transmisión

$$M_{tf} = 0,5 \frac{\mu_{e.ai} d}{\text{tg}(\phi + \beta_{ae.ai}) + \text{tg} \beta_{c.ae}} \cdot F$$

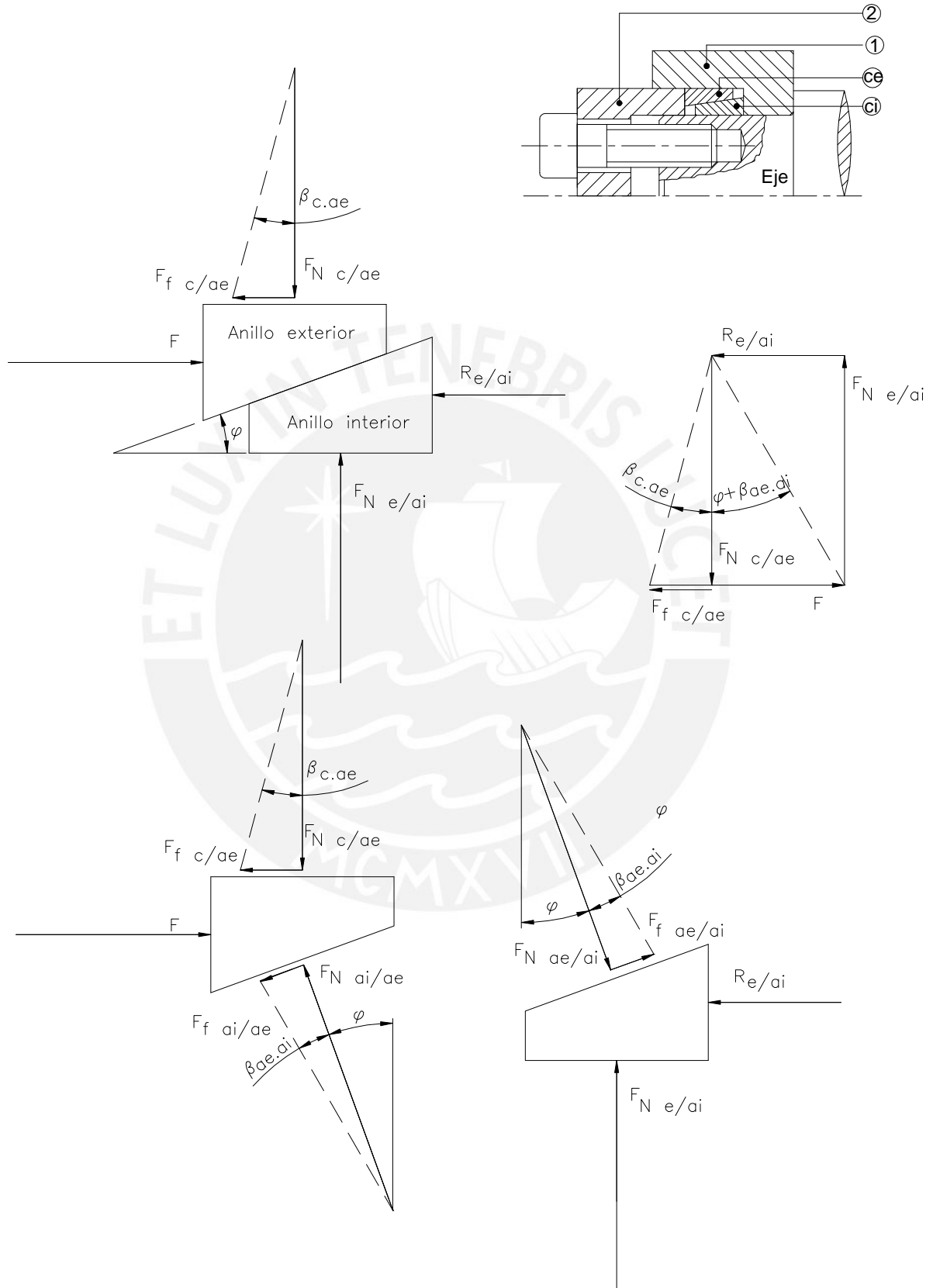
Del mismo polígono de fuerzas se obtiene la fuerza axial $R_{e/ai}$ entre el resalte del eje y el anillo interior

$$R_{e/ai} = F_{N_{e/ai}} \cdot \text{tg}(\phi + \beta_{ae.ai})$$

$$R_{e/ai} = \frac{\text{tg}(\phi + \beta_{ae.ai})}{\text{tg}(\phi + \beta_{ae.ai}) + \text{tg} \beta_{c.ae}} F$$



Como se mencionó, en esta página se puede observar el polígono de fuerzas de un par de anillos y las fuerzas que actúan en cada uno de ellos.



Configuración eje sin resalte.

Las expresiones siguientes se basan en el polígono de fuerzas que actúan en el par de anillos y las fuerzas que actúan en cada uno de ellos. Estos gráficos de fuerzas se observan en la página siguiente.

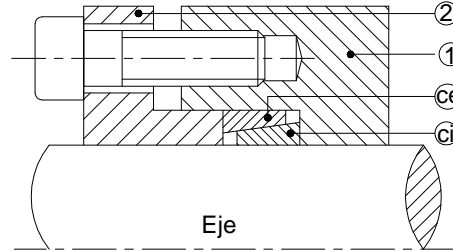


Figura 1.2/8

Siguiendo el mismo procedimiento anterior se obtiene la capacidad de transmisión y las fuerzas para esta configuración.

$$M_{yf} = F_f \cdot \frac{d}{2} = \mu_{e \cdot ai} \cdot F_{N e/ai} \cdot \frac{d}{2}$$

$$tg(\phi + \beta_{ae \cdot ai}) = \frac{F - F_{f c/ae}}{F_{N e/ai}} = F - F_{N e/ai} tg \beta_{c \cdot ae}$$

Donde:

$$F_{f c/ae} = F_{N e/ai} tg \beta_{c \cdot ae}$$

Por tanto

$$F_{N e/ai} = \frac{F}{tg(\phi + \beta_{ae \cdot ai}) + tg \beta_{c \cdot ae}}$$

y

$$M_{yf} = \frac{\mu_{e \cdot ai} \cdot d/2}{tg(\phi + \beta_{ae \cdot ai}) + tg \beta_{c \cdot ae}} \cdot F$$

Para el cálculo de la fuerza axial $R_{c/ai}$ del cubo sobre el anillo interior, se tiene

$$tg(\phi + \beta_{ae \cdot ai}) = \frac{R_{c/ai} - F_{f e/ai}}{F_{N e/ai}} = \frac{R_{c/ai} - F_{N e/ai} tg \beta_{e \cdot ai}}{F_{N e/ai}}$$

Donde $tg \beta_{e \cdot ai} = \mu_{e \cdot ai}$ es el coeficiente de fricción entre el eje y el anillo interior

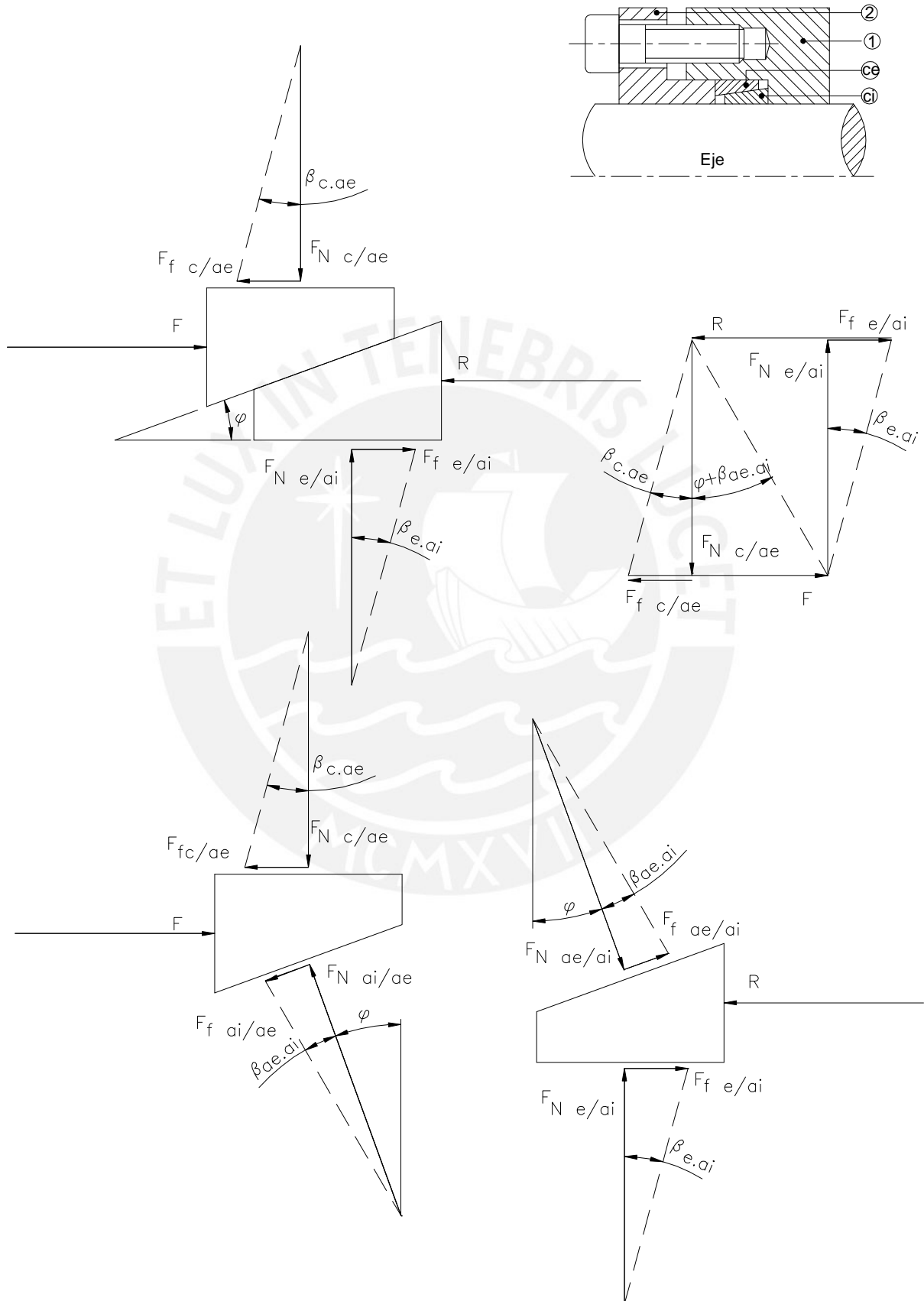
$$R_{c/ai} = F_{Ne/ai} \left[\operatorname{tg} (\phi + \beta_{ae \cdot ai}) + \operatorname{tg} \beta_{e \cdot ai} \right]$$

$$R_{c/ai} = \frac{\operatorname{tg} (\phi + \beta_{ae \cdot ai}) + \operatorname{tg} \beta_{e \cdot ai}}{\operatorname{tg} (\phi + \beta_{ae \cdot ai}) + \operatorname{tg} \beta_{c \cdot ae}} \cdot F$$

Nota: en la figura que acompaña al polígono de fuerzas correspondiente al caso de eje sin resalte, se presenta con R la fuerza axial $R_{c/ai}$

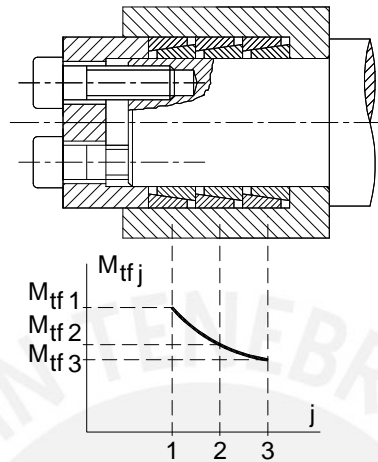


En forma similar al caso anterior, en esta página se presentan el polígono de fuerzas de un par de anillos y las fuerzas que actúan en cada uno de ellos. Observar que este es el caso de eje sin resalte.



Anillos de expansión en serie. Configuración eje con resalte.

Si fueran n pares de anillos en serie, el torque total será la suma de los n torques. El momento torsor que trasmite el primer par es el mayor y el del n-ésimo par es el menor, tal como se muestra en la siguiente figura.

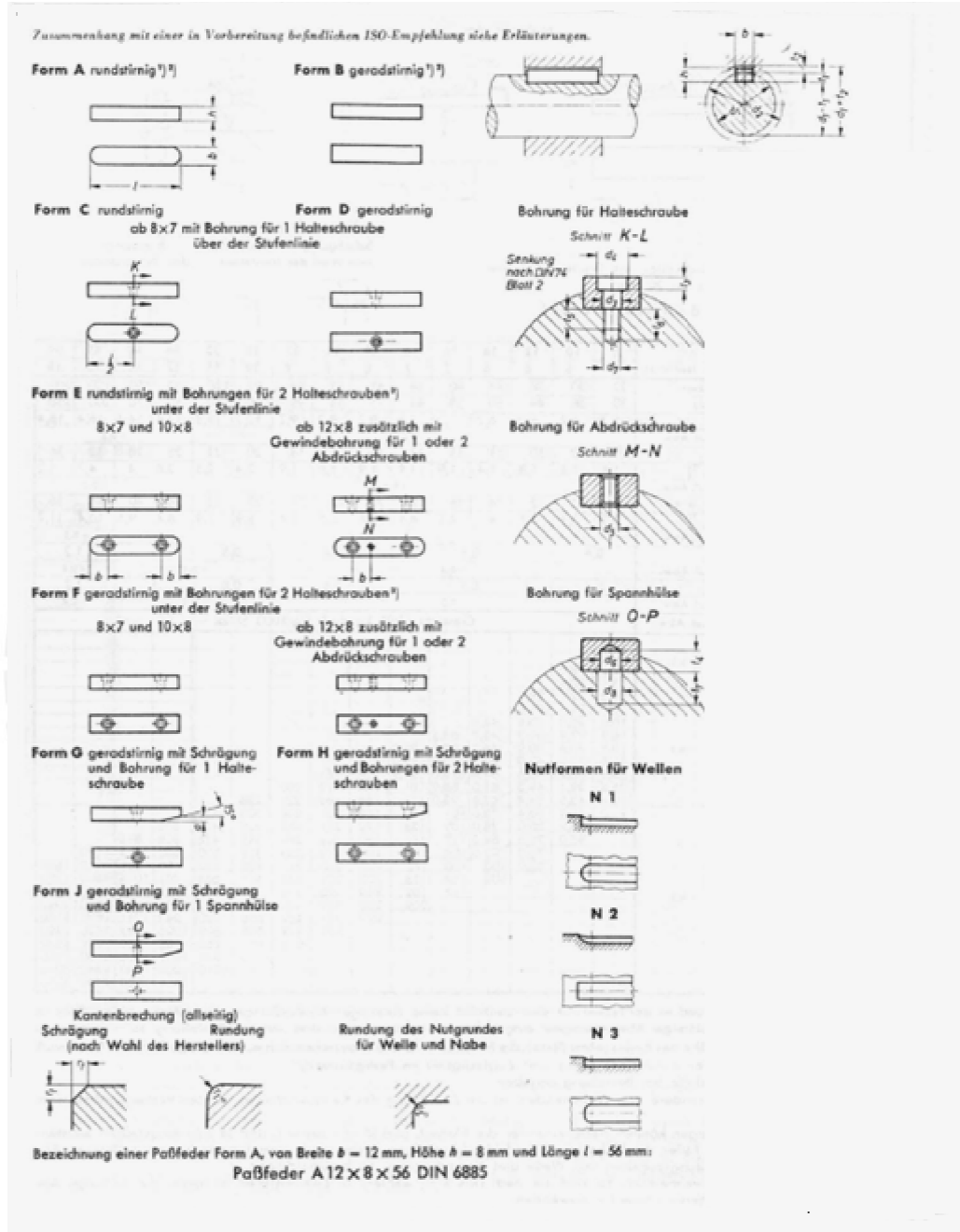


A continuación se presentan las expresiones de torque transmitido por fricción por el j-ésimo par de anillos y la suma de los n pares de anillos en serie.

$$M_{tfj} = 0,5 \frac{\mu_{e \cdot ai} \cdot d \cdot tg^{j-1} (\phi + \beta_{ae \cdot ai})}{(tg (\phi + \beta_{ae \cdot ai}) + tg \beta_{c \cdot ae})^j} \cdot F$$

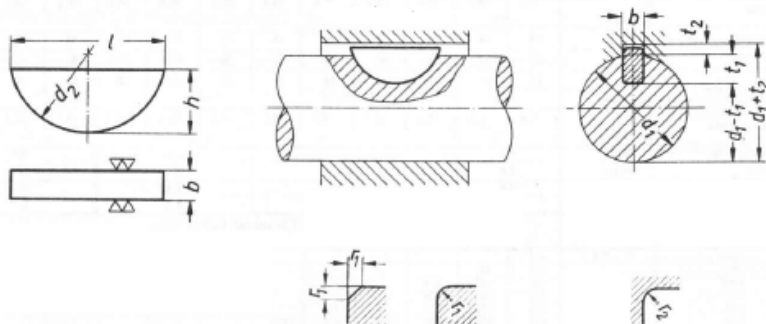
$$M_{tf} = \sum_{j=1}^n M_{tfj} = 0,5 \mu_{e \cdot ai} \cdot d \cdot \left(\frac{\sum_{j=1}^n tg^{j-1} (\phi + \beta_{ae \cdot ai}) (tg (\phi + \beta_{ae \cdot ai}) + tg \beta_{c \cdot ae})^{n-1}}{(tg (\phi + \beta_{ae \cdot ai}) + tg \beta_{c \cdot ae})^n} \right)$$

ANEXO 1.1/1 (continuación)
Chavetas de caras paralelas según DIN6885
(Geometría)



ANEXO 1.1/2
Chavetas de caras paralelas según DIN6888
(Dimensiones)

Scheibenfeder-Querschnitt (Halbrundstahl nach DIN 6882)		Breite b h9	1	1,5	2	2,5*)	3	4							
		Höhe h h12	1,4	2,6	2,6	3,7	3,7	5	6,5	5	6,5	7,5			
Zu- ord- nung ¹⁾	I	für Wellen- durchmesser d_1 über bis	3 4	4 6	6 8	8 10	10 10	12 17	10 12	10 12	10 12	10 12			
	II	für Wellen- durchmesser d_1 über bis	6 8	8 10	10 12	12 17	17 22	17 22	17 22	17 22	17 22	17 22			
Durchmesser		d_2	4	7	7	10	10	13	16	13	16	19			
		Zul. Abw.	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1			
Schrägung oder Rundung		r_1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2			
		Zul. Abw.	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1			
Länge		l_{max}	3,82	6,76	6,76	9,66	9,66	12,65	15,72	12,65	15,72	18,57			
Gewicht (7,85 kg/dm ³) kg/1000 Stück \approx			0,031	0,153	0,204	0,414	0,518	0,622	1,10	1,80	1,47	2,40	3,27		
Breite		Fester Sitz P9	5	6	6	8	8	10	10	10	10	10			
Scheibenfeder- Querschnitt (Halbrundstahl nach DIN 6882)		Breite b h9 Höhe h h12	5 6,5	6 7,5	6 9	8 7,5	8 9	10 (10)	10 11	10 9	10 11	10 13	10 11	10 13	10 16
Zu- ord- nung ¹⁾	I	für Wellen- durchmesser d_1 über bis	12 17	17 22	17 22	22 25	22 28	25 28	28 32	22 28	28 32	30 32	30 38	30 38	
	II	für Wellen- durchmesser d_1 über bis	22 30	22 30	22 30	30 38	30 38	30 38	30 38	30 38	30 38	30 38	30 38	30 38	
Durchmesser		d_2	16	19	22	19	22	25	28	22	28	32	28	32	45
		Zul. Abw.	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1
Schrägung oder Rundung		r_1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
		Zul. Abw.	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	
Länge		l_{max}	15,72	18,57	21,63	18,57	21,63	24,49	27,35	21,63	27,35	31,43	27,35	31,43	43,08
Gewicht (7,85 kg/dm ³) kg/1000 Stück \approx			3,01	4,09	5,73	4,91	6,88	8,64	10,6	9,17	14,1	19,3	17,6	24,1	39,9
Wellen-Nut	Breite $b^2)$	Fester Sitz P9	5	6	6	8	8	10	10	10	10	10	10	10	
		Leichter Sitz N9	5	6	6	8	8	10	10	10	10	10	10	10	
	Tiefe $t_1^3)$	Reihe A	4,5	5,5	7	5,1	6,6	7,6	8,6	6,2	8,2	10,2	7,8	9,8	12,8
		Reihe B	5,4	6,4	7,9	6	7,5	8,5	9,5	7,5	9,5	11,5	9,1	11,1	14,1
			Zul. Abw. für A und B	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2
Durchmesser $d_2 + 0,5$			16	19	22	19	22	25	28	22	28	32	28	32	45
Naben-Nut	Breite $b^2)$	Fester Sitz P9	5	6	6	8	8	10	10	10	10	10	10	10	
		Leichter Sitz J9 ⁶⁾	5	6	6	8	8	10	10	10	10	10	10	10	
	Tiefe $t_2^3)$	Reihe A ⁴⁾	2,2	2,6	2,6	3	3	3,4	3,4	3	3	3,4	3,4	3,4	
		Zul. Abw. für A	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	
	Reihe B ⁵⁾	1,3	1,7	1,7	1,7	1,7	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1		
Zul. Abw. für B		+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1		
Rundung des Nutgrundes		r_2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
		Zul. Abw.	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	- 0,1	



ANEXO 1.1/3
Pasadores y clavijas
Presión y esfuerzos admisibles

VALORES ADMISIBLES EN UNIONES CON PASADORES Y CLAVIJAS (Para clavijas ranuradas tomar el 70%)					
Parte fija (extremos)				Partes deslizantes, articulaciones	
Materiales *	p_{adm} (N/mm ²) Cargas			Materiales en contacto	p_{adm} (N/mm ²) **
	Fija	Pulsante	Alternante		
Rg, Bronce	30	20	15	Acero/Fe.Fdo	5
Fe. Fdo.	70	50	30	Acero/Acero Fdo	7
Acero Fdo.	80	60	40	Acero/Rg, Bronce	8
St37 (S235JR)	85	65	50	St endur./Rg Bronce	10
St50 (E295)	120	90	60	St endur./St endur.	15
St60 (E335)	150	105	65		
St70 (E360)	180	120	70		

* Para materiales diferentes en contacto se toma el del menor valor correspondiente
** Para cargas de punta de corto tiempo se admite valores mayores.

TENSIONES ADMISIBLES PARA PASADORES Y CLAVIJAS (Para clavijas ranuradas tomar el 70%)						
Materiales	$\sigma_{b adm}$ (N/mm ²) Cargas			$\tau_{s adm}$ (N/mm ²)		
	Fija	Pulsante	Alternante	Fija	Pulsante	Alternante
St37 (S235JR), 9S20, 4.6	80	55	35	50	35	25
St50 (E295), 6.8	110	80	50	70	55	35
St60 (E335), C35, C45, 8.8	130	95	60	85	60	42
St70 (E360)	150	110	68	100	68	48

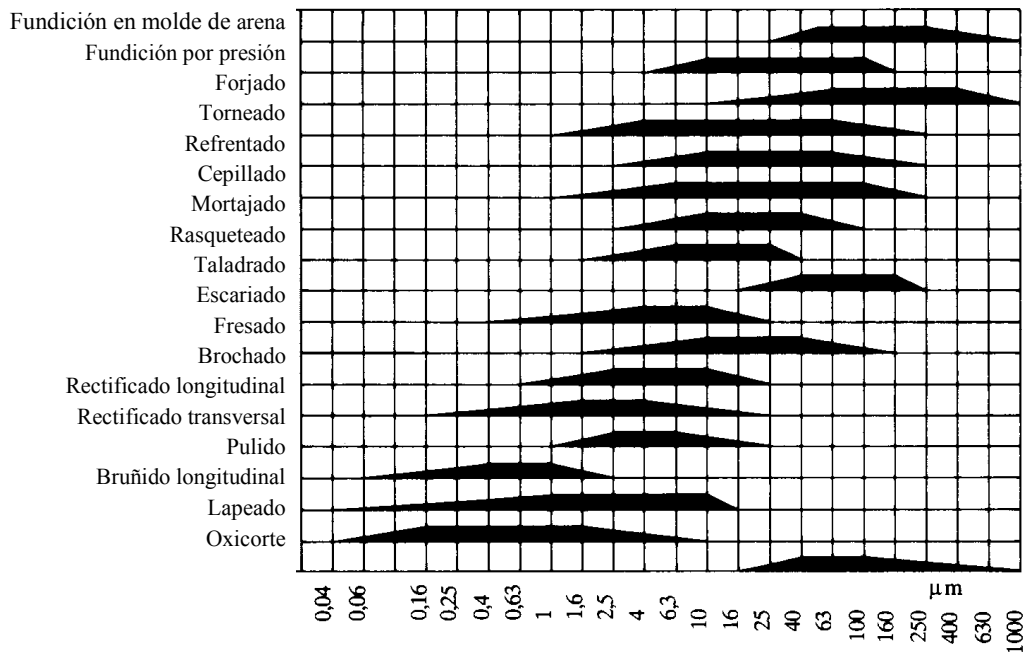
- p_{adm} ó p_{Adm} : presión superficial admisible
- $\sigma_{b adm}$ ó σ_{fAdm} : esfuerzo de flexión admisible
- $\tau_{s adm}$ ó τ_{cAdm} : esfuerzo de corte admisible

ANEXO 1.2/1
Ajuste por contracción
Fricción – Rugosidad – Dilatación

- Coeficientes de fricción

<i>Materiales</i>	<i>En seco</i>	<i>Lubricado</i>
Acero / Acero – Acero / Acero Fdo.	0,15 a 0,25	0,1 a 0,2
Acero / Hierro Fdo. – Acero / Bronce	0,1 a 0,18	0,08
Acero / Al Mg	0,08 a 0,13	
Acero / Latón	0,05 a 0,14	

- Profundidad de la rugosidad según el proceso de mecanizado ($R_t \sim R_z$)



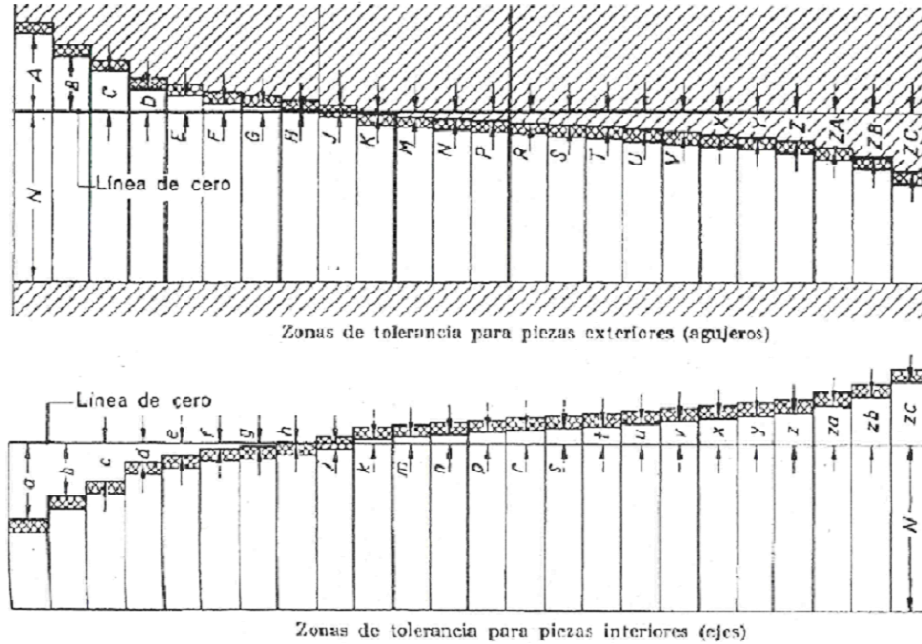
(Original en alemán Roloff / Matek Maschinenelemente)

- Coeficiente de dilatación térmica

<i>Material</i>	<i>1 / °C</i>
Acero	12×10^{-6}
Hierro fundido	$(9 \dots 11) \times 10^{-6}$
Aluminio	23×10^{-6}
Cobre	17×10^{-6}
Bronce	$17,5 \times 10^{-6}$

ANEXO 1.2/2
Ajuste por contracción
Tolerancias

Posición de la tolerancia



Posición de Tolerancias para ejes (Extracto de DIN ISO 286 T1)

Posición de Tolerancia →	r	s	t	u	v	x	y	z
Calidad →	Todas							
De 1 hasta 3	+ 10	+ 14	-	+ 18	-	+ 20	-	+ 26
Sobre 3 hasta 6	+ 15	+ 19	-	+ 23	-	+ 28	-	+ 35
Sobre 6 hasta 10	+ 19	+ 23	-	+ 28	-	+ 34	-	+ 42
Sobre 10 hasta 14	+ 23	+ 28	-	+ 33	-	+ 40	-	+ 50
Sobre 14 hasta 18					+ 39	+ 45	-	+ 60
Sobre 18 hasta 24	+ 28	+ 35	-	+ 41	+ 47	+ 54	+ 63	+ 73
Sobre 24 hasta 30			+ 41	+ 48	+ 55	+ 64	+ 75	+ 88
Sobre 30 hasta 40	+ 34	+ 43	+ 48	+ 60	+ 68	+ 80	+ 94	+ 112
Sobre 40 hasta 50			+ 54	+ 70	+ 81	+ 97	+ 114	+ 136
Sobre 50 hasta 65	+ 41	+ 53	+ 66	+ 87	+ 102	+ 122	+ 144	+ 172
Sobre 65 hasta 80	+ 43	+ 59	+ 75	+ 102	+ 120	+ 146	+ 174	+ 210
Sobre 80 hasta 100	+ 51	+ 71	+ 91	+ 124	+ 146	+ 178	+ 214	+ 258
Sobre 100 hasta 120	+ 54	+ 79	+ 104	+ 144	+ 172	+ 210	+ 254	+ 310
Sobre 120 hasta 140	+ 63	+ 92	+ 122	+ 170	+ 202	+ 248	+ 300	+ 365
Sobre 140 hasta 160	+ 65	+ 100	+ 134	+ 190	+ 228	+ 280	+ 340	+ 415
Sobre 160 hasta 180	+ 68	+ 108	+ 146	+ 210	+ 252	+ 310	+ 380	+ 465
Sobre 180 hasta 200	+ 77	+ 122	+ 166	+ 236	+ 284	+ 350	+ 425	+ 520
Sobre 200 hasta 225	+ 80	+ 130	+ 180	+ 258	+ 310	+ 385	+ 470	+ 575
Sobre 225 hasta 250	+ 84	+ 140	+ 196	+ 284	+ 340	+ 425	+ 520	+ 640
Sobre 250 hasta 280	+ 94	+ 158	+ 218	+ 315	+ 385	+ 475	+ 580	+ 710
Sobre 280 hasta 315	+ 98	+ 170	+ 240	+ 350	+ 425	+ 525	+ 650	+ 790
Sobre 315 hasta 355	+ 108	+ 190	+ 268	+ 390	+ 475	+ 590	+ 730	+ 900
Sobre 355 hasta 400	+ 114	+ 208	+ 294	+ 435	+ 530	+ 660	+ 820	+ 1000
Sobre 400 hasta 450	+ 126	+ 232	+ 330	+ 490	+ 595	+ 740	+ 920	+ 1100
Sobre 450 hasta 500	+ 132	+ 252	+ 360	+ 540	+ 660	+ 820	+ 1000	+ 1250

Magnitud de la tolerancia

COTA NOMINAL EN mn	GRADOS DE CALIDAD IT (Extracto de DIN ISO 286 T1)																				
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
RANGO	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
De	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	5	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	-	-	
Hasta	3																				
De	3	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750	-	-
Hasta	6																				
De	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	1500	-
Hasta	10																				
De	10	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	1800	2700
Hasta	18																				
De	18	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300	2100	3300
Hasta	30																				
De	30	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	3900
Hasta	50																				
De	50	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	3000	4600
Hasta	80																				
De	80	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500	5400
Hasta	120																				
De	120	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300
Hasta	180																				
De	180	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	4600	7200
Hasta	250																				
De	250	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	5200	8100
Hasta	315																				
De	315	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	5700	8900
Hasta	400																				
De	400	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	6300	9700
Hasta	500																				



ANEXO 5

Cálculo de Engranajes, según Norma DIN 3990

1. Resistencia a la fatiga por flexión en la raíz del diente:

Se tiene que: σ_{FP} = Tensión admisible del material, y

σ_{FN} = Tensión nominal en la raíz del diente.

Entonces: $\sigma_{FN} \leq \sigma_{FP}$... (1)

Pero; $\sigma_{FN} = \frac{W_{Ft}}{m_n} \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_{\epsilon} \cdot Y_{\beta}$... (2)

Donde, m_n = Módulo (ver norma DIN 780)

Y_{Fa} = Factor de forma (ver fig. N° 1)

Y_{Sa} = Factor de concentración de tensión (ver Fig. N° 2)

Y_{ϵ} = Factor de engrane (ver fig. N° 3)

Y_{β} = Factor de inclinación de la hélice (ver Fig. N° 3)

$W_{Ft} = \frac{F_t}{b} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{\gamma}$

Luego, F_t = Fuerza tangencial sobre el diente

b = Ancho del diente.

K_A = Factor de servicio (ver tabla N° 1)

K_V = Factor dinámico

$K_{F\alpha}$ = Factor de distribución de carga transversal.

$K_{H\alpha}$ = Factor de distribución de carga en el plano.

$K_{F\beta}$ = Factor de distribución de carga a lo ancho ($K_{H\beta}$)

K_{γ} = Factor de distribución de carga en diferentes puntos.

La influencia de los factores K_V , K_{Fa} , K_{Ha} , $K_{F\beta}$, K_γ , es comparativamente pequeña; luego se consideran iguales a la unidad (*), obteniéndose cálculos relativamente conservadores.

Entonces se tiene que; $W_{Ft} = \frac{F_t}{b} \cdot K_A$, reemplazando

En 2, obtenemos:

$$\sigma_{FN} = \frac{F_t}{b \cdot m_n} \cdot K_A \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\epsilon \cdot Y_B \quad \dots (3)$$

Ahora analizando el material (piñón y engranaje por separado) se tiene:

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{FLim}}{S_{Fmin}} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta rel \cdot T} \cdot Y_{R \cdot rel \cdot T} \cdot Y_X \cdot Y_{NT} \quad \dots (4)$$

Donde,

σ_{FLim} = Esfuerzo pulsante de flexión en la raíz del diente (ver tabla N° 2)

S_{Fmin} = Factor de seguridad mínimo = 1,7

Y_{ST} = Factor de corrección de la tensión para dimensiones de ruedas probadas = 2,0

$Y_{\delta rel \cdot T}$ = Cifra relativa de apoyo, que considera la sensibilidad a la entalla del material (ver Fig. N° 4)

$Y_{R \cdot rel \cdot T}$ = Factor de acabado superficial en el redondeo de la raíz (ver Fig. N° 5)

Y_X = Factor de tamaño (ver Fig. N° 6)

Y_{NT} = Factor de duración, vida (ver Fig. N° 7)

Reemplazando (3) y (4) en (1) se tiene:

$$\frac{F_t}{b \cdot m_n} \cdot K_A \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\epsilon \cdot Y_B \leq \frac{\sigma_{FLim}}{S_{Fmin}} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta rel \cdot T} \cdot Y_{R \cdot rel \cdot T} \cdot Y_X \cdot Y_{NT}$$

(*) Si se desean cálculos exactos recurrir a la bibliografía especializada o a las normas respectivas.

2. Resistencia a la fatiga por presión en el flanco del diente:

Se tiene que: σ_{HP} = tensión admisible del material y

σ_{HN} = Tensión nominal en el punto de rodadura.

Entonces: $\sigma_{HN} \leq \sigma_{HP}$... (5)

Pero, por el análisis de presión de contacto (Hertz) se tiene:

$$\sigma_{HN} = \underbrace{0,35 \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{(E_1 + E_2)}}_{Z_E} \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot (u+1)}{b \cdot d_1 \cdot u}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{2}{\text{sen } \alpha_t \cdot \cos \alpha_t}}}_{Z_H}$$

Entonces:

$$\sigma_{HN} = Z_E \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot (u+1)}{b \cdot d_1 \cdot u}} \cdot Z_H$$

Donde, Z_E = Factor de elasticidad (ver tabla N° 3)

Z_H = Factor de zona (ver Fig. N° 9)

Luego, agrupando convenientemente se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{HN} = \sqrt{\frac{W_{Ht} \cdot (u+1)}{d_1 \cdot u}} \cdot Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta \quad \dots (6)$$

Es decir, Z_ε = Factor de engrane (ver Fig. N° 10 y N° 8)

Z_β = Factor del ángulo de hélice (ver Fig. N° 10)

$$W_{Ht} = \frac{F_t}{b} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot K_\gamma$$

Ahora reemplazando en (6) obtenemos que;

$$\sigma_{HN} = \sqrt{\frac{F_t \cdot K_A \cdot (u+1)}{b \cdot d_1 \cdot u}} \cdot Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \quad \dots (7)$$

Analizando ahora el material (siempre el piñón) se tiene:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_{Hmin}} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X \quad \dots (8)$$

Donde,

σ_{Hlim} = Esfuerzo de fatiga en el perfil del diente (ver tabla N° 2)

S_{Hmin} = Factor de seguridad para evitar picaduras (pitting), debe ser $\geq \sqrt{1,4 \dots 1,7}$

Z_{NT} = Factor de duración por presión en el flanco (ver Fig. N° 11)

Z_L = Factor de lubricación (ver Fig. N° 12)

Z_R = Factor de rugosidad (ver Fig. N° 13)

Z_V = Factor de velocidad (ver Fig. N° 15)

Z_W = Factor de apareamiento de los materiales (ver Fig. N° 14)

Z_X = Factor de tamaño (ver Fig. N° 16)

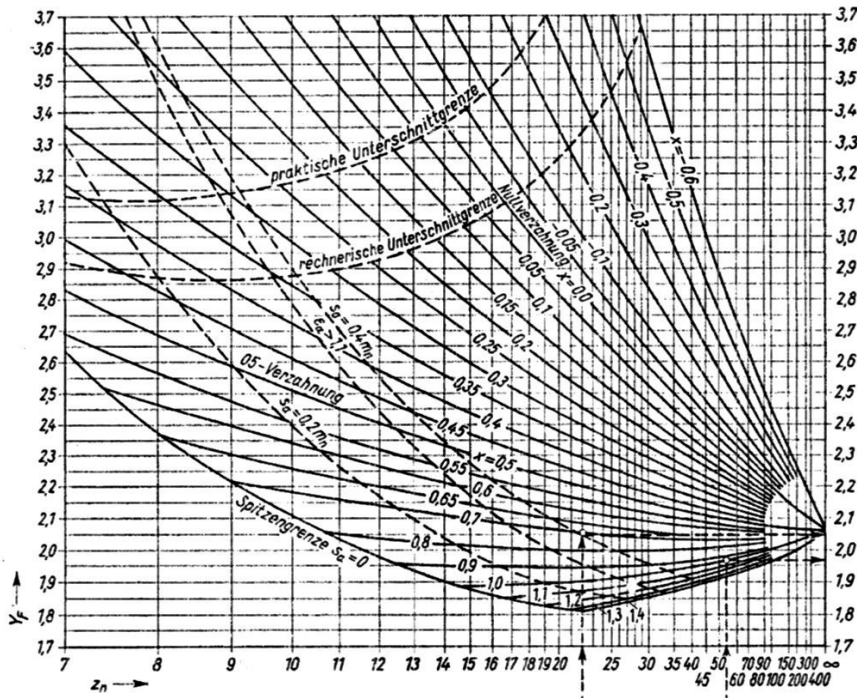
Reemplazando (7) y (8) en (5) se tiene:

$$\sqrt{\frac{F_t \cdot K_A \cdot (u+1)}{b \cdot d_1 \cdot u}} \cdot Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \leq \frac{\sigma_{Hlim}}{S_{Hmin}} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X$$

Simbología que se usa en las figuras para indicar materiales y tratamientos térmicos:

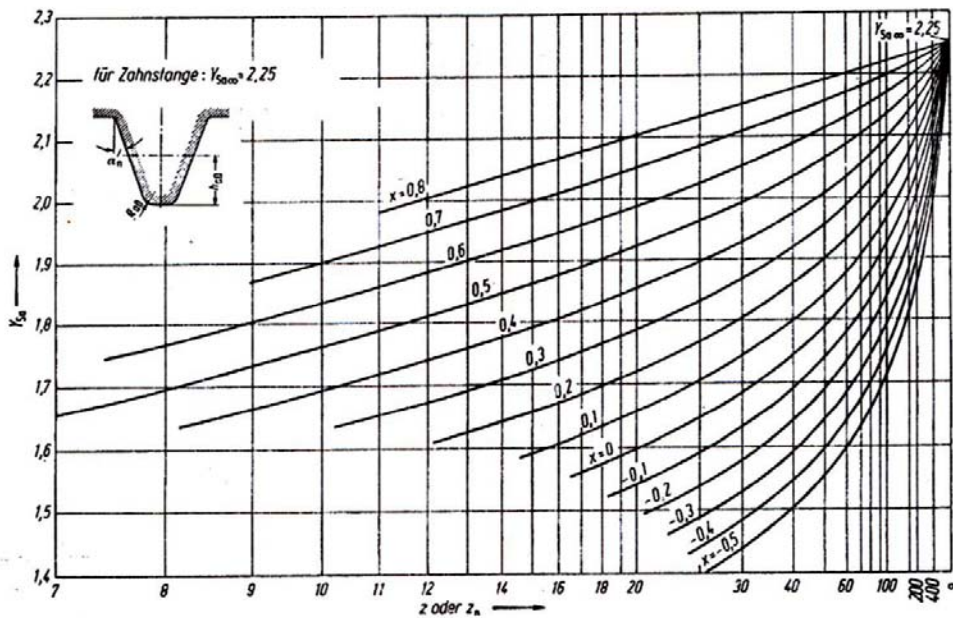
- S : resistencia estática
- D : resistencia a la fatiga
- Eh : acero cementable, endurecido por cementación
- GG : fundición gris
- GGG : hierro fundido
- GS : acero fundido
- BTS : fundición maleable
- N : normalizado
- N () : aceros bonificables y cementables, nitrurado.
- V : aceros de bonificación, bonificados a $\sigma_B \geq 800 \text{ N/mm}^2$
- IF : acero y GGG, endurecido por inducción o llama
- IF_(base) : IF con la base del diente endurecida





Y_{Fa} Factor de Forma

FIGURA N° 1



Y_{Sa} Factor de concentración de tensión

$\alpha_n = 20^\circ; h_a/m_n = 1,0; h_{a0}/m_n = 1,25; \rho_{a0}/m_n = 0,25$

FIGURA N° 2

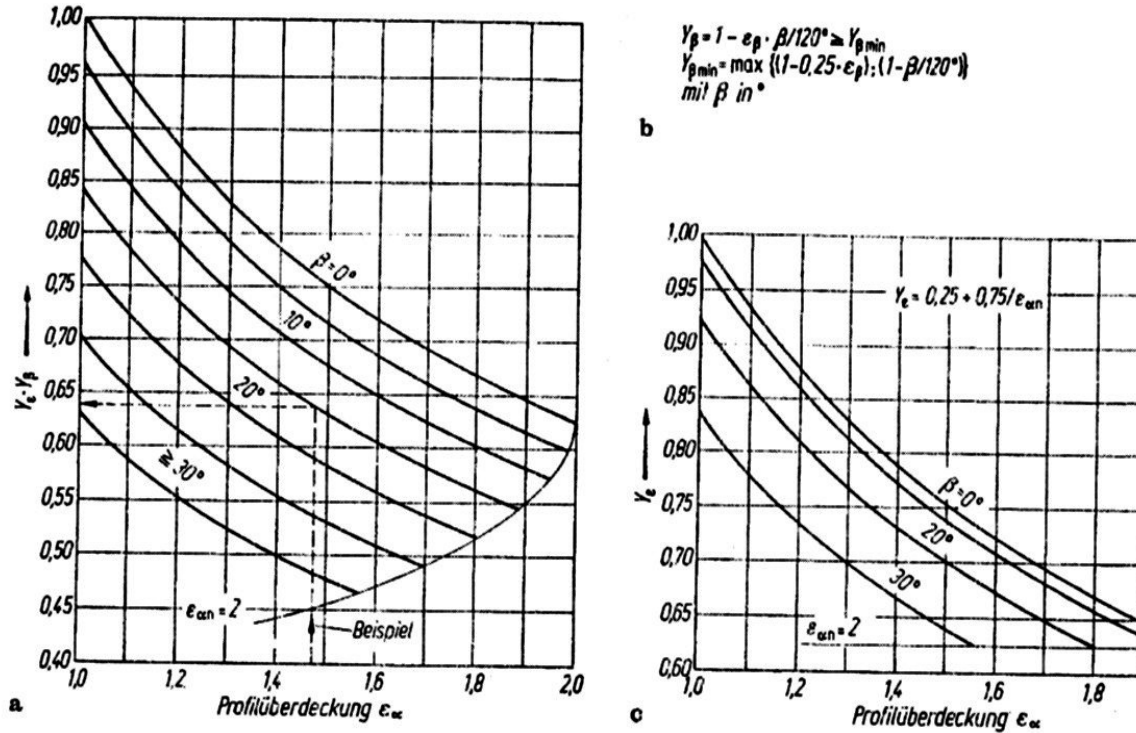


FIGURA N° 3: a) Factor de inclinación ($Y_{\beta} \cdot Y_{\epsilon}$); para $\epsilon_{\beta} > 1$, con $\epsilon_{\beta} = \frac{b \cdot \tan \beta}{P_i}$
 b) Factor de inclinación (Y_{β}); para $\epsilon_{\beta} < 1$, se aplican las relaciones indicadas.
 c) Factor de engrane (Y_{ϵ}); vale para $\epsilon_{gan} \leq 2$

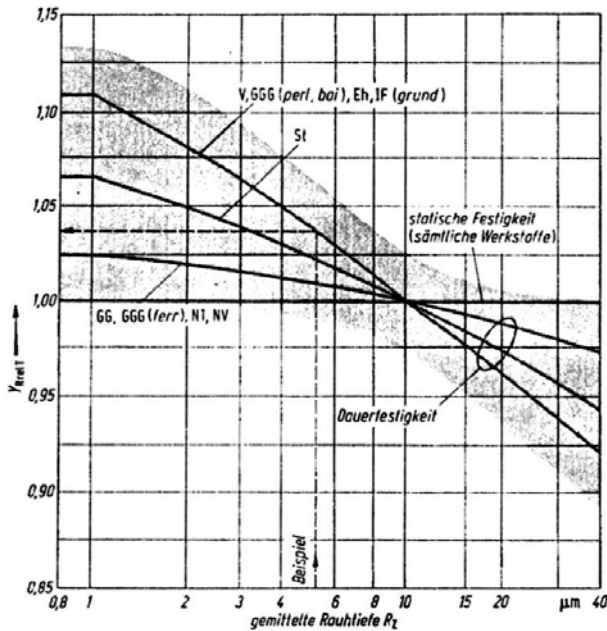


FIGURA N° 5

Todos los materiales con carga estática.

- Fundición y Acero Nitrurado.
- Aceros cementados y blandos ($\sigma_B < 800 \text{ N/mm}^2$)
- Aceros bonificados ($\sigma_B \geq 800 \text{ N/mm}^2$)

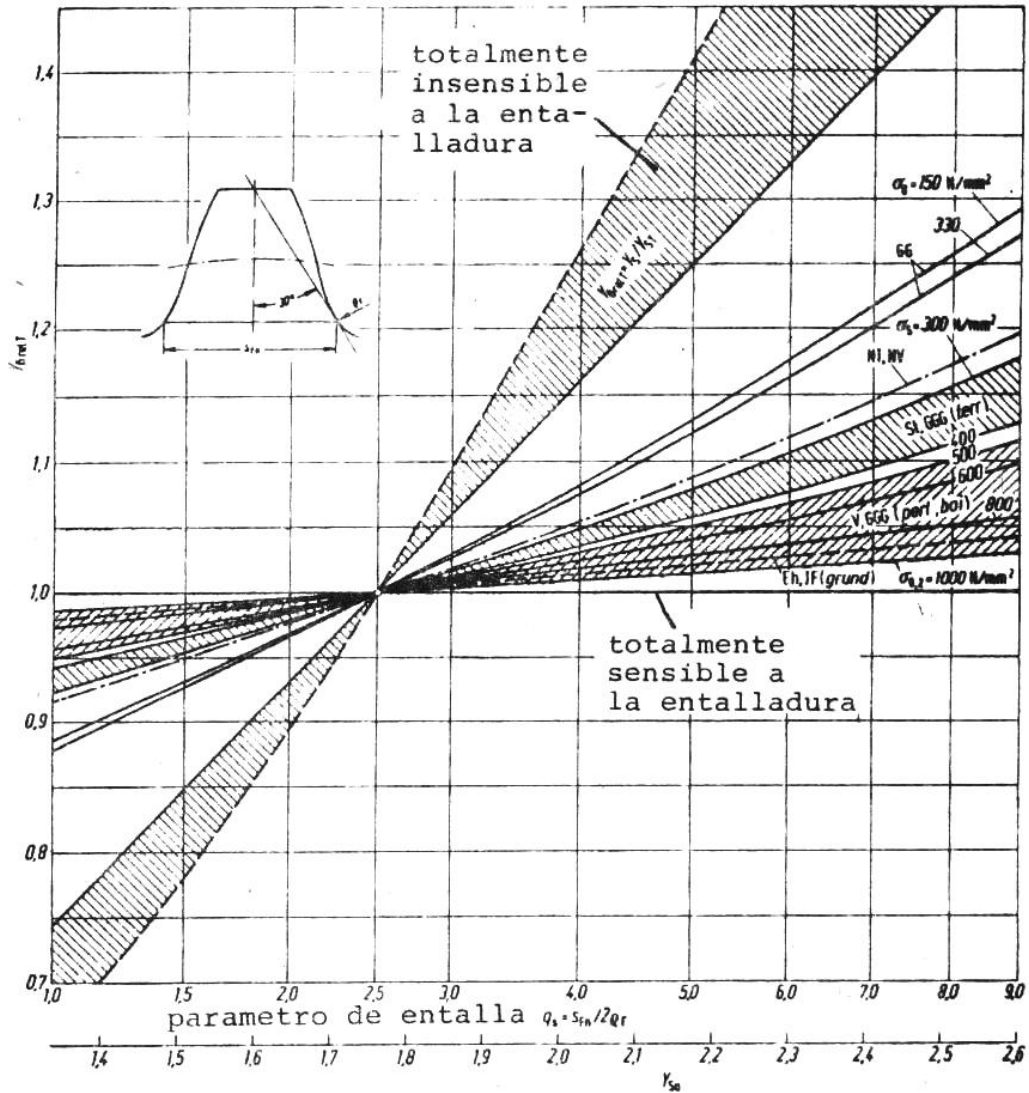
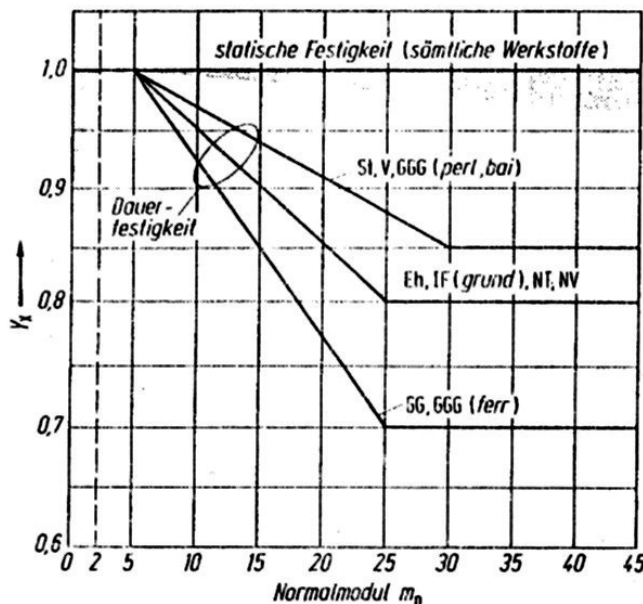


FIGURA N° 4

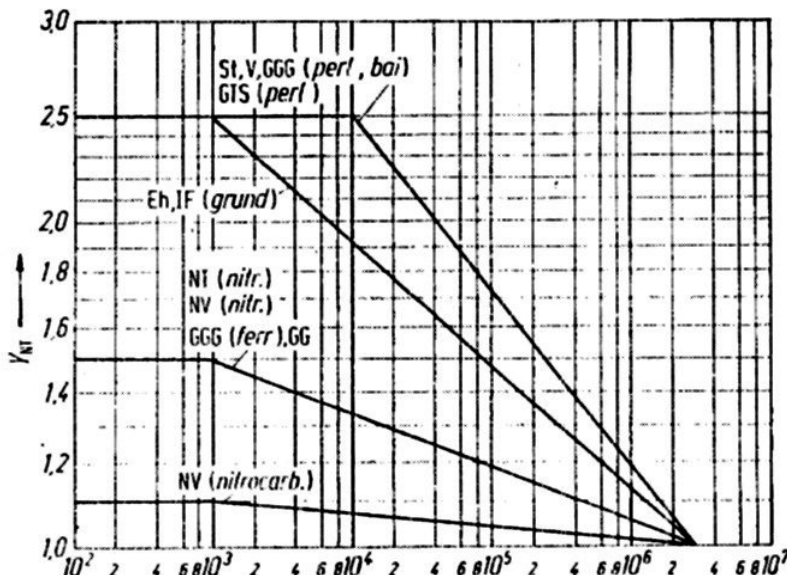


Todos los materiales con carga estática.

Acero de construcción y bonificados
Acero endurecidos en superficie

Fundición

FIGURA N° 6



N_L : ciclos de repetición de carga

$N_L = t.n.60$,
 donde:
 t: vida en horas
 n: RPM

FIGURA N° 7

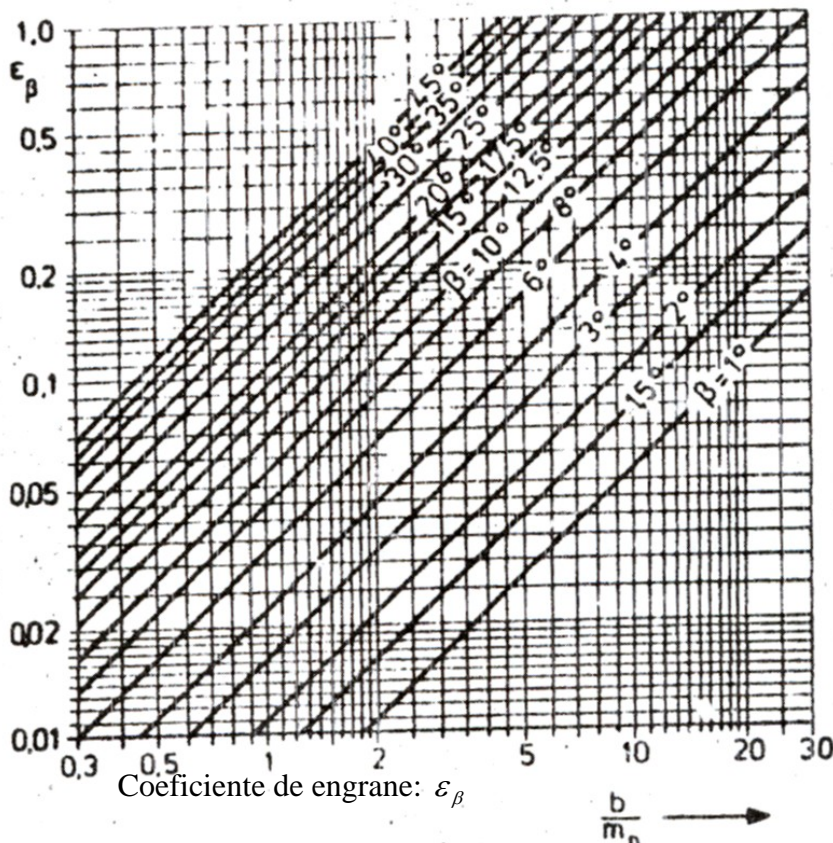
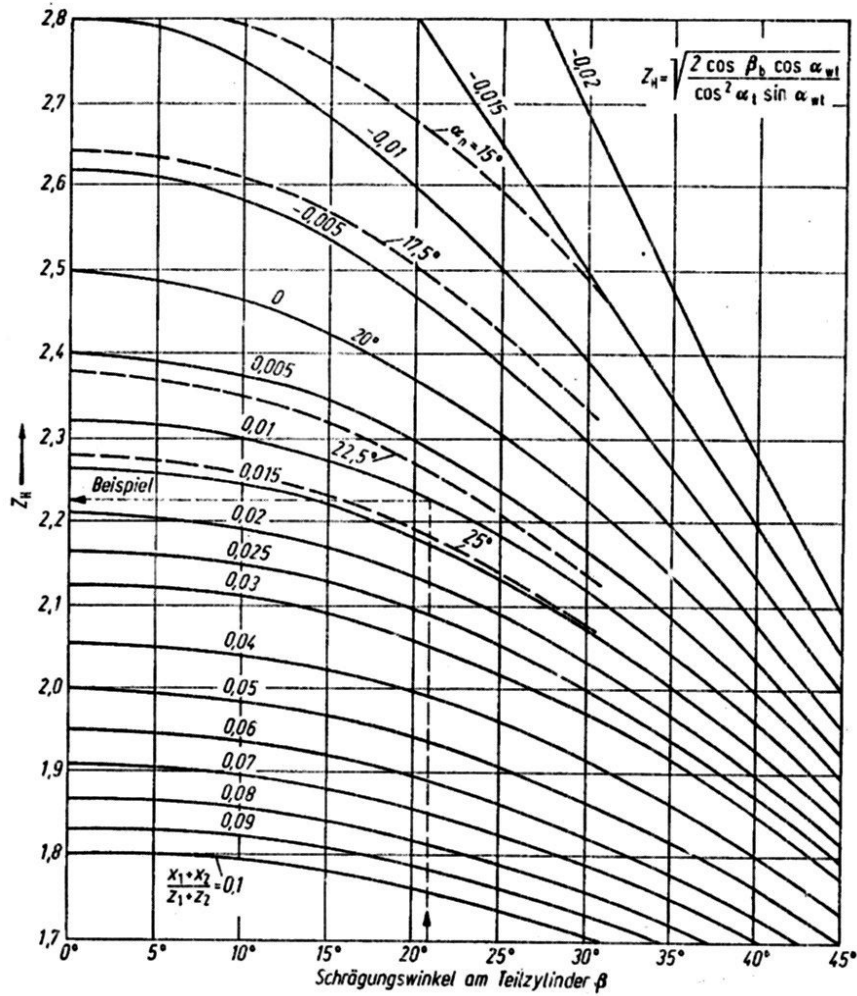


FIGURA N° 8



Factor de zona. Z_H para $\alpha_n = 20^\circ$, dientes corregidos

Línea punteada: Z_H para $\alpha_n = 15^\circ; 17,5^\circ; 25^\circ$ con

$$x_1 + x_2 = 0$$

FIGURA N° 9

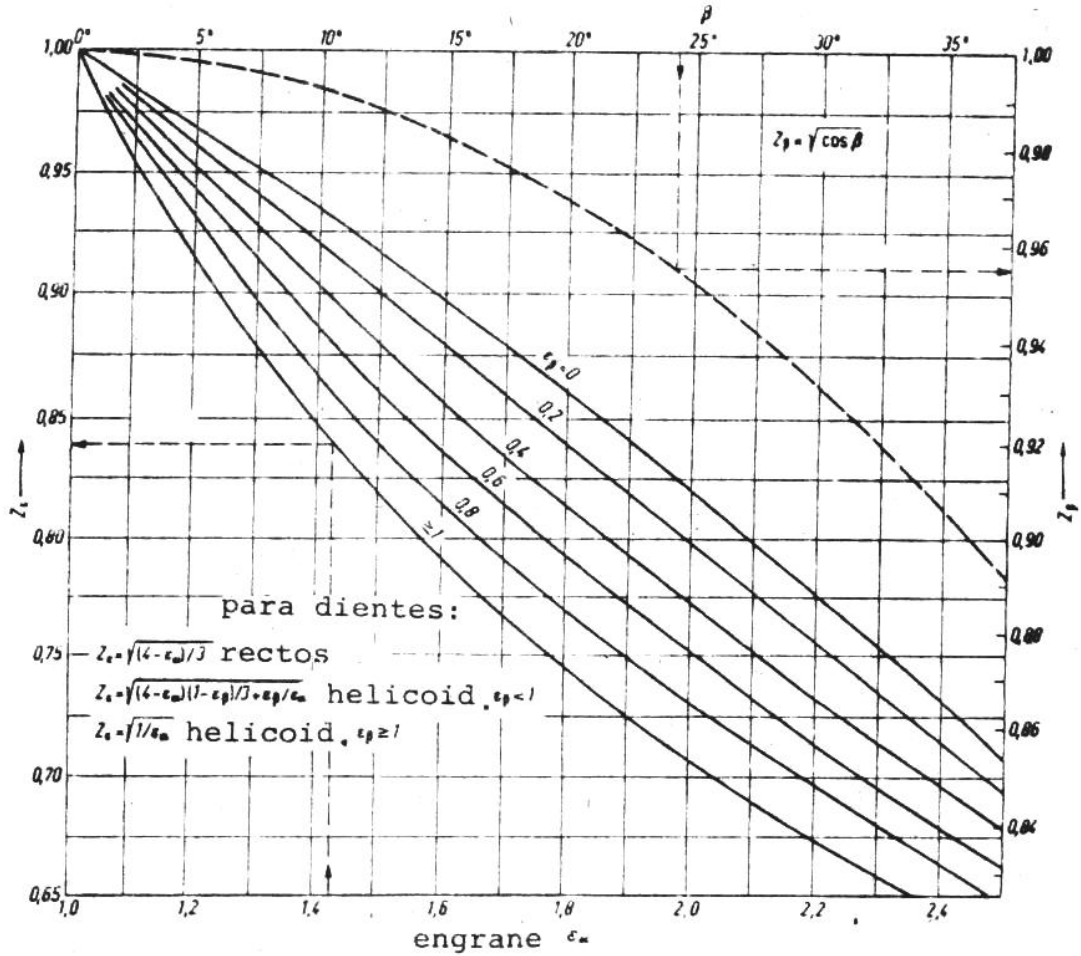


FIGURA N° 10

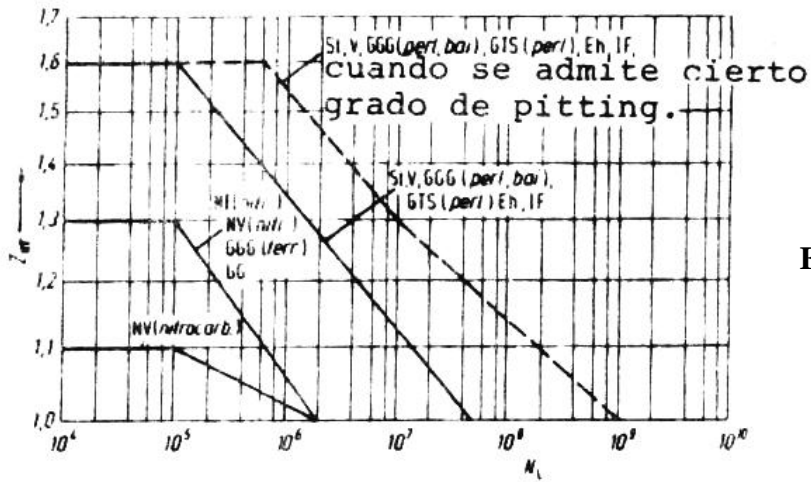
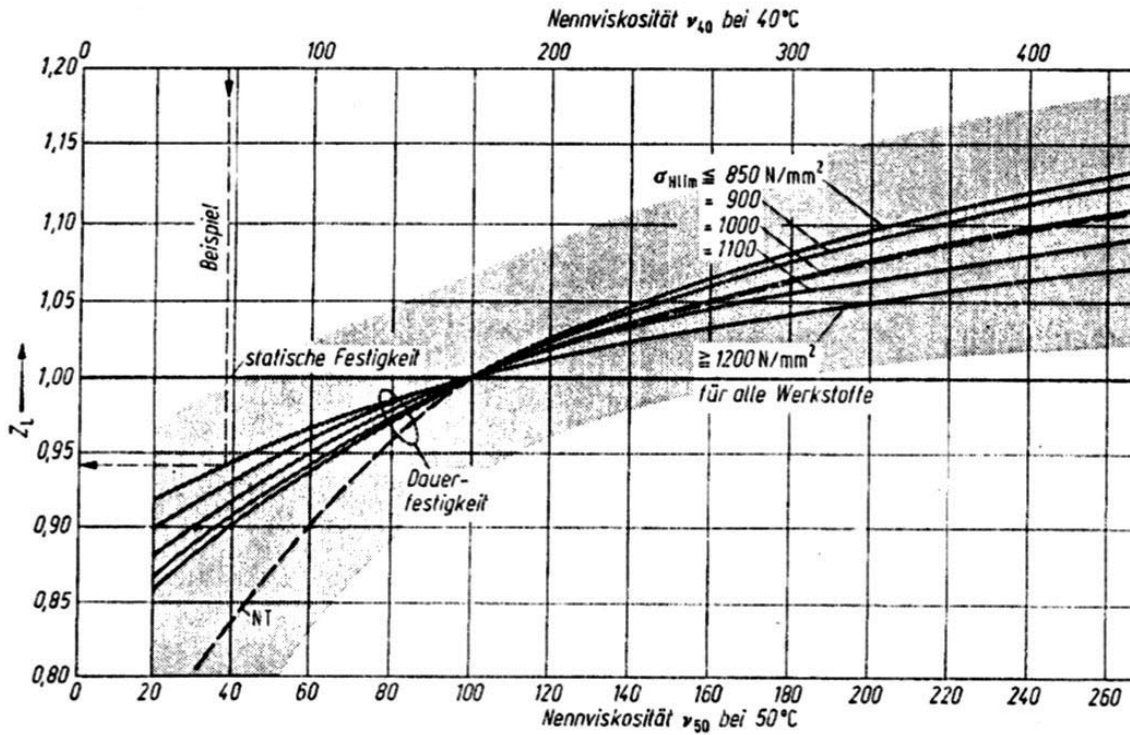


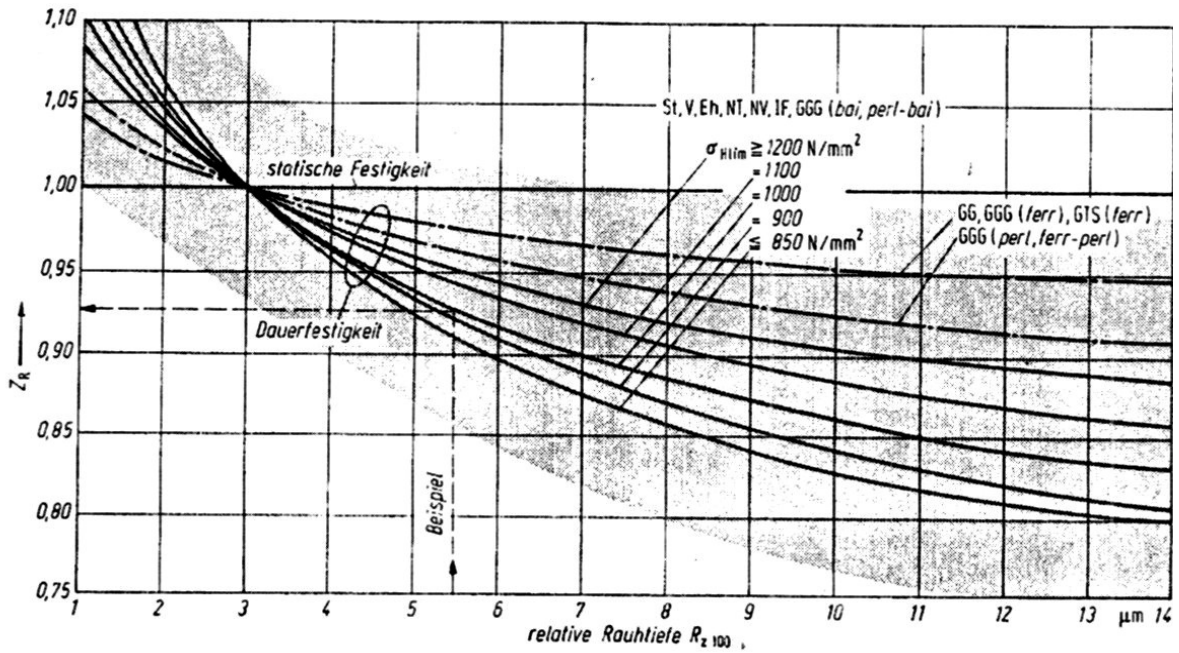
FIGURA N° 11



z_L : factor de lubricación.

ν : viscosidad nominal a diferentes temperaturas
(para ruedas de diferentes dureza, tomar la de menor dureza).

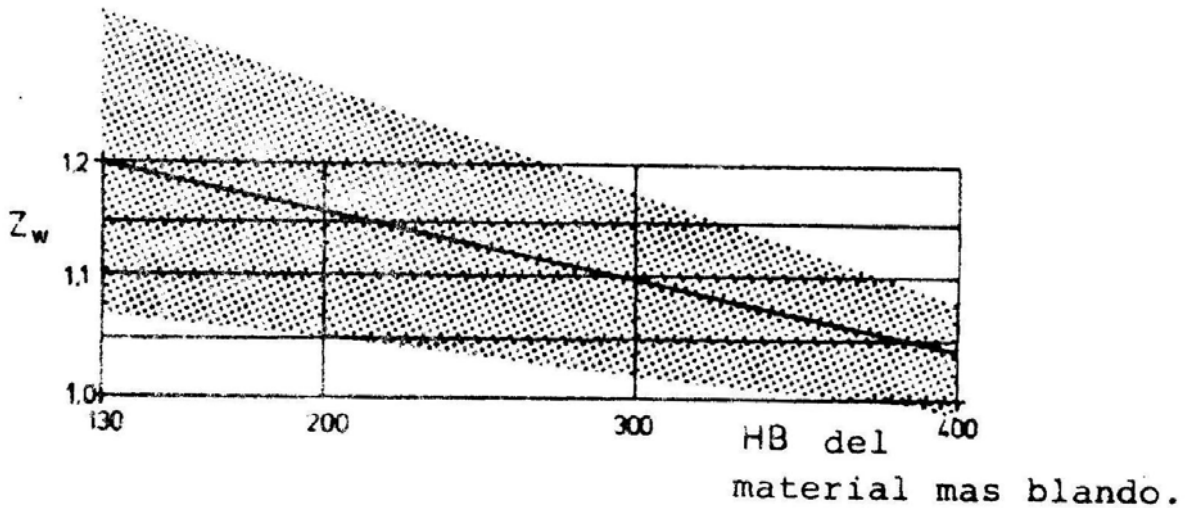
FIGURA N° 12



z_R : factor de rugosidad

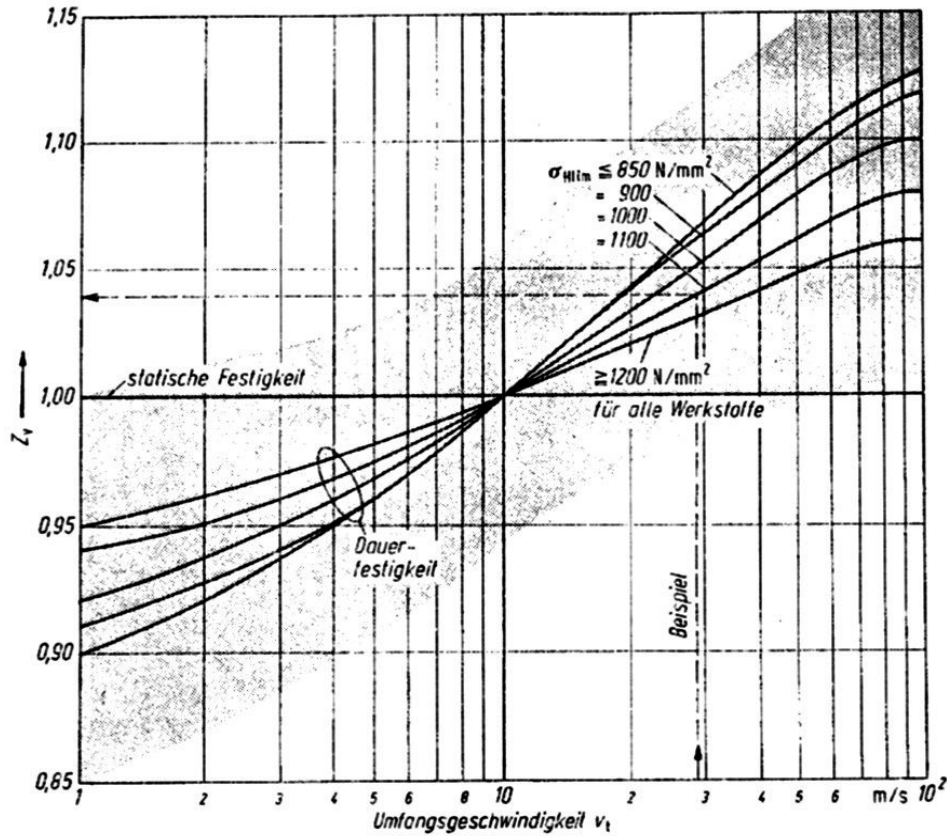
Rugosidad relativa: $R_{z100} = 0,5 \cdot (R_{z1} + R_{z2}) \sqrt[3]{100/a}$
 (para ruedas con diferente dureza, tomar la de menor dureza)

FIGURA N° 13



z_w : factor de apareamiento de los materiales.

FIGURA N° 14



V_t : velocidad tangencial
(para ruedas de diferente dureza, tomar la de menor dureza)

FIGURA N° 15

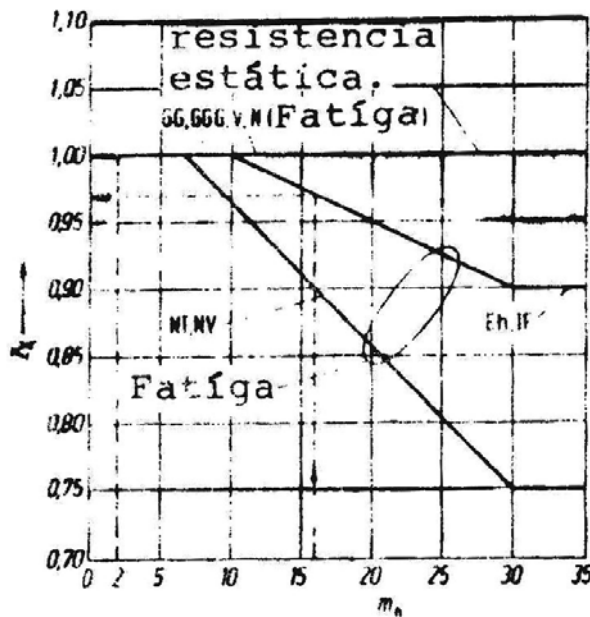


FIGURA N° 16

TABLA 1. Factor de Servicio K_A (según DIN 3990)

Máquinas Accionadas	Máquinas Motrices			
Ejemplos	Uniforme Ej. Motor eléctrico, turbina de vapor, turbina de gas.	Choque liviano. Ej. uniforme pero grandes Momentos de Arranques frecuentes	Choques moderados. Ej. Motor a combustión con varios cilindros.	Choques pesados. Ej. Motor a combustión 1 cilindro.
Uniforme Bombas centrífugas. Compresores centrífugos. Cintas transportadoras (Cargas ligeras). Ventiladores y bombas hasta 7,5 kW	1,00	1,10	1,25	1,50
Choques moderados Cizallas, prensas, transportadoras por cadenas y cintas transportadoras (cargas pesadas). Cribas vibratorias. Generadores. Mezcladoras amasadoras. Máquinas herramientas (tornos, rectificadoras). Lavadoras, Maquinaria de artes gráficas. Ventiladores y bombas de más de 7,5 kW	1,25	1,35	1,50	1,75
Choques medios Compresores de pistones. Transportadores inclinados, verticales y de impulsos, transportadores de placas articuladas, elevadores de cangilones y otros. Montacargas, prensas de ladrillos. Maquinaria textil. Máquinas para la fabricación de papel. Bombas de émbolo, bombas de dragas, sierras alternativas. Molinos de martillos.	1,50	1,60	1,75	2,00
Choques fuertes Molinos sometidos a grandes cargas (barras y bolas), Machacadoras (de mandíbulas, giratorias, de rodillos, etc). Calandras, Mezcladoras. Cabres-tantes. Grúas. Dragas.	1,75	1,85	2,00	$\geq 2,25$

Ref.: Decker, *Maschinenelemente*, Edit. Hanser, Alemania, 2009.

Tabla N° 2: Valores máximos de resistencia según resultados de experimentos.

N°	Grupo de Material	Denominac. Según DIN	Estado Trata - miento	Rugo - sidad Media R_{m} μ_m	Dureza de la rueda		Resistencia a la Fatiga		Resist. Estát. en la raíz $10^3 \frac{N}{mm^2}$
					Nucleo $10^2 \frac{N}{mm^2}$	Flanco $10^2 \frac{N}{mm^2}$	Flanco $\sigma_{H \lim} 10^3 \frac{N}{mm^2}$	Raíz $\sigma_{F \lim} 10^3 \frac{N}{mm^2}$	
					HB	HB			
1	Fund.	GG 20	--	6	1.70	1.70	0.27	0.05	0.20
2	Lamelar	GG 26		6	2.10	2.10	0.31	0.06	0.26
3	DIN 1691	GG 35		6	2.30	2.30	0.36	0.08	0.35
4	Fund. Lobular DIN 1693	GGG 42		6 bis 7	1.70	1.70	0.36	0.20	0.80
5		GGG 60		6 bis 7	2.50	2.50	0.49	0.22	1.00
6		GGG 80		6 bis 7	2.75	2.75	0.56	0.23	1.20
7		GGG 100		6 bis 7	3.00	3.00	0.61	0.24	1.30
8	Fd.gris	GTS 35		6	1.40	1.40	0.36	0.19	0.80
9	DIN 1692	GTS 65		6 bis 7	2.35	2.35	0.49	0.23	1.00
10	Ac.Fdo.	GS 52	--	4 bis 5	1.50	1.50	0.34	0.15	0.47
11	DIN 1681	GS 60		4 bis 5	1.75	1.75	0.42	0.17	0.52
12	Acero de Constr.	St 42	--	6	1.25	1.25	0.29	0.17	0.45
13	DIN	St 50		6	1.50	1.50	0.34	0.19	0.55
14		St 60		6	1.80	1.80	0.40	0.20	0.65
15	17100	St 70		6	2.08	2.08	0.46	0.22	0.80
					HV 10	HV 10			
16	Acero bonifica - do DIN 17200	Ck 22	Bonif.	3	1.40	1.40	0.44	0.17	0.60
17		Ck 45	Normal	3	1.85	1.85	0.59	0.20	0.80
18		Ck 60	Bonif.	3	2.10	2.10	0.62	0.22	0.90
19		34 Cr 4	Bonif.	3	2.60	2.60	0.65	0.26	0.90
20		37 Cr 4	Bonif.	3	2.60	2.60	0.65	0.27	0.95
21		42 Cr Mo 4	Bonif.	3	2.80	2.80	0.67	0.29	1.10
22		Ck 45	Bonif.	3	3.10	3.10	0.77	0.32	1.30
23	Ac.bonif.	34 Cr Nr Mo6	Endur	3	2.20	5.60	1.10	0.27	1.00
24	DIN	37 Cr 4	Bordes	3	2.70	6.10	1.28	0.31	1.15
25	17200 end.induc	42 Cr Mo 4	y raíz	3	2.75	6.50	1.36	0.35	1.30
26	Ac.bonif.	Ck 45	Nitru B	3	2.20	4.00 *	1.10	0.35	1.10
27	DIN	42 Cr Mo 4	Nitru B	3	2.75	5.00 *	1.22	0.43	1.45
28	17200 nitrurado	42 Cr Mo 4	Nitru C	3	2.75	5.00 *	1.22	0.43	1.45
29	Ac. de Nitru.	31 Cr Mo V9	Nitru C	3	3.20	7.00 *	1.40	0.50	1.50
30	Ac. de cement. DIN 17210	C 15	Cemen - tado	3	1.90	7.20 *	1.60	0.23	0.90
31		16 Mn Cr 5		3	2.70	7.20 *	1.63	0.46	1.40
32		20 Mn Cr 5		3	3.30	7.20 *	1.63	0.48	1.50
33		20 Mn Cr 4		3	2.70	7.20 *	1.63	0.40	1.30
34		15 Cr Ni 6		3	3.10	7.20 *	1.63	0.50	1.60
35		18 Cr Ni 8		3	4.00	7.40 *	1.63	0.50	1.70
36		17 Cr Ni Mo 6		3	4.00	7.40 *	1.63	0.50	1.70
	Sintético	Designac	Cond. de trabajo				--	--	--
37	Duroplast mat.ext.	Tej.duro grueso	Engran. Don ruedas rect y endur. Lub. Acei 60°C				0.11	0.05	--
38		Tej duro fino	Veloc.tanq $v \leq 5$ m/s				0.13	0.06	--

* HV1

Tabla N° 3: Factor de Elasticidad (Z_E)

Rueda 1		Número Poisson ν_1	Rueda 2		Número Poisson ν_2	Z_E ($\sqrt{N/mm^2}$)
Material	Mod. Elast. E_1 (N/mm ²)		Material	Mod. Elast. E_2 (N/mm ²)		
Acero	206 000	0,3	Acero	206 000	0,3	189,8
			Ac. Fdo.	202 000		188,9
			Fund. con bolas de grafito.	173 000		181,4
			Alea. Zn-Br (Fdo.)	103 000		155,0
			Zn-Br	113 000		159,8
			Fund. Lamelar (Fd. gris)	126 000		165,4
				118 000		162,0
Acero Fundido	202 000		Ac. Fdo. Fund. con bolas de grafito	202 000		188,0
			Fd. lam. (Fd. gris)	173 000		180,5
				118 000		161,4
Hierro Fd. Lob.	173 000	0,3	Fund. Lobul.	173 000	0,3	173,9
			Fd. lam. (fd. gris)	118 000		156,6
Hierro Fd. lam. gris	126 000		Fd. Lam (Fd. gris)	118 000		146,0
	118 000					143,7
Acero	206 000	0,3	Fibra dura	7 850*	0,5 *	56,4

* valores promedios

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{I}{\pi \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}}$$

ANEXO 6

Standard Practice for Guarded-Hot-Plate Design Using Circular Line-Heat Sources¹

This standard is issued under the fixed designation C1043; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice covers the design of a circular line-heat-source guarded hot plate for use in accordance with Test Method **C177**.

NOTE 1—Test Method **C177** describes the guarded-hot-plate apparatus and the application of such equipment for determining thermal transmission properties of flat-slab specimens. In principle, the test method includes apparatus designed with guarded hot plates having either distributed- or line-heat sources.

1.2 The guarded hot plate with circular line-heat sources is a design in which the meter and guard plates are circular plates having a relatively small number of heaters, each embedded along a circular path at a fixed radius. In operation, the heat from each line-heat source flows radially into the plate and is transmitted axially through the test specimens.

1.3 The meter and guard plates are fabricated from a continuous piece of thermally conductive material. The plates are made sufficiently thick that, for typical specimen thermal conductances, the radial and axial temperature variations in the guarded hot plate are quite small. By proper location of the line-heat source(s), the temperature at the edge of the meter plate can be made equal to the mean temperature of the meter plate, thus facilitating temperature measurements and thermal guarding.

1.4 The line-heat-source guarded hot plate has been used successfully over a mean temperature range from -10 to $+65^{\circ}\text{C}$, with circular metal plates and a single line-heat source in the meter plate. The chronological development of the design of circular line-heat-source guarded hot plates is given in Refs (1-9).²

1.5 This practice does not preclude (1) lower or higher temperatures; (2) plate geometries other than circular; (3) line-heat-source geometries other than circular; (4) the use of

plates fabricated from ceramics, composites, or other materials; or (5) the use of multiple line-heat sources in both the meter and guard plates.

1.6 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.7 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- C168** Terminology Relating to Thermal Insulation
- C177** Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus
- C1044** Practice for Using a Guarded-Hot-Plate Apparatus or Thin-Heater Apparatus in the Single-Sided Mode
- E230** Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples

2.2 ASTM Adjuncts:

- Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus⁴

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms and symbols used in this practice, refer to Terminology **C168**. For definitions of terms relating to the guarded-hot-plate apparatus refer to Test Method **C177**.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *gap, n*—a separation between the meter plate and guard plate, usually filled with a gas or thermal insulation.

3.2.2 *guard plate, n*—the outer ring of the guarded hot plate that encompasses the meter plate and promotes one-dimensional heat flow normal to the meter plate.

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee **C16** on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee **C16.30** on Thermal Measurement.

Current edition approved Sept. 1, 2010. Published January 2011. Originally approved 1985. Last previous edition approved in 2006 as C1043–06. DOI: 10.1520/C1043-06R10.

² The boldface numbers in parentheses refer to a list of references at the end of this practice.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

⁴ Available from ASTM Headquarters. Order Adjunct: **ADJC1043**.

3.2.3 *guarded hot plate, n*—an assembly, consisting of a meter plate and a co-planar, concentric guard plate, that provides the heat input to the specimens.

3.2.4 *line-heat-source, n*—a thin or fine electrical heating element that provides uniform heat generation per unit length.

3.2.5 *meter area, n*—the mathematical area through which the heat input to the meter plate flows normally under ideal guarding conditions into the meter section of the specimen.

3.2.6 *meter plate, n*—the inner disk of the guarded hot plate that contains one or more line-heat sources embedded in a circular profile and provides the heat input to the meter section of the specimens.

3.2.7 *meter section, n*—the portion of the test specimen (or auxiliary insulation) through which the heat input to the meter plate flows under ideal guarding conditions.

4. Significance and Use

4.1 This practice describes the design of a guarded hot plate with circular line-heat sources and provides guidance in determining the mean temperature of the meter plate. It provides information and calculation procedures for: (1) control of edge heat loss or gain (Annex A1); (2) location and installation of line-heat sources (Annex A2); (3) design of the gap between the meter and guard plates (Appendix X1); and (4) location of heater leads for the meter plate (Appendix X2).

4.2 A circular guarded hot plate with one or more line-heat sources is amenable to mathematical analysis so that the mean surface temperature can be calculated from the measured power input and the measured temperature(s) at one or more known locations. Further, a circular plate geometry simplifies the mathematical analysis of errors resulting from heat gains or losses at the edges of the specimens (see Refs (10, 11)).

4.3 In practice, it is customary to place the line-heat source(s) in the meter plate at a prescribed radius such that the temperature at the outer edge of the meter plate is equal to the mean surface temperature over the meter area. Thus, the

determination of the mean temperature of the meter plate can be accomplished with a small number of temperature sensors placed near the gap.

4.4 A guarded hot plate with one or more line-heat sources will have a radial temperature variation, with the maximum temperature differences being quite small compared to the average temperature drop across the specimens. Provided guarding is adequate, only the mean surface temperature of the meter plate enters into calculations of thermal transmission properties.

4.5 Care must be taken to design a circular line-heat-source guarded hot plate so that the electric-current leads to each heater either do not significantly alter the temperature distributions in the meter and guard plates or else affect these temperature distributions in a known way so that appropriate corrections can be made.

4.6 The use of one or a few circular line-heat sources in a guarded hot plate simplifies construction and repair. For room-temperature operation, the plates are typically of one-piece metal construction and thus are easily fabricated to the required thickness and flatness. The design of the gap is also simplified, relative to gap designs for distributed-heat-source hot plates.

4.7 In the single-sided mode of operation (see Practice C1044), the symmetry of the line-heat-source design in the axial direction minimizes errors due to undesired heat flow across the gap.

5. Design of a Guarded Hot Plate with Circular Line-Heat Source(s)

5.1 *General*—The general features of a circular guarded-hot-plate apparatus with line-heat sources are illustrated in Fig. 1. For the double-sided mode of operation, there are two specimens, two cold plates, and a guarded hot plate with a gap

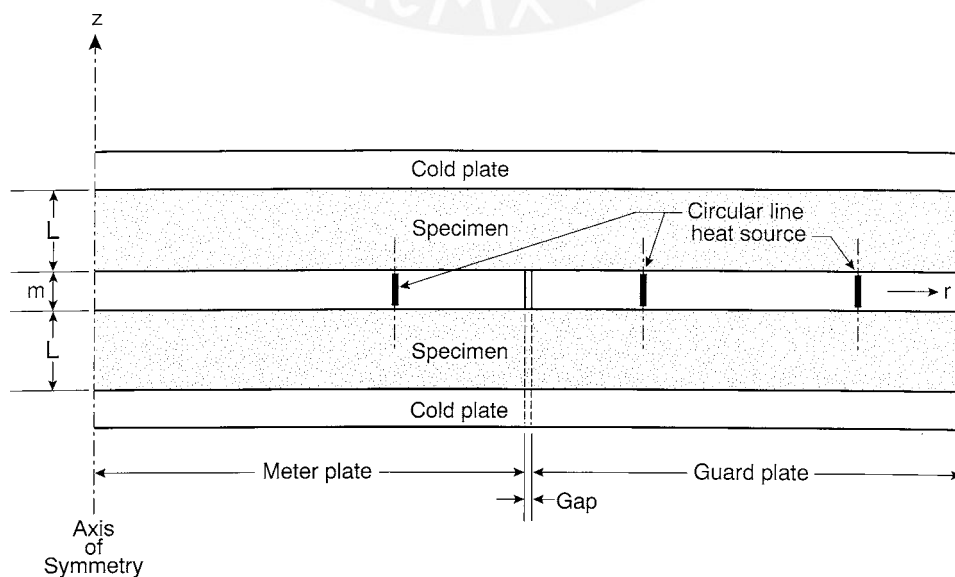


FIG. 1 Schematic of a Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus

between the meter and guard plates. The meter and guard plates are each provided with one (or a few) circular line-heat sources.

5.2 Summary—To design the meter and guard plates, use the following suggested procedure: (1) establish the specifications and priorities for the design criteria; (2) select an appropriate material for the plates; (3) determine the dimensions of the plates; (4) determine the type, number, and location of the line-heat source(s); (5) design the support system for the plates; and (6) determine the type, number, and location of the temperature sensors.

5.3 Design Criteria—Establish specifications for the following parameters of the guarded hot-plate apparatus: (1) specimen diameter; (2) range of specimen thicknesses; (3) range of specimen thermal conductances; (4) characteristics of specimen materials (for example, stiffness, mechanical compliance, density, hardness); (5) range of hot-side and cold-side test temperatures; (6) orientation of apparatus (vertical or horizontal heat flow); and (7) required measurement precision.

NOTE 2—The priority assigned to the design parameters depends on the application. For example, an apparatus for high-temperature may necessitate a different precision specification than that for a room-temperature apparatus. Examples of room-temperature apparatus are available in the adjunct.⁴

5.4 Material—Select the material for the guarded hot plate by considering the following criteria:

5.4.1 Ease of Fabrication—Fabricate the guarded hot plate from a material that has suitable thermal and mechanical properties and which can be readily fabricated to the desired shapes and tolerances, as well as facilitate assembly.

5.4.2 Thermal Stability—For the intended range of temperature, select a material for the guarded hot plate that is dimensionally stable, resistant to oxidation, and capable of supporting its own weight, the test specimens, and accommodating the applied clamping forces without significant distortion. The coefficient of thermal expansion must be known in order to calculate the meter area at different temperatures.

5.4.3 Thermal Conductivity—To reduce the (small) radial temperature variations across the guarded hot plate, select a material having a high thermal conductivity. For cryogenic or modest temperatures, it is recommended that a metal such as copper, aluminum, silver, gold or nickel be selected. For high-temperature (up to 600 or 700°C) use in air, nickel or a single-compound ceramic, such as aluminum oxide, aluminum nitride, or cubic boron nitride is recommended.

5.4.4 Heat Capacity—To achieve thermal equilibrium quickly, select a material having a low volumetric heat capacity (product of density and specific heat). Although aluminum, silver, and gold, for example, have volumetric heat capacities lower than copper, as a practical matter, either copper or aluminum is satisfactory.

NOTE 3—Heat capacity is particularly important when acquiring test data by decreasing the mean temperature. Since the meter plate, for most designs, can only lose heat through the test specimens, the meter plate may cool quite slowly.

5.4.5 Thermal Emittance—To achieve a uniform, high thermal emittance, select a plate material that will accept a suitable

surface treatment. The treatment should also provide good oxidation resistance. For modest temperatures, various high emittance paints can be used for copper, silver, gold, or nickel. For aluminum, a black anodized treatment provides a uniformly high emittance. For high-temperature, most ceramics have an inherently high thermal emittance and nickel and its alloys can be given a fairly stable oxide coating. In any case, the thermal emittance should not change significantly with aging.

5.5 Guarded-Hot-Plate Dimensions—Select the geometrical dimensions of the guarded hot plate to provide an accurate determination of the thermal transmission properties.

NOTE 4—The accurate determination of thermal transmission properties requires that the heat input to the meter plate flows normally through the specimens to the cold plates. One-dimensional heat flow is attained by proper selection of the diameter of the meter plate relative to the diameter of the guard plate while also considering (1) the specimen thermal conductivities; (2) specimen thicknesses; (3) edge insulation; and, (4) secondary guarding, if any.

5.5.1 Meter Plate Diameter—The diameter shall be large enough so that the meter section of the specimens is statistically representative of the material. Conversely, the diameter needs to be sufficiently smaller than the diameter of the guard plate so that adequate guarding from edge heat losses can be achieved (see 5.5.2).

NOTE 5—The first requirement is particularly critical for low-density insulations that may be inhomogeneous. The second requirement is necessary in order to provide adequate guarding for the testing of the specimen materials and thicknesses of concern.

5.5.2 Guard Plate Diameter—Use **Annex A1** to determine either the diameter of the guard plate for a given meter plate diameter, or the diameter of the meter plate for a given guard plate diameter. Specifically, determine the combinations of diameters of the meter plate and guard plate that will be required so that the edge-heat-loss error will not be excessive for the thickest specimens, with the highest lateral thermal conductances. If necessary, calculate the edge heat loss for different edge insulation and secondary-guarding conditions.

NOTE 6—For example, when testing relatively thin specimens of insulation, it may be sufficient to maintain the ambient temperature at essentially the mean temperature of the specimens and to use minimal edge insulation without secondary guarding. However, for thicker conductive specimens, edge insulation and stringent secondary guarding may be necessary to achieve the desired test accuracy.

5.5.3 Guarded-Hot-Plate Thickness—The thickness should be large enough to provide proper structural rigidity, and have a large lateral thermal conductance, thus minimizing radial temperature variations in the plate. Conversely, a large thickness will increase the heat capacitance of the plate and thus adversely affect the (rapid) achievement of thermal equilibrium, and reduce the thermal isolation between the meter plate and the guard plate.

5.5.4 Gap Width—The gap shall have a uniform width such that the gap area, in the plane of the surface of the guarded hot plate, shall be less than 3 % of the meter area. In any case, the width of the gap shall not exceed the limitations given in Test Method **C177**. The width of the gap is a compromise between increasing the separation in order to reduce lateral heat flow

and distorting the heat flow into the specimen and increasing the uncertainty in the determination of the meter area.

NOTE 7—The gap provides a significant thermal resistance between the meter and guard plates. The temperature difference across the gap needs to be maintained at a very small value, thereby minimizing the heat transfer between the meter and guard plates, both directly across the gap and also through adjacent portions of the specimens.

5.5.5 *Gap Configuration*—Refer to Fig. 2 in selecting an appropriate design for the gap cross-section. Designs (b) and (c) permit a narrow gap at the surfaces, in the plane of the plate, while maintaining a fairly high thermal resistance between the meter and guard plates. For a small temperature difference across the gap, calculate the corresponding heat flow using guidelines in Appendix X1.

5.5.6 *Plate Flatness:*

5.5.6.1 When assembled, the guarded hot plate shall have the surfaces of both the meter and guard plates flat to within 0.025 % of the outer diameter of the guard plate.

NOTE 8—For example, a guarded hot plate with a 600-mm diameter guard plate should be flat over its entire surface to within 0.15 mm.

5.5.6.2 During fabrication, assembly, and installation of the guarded hot plate, considerable care needs to be taken to achieve this flatness tolerance. For a metal plate, it may be necessary to anneal the plate to relieve stresses introduced

during machining and then grind the plate(s) to final tolerances. Continued checking may be necessary to ensure the flatness tolerance is maintained after temperature cycling.

5.5.7 *Surface Emittances:*

5.5.7.1 *Guarded Hot Plate*—Treat the surfaces of the guarded hot plate to maintain a total hemispherical emittance greater than 0.8. In any case, the hot plate surface emittance shall meet the requirements of Test Method C177.

5.5.7.2 *Gap*—To minimize the heat flow across the gap, either treat the surfaces of the gap (by polishing or electroplating) to reduce their thermal emittance, or fill the gap with thermal insulation.

5.6 *Heater Design*—Select the radius of each circular line-heat source for the meter plate and the guard plate as follows.

5.6.1 *Location of Heaters:*

5.6.1.1 *Meter Plate*—If the meter plate has a single line-heat source, locate the heat source at a radius equal to $\sqrt{2}/2$ times the radius to the center of the gap. If it is desired to have heaters at more than one radius, select these radii by using the criteria given in Annex A2.

5.6.1.2 *Guard Plate*—For a guarded hot plate with the outer radius of the guard plate equal to 2.5 times the radius to the center of the gap, locate the line-heat source at a radius equal to 1.29 times the radius to the center of the gap. If another line-heat source is required in the guard plate, locate the heat source at a radius of 1.97 times the radius to the center of the gap. Use the criteria given in Annex A2 for determining other radii of line-heat sources in the guard plate.

NOTE 9—The location(s) of the line-heat sources in the guard plate is less critical than is the case for the meter plate.

5.6.2 *Type of Heater*—Select the line-heat source from one of the following types of heater elements: (1) thin ribbon; (2) sheathed; or (3) any other stable type that provides a uniform heat output per unit length, for example, fine resistance wire with dielectric insulation.

5.6.2.1 *Ribbon Heater*—A thin ribbon heater consists of an etched foil or wire-wound heating element sandwiched between two layers of electrical insulation. For a guarded hot plate intended for use over the temperature range of building insulations, the electrical insulation can be any of a variety of plastics (for example, polyimide). For use over a broader temperature range, care must be taken to select an insulation, such as high-temperature polyimide or silicone rubber, that will survive the temperatures of interest.

5.6.2.2 *Sheathed Heater*—A sheathed heater, sometimes known as a cable heater or a swaged heater, consists of a straight or coiled heater element insulated from its surrounding metal sheath by compacted ceramic powder. This type of heater can be used to quite high temperatures, depending upon the type of resistance wire and sheath that are selected.

5.6.3 *Installation of Heaters:*

5.6.3.1 Install the ribbon heater(s) by fabricating the plate (meter or guard) in two concentric sections and placing the heater between the sections by either an interference fit or a tapered fit. Prepare the interference fit by applying a moderate temperature difference to the two concentric sections. See adjunct for further details.⁴

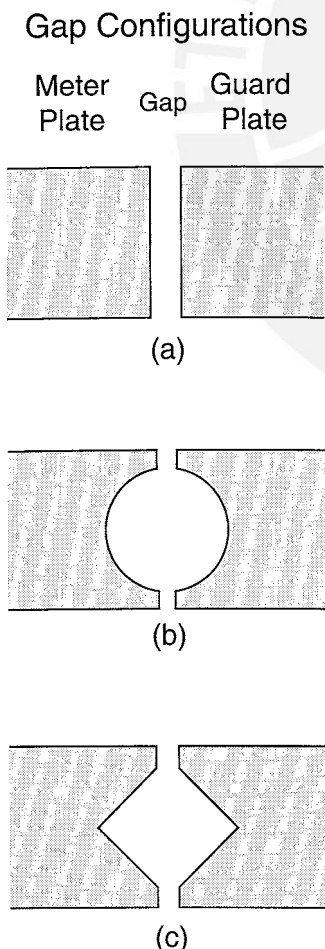


FIG. 2 Designs for the Cross-section of the Gap Between the Meter and Guard Plates

5.6.3.2 Install the sheathed heater(s) by pressing the heater into circular grooves that have been cut into one (or more) surface(s) of the plate (meter or guard). The grooves should be deep enough that the heater will be below the surface of the plate. Fill the remainder of the groove with either conductive epoxy, solder, or braze.

5.6.4 *Lead Wires for Heater*—In order to minimize undesired heat generation from the heater leads, select lead wires that have a lower electrical resistance per unit length than the heater element(s). The heater elements may have either integral electrical lead wires, or individual insulated lead wires attached to the heater elements with the junctions electrically insulated (with, for example, epoxy or ceramic cement). Secure the electrical connections so they are reliable and properly insulated electrically from the guarded hot plate.

NOTE 10—Since some heat will be generated by the wire leads, thereby perturbing the temperature profile, consideration must be given to where the leads are located and how they are installed. Refer to [Appendix X2](#) for guidance on locating the wire heater leads.

5.7 Support Structures:

5.7.1 *Support for Meter Plate*—Design the support system for the meter plate to:

5.7.1.1 Facilitate assembly of the meter and guard plates so that the two plates are co-planar (per [5.5.6](#)) and concentric with a uniform gap width (per [5.5.4](#)),

5.7.1.2 Support the mass of the meter plate as well as the forces from clamping the test specimens,

5.7.1.3 Account for the effects of thermal expansion of the meter and guard plates,

5.7.1.4 Minimize heat conduction between the meter and guard plates, and

5.7.1.5 Facilitate installation and repair of the line-heat sources, lead wires, and sensors.

NOTE 11—Extraneous heat flows caused by the support system could disturb the desired temperature distribution in the meter plate. One successful technique consists of a system of three small pins with both ends tapered that are installed in radially drilled holes in the guard plate. A tapered-end screw pushed against the outer end of each pin presses the other end of the pin into a circumferential groove in the outer edge of the meter plate. This system will center the meter plate accurately so that the gap width is uniform (per [5.5.4](#)).

5.7.2 *Support for Guard Plate*—Design the support system for the guard plate to maintain the guarded hot plate in the desired orientation (usually the plane of the hot plate will be either horizontal or vertical), and, minimize conductive heat losses from the guard plate.

NOTE 12—Extraneous heat flows caused by the support structure could disturb the desired temperature distribution in the guard plate. One successful technique for supporting the guard plate is wire cables (at three or four locations) at the periphery of the guard plate. A second technique is to rigidly support the underside of the guard plate at the periphery either from above or below.

5.8 Temperature Sensors:

5.8.1 *Type*—Select temperature sensors for the guarded hot plate that provide adequate sensitivity and do not significantly change the temperatures that are to be measured. At modest temperatures, select sensors from the following types: (1) thermocouples (either Type T or E wire being the most commonly used); (2) small, accurate (platinum) resistance

thermometers; or (3) stable thermistors. At extreme temperatures (high or cryogenic), consult Specification [E230](#) or Ref [\(12\)](#) for the use of thermocouples for temperature measurement.

5.8.2 *Calibration*—Temperature sensors shall be calibrated with standards traceable to a national standards laboratory.

NOTE 13—The overall uncertainty depends not only on the type of sensor and its calibration, but also on the measurement system. Normal precautions require minimizing spurious voltages by locating junctions of dissimilar metals in regions of low thermal gradients and using high quality low-thermal emf switches. For further guidelines, consult Test Method [C177](#).

5.8.3 *Location in Meter Plate*—If the line-heat source(s) is located per 5.6.1 in the meter plate, then locate the temperature sensor at the outer radius of the meter plate. Consult [Appendix X2](#) for the angular location of the temperature sensor. Locate the temperature sensor at the center plane of the meter plate.

5.8.4 *Location in Gap*—Use a thermopile to detect directly the temperature difference across the gap, rather than separate measurements of the absolute temperature of the meter and guard-sides. In order to minimize heat conduction through the thermopile wires, select (1) wires of small diameter and low thermal conductivity; (2) the minimum number of thermocouple junction pairs necessary for adequate sensitivity; and (3) an oblique (rather than radial) path for the wires to cross the gap.

5.8.4.1 *Type of Wire*—In general, avoid constructing the thermopile from copper wires. Because of its high sensitivity and relatively low thermal conductivity of both alloys, consider Type E thermocouple wire, having a diameter no greater than 0.3 mm.

5.8.4.2 *Sensitivity*—For a line-heat-source guarded hot plate, angular temperature variations on either side of the gap should be small so that only a small number of thermocouple junctions for sampling purposes is required, provided the junctions are wisely located relative to the heater leads (see [Appendix X2](#)).

NOTE 14—Different designs for guarded hot plates have used anywhere from a few pairs of thermocouple junctions to several hundred pairs to achieve both adequate sensitivity and adequate sampling of the temperature on either side of the gap. The number of thermocouple junctions needs to provide the desired resolution of the temperature difference across the gap. For example, if thermocouple wire with a nominal sensitivity of 60 $\mu\text{V}/\text{K}$ were used, a thermopile with 16 pairs of junctions would have a sensitivity of 960 $\mu\text{V}/\text{K}$. For such a thermopile, measurement of the thermopile output to a resolution of 1 μV would correspond to a resolution in the temperature difference across the gap of approximately 1 mK.

5.8.4.3 *Installation*—Place all thermocouple junctions in good thermal contact with the meter plate or guard plate. Secure, if necessary, by mechanical fasteners. Insulate electrically all thermocouple junctions from the meter plate and guard plate.

5.8.5 *Location in Guard Plate*—Measure the temperatures of the primary guard using thermocouples, (platinum) resistance thermometers, or thermistors, or indirectly using differential thermocouples.

NOTE 15—Temperatures in the guard plate do not enter directly into the calculation of thermal transmission properties. However, it is important to

measure temperatures at some locations in the guard plate so that correct operation of the guarded hot plate can be verified.

6. Design Precautions

6.1 Error in the measurement of the temperature of the guarded hot plate can be introduced from several sources, including: (1) improper design of the guarded hot plate; (2) location of the temperature sensor; and (3) calibration of the temperature sensor as well as the measurement system (see 5.8.2).

6.2 A basic premise in the design of the guarded hot plate is the location of the line-heat source at a prescribed radius as described in Annex A2. This ensures that the mean temperature of the surface of the meter plate is equal to the temperature at the edge of the meter plate. The radial temperature profile is affected by the thermal conductivity of the plate. Consequently,

the thermal conductivity of the plate should be high relative to the specimen (see Annex A2).

6.3 Experimental checks to verify the radial temperature distribution are recommended. These include independent temperature measurements of the guarded hot plate with thermocouples, for example, as described in Refs (5), (8).

6.4 Angular perturbations in the temperature profile are possible due to heating from the heater leads crossing the gap. Additional temperature sensors may be necessary to determine adequately the mean temperature of the surface of the meter plate.

7. Keywords

7.1 guarded hot plate apparatus; heat flow; line source heater; steady state; thermal conductivity ; thermal insulation; thermal resistance

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. CONTROL OF EDGE HEAT LOSS OR GAIN

A1.1 Scope

A1.1.1 This annex provides a procedure for determining the diameter of the guard plate and ambient temperature conditions required to reduce the edge effects to negligible proportions. Alternative procedures may be used, but it is the responsibility of the user to determine that those procedures yield equivalent results.

A1.2 Theoretical Analysis

A1.2.1 For an apparatus with an isothermal guarded hot plate and cold plate(s), the error due to edge heat loss or gain has been derived for both circular and square plates by Peavy and Rennex (10), for the case of the specimen being anisotropic, and by Bode (11), for the isotropic case. The error due to edge heat transfer in a guarded hot plate apparatus is given by:

$$\varepsilon = A + BX \tag{A1.1}$$

where:

$$X = \frac{2(T_m - T_a)}{T_h - T_c} \tag{A1.2}$$

Here, T_h is the guarded hot plate temperature, and T_c , the cold plate temperature. The mean temperature of the specimen is $T_m = (T_h + T_c)/2$, and T_a is the ambient temperature at the edge of the specimen.

A1.2.2 For a circular plate geometry, the coefficients A and B are given by:

$$A = \sum_{n=1}^{\infty} W_{2n} \tag{A1.3}$$

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} W_{2n-1} \tag{A1.4}$$

The terms in the summations are given by:

$$W_n = \frac{4}{\pi^2} \left(\frac{hL}{\lambda} \right) \left(\frac{\gamma L}{b} \right) \frac{I_1(n\pi b/\gamma L)}{n^2 [I_1(n\pi d/\gamma L) + (hL/n\pi\lambda)I_0(n\pi d/\gamma L)]} \tag{A1.5}$$

where I_0 and I_1 are modified Bessel functions of the first kind of order 0 and 1, respectively, b is the radius to the center of the gap, d is the outer radius of the guard plate, L is the thickness of the specimen, and h is the heat transfer coefficient at the circumference of the specimen. The anisotropy ratio for the specimen is $\gamma^2 = \lambda_r/\lambda_z$ where λ_r and λ_z are the thermal conductivities in the radial and axial directions, respectively. The geometrical mean of the thermal conductivities is $\lambda = (\lambda_r\lambda_z)^{1/2}$.

A1.2.3 For the range of parameters that provide appropriate guarding, Eq A1.3 and Eq A1.4 are convergent and require only a few terms to obtain accurate results. Peavy and Rennex (10) provide plots of A and B as functions of geometry and of the ratio of heat transfer coefficient, h , to specimen conductivity.

A1.2.4 For relatively small values of A and B , approximate universal curves can be obtained by writing:

$$A = \frac{\frac{hL}{\lambda}}{1 + \left(1 + \frac{\gamma L}{4\pi d}\right) \frac{hL}{2\pi\lambda}} A' \tag{A1.6}$$

$$B = \frac{\frac{hL}{\lambda}}{1 + \left(1 + \frac{\gamma L}{2\pi d}\right) \frac{hL}{\pi\lambda}} B' \tag{A1.7}$$

where A and B are computed from Eq A1.3 and Eq A1.4 and A' and B' are then computed using Eq A1.6 and Eq A1.7. Fig.

Fig. A1.1 and Fig. A1.2 present parametric curves of A' and B' , respectively, as functions of $\gamma L/d$. The values computed for A' and B' are also weak functions of hd/λ . The widths of the lines shown in Fig. A1.1 and Fig. A1.2 correspond to the variations due to hd/λ being varied from 0.1 to infinity. Fig. A1.1 and Fig. A1.2 can be used to obtain values of A' and B' , from which A and B can be computed using Eq A1.6 and Eq A1.7.

A1.2.5 For values of d/b not shown, or for values of $\gamma L/d$ larger than unity, A and B can be obtained from Peavy and Rennex (10) or computed directly from Eq A1.3 and Eq A1.4. Alternatively, upper limits on A' and B' can be computed simply from the expressions:

$$A' < \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{\gamma L}{b} \right) \left(\frac{d}{b} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{-2\pi(d-b)}{\gamma L} \right) \quad (A1.8)$$

$$B' < \frac{4}{\pi^2} \left(\frac{\gamma L}{b} \right) \left(\frac{d}{b} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{-\pi(d-b)}{\gamma L} \right) \quad (A1.9)$$

A1.3 Application

A1.3.1 A review of Eq A1.6 and Eq A1.7 and Fig. A1.1 and Fig. A1.2 indicates that A' and B' are, aside from a very small dependence on hL/λ , functions of $\gamma L/d$ and d/b , or, equivalently, some other ratio of these geometrical quantities. For a given guarded hot plate, b and d are fixed and the values of A' and B' are functions only of γL (again, neglecting the weak dependence on hL/λ). The quantities multiplying A' and B' in Eq A1.6 and Eq A1.7 are, aside from a small dependence on $\gamma L/d$, functions only of hL/λ and thus do not depend on the meter area or guard plate diameters. For fixed hot- and cold-plate temperatures, the quantity X in Eq A1.1 and Eq A1.2 is a function of T_a , the ambient temperature. Thus, for a given guarded hot plate, with fixed b and d , the error due to edge heat losses or gains is dependent upon γL , hL/λ , and T_a .

A1.3.2 From Eq A1.1 and Eq A1.2, it is seen that A represents the error when the ambient temperature T_a is equal

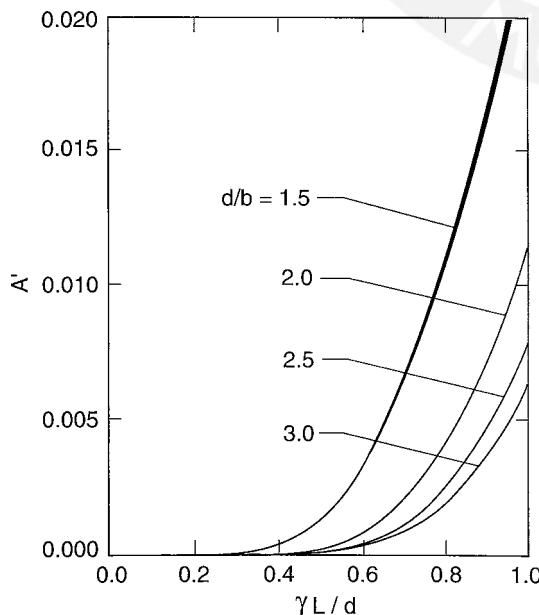


FIG. A1.1 The Coefficient A' as a Function of $\gamma L/d$ with d/b as a Parameter

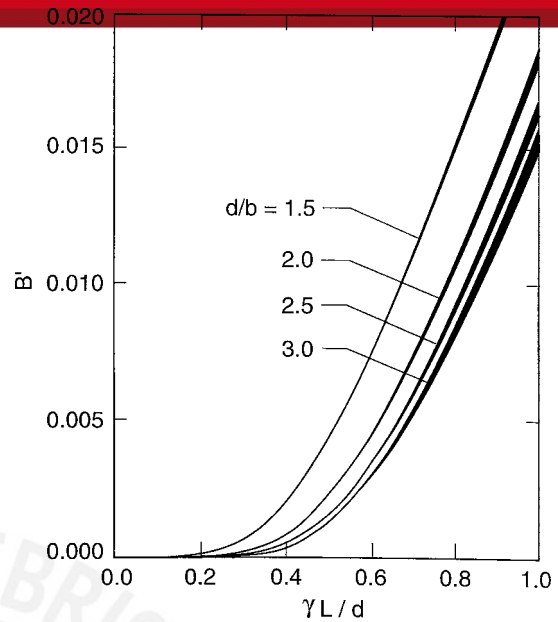


FIG. A1.2 The Coefficient B' as a Function of $\gamma L/d$ with d/b as a Parameter

to the mean temperature of the specimen. Under ideal conditions, the temperature of half of each specimen next to the guarded hot plate is higher than the ambient resulting in a heat loss along half the specimen edge. Conversely, the other half of the specimen (next to the cold plate) experiences a heat gain from the ambient. In effect, a small fraction of the heat input to the meter plate bypasses the meter section of the specimen, resulting in an error in the computed thermal transmission properties.

A1.3.3 The quantity BX in Eq A1.1 and Eq A1.2 represents the additional error when the ambient temperature differs from the mean temperature of the test specimen. In principle, the error due to edge heat losses or gains can be eliminated by selecting an ambient temperature such that $BX = -A$, which occurs when the ambient temperature is somewhat hotter than the mean temperature of the specimen:

$$T_a = T_m + \frac{A}{B} \frac{T_h - T_c}{2} \quad (A1.10)$$

A1.3.4 While this value of T_a is a good choice, relying on this selection alone as a means of adequately controlling edge heat loss or gain is usually insufficient. Simply controlling the ambient temperature to the value given by Eq A1.10 cannot adequately eliminate edge heat losses or gains unless the guard plate is sufficiently wide and the value of hL/λ is sufficiently low to ensure that both A and B are small.

NOTE A1.1—The analytical models used by Peavy and Rennex (10) and Bode (11) assume that edge heat transfer occurs across an infinitesimally thin boundary with a uniform film coefficient h and a uniform ambient temperature T_a . In actuality, the following conditions can cause the assumptions to be invalid: (1) if edge insulation is used and h is taken as the thermal conductance in the radial direction, the assumption of an infinitesimally thick boundary is not satisfied; and (2) if a secondary guard is used (see Test Method C177), there may be heat flows in the edge insulation to regions at temperatures different than that of the secondary guard. Consequently, the basic assumptions of the analysis may not be valid.

A1.3.5 In designing a guarded hot plate, b and d can be varied in order to obtain acceptably small edge-effect errors for the specimen thermal conductivities and thicknesses of interest. Fig. A1.1 and Fig. A1.2 reveal that, for any given value of d/b , both A' and B' increase rapidly as $\gamma L/d$ increases beyond 0.3. Reducing b , the radius of the meter area, relative to d , the guard plate outer radius, significantly lowers the values of A' and B' as d/b increases from 1.5 to 2.0. However, further reduction in b does not provide much additional reduction in A' and B' . From these observations, the value of d/b should be equal to 2.0 or greater, but little additional benefit would be gained by selecting d/b greater than 2.5.

A1.3.6 Eq A1.6 and Eq A1.7 reveal that when $hL/\lambda \ll 1.0$, A and B are approximately equal to $(hL/\lambda)A'$ and $(hL/\lambda)B'$, respectively. When hL/λ is very large, A is approximately $2\pi A'$ and B is approximately $\pi B'$, corresponding to the situation where the circumferential edge of the specimen is essentially isothermal at the same temperature as that of the ambient. For these limiting values, fixed values of b and d , and a given ambient temperature T_a , hL/λ needs to be less than 3.0 in order to reduce the edge heat loss effects to less than half of what they would be if hL/π were quite large.

A1.3.7 Using edge insulation having a thermal conductivity λ_e and thickness E , the equivalent film coefficient for the edge insulation is $h = \lambda_e/E$ and accordingly, $hL/\lambda = (\lambda_e/\lambda)(L/E)$.

Assume that the edge insulation and specimen have the same thermal conductivity ($\lambda_e = \lambda$) so that $hL/\lambda = L/E$. Based upon A1.4.6, the thickness of the edge insulation should be at least one-third the thickness of the specimen in order to reduce significantly the edge effects. For example, a specimen 0.15 m thick requires at least 0.050 m of edge insulation. For thicker specimens, or an apparatus with a fixed-diameter secondary guard, it may not be possible to have the desired level of edge insulation.

A1.3.8 Example—Given a guarded hot plate with $d/b = 2.0$, an isotropic specimen ($\gamma = 1$) of thickness $L = 0.8d$, and edge insulation such that $hL/\lambda = 3$, the edge effects are estimated as follows. From Fig. A1.1 and Fig. A1.2, $A' = 0.0043$ and $B' = 0.11$. From these values, using Eq A1.6 and Eq A1.7, $A = 1.99A' = 0.0086$ and $B = 1.44B' = 0.16$. Thus, from Eq A1.1, $\varepsilon = 0.0086 + 0.16X$. From Eq A1.10, taking $T_h - T_c = 20$ K, the ideal choice for the ambient temperature would be $T_a = T_m + 0.54$ K. Assuming that the ambient temperature can be held within ± 1 K of this value, the edge heat loss error, from Eq A1.1 and Eq A1.2, would be $\varepsilon = \pm 0.016$. Thus, for the above assumptions, the edge effects could be $\pm 1.6\%$.

A2. LOCATION OF LINE-HEAT SOURCES

A2.1 Scope

A2.1.1 This annex provides procedures based on analyses by Flynn et al. (13) for determining the radial locations of the line-heat sources. Alternative procedures than those in this annex may be used for selecting these locations, but it is the responsibility of the user to determine what, if any, corrections must be applied to measured temperatures in order to compute thermal transmission properties of test specimens. This annex provides for two general cases for the meter plate: (1) the mean temperature of the meter plate equal to the gap temperature; and (2) the mean temperature of the meter plate maximally isothermal and greater than the gap temperature. Analogous procedures are provided for the guard plate.

A2.2 Meter Plate: Case 1

A2.2.1 The procedure in this section provides the means for multiple heaters in the meter plate to be located so that the temperature at the gap will be equal to the mean temperature of the meter plate. The special case of one circular line-heat source in the meter plate is also discussed.

NOTE A2.1—The latter represents the case for plates built at the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards) as described in the adjunct.⁴

A2.2.2 The meter plate is assumed to have n circular heaters. If the effects of heater leads are neglected and the thermal conductance of the test specimens is not too high, the

temperature distribution in the meter plate can be assumed to be a function only of radial position and the heat flux from the plate into the specimens can be assumed uniform. For these assumptions, the temperature at the guard gap, $r = b$, will be equal to the mean temperature averaged over the entire meter plate provided that:

$$\sum_{k=1}^n \frac{2\pi a_k q_k}{Q} \left(\frac{2a_k^2}{b^2} - 1 \right) = 0 \tag{A2.1}$$

where the k -th heater, located at $r = a_k$, produces q_k W per unit length. The total power input to the meter plate is given by:

$$Q = \sum_{k=1}^n 2\pi a_k q_k \tag{A2.2}$$

A2.2.3 If all of the heaters carry the same current, q_k in Eq A2.1 can be replaced by the electrical resistance per unit length of the k -th heater and Q can be replaced by the total combined electrical resistance of all of the heaters. Further, if all of the heaters have the same electrical resistance per unit length, the temperature at the guard gap can be made equal to the mean temperature of the meter plate by selecting heater locations such that:

$$\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{b} \left(\frac{2a_k^2}{b^2} - 1 \right) = 0 \tag{A2.3}$$

A2.2.4 For only one heater, the location is $a = a_1 = b\sqrt{2}/2$. If there are multiple heaters, Eq A2.3 does not have a unique

solution. However, if half of the power input to each heater is constrained to flow radially inward in the meter plate and half to flow outward and the power input to the region of the meter plate between two heaters is provided only by those two heaters, a unique solution to Eq A2.3 is available. With these constraints, when the heaters are of equal strength (that is, have the same power output per unit length), they should be located at:

$$\frac{a_k}{b} = \frac{k}{\sqrt{n^2+n}}, \text{ for } k = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A2.4})$$

Values for a_k/b obtained from Eq A2.4 for $n \leq 6$ are listed in Table A2.1.

A2.2.5 When the heater locations have been selected such that the mean temperature of the meter plate is equal to the temperature at the gap, the radial temperature distribution $v(r)$ is given by:

$$\frac{v(r) - V}{V} = \frac{b^2}{2\lambda_p m R} \cdot F(n, r/b) \quad (\text{A2.5})$$

Here, $V = T_h - T_c$ is the mean temperature of the meter plate measured relative to the cold plates, λ_p is the thermal conductivity of the material of which the meter plate is constructed, m is the thickness of the meter plate, and R is the thermal resistance of the specimens. The function F is given by:

$$F(n, r/b) = \frac{r^2}{b^2} - 1 - \frac{4}{n^2+n} \sum_{k=1}^n k \ln\left(\frac{r_k}{b}\right) \quad (\text{A2.6})$$

where $r_{k>}$ is the greater of r or a_k (that is, $r_{k>} = a_k$ when $r < a_k$ and $r_{k>} = r$ when $r > a_k$). Eq A2.5 requires two specimens each having the same thermal resistance. If the specimens have different resistances R_1 and R_2 , R in Eq A2.5 becomes $2R_1R_2/(R_1 + R_2)$. If the guarded-hot-plate apparatus is operated in the single-sided mode, with only one specimen, the right hand side of Eq A2.5 should be divided by two.

A2.2.6 Fig. A2.1 shows the function $F(n, r/b)$ for values of n ranging from 1 to 4. For each value of n this function has its lowest value, F_{\min} , at the center of the meter plate and local maxima at the location of each heater, with the highest value, F_{\max} , being at the outermost heater. The values of F_{\min} and F_{\max} are included in Table A2.1. These values can be used in conjunction with Eq A2.5 to compute the range of temperature variation for a given meter plate and specimens.

A2.2.7 Example 1—Assume that the meter plate has a radius of 0.1 m, a thickness of 0.005 m, and a thermal conductivity of

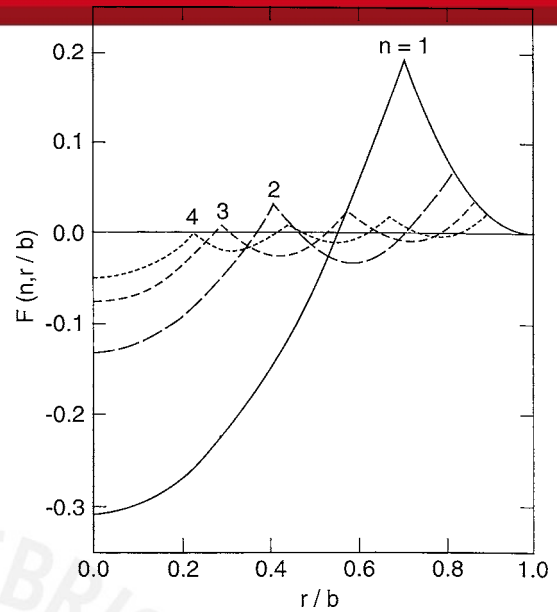


FIG. A2.1 The Function $F(n, r/b)$ for the Meter Plate, Plotted versus r/b with n as a Parameter

200 W/m·K. For a pair of specimens, each having a thermal resistance of $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, Eq A2.5 yields:

$$\frac{v(r) - V}{V} = 0.01 \cdot F(n, r/b) \quad (\text{A2.7})$$

For a meter plate with a single line-heat source and this set of parameters, the temperature of the meter plate, relative to the temperature of the cold plates, would be 0.3 % colder than the mean temperature in the center and 0.2 % hotter at the heater location. If three heaters were used, the center temperature would be 0.08 % colder and the maximum temperature 0.04 % hotter than the mean temperature.

A2.2.8 Example 2—Consider a meter plate having a radius of 0.05 m, a thickness of 0.005 m, and a thermal conductivity of 50 W/m·K used to test specimens having a thermal resistance of only $0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. The factor multiplying F in Eq A2.5 would be 0.1. If a single heater were used, the temperature at the center of the meter plate would be 3.1 % colder than the mean temperature and the temperature at the location of the heater would be 1.9 % hotter. Thus, for high-conductance specimens, the user may decide to build the meter plate with

TABLE A2.1 Radial Locations for Line-heat Sources in the Meter Plate, Selected so that the Gap is Equal to the Mean Temperature of the Meter Plate

n	a_1/b	a_2/b	a_3/b	a_4/b	a_5/b	a_6/b	a_7/b	a_8/b	a_9/b	a_{10}/b	F_{\min}	F_{\max}
1	0.7071	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-0.3069	0.1931
2	0.4082	0.8165	...	...	...	...	...	...	...	...	-0.1324	0.0721
3	0.2887	0.5774	0.8660	...	...	...	...	...	...	...	-0.0758	0.0377
4	0.2236	0.4472	0.6708	0.8944	...	...	...	...	...	...	-0.0497	0.0231
5	0.1826	0.3651	0.5477	0.7303	0.9129	...	...	...	...	...	-0.0354	0.0157
6	0.1543	0.3086	0.4629	0.6172	0.7715	0.9258	...	...	...	...	-0.0266	0.0113
7	0.1336	0.2673	0.4009	0.5345	0.6682	0.8018	0.9354	...	...	...	-0.0208	0.0085
8	0.1179	0.2357	0.3536	0.4714	0.5893	0.7071	0.8250	0.9428	...	...	-0.0168	0.0067
9	0.1054	0.2108	0.3162	0.4216	0.5270	0.6325	0.7379	0.8433	0.9487	...	-0.0138	0.0054
10	0.953	0.1907	0.2860	0.3814	0.4767	0.5721	0.6674	0.7628	0.8581	0.9535	-0.0116	0.0044

four line-heat sources so that the extreme temperatures would be only - 0.5 % and + 0.2 % different from the mean temperature.

A2.3 Meter Plate: Case 2

A2.3.1 The procedure in this section provides the means for heater locations that result in the meter plate being more isothermal than if heater locations had been determined using the procedure in A2.2. However, this improved temperature uniformity is obtained at the expense of either locating the temperature sensors somewhat inboard of the outer edge of the meter plate or else making a small correction to the gap temperature in order to obtain the mean temperature of the meter plate. As was the case in A2.2, it is assumed that the heaters all have the same electrical resistance per unit length and carry the same current.

A2.3.2 An iterative procedure is required to determine the location of the heaters so that a simple equation cannot be used to compute the values of a_k/b , as was done in A2.2. The radial locations are given in Table A2.2, for the cases of 1 to 6 heaters. The values shown for r_{meas}/b indicate the largest radius at which the local temperature of the plate is equal to its mean temperature. This is a location at which temperature sensors can be located if one does not wish to have to make a (small) correction to the measured temperature in order to obtain the mean temperature.

A2.3.3 When the heater locations have been selected from the values in Table A2.2, the radial temperature distribution is given by Eq A2.5, but with $F(n,r/b)$ replaced by $G(n,r/b)$, the function shown in Fig. A2.2. For $n = 1$ to 6, the minimum and maximum values of $G(n,r/b)$ are given in Table A2.2. The examples given previously in A2.2.7 and A2.2.8 can easily be adapted to the modified heater locations by replacing values of F with the corresponding values of G .

A2.4 Guard Plate: Case 1

A2.4.1 The procedure in this section provides the means for multiple heaters in the guard plate to be located so that half of the heat input to a given heater flows inward in the guard plate while half flows outward.

A2.4.2 The temperature distribution in the guard plate depends upon the inner and outer diameters of the guard ring, the heater locations, and the amount of heat loss from the edge of the guard plate. Normally, the edge heat losses would not be negligible when specimens having high thermal resistance are tested. In a well-designed guarded hot plate, the radial tem-

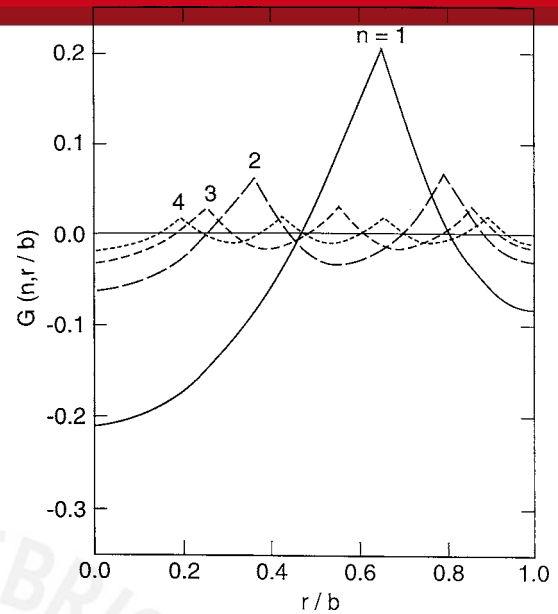


FIG. A2.2 The Function $G(n,r/b)$ for the Meter Plate, Plotted versus r/b with n as a Parameter

perature variations for such specimens would be so small that optimal location of the heaters would not be critical. For specimens with very low thermal resistance, edge heat loss would not have much effect on the selection of heater locations, provided that reasonably good edge insulation were used and the ambient temperature did not differ too greatly from the guard plate edge temperature. For this reason, the heater locations given in this section and in A2.5 have been computed assuming that edge heat losses are negligible compared to the heat flow through the test specimen(s).

NOTE A2.2—For a specific guarded-hot-plate design, a particular edge heat loss can be assumed and the corresponding optimal heater locations computed for specimens having the lowest thermal resistance of interest. A better procedure would be to compute the heater locations as is done in this section and in A2.5, that is, assuming that there is no edge heat loss, and then to design and build the guarded-hot-plate apparatus with an edge heater on the guard plate that can be adjusted to provide essentially all of the heat that is lost to the ambient.

A2.4.3 Given the same constraints as in A2.2.3, that is, n heaters of equal strength per unit length located so that half of the heat input to a given heater flows inward in the guard plate while half flows outward, the k -th heater should be located at a radius c_k , given by:

TABLE A2.2 Radial Locations for Line Heat-Sources in the Meter Plate, Selected so that the Meter Plate is as Isothermal as Possible

n	a_1/b	a_2/b	a_3/b	a_4/b	a_5/b	a_6/b	a_7/b	a_8/b	a_9/b	a_{10}/b	r_{meas}/b	G_{min}	G_{max}
1	0.6459	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.8039	-0.2086	0.2086
2	0.3535	0.7909	...	...	...	...	...	...	...	...	0.8820	-0.0625	0.0656
3	0.2464	0.5480	0.8529	...	...	...	...	...	...	...	0.9163	-0.0303	0.0313
4	0.1888	0.4203	0.6530	0.8864	...	...	...	...	...	...	0.9352	-0.0178	0.0183
5	0.1531	0.3408	0.5296	0.7183	0.9074	...	...	...	...	...	0.9471	-0.0117	0.0120
6	0.1288	0.2867	0.4454	0.6042	0.7629	0.9219	...	...	...	...	0.9553	-0.0083	0.0085
7	0.1111	0.2474	0.3844	0.5213	0.6583	0.7953	0.9325	...	...	...	0.9613	-0.0062	-0.0063
8	0.0977	0.2175	0.3380	0.4585	0.5790	0.6994	0.8199	0.9405	...	...	0.9659	-0.0048	-0.0049
9	0.0872	0.1941	0.3017	0.4092	0.5167	0.6264	0.7317	0.8392	0.9468	...	0.9695	-0.0038	-0.0039
10	0.0788	0.1753	0.2724	0.3694	0.4665	0.5636	0.6606	0.7577	0.8548	0.9519	0.9724	-0.0031	-0.0032



$$\frac{c_k}{b} = \frac{c_1}{b} \left[1 + (k-1) \left(1 - \frac{b^2}{c_1^2} \right) \right] \quad (A2.8)$$

where b is the inner radius of the guard plate and c_1 is the location of the innermost heater, with c_1/b given by the real, positive root of:

$$(n^2+n) \frac{c_1^4}{b^4} - \left(\frac{d^2}{b^2} + 2n^2 - 1 \right) \frac{c_1^2}{b^2} + (n^2 - n) = 0 \quad (A2.9)$$

Since Eq A2.9 is quadratic in c_1^2 / b^2 , the root is easily obtained. Values for c_k/b , obtained from Eq A2.8 and Eq A2.9, for $d/b = 1.5, 2.0, 2.5,$ and 3.0 and $n \leq 6$ are listed in Table A2.3.

A2.5 Guard Plate: Case 2

A2.5.1 The heater locations given in this section result in the guard plate being somewhat more isothermal than it would

be for the heater locations determined using the procedure in A2.4. As was the case in A2.4, it is assumed that the effects of edge heat losses can be neglected and that the heaters all have the same electrical resistance per unit length and carry the same current. An iterative procedure, or the solution of a family of equations, is required to determine the location of the heaters so that a simple equation cannot be used to compute the values of c_k/b , as was done in the previous section. The heater locations obtained by iteration are given in Table A2.4, for the cases of 1 to 6 heaters, for four different values of d/b .

TABLE A2.3 Radial Locations for Line-heat Sources in the Guard Plate, Selected so that Half of the Heat Input to a Given Heater Flows Inward in the Guard Plate While Half Flows Outward

d/b	n	c_1/b	c_2/b	c_3/b	c_4/b	c_5/b	c_6/b	c_7/b	c_8/b	c_9/b	c_{10}/b
1.5	1	1.2748	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2	1.1321	1.3808	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	1.0866	1.2529	1.4192	...	...	...	...	...	...	...
	4	1.0644	1.1892	1.3140	1.4389	...	...	...	...	...	...
	5	1.0512	1.1511	1.2510	1.3510	1.4509	...	...	...	...	...
	6	1.0425	1.1258	1.2091	1.2924	1.3757	1.4589	...	...	...	...
	7	1.0363	1.1077	1.1791	1.2505	1.3219	1.3933	1.4647	...	...	...
	8	1.0317	1.0942	1.1567	1.2192	1.2816	1.3441	1.4066	1.4691	...	...
	9	1.0282	1.0837	1.1392	1.1948	1.2503	1.3059	1.3614	1.4169	1.4752	...
	10	1.0253	1.0753	1.1253	1.1753	1.2253	1.2753	1.3252	1.3752	1.4252	1.4752
2.0	1	1.5811	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2	1.2762	1.7688	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	1.1791	1.5102	1.8413	...	...	...	...	...	...	...
	4	1.1322	1.3813	1.6303	1.8794	...	...	...	...	...	...
	5	1.1047	1.3042	1.5037	1.7032	1.9027	...	...	...	...	...
	6	1.0866	1.2530	1.4194	1.5858	1.7522	1.9185	...	...	...	...
	7	1.0739	1.2166	1.3592	1.5019	1.6446	1.7873	1.9299	...	...	...
	8	1.0644	1.1893	1.3141	1.4390	1.5639	1.6888	1.8137	1.9385	...	...
	9	1.0571	1.1681	1.2791	1.3901	1.5012	1.6122	1.7232	1.8342	1.9453	...
	10	1.0512	1.1512	1.2511	1.3510	1.4510	1.5509	1.6508	1.7508	1.8507	1.9057
2.5	1	1.9039	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2	1.4302	2.1611	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	1.2771	1.7711	2.2652	...	...	...	...	...	...	...
	4	1.2034	1.5758	1.9483	2.3207	...	...	...	...	...	...
	5	1.1604	1.4591	1.7578	2.0564	2.3551	...	...	...	...	...
	6	1.1323	1.3816	1.6308	1.8800	2.1293	2.3785	...	...	...	...
	7	1.1126	1.3264	1.5402	1.7540	1.9678	2.1816	2.3954	...	...	...
	8	1.0980	1.2851	1.4723	1.6595	1.8466	2.0338	2.2210	2.4082	...	...
	9	1.0867	1.2531	1.4195	1.5860	1.7524	1.9189	2.0853	2.2517	2.4182	...
	10	1.077	1.2276	1.3774	1.5272	1.6770	1.8269	1.9767	2.1265	2.2764	2.4262
3.0	1	2.2361	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2	1.5922	2.5564	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	1.3799	2.0351	2.6902	...	...	...	...	...	...	...
	4	1.2777	1.7727	2.2677	2.7627	...	...	...	...	...	...
	5	1.2183	1.6157	2.0131	2.4105	2.8079	...	...	...	...	...
	6	1.1796	1.5114	1.8432	2.1750	2.5069	2.8397	...	...	...	...
	7	1.1525	1.4372	1.7220	2.0067	2.2915	2.5762	2.8610	...	...	...
	8	1.1324	1.3818	1.6311	1.8805	2.1298	2.3792	2.6286	2.8779	...	...
	9	1.1170	1.3388	1.5606	1.7823	2.0041	2.2259	2.4476	2.6694	2.8912	...
	10	1.1048	1.3045	1.5041	1.7038	1.9035	2.1032	2.3028	2.5025	2.7022	2.9018

TABLE A2.4 Radial Locations for Line-heat Sources in the Guard Plate, Selected so that the Plate is as Isothermal as Possible

d/b	n	c_1/b	c_2/b	c_3/b	c_4/b	c_5/b	c_6/b	c_7/b	c_8/b	c_9/b	c_{10}/b
1.5	1	1.2626	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2	1.1279	1.3773	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	1.0847	1.2509	1.4177	...	...	...	...	...	...	...
	4	1.0633	1.1881	1.3130	1.4381	...	...	...	...	...	...
	5	1.0505	1.1504	1.2504	1.3503	1.4504	...	...	...	...	...
	6	1.0420	1.1253	1.2086	1.2919	1.3752	1.4586	...	...	...	...
	7	1.0360	1.1073	1.1788	1.2502	1.3216	1.3930	1.4645	...	...	...
	8	1.0314	1.0939	1.1564	1.2189	1.2814	1.3439	1.4064	1.4689	...	...
	9	1.0279	1.0835	1.1390	1.1946	1.2501	1.3057	1.3612	1.4168	1.4723	...
	10	1.0251	1.0751	1.1251	1.1751	1.2251	1.2751	1.3251	1.3751	1.4251	1.4751
2.0	1	1.5425	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2	1.2609	1.7576	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	1.1719	1.5034	1.8366	...	...	...	...	...	...	...
	4	1.1280	1.3771	1.6268	1.8768	...	...	...	...	...	...
	5	1.1020	1.3014	1.5013	1.7011	1.9011	...	...	...	...	...
	6	1.0847	1.2510	1.4176	1.5842	1.7507	1.9174	...	...	...	...
	7	1.0724	1.2150	1.3579	1.5006	1.6434	1.7862	1.9291	...	...	...
	8	1.0633	1.1881	1.3131	1.4380	1.5630	1.6879	1.8129	1.9379	...	...
	9	1.0562	1.1671	1.2782	1.3893	1.5004	1.6115	1.7226	1.8336	1.9448	...
	10	1.0505	1.1504	1.2504	1.3503	1.4503	1.5503	1.6503	1.7503	1.8502	1.9503
2.5	1	1.8331	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2	1.3984	2.1399	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	1.2615	1.7572	2.2562	...	...	...	...	...	...	...
	4	1.1942	1.5671	1.9412	2.3158	...	...	...	...	...	...
	5	1.1544	1.4531	1.7527	2.0522	2.3521	...	...	...	...	...
	6	1.1281	1.3772	1.6270	1.8767	1.1264	2.3764	...	...	...	...
	7	1.1094	1.3231	1.5373	1.7514	1.9655	2.1796	2.3939	...	...	...
	8	1.0955	1.2826	1.4700	1.6574	1.8447	2.0321	2.2195	2.4070	...	...
	9	1.0847	1.2510	1.4177	1.5842	1.7508	1.9174	2.0840	2.2506	2.4173	...
	10	1.0761	1.2259	1.3758	1.5258	1.6757	1.8256	1.9756	2.1255	2.2754	2.4255
3.0	1	2.1308	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2	1.5400	2.5237	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	1.3534	1.0123	2.6764	...	...	...	...	...	...	...
	4	1.2617	1.7580	2.2561	2.7552	...	...	...	...	...	...
	5	1.2077	1.6055	1.0046	2.4035	2.8032	...	...	...	...	...
	6	1.1721	1.5040	1.8368	2.1696	2.5023	2.8355	...	...	...	...
	7	1.1469	1.4315	1.7170	2.0023	2.2877	2.5730	2.8587	...	...	...
	8	1.1281	1.3773	1.6271	1.8769	2.1267	2.3764	2.6262	2.8762	...	...
	9	1.1136	1.3352	1.5573	1.7793	2.0014	2.2235	2.4455	2.6676	2.8898	...
	10	1.1020	1.3015	1.5014	1.7013	1.9012	2.1011	2.3010	2.5008	2.7007	2.9007

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. ESTIMATION OF HEAT FLOW ACROSS THE GAP

X1.1 Scope

X1.1.1 This appendix provides analyses of heat flow for three gap cross-sections: (a) rectangular; (b) circular; and, (c) diamond-shaped (Fig. 2). The analyses for the following geometries have been derived by Hahn (2, 3).

X1.2 Gap of Rectangular Cross-Section

X1.2.1 The heat flow across the gap in Fig. 2(a) is simply:

$$Q_g \approx \frac{2\pi b m \lambda_g V_0}{w} \tag{X1.1}$$

where V_0 is the temperature difference across the gap, λ_g is the thermal conductivity of insulation in the gap, m is the plate thickness, b is the radius to the center of the gap, and w is the width of the gap.

X1.3 Gap of Circular Cross-Section

X1.3.1 As shown by Hahn et al. (3), the heat flow across the gap in Fig. 2(b) is:

$$Q_g \approx \frac{2\pi b m \lambda_g V_0}{w} \left[\frac{m - 2R}{m} + \frac{8R}{\pi m} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{nw}{2R}\right) \right] \tag{X1.2}$$

where R is the radius of the circular cross-section. The first term in Eq X1.2 represents heat flow across the narrow portions of the gap near the surfaces of the plate, while the second term represents heat flow across the circular region.

X1.4 Gap of Diamond-Shaped Cross-Section

X1.4.1 As shown by Hahn et al. (3), the total heat flow across the gap in Fig. 2(c) is:

$$Q_g \approx \frac{2\pi b m \lambda_g V_0}{w} \left[\frac{m - 2R}{m} + \frac{8w}{\pi m} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left\{ \operatorname{cosech}(n\pi) \cosh \frac{n\pi w}{2R+w} - \coth(n\pi) \cos \frac{2n\pi R}{2R+w} \right\} \right] \quad (X1.3)$$

Here, $2R$ is the vertical distance of the meter plate subtended by the angle of the diamond-shaped cross-section (see Fig. 2(c)).

X1.5 Other Considerations

X1.5.1 If the temperature across the gap is imbalanced, other factors affecting the heat flow across the gap should be considered, including: (1) conduction heat transfer across the air gap; (2) conduction through the meter plate support system (metal pins, for example); (3) conduction through sensor wires that cross the gap; (4) conduction through the wire heater leads that cross the gap; and (5) radiation heat transfer across the gap. For further details, the user is referred to Hahn’s dissertation (2).

X2. ANGULAR LOCATION OF HEATER LEADS AND TEMPERATURE SENSORS

X2.1 Scope

X2.1.1 This appendix provides a method for locating the angular positions of the heater leads and temperature sensors in the gap. The analysis presented here has been derived by Hahn (2) utilizing Green’s functions to describe the generation of heat due to the heater leads.

NOTE X2.1—The analysis presented in Annex A2 is based on ideal temperature distributions, independent of angle. In actuality, this symmetry in a line-heat-source guarded hot plate can be disturbed by the (joulean) heat generated from the wire leads to the heaters in the meter and guard plates. These effects are generally small but can be determined by application of Green’s functions.

X2.2 Theoretical Analysis

X2.2.1 *Geometric Model*—A meter plate of thickness m , radius b_1 , and thermal conductivity λ_p has a single line-heat source at radius a as illustrated in Fig. X2.1. For the analysis, an r, θ, z cylindrical coordinate system is utilized. The lead wires for the heater enter the meter plate radially at the half-angle, α . The heat generation per unit length for the lead wires is q_1' ; for the portion of the heater between $-\alpha < \theta < \alpha$, q_2' ; and the remaining portion, q_3' .

X2.2.2 *Assumptions*—The analysis is based on the following assumptions (1) axial heat flow in the guarded hot plate can be neglected; (2) radial and angular heat flow in the specimen can be neglected; (3) the heat flux from both sides of the guarded hot plate is uniform; (4) there is no heat flow across the gap; and, (5) heat is generated only in circular line-line heat sources or heater leads normal to the sources.

X2.2.3 *Meter Plate*—As shown by Hahn et al. (2), the solution for the meter plate for $r = b_1$ is:

$$v(b_1, \theta) = \frac{q_1'}{2\pi m \lambda_p} \left[\frac{b_1^3 - a^3}{3b_1^2} + \frac{7}{2} (b_1 - a) - b_1 (1 - \cos(\theta - \alpha)) \ln(2 - 2\cos(\theta - \alpha)) - b_1 (1 - \cos(\theta + \alpha)) \ln(2 - 2\cos(\theta + \alpha)) \right] \quad (X2.1)$$

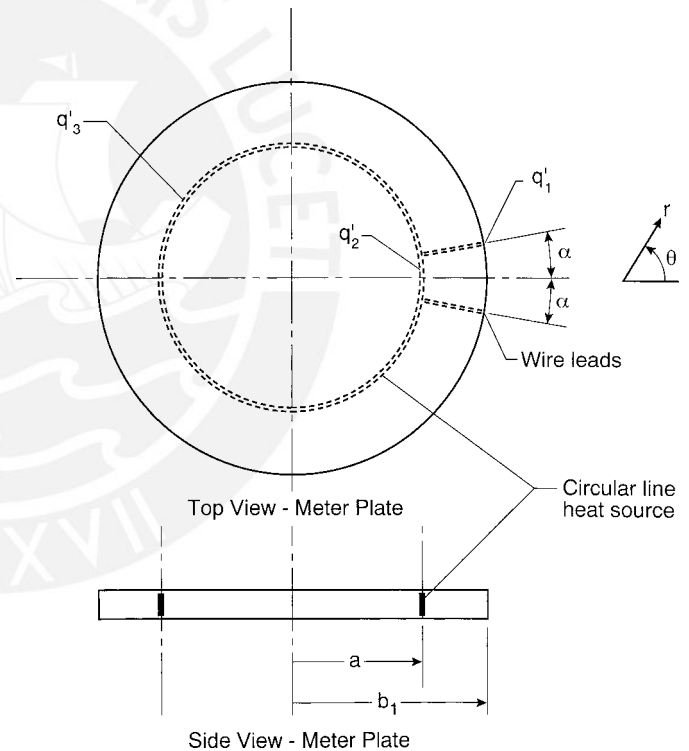


FIG. X2.1 Geometry Used in the Analysis of Angular Temperature Distribution at the Gap

$$+ (a - b_1 \cos(\theta - \alpha)) \ln \left(1 - 2 \frac{a}{b_1} \cos(\theta - \alpha) + \frac{a^2}{b_1^2} \right) + \left(a - b_1 \cos(\theta + \alpha) \ln \left(1 - 2 \frac{a}{b_1} \cos(\theta + \alpha) + \frac{a^2}{b_1^2} \right) - 2b_1 \sin(\theta - \alpha) \left(\tan^{-1} \frac{1 - \cos(\theta - \alpha)}{\sin(\theta - \alpha)} - \tan^{-1} \frac{a - b_1 \cos(\theta - \alpha)}{b_1 \sin(\theta - \alpha)} \right) - 2b_1 \sin(\theta + \alpha) \left(\tan^{-1} \frac{1 - \cos(\theta + \alpha)}{\sin(\theta + \alpha)} - \tan^{-1} \frac{a - b_1 \cos(\theta + \alpha)}{b_1 \sin(\theta + \alpha)} \right) \right]$$



$$+ \frac{a}{\pi m \lambda_p} [q_2 \alpha + q_3 (\pi - \alpha)] \left(\frac{b_1^2 + a^2}{2b_1^2} - \frac{3}{4} \right) - 2 \sin \theta \left(\tan^{-1} \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} - \tan^{-1} \frac{a/b_1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right) + \bar{V}_m$$

$$+ \frac{2a}{\pi m \lambda_p} (q_2 - q_3) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(\frac{a}{b_1} \right)^n \sin n \alpha \cos n \theta + \bar{V}_m$$

where v is the temperature and V_m is the average temperature of the meter plate.

X2.2.4 *Example*—Choosing $a = b_1 \sqrt{2}/2$, $\alpha = 0$, and $q_2 - q_3 = 0$, Eq X2.1 becomes:

$$v(b_1, \theta) = \frac{q_1 b_1}{\pi m \lambda_p} \left[\frac{23}{12} - \frac{11}{6} \frac{a}{b_1} - (1 - \cos \theta) \frac{1}{n} (2 - 2 \cos \theta) + \left(\frac{a}{b_1} - \cos \theta \right) \frac{1}{n} \left(\frac{3}{2} - 2 \frac{a}{b_1} \cos \theta \right) \right] \quad (X2.2)$$

X3. COMMENTARY

X3.1 Introduction

X3.1.1 This commentary provides the user of this practice with its background and history. It includes a brief discussion on the precision and bias of the line-heat-source guarded hot plate.

X3.1.2 The guarded-hot-plate apparatus and its application in determining the steady-state thermal transmission properties of flat specimens are covered in Test Method C177. The test method permits different designs for the apparatus and, in principle, includes apparatus designed with guarded hot plates having either distributed- or line-heat sources.

X3.1.3 A guarded hot plate with a distributed heat source typically utilizes a core heater of wire or ribbon distributed over a square or circular core plate and laminated between two thermally conductive surface plates. In most cases, the surface plates are metal and are insulated electrically from the heater windings.

X3.1.4 Considerable difficulty is encountered in assessing the errors associated with this type of apparatus (14). A square plate geometry can further complicate the thermal balance at the guard due to the effects of corners. Also, a laminated construction using materials having differential thermal expansions may warp or deform permanently after thermal cycling.

X3.1.5 In contrast, a guarded hot plate with circular line-heat sources typically utilizes one (or a few) heaters embedded at fixed locations in a monolithic plate having a high thermal conductivity. A plate having a circular geometry simplifies the mathematical analysis permitting the temperature profile and mean surface temperature of the meter plate to be calculated.

X3.1.6 The main benefit of the line-heat-source design is that the temperature distribution in the meter plate can be accurately predicted. Thus, it is not necessary to install temperature sensors in the central region of the meter plate. The mean surface temperature of the meter plate is measured with one (or a few) temperature sensors located at the edge of the meter plate in the gap.

Further substituting for $q_1 = \rho_1 \pi i^2 = 0.029 i^2$ W/m, $\lambda_p = 370$ W/(m·K), $b_1 = 75.79$ mm and $m = 9.53$ mm allows plotting $(v(b_1, \theta) - V_m)/i^2$ versus θ . For $v(b_1, \theta) - V_m = 0$, $\theta_{1,2} = 69^\circ$ and 291° . Thus, temperature sensors on the meter-plate side of the gap would be located at these two positions. A similar computation (2) is performed to determine the angles for the guard-plate side of the gap.

X3.1.7 Other benefits due to the circular plate geometry include simplification of the mathematical analysis of edge heat losses (or gains) as well as facilitating the temperature balance of the gap between the meter and guard plates. The monolithic construction of the guarded hot plate facilitates fabrication and repair of the plate.

X3.2 History of Practice C1043

X3.2.1 In 1964, H. E. Robinson presented the basic design of the line-heat-source guarded hot plate to a thermal conductivity conference sponsored by the National Physical Laboratory in England. Tye (1) reported:

H. E. Robinson (U.S. National Bureau of Standards) discussed forms of line heat sources that could be used as heaters in apparatus for measurements at lower temperatures on insulating materials in disk and slab form. These new configurations lend themselves more readily to mathematical analysis; they are more simple to use and would appear to be able to yield more accurate results.

X3.2.2 In 1971, Hahn (2) conducted an in-depth analysis of the line-heat-source concept and investigated several design options. Subsequently, in 1973, the design, mathematical analysis, and uncertainty analysis for an apparatus under construction at the National Bureau of Standards (now NIST) were presented at an ASTM symposium on Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations (3). A final description of this apparatus was presented by Siu (5) in 1981. Favorable test results resulted in the construction at NIST of a second larger line-heat-source guarded hot plate apparatus (7), which has subsequently been used for the development of NIST SRMs 1449 – Fumed Silica Board, 1450c – Fibrous Glass Board, and 1453 – Expanded Polystyrene Board.

X3.2.3 In 1985, the practice for using a line-heat-source in a guarded hot plate was adopted by the American Society for Testing and Materials with a (minor) revision made in 1989. In 1996, the practice was revised extensively with changes in title and scope with minor revisions in 1997 and in 2006.

X3.3 Precision and Bias

X3.3.1 A statement on precision and bias for guard-hot-plate apparatus is covered in Test Method C177. Currently, the statement does not distinguish between types of apparatus, line-heat-source or otherwise. The user is directed instead to the intra- and interlaboratory tests reported as follows if information on precision and bias is required.

X3.3.2 *Guarded Hot Plate Temperature Distribution*—For the NIST 305 mm line-heat-source guarded hot plate, Peavy's analysis (3) for a perfectly balanced gap predicts that the maximum temperature at the heater is 0.03°C above that at the center of the meter plate. Experimental verification by Siu (5) shows the temperature at the heater to be 0.2°C higher than the center of the meter plate. This difference, however, was equal to the uncertainty in the temperature measurements.

X3.3.3 *Intralaboratory Tests*—In 1981, Siu (6) presented

results of a within-laboratory comparison of distributed- and line-heat-source guarded hot plates. The maximum deviations of the measured results for a pair of fibrous-glass board specimens were less than one percent from the SRM 1450 curve for the temperature range – 10 to 80°C.

X3.3.4 *Interlaboratory Tests*—From 1985 to 2006, the NIST 1-meter line-heat-source guarded hot plate has participated in five (published) interlaboratory tests. The first, in 1985, was sponsored by the American Society for Testing and Materials and the Mineral Insulation Manufacturers Association (15); the second on loose-fill insulations by ASTM Committee C16 with eleven laboratories (16); and third also on loose-fill insulation by ASTM Committee C16 with nine laboratories (17) the fourth with NRC-Canada (18); and, the fifth with four other national metrology institutes (19).

REFERENCES

- (1) Tye, R. P., *Nature*, Vol 204, 1964, p. 636.
- (2) Hahn, M. H., *The Line Source Guarded Hot Plate for Measuring the Thermal Conductivity of Building and Insulating Materials*, Ph.D. dissertation, Catholic University of America, 1971, available as Microfilm No. 72-17633 from University Microfilm International, 300 N. Zeeb Road, Ann Arbor, MI, 48106.
- (3) Hahn, M. H., Robinson, H., and Flynn, D., "Robinson Line-Heat-Source Guarded Hot Plate Apparatus," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations*, ASTM STP 544, 1974, pp. 167–192.
- (4) Powell, F. J., and Siu, M. C. I., "Development of the Robinson Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus for Measurement of Thermal Conductivity," *Proceedings of XIV International Congress of Refrigeration*, International Institute of Refrigeration, Moscow, 1975.
- (5) Siu, M. C. I., and Bulik, C., "National Bureau of Standards Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol 52, No. 11, 1981, pp. 1709–1716.
- (6) Siu, M. C. I., "Comparison of Results of Measurements Made on a Line-Heat-Source and a Distributed-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Proceedings of the 17th Conference on Thermal Conductivity*, 1983, pp. 413–426.
- (7) Powell, F. J., and Rennex, B. G., "The NBS Line-Heat-Source Guarded Hot Plate for Thick Materials," *Proceedings of the ASHRAE/DOE Conference on Thermal Performance of Exterior Envelopes of Buildings II*, Las Vegas, ASHRAE SP 38, ASHRAE, Atlanta, GA, 1983, pp. 657–672.
- (8) Rennex, B. G., "Error Analysis for the NBS 1016 mm Guarded Hot Plate," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 7, 1983, pp. 18–51.
- (9) Zarr, R. R., "A History of Testing Heat Insulators at the National Institute of Standards and Technology," *ASHRAE Transactions*, Vol. 107, Pt. 2, 2001, pp. 661-671.
- (10) Peavy, B., and Rennex, B. G., "Circular and Square Edge Effect Study for Guarded-Hot-Plate and Heat-Flow-Meter Apparatuses," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 9, 1986, pp. 254–300.
- (11) Bode K. H., "Thermal Conductivity Measurements with the Plate Apparatus: Influence of the Guard Ring Width on the Accuracy of Measurements," *Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology*, ASTM STP 879, C. J. Shirliff and R. P. Tye, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, pp. 29–48.
- (12) ASTM Committee E-20, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement*, ASTM Manual Series: MNL 12, ASTM, 1993.
- (13) Flynn, D. R., Healy, W. M., and Zarr, R. R., "High Temperature Guarded Hot Plate Apparatus - Optimal Locations of Circular Heaters," *Thermal Conductivity 28/Thermal Expansion 16*, DESTech Publications, Inc., Lancaster, PA., 2006, pp. 466-477.
- (14) Pratt, A. W., in *Thermal Conductivity*, Vol 1, R. P. Tye, Ed., 1969, p. 301.
- (15) Hust J. G., and Pelanne, C. M., "Round Robins on the Apparent Thermal Conductivity of Low-Density Glass Fiber Insulations Using Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Apparatus," NBSIR 85-3026, National Bureau of Standards, Boulder CO, May 1985.
- (16) Adams, R. D., and Hust, J. G., "A Round Robin on Apparent Thermal Conductivity of Several Loose-Fill Insulations," *Insulation, Materials, Testing, and Applications*, ASTM STP 1030, D. L. McElroy and J. F. Kimpflen, Eds., 1990, pp. 263–289.
- (17) McCaa, D. J., and Smith, D. R., "Interlaboratory Comparison of the Apparent Thermal Conductivity of a Fibrous Batt and Four Loose-Fill Insulations," *Insulation Materials: Testing and Applications*, 2nd Volume, ASTM STP 1116, R. S. Graves and D. C. Wysocki, Eds., 1991, pp. 534–557.
- (18) Zarr, R. R., Kumaran, M. K., and Lagergren, E. S., "NIST/NRC-Canada Interlaboratory Comparison of Guarded Hot Plate Measurements: 1993-1997," NISTIR 6087, December 1997.
- (19) Zarr, R. R., and Filliben, J. J., "International Comparison of Guarded Hot Plate Apparatus Using National and Regional Reference Materials," NIST Technical Note 1444, May 2002.



ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT).



ANEXO 7

Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation C177; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method establishes the criteria for the laboratory measurement of the steady-state heat flux through flat, homogeneous specimen(s) when their surfaces are in contact with solid, parallel boundaries held at constant temperatures using the guarded-hot-plate apparatus.

1.2 The test apparatus designed for this purpose is known as a guarded-hot-plate apparatus and is a primary (or absolute) method. This test method is comparable, but not identical, to ISO 8302.

1.3 This test method sets forth the general design requirements necessary to construct and operate a satisfactory guarded-hot-plate apparatus. It covers a wide variety of apparatus constructions, test conditions, and operating conditions. Detailed designs conforming to this test method are not given but must be developed within the constraints of the general requirements. Examples of analysis tools, concepts and procedures used in the design, construction, calibration and operation of a guarded-hot-plate apparatus are given in Refs (1-41).²

1.4 This test method encompasses both the single-sided and the double-sided modes of measurement. Both distributed and line source guarded heating plate designs are permitted. The user should consult the standard practices on the single-sided mode of operation, Practice C1044, and on the line source apparatus, Practice C1043, for further details on these heater designs.

1.5 The guarded-hot-plate apparatus can be operated with either vertical or horizontal heat flow. The user is cautioned however, since the test results from the two orientations may be different if convective heat flow occurs within the specimens.

1.6 Although no definitive upper limit can be given for the magnitude of specimen conductance that is measurable on a guarded-hot-plate, for practical reasons the specimen conductance should be less than 16 W/(m²K).

1.7 This test method is applicable to the measurement of a wide variety of specimens, ranging from opaque solids to porous or transparent materials, and a wide range of environmental conditions including measurements conducted at extremes of temperature and with various gases and pressures.

1.8 Inhomogeneities normal to the heat flux direction, such as layered structures, can be successfully evaluated using this test method. However, testing specimens with inhomogeneities in the heat flux direction, such as an insulation system with thermal bridges, can yield results that are location specific and shall not be attempted with this type of apparatus. See Test Method C1363 for guidance in testing these systems.

1.9 Calculations of thermal transmission properties based upon measurements using this method shall be performed in conformance with Practice C1045.

1.10 In order to ensure the level of precision and accuracy expected, persons applying this standard must possess a knowledge of the requirements of thermal measurements and testing practice and of the practical application of heat transfer theory relating to thermal insulation materials and systems. Detailed operating procedures, including design schematics and electrical drawings, should be available for each apparatus to ensure that tests are in accordance with this test method. In addition, automated data collecting and handling systems connected to the apparatus must be verified as to their accuracy. This can be done by calibration and inputting data sets, which have known results associated with them, into computer programs.

1.11 It is not practical for a test method of this type to establish details of design and construction and the procedures to cover all contingencies that might offer difficulties to a person without technical knowledge concerning theory of heat flow, temperature measurements and general testing practices. The user may also find it necessary, when repairing or

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurement.

Current edition approved Sept. 15, 2013. Published October 2013. Originally approved in 1942. Last previous edition approved in 2010 as C177 – 10 . DOI: 10.1520/C0177-13.

² The boldface numbers given in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

modifying the apparatus, to become a designer or builder, or both, on whom the demands for fundamental understanding and careful experimental technique are even greater. Standardization of this test method is not intended to restrict in any way the future development of new or improved apparatus or procedures.

1.12 This test method does not specify all details necessary for the operation of the apparatus. Decisions on sampling, specimen selection, preconditioning, specimen mounting and positioning, the choice of test conditions, and the evaluation of test data shall follow applicable ASTM Test Methods, Guides, Practices or Product Specifications or governmental regulations. If no applicable standard exists, sound engineering judgment that reflects accepted heat transfer principles must be used and documented.

1.13 This test method allows a wide range of apparatus design and design accuracy to be used in order to satisfy the requirements of specific measurement problems. Compliance with this test method requires a statement of the uncertainty of each reported variable in the report. A discussion of the significant error factors involved is included.

1.14 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.15 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* Specific precautionary statements are given in **Note 21**.

1.16 Major sections within this test method are arranged as follows:

	Section	Section
Scope	1	
Referenced Documents	2	
Terminology	3	
Summary of Test Method	4	
Significance and Use	5	
Apparatus	6	
Specimen Preparation and Conditioning	7	
Procedure	8	
Calculation of Results	9	
Report	10	
Precision and Bias	11	
Keywords	12	
	Figures	
General Arrangement of the Mechanical Components of the Guarded-Hot-Plate Apparatus	Fig. 1	
Illustration of Heat Flow in the Guarded-Hot-Plate Apparatus	Fig. 2	
Example Report Form	Fig. 3	
	Annexes	
Importance of Thickness	A1.1	
Measuring Thickness	A1.2	
Limitations Due to Apparatus	A1.3	
Limitations Due to Temperature	A1.4	
Limitations Due to Specimen	A1.5	
Random and Systematic Error Components	A1.6	
Error Components for Variables	A1.7	
Thermal Conductance or Thermal Resistance Error Analysis	A1.8	
Thermal Conductivity or Thermal Resistivity Error Analysis	A1.9	
Uncertainty Verification	A1.10	

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards*:³
- C168 Terminology Relating to Thermal Insulation
 - C518 Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus
 - C687 Practice for Determination of Thermal Resistance of Loose-Fill Building Insulation
 - C1043 Practice for Guarded-Hot-Plate Design Using Circular Line-Heat Sources
 - C1044 Practice for Using a Guarded-Hot-Plate Apparatus or Thin-Heater Apparatus in the Single-Sided Mode
 - C1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-State Conditions
 - C1058 Practice for Selecting Temperatures for Evaluating and Reporting Thermal Properties of Thermal Insulation
 - C1363 Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus
 - E230 Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples
 - E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method
- 2.2 *ISO Standard*:
- ISO 8302 Thermal Insulation—Determination of Steady-State Areal Thermal Resistance and Related Properties—Guarded-Hot-Plate Apparatus⁴
- 2.3 *ASTM Adjuncts*: ASTM
- Table of Theoretical Maximum Thickness of Specimens and Associated Errors⁵
 - Descriptions of Three Guarded-Hot-Plate Designs⁵
 - Line-Heat-Source Guarded Hot-Plate Apparatus⁶

3. Terminology

- 3.1 *Definitions*:
- 3.1.1 For definitions of terms and symbols used in this test method, refer to Terminology C168 and the following subsections.
- 3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard*:
- 3.2.1 *auxiliary cold surface assembly, n*—the plate that provides an isothermal boundary at the outside surface of the auxiliary insulation.
- 3.2.2 *auxiliary insulation, n*—insulation placed on the back side of the hot-surface assembly, in place of a second test specimen, when the single sided mode of operation is used. (*Synonym*—backflow specimen.)
- 3.2.3 *cold surface assembly, n*—the plates that provide an isothermal boundary at the cold surfaces of the test specimen.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

⁴ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, http://www.ansi.org.

⁵ Available from ASTM Headquarters, Order Adjunct: ADJC0177.

⁶ Available from ASTM Headquarters, Order Adjunct: ADJC1043.

3.2.4 *controlled environment, n*—the environment in which an apparatus operates.

3.2.5 *guard, n*—promotes one-dimensional heat flow. Primary guards are planar, additional coplanar guards can be used and secondary or edge guards are axial.

3.2.6 *guarded-hot-plate apparatus, n*—an assembly, consisting of a hot surface assembly and two isothermal cold surface assemblies.

3.2.7 *guarded-hot-plate, n*—the inner (rectangular or circular) plate of the hot surface assembly, that provides the heat input to the metered section of the specimen(s).

3.2.8 *hot surface/assembly, n*—the complete center assembly providing heat to the specimen(s) and guarding for the meter section.

3.2.9 *metered section, n*—the portion of the test specimen (or auxiliary insulation) through which the heat input to the guarded-hot-plate flows under ideal guarding conditions.

3.2.10 *mode, double-sided, n*—operation of the guarded-hot-plate apparatus for testing two specimens, each specimen placed on either side of the hot surface assembly.

3.2.11 *mode, single-sided, n*—operation of the guarded-hot-plate apparatus for testing one specimen, placed on one side of the hot-surface assembly.

3.2.12 *thermal transmission properties, n*—those properties of a material or system that define the ability of a material or system to transfer heat such as thermal resistance, thermal conductance, thermal conductivity and thermal resistivity, as defined by Terminology C168.

3.3 *Symbols*—The symbols used in this test method have the following significance:

3.3.1 ρ_m —specimen metered section density, kg/m³.

3.3.2 ρ_s —specimen density, kg/m³.

3.3.3 λ —thermal conductivity, W/(m K).

3.3.4 σ —Stefan-Boltzmann constant, W/m² K⁴.

3.3.5 A —metered section area normal to heat flow, m².

3.3.6 A_g —area of the gap between the metered section and the primary guard, m².

3.3.7 A_m —area of the actual metered section, m².

3.3.8 A_s —area of the total specimen, m².

3.3.9 C —thermal conductance, W/(m² K).

3.3.10 C_i —the specific heat of the i th component of the metered section, J/(kg K).

3.3.11 dT/dt —potential or actual drift rate of the metered section, K/s.

3.3.12 λ_g —thermal conductivity of the material in the primary guard region, W/(m K).

3.3.13 L —in-situ specimen thickness, m.

3.3.14 m —mass of the specimen in the metered section, kg.

3.3.15 m_i —the mass of the i th component, kg.

3.3.16 m_s —mass of the specimen, kg.

3.3.17 Q —heat flow rate in the metered section, W.

3.3.18 q —heat flux (heat flow rate per unit area), Q , through area, A, W/m².

3.3.19 Q_{ge} —lateral edge heat flow rate between primary Guard and Controlled Environment, W.

3.3.20 Q_{gp} —lateral heat flow rate across the gap, W.

3.3.21 Q_{grad} —guard heat flow through Specimen, W.

3.3.22 Q_{se} —edge heat flow between Specimen and Controlled Environment, W.

3.3.23 R —thermal resistance, m² K/W.

3.3.24 ΔT —temperature difference across the specimen, $T_h - T_c$.

3.3.25 T_c —cold surface temperature, K.

3.3.26 T_h —hot surface temperature, K.

3.3.27 T_m —mean temperature, K, $(T_h + T_c)/2$.

3.3.27.1 *Discussion*— The Guarded-Hot-Plate Apparatus provides a means for measurement of steady state heat flux through insulation materials, that consists of a guarded heater unit, comprised of a center metering area and concentric separately heated guards, and an opposite, similarly sized cooling plate. Specimens are placed in the space between the heater plate and the cooling plate for testing. The guarded-hot-plate is operated as a single or double sided apparatus. Insulation thermal properties are calculated from measurements of metering area, energy input, temperatures, and thickness. The guarded-hot-plate, which provides an absolute measurement of heat flux, has been shown to be applicable for most insulating materials over a wide range of temperature conditions.

4. Summary of Test Method

4.1 Fig. 1 illustrates the main components of the idealized system: two isothermal cold surface assemblies and a guarded-hot-plate. It is possible that some apparatuses will have more than one guard. The guarded-hot-plate is composed of a metered section thermally isolated from a concentric primary guard by a definite separation or gap. Some apparatus may have more than one guard. The test specimen is sandwiched between these three units as shown in Fig. 1. In the double-sided mode of measurement, the specimen is actually composed of two pieces. The measurement in this case produces a result that is the average of the two pieces and therefore it is important that the two pieces be closely identical. For guidance in the use of the one-sided mode of measurement, the user is directed to Practice C1044. For guidance in the use of a guarded-hot-plate incorporating the use of a line source heater, refer to Practice C1043.

4.1.1 The guarded-hot-plate provides the power (heat flow per unit time) for the measurement and defines the actual test volume, that is, that portion of the specimen that is actually being measured. The function of the primary guard, and additional coplanar guard where applicable, of the guarded-hot-plate apparatus is to provide the proper thermal conditions within the test volume to reduce lateral heat flow within the apparatus. The proper (idealized) conditions are illustrated in Fig. 1 by the configuration of the isothermal surfaces and lines of constant heat flux within the specimen.

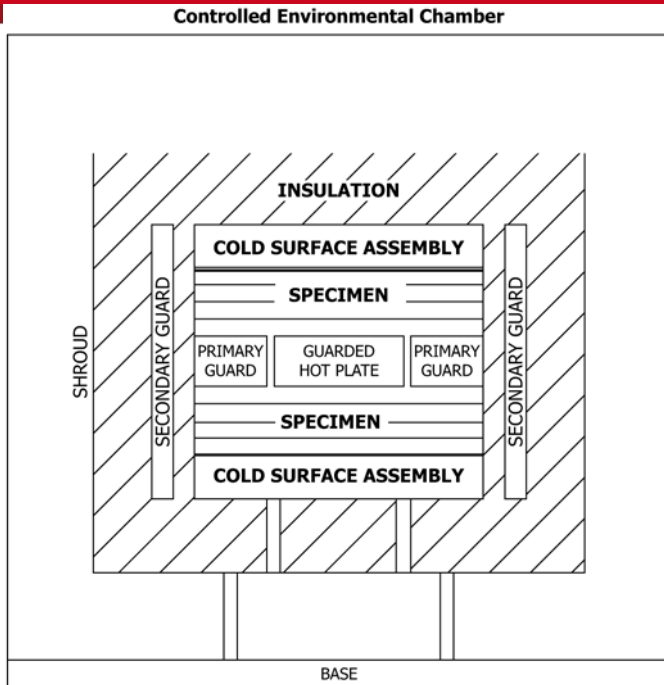


FIG. 1 General Arrangement of the Mechanical Components of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

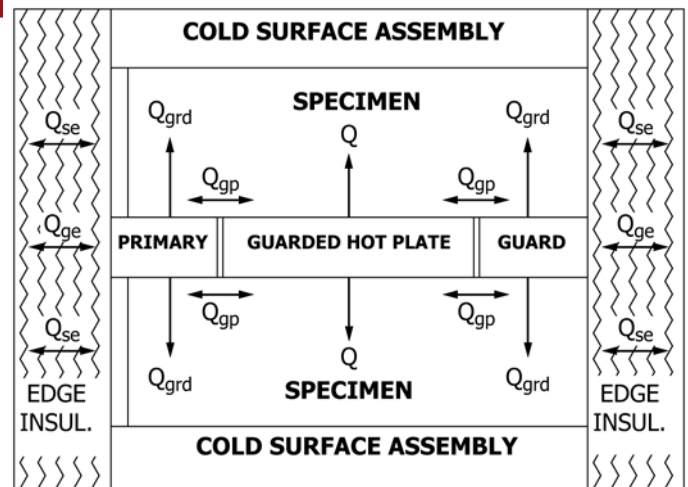


FIG. 2 Illustration of Idealized Heat Flow in a Guarded-Hot-Plate Apparatus

4.1.2 Deviations from the idealized configuration are caused by: specimen inhomogeneities, temperature differences between the metered section and the guard (gap imbalance), and temperature differences between the outer edge of the assembly and the surrounding controlled environment (edge imbalance). These experimental realities lead to heat flow measurements that are too small or too large because the power supplied to the metered section is not exactly equal to that which flows through the specimen in the metered section. The resulting qualitative heat flows are depicted in Fig. 2.

4.2 The three heating/cooling assemblies are designed to create isothermal surfaces on the faces of the specimens within the metered section. The two surfaces designated as the cold surface assemblies are adjusted to the same temperature for the double-sided mode of operation. In practice, because the plates and specimens are of finite dimensions, and because the external controlled environment is often at a temperature different from the edge of the metered section, some lateral heat flow occurs. The primary guard for the guarded hot plate limits the magnitude of the lateral heat flow in the metered section. The effectiveness of the primary guard is determined, in part, by the ratio of its lateral dimension to that of the metered section and to the specimen thickness (6,7,8,20,31).

4.3 Compliance with this test method requires: the establishment of steady-state conditions, and the measurement of the unidirectional heat flow Q in the metered section, the metered section area A , the temperature gradient across the specimen, in terms of the temperature T_h of the hot surface and the temperature T_c of the cold surface, (or equivalently, the temperature T between the two surfaces), the thickness L_1 and L_2 of each specimen, and guard balance between the metered section and primary guard.

5. Significance and Use

5.1 This test method covers the measurement of heat flux and associated test conditions for flat specimens. The guarded-hot-plate apparatus is generally used to measure steady-state heat flux through materials having a “low” thermal conductivity and commonly denoted as “thermal insulators.” Acceptable measurement accuracy requires a specimen geometry with a large ratio of area to thickness.

5.2 Two specimens are selected with their thickness, areas, and densities as identical as possible, and one specimen is placed on each side of the guarded-hot-plate. The faces of the specimens opposite the guarded-hot-plate and primary guard are placed in contact with the surfaces of the cold surface assemblies.

5.3 Steady-state heat transmission through thermal insulators is not easily measured, even at room temperature. This is due to the fact heat transmission through a specimen occurs by any or all of three separate modes of heat transfer (radiation, conduction, and convection). It is possible that any inhomogeneity or anisotropy in the specimen will require special experimental precautions to measure that flow of heat. In some cases it is possible that hours or even days will be required to achieve the thermal steady-state. No guarding system can be constructed to force the metered heat to pass only through the test area of insulation specimen being measured. It is possible that moisture content within the material will cause transient behavior. It is also possible that physical or chemical change in the material with time or environmental condition will permanently alter the specimen.

5.4 Application of this test method on different test insulations requires that the designer make choices in the design selection of materials of construction and measurement and control systems. Thus it is possible that there will be different designs for the guarded-hot-plate apparatus when used at ambient versus cryogenic or high temperatures. Test thickness, temperature range, temperature difference range, ambient conditions and other system parameters must also be selected

during the design phase. Annex A1 is referenced to the user, which addresses such issues as limitations of the apparatus, thickness measurement considerations and measurement uncertainties, all of which must be considered in the design and operation of the apparatus.

5.5 Apparatus constructed and operated in accordance with this test method should be capable of accurate measurements for its design range of application. Since this test method is applicable to a wide range of specimen characteristics, test conditions, and apparatus design, it is impractical to give an all-inclusive statement of precision and bias for the test method. Analysis of the specific apparatus used is required to specify a precision and bias for the reported results. For this reason, conformance with the test method requires that the user must estimate and report the uncertainty of the results under the reported test conditions.

5.6 Qualification of a new apparatus. When a new or modified design is developed, tests shall be conducted on at least two materials of known thermal stability and having verified or calibrated properties traceable to a national standards laboratory. Tests shall be conducted for at least two sets of temperature conditions that cover the operating range for the apparatus. If the differences between the test results and the national standards laboratory characterization are determined to be significant, then the source of the error shall, if possible, be identified. Only after successful comparison with the certified samples, can the apparatus claim conformance with this test method. It is recommended that checks be continued on a periodic basis to confirm continued conformance of the apparatus.

5.7 The thermal transmission properties of a specimen of material have the potential to be affected due to the following factors: (a) composition of the material (b) moisture or other environmental conditions (c) time or temperature exposure (d) thickness (e) temperature difference across the specimen (f) mean temperature. It must be recognized, therefore, that the selection of a representative value of thermal transmission properties for a material must be based upon a consideration of these factors and an adequate amount of test information.

5.8 Since both heat flux and its uncertainty may be dependent upon environmental and apparatus test conditions, as well as intrinsic characteristics of the specimen, the report for this test method shall include a thorough description of the specimen and of the test conditions.

5.9 The results of comparative test methods such as Test Method C518 depend on the quality of the heat flux reference standards. The apparatus in this test method is one of the absolute methods used for generation of the reference standards. The accuracy of any comparative method can be no better than that of the referenced procedure. While it is possible that the precision of a comparative method such as Test Method C518 will be comparable with that of this test method, Test Method C518 cannot be more accurate. In cases of dispute, this test method is the recommended procedure.

6. Apparatus

6.1 A general arrangement of the mechanical components of such a guarded-hot-plate apparatus is illustrated in Fig. 1. This consists of a hot surface assembly comprised of a metered section and a primary guard, two cold surface assemblies, and secondary guarding in the form of edge insulation, a temperature-controlled secondary guard(s), and often an environmental chamber. Some of the components illustrated in Fig. 1 are omitted in systems designed for ambient conditions, although a controlled laboratory environment is still required; edge insulation and the secondary guard are typically used only at temperatures that are more than $\pm 10^\circ\text{C}$ from ambient. At ambient conditions, the environmental chamber is recommended to help eliminate the effects of air movement within the laboratory and to help ensure that a dry environment is maintained.

6.1.1 The purpose of the hot surface assembly is to produce a steady-state, one-dimensional heat flux through the specimens. The purpose of the edge insulation, secondary guard, and environmental chamber is to restrict heat losses from the outer edge of the primary guard. The cold surface assemblies are isothermal heat sinks for removing the energy generated by the heating units; the cold surface assemblies are adjusted so they are at the same temperature.

6.2 *Design Criteria*—Establish specifications for the following specifications prior to the design. Various parameters influence the design of the apparatus and shall be considered throughout the design process, maximum specimen thickness; range of specimen thermal conductances; range of hot surface and cold surface temperatures; characteristics of the specimens (that is, rigidity, density, hardness); orientation of the apparatus (vertical or horizontal heat flow); and required accuracy.

6.3 *Hot Surface Assembly*—The hot surface assembly consists of a central metered section and a primary guard. The metered section consists of a metered section heater sandwiched between metered section surface plates. The primary guard is comprised of one or more guard heaters sandwiched between primary guard surface plates. The metered section and primary guard shall be thermally isolated from each other by means of a physical space or gap located between the sections. The hot surface assembly using a line-heat-source is covered in Practice C1043.

NOTE 1—The primary guard, in some cases, is further divided into two concentric sections (double guard) with a gap separator to improve the guard effectiveness.

6.3.1 *Requirements*—The hot surface assembly shall be designed and constructed to satisfy the following minimum requirements during operation.

6.3.1.1 The maximum departure from a plane for any surface plate shall not exceed 0.025 % of the linear dimension of the metered section during operation.

NOTE 2—Planeness of the surface can be checked with a metal straightedge held against the surface and viewed at grazing incidence with a light source behind the straightedge. Departures as small as $2.5\ \mu\text{m}$ are readily visible, and large departures can be measured using shim-stock, thickness gages or thin paper.

6.3.1.2 The average temperature difference between the metered section surface plate and the primary guard surface

plate shall not exceed 0.2 K. In addition, the temperature difference across any surface plate in the lateral direction shall be less than 2 % of the temperature difference imposed across the specimen.

NOTE 3—When qualifying the apparatus, additional temperature sensors shall be applied to the surface plates of the metered section and primary guards that verify that the requirements of 6.3.1.2 are satisfied.

6.3.1.3 The surfaces of the metered and primary guard surface plates that are in contact with the test specimen shall be treated to maintain a total hemispherical emittance greater than 0.8 over the entire range of operating conditions.

NOTE 4—At high temperatures the importance of high emittance of the surfaces adjacent to the specimens cannot be stressed too strongly since radiative heat transfer predominates in many materials as the temperature increases.

6.3.1.4 The metered section and primary guard surface plates shall remain planar during the operation of the apparatus. See 6.3.1.1.

6.3.2 *Materials*—The materials used in the construction of the hot surface assembly shall be carefully chosen after considering the following material property criteria.

6.3.2.1 *Temperature Stability*—Materials are selected for the heaters and surface plates that are dimensionally and chemically stable and suitably strong to withstand warpage and distortion when a clamping force is applied. For modest temperatures, electric resistance heaters embedded in silicone have been successfully employed; at higher temperatures, heating elements sandwiched between mica sheets or inserted into a ceramic core have been used. Surface plates for hot surface assemblies used at modest temperatures have been fabricated from copper and aluminum. High purity nickel alloys have been used for higher temperature applications.

6.3.2.2 *Thermal Conductivity*—To reduce the lateral temperature differences across the metered and primary guard surface plates, fabricate these plates from materials that possess a high thermal conductivity for the temperature and environmental conditions of operation. Copper and aluminum are excellent choices for modest temperature applications; at higher temperatures consider using nickel, high purity alumina or aluminum nitride. These are examples of materials used and the operator must fully understand the thermal conductivity versus temperature dependency of the materials selected.

6.3.2.3 *Emittance*—To obtain a uniform and durable high surface emittance in the desired range, select a surface plate material or suitable surface treatment, or both. For modest temperature applications, high emittance paints may be employed. Aluminum can be anodized to provide the necessary high emittance. For high temperature applications, most ceramics will inherently satisfy this requirement while nickel surface plates can be treated with an oxide coating.

6.3.2.4 *Temperature Uniformity*—Select a heating element design that will supply the necessary heat flux density for the range of specimen thermal conductances to be investigated. The design of the heating element shall also consider the heat flux distribution of the surface of the heating element. Most apparatus incorporate the use of a distributed electric resistance heating element dispersed uniformly across the metered section and the primary guard. The surface plates and heating elements

shall be clamped or bolted together in a uniform manner such that the temperature difference requirements specified in 6.3.1.2 are satisfied. Bolting the composite constructions together has been found satisfactory.

6.3.2.5 The insertion of insulating sheets between the heating elements and surface plates (that is, to mount a gap temperature imbalance detector) is allowed. To satisfy the requirements of 6.3.1.2, similar sheets shall be mounted between the heating element and the opposing surface plate.

6.3.2.6 *Hot Surface Assembly Size*—Design criteria established in 6.2 will determine the size of the apparatus. The size of the metered section shall be large enough so that the amount of specimen material in contact with the metered section (and therefore being measured) can be considered representative of the material being tested.

6.3.2.7 After determining the maximum specimen thickness that will be tested by this design, refer to Adjunct, Table of Theoretical Maximum Thickness of Specimens and Associated Errors, regarding associated errors attributable to combinations of metered section size, primary guard width, and specimen thickness.

NOTE 5—Typically the width of the primary guard equal to approximately one-half of the linear dimension of the metered section has been found to reduce edge heat loss to acceptable levels.

6.3.2.8 *Heat Capacitance*—The heat capacity of the hot surface assembly will impact the time required to achieve thermal equilibrium. Selecting materials with a low specific heat will increase the responsiveness of the apparatus. The thickness of the surface plates needs to be carefully considered; thick plates assist in reducing lateral temperature distributions but reduce responsiveness. A balance between these requirements is needed.

6.4 *The Gap*—The metered section and the primary guard shall be physically separated by a gap. The gap provides a lateral thermal resistance between these sections of the hot surface assembly. The area of the gap in the plane of the surface plates shall not be more than 5 % of the metered section area.

6.4.1 The heater windings from the metered section and primary guard heating elements shall be designed to create a uniform temperature along the gap perimeter.

6.4.2 The metered section area shall be determined by measurements to the center of the gap that surrounds this area, unless detailed calculations or tests are used to define this area more precisely.

6.4.3 Any connections between the metered section and the primary guard shall be designed to minimize heat flow across the gap. If a mechanical means is used to satisfy the requirements of 6.3.1.4, these connections shall be fabricated with materials having a high thermal resistance. Instrumentation or heater leads that cross the gap should be fabricated with fine-gage wire and traverse the gap at an oblique angle.

6.4.4 The gap may be filled with a fibrous insulation. Packing the gap with this insulation has been found to maintain the metered section and primary guard surface plates planar. An additional benefit of this practice for high temperature applications is that the densely packed insulation reduces the amount of heat conducted across the gap spacing.

6.5 Cold Surface Assembly—The cold surface assembly consists of a single temperature controlled section and is comprised of a cold surface heater sandwiched between cold surface plates and a heat sink. It is recommended that the size of the cold surface assembly be identical to the hot surface assembly, including the primary guard. It is acceptable to construct cold surface assemblies with a gap where operation of the apparatus is susceptible to edge loss effects. This design is the ideal design, however, this assembly has traditionally been constructed without a gap with great success.

NOTE 6—The temperature of the cold surface assembly may be maintained through the use of a temperature-controlled bath; in this instance, there is no need to install a cold surface heater. Care must be taken in this instance; the flow rate of the bath must be sufficient to satisfy the temperature uniformity requirements specified in 6.3.1.2 and 6.5.1.

6.5.1 Requirements—The cold surface assemblies shall be designed and constructed to satisfy all of the requirements of 6.3.1 except that, since only one surface plate of each cold surface assembly is in contact with the test specimens, the requirement that specifies the temperature difference between the surface plates shall not apply.

6.5.2 Materials—The criteria to select materials that will be used in the construction of the cold surface assemblies are identical to the hot surface assembly and are listed in 6.3.2.

6.5.3 High Temperature Operation—When the cold surface assemblies will be operated at high temperatures, it is acceptable to insert several thin sheets of insulation between the heat sink and cold surface heater. The addition of these insulation sheets will reduce the energy requirements to the cold surface heater and extend service life.

6.6 Additional Edge Loss Protection—Deviation from one-dimensional heat flow in the test specimen is due to non-adiabatic conditions at the edges of the hot surface assembly and the specimens. This deviation is greatly increased when the apparatus is used at temperatures other than ambient. When the guarded-hot-plate apparatus is operated at temperatures that deviate from ambient by more than 10°C, the apparatus shall be outfitted with additional components to reduce edge losses. These components are described in the following sections and shall be used if edge losses cannot be minimized.

NOTE 7—Another means of assessing whether edge insulation is required is to attach a temperature sensor to the mid-height of the exterior edge of the specimen. Sufficient edge insulation is present if the edge temperature, T_e , satisfies the following requirement.

$$(T_e - T_m)/\Delta T < 0.05 \quad (1)$$

6.6.1 Secondary Guard—To reduce heat exchange between the edges of the guarded-hot-plate and the environment, the guarded-hot-plate shall be outfitted with a co-axial temperature-controlled container referred to as the secondary guard. The secondary guard will be employed to adjust the ambient temperature to approximate the mean temperature of the test specimen.

6.6.1.1 Size—The secondary guard should have an inner dimension that is at least twice the dimension of the hot surface heater and the height should be equal to the thickness of the hot surface heater plus twice the thickness of the thickest specimen that will be tested.

6.6.1.2 Materials—The materials used in the construction of the secondary guard are not as critical as those selected for the hot and cold surface assemblies. However, the materials used in the design of the secondary guard shall be selected so that they are thermally stable over the intended temperature range, the heating element shall be capable of producing the necessary heat flux density to adjust the ambient temperature, and a means of cooling the secondary guard is required if the apparatus is intended for use at temperatures below the laboratory ambient. The use of high thermal conductivity metals is recommended for the construction since the secondary guard should be isothermal.

NOTE 8—Successful secondary guard designs consist of a sheathed heater wire or cable wrapped around an adequately-sized metal tube and pressed against the metal tube with another sheet of metal. For low-temperature operation, a cooling coil has been wrapped around the exterior surface of the secondary guard.

6.6.1.3 Location—The secondary guard shall be positioned around the hot surface assembly such that a uniform spacing is created between the components. The height of the secondary guard shall be adjusted such that the mid-height of the secondary guard is aligned with the center of the hot surface assembly thickness.

6.6.2 Edge Insulation—The interspace between the hot and cold surface assemblies, specimens and the secondary guard shall be filled with an insulating material. Due to the complex shapes of this interspace, a powder or fibrous insulation is recommended.

6.6.2.1 The selection of an edge insulation material will depend on the test conditions. Vermiculite is easy to use but should not be employed at temperatures above 540°C because it's thermal conductivity increases dramatically with temperature.

NOTE 9—Avoid the use of vermiculite when the guarded-hot-plate is used to evaluate specimens in different gaseous environments; vermiculite is extremely hygroscopic and the system is difficult to evacuate when it is used.

NOTE 10—Care shall be taken to ensure that there are no voids, pockets, or other extraneous sources of radiative heat transfer occurring at or near the guarded-hot-plate.

6.6.3 Enclosure—The guarded-hot-plate shall be placed inside an enclosure when the apparatus is used in to maintain a gaseous environment that is different than the laboratory ambient.

6.6.3.1 For low-temperature operation, a dry gas environment shall be used to prevent condensation from occurring on the cold surface assemblies and specimens.

6.6.3.2 For high temperature operation, it will often be desirable to protect the apparatus from severe degradation by using a non-oxidizing gas.

6.6.3.3 The enclosure can also be used for substituting different gaseous environments and control of the ambient pressure.

6.7 Clamping Force—A means shall be provided for imposing a reproducible constant clamping force on the guarded-hot-plate to promote good thermal contact between the hot and cold surface assemblies and the specimens and to maintain accurate spacing between the hot and cold surface assemblies. It is

unlikely that a force greater than 2.5 kPa will be required for the majority of insulating materials. In the case of compressible materials, a constant pressure arrangement is not needed and it is possible that spacers between the plates will be necessary to maintain constant thickness.

6.7.1 A steady force, that will thrust the cold surface assemblies toward each other can be imposed by using constant-force springs or an equivalent method.

6.7.2 For compressible specimens, spacers are required if the test thickness can not be measured by other means. The spacers shall be small in cross-section and located near the exterior perimeter of the primary guard. Avoid placing spacers on surfaces where underlying sensors are being used to measure plate conditions.

NOTE 11—Because of the changes of specimen thickness possible as a result of temperature exposure, or compression by the plates, it is recommended that, when possible, specimen thickness be measured in the apparatus at the existing test temperature and compression conditions. Gaging points, or measuring studs along the outer perimeter of the cold surface assemblies, will serve for these measurements. The effective combined specimen thickness is determined by the average difference in the distance between the gaging points when the specimen is in place in the apparatus and when it is not in place.

6.8 Temperature Measurements:

6.8.1 *Imbalance Detectors*—A suitable means shall be provided to detect the average temperature imbalance between surface plates of the metering section and the primary guard.

6.8.1.1 *Sensors*—The gap region shall be instrumented with temperature sensors to monitor and control the average temperature imbalance across the gap. Fine-gage thermocouples connected as thermopiles are often used for this purpose, although other temperature control sensors, such as thermistors, have been used. Highly alloyed thermocouples, rather than pure metals, should be used to maximize the thermal resistance across the gap. Because of nonuniform heat flux within the surface plates, temperature imbalance is not always constant along the gap perimeter. It has been found that with proper design the thermal conductance of the wires crossing the gap can be made relatively small and, therefore, a large number of thermocouples can be used to increase the gap imbalance sensitivity. It is not uncommon to use ten or more sensing elements.

6.8.1.2 *Sensitivity*—The detection system shall be sufficiently sensitive to ensure that variation in measured properties due to gap temperature imbalance shall be restricted to not more than 0.5 % of the metered section power, as determined experimentally or analytically.

NOTE 12—The sensitivity of many temperature sensors is reduced drastically at temperatures below the laboratory ambient. Particular care must be used in designing thermopile measurement systems to operate under these conditions.

6.8.1.3 *Location*—When using only a minimum number of sensing elements along the gap, the most representative positions to detect the average balance for a square plate are those at a distance from the corners equal to one-fourth of the side of the metering area. The corners and the axes should be avoided. For a round plate, the sensors should be spaced equally around the gap.

6.8.1.4 *Electrically isolated gap imbalance sensors* should be placed on both surface plates of the guarded heating unit to average the imbalance on both faces of the heating unit.

6.8.1.5 Thermal junctions or other sensitive elements should each be located in similar areas of the hot surface assembly. It is suggested that all junctions should be located at points directly adjacent to the centers of the areas between heater windings. Any leads crossing the gap should be thermally anchored to the primary guard to provide a heat sink from external thermal variations. In some instances it may be desirable to provide a heat sink for these leads outside the primary guard to minimize any radial heat flow.

6.8.2 *Temperature Sensors*—Methods possessing adequate accuracy, such as thermistors, thermocouples, diodes and precision resistance thermometers may be used for the measurement of temperatures in the apparatus. Thermocouples are the most widely used detector due to their wide range of applicability and accuracy. The goal is to measure the temperature gradient within the specimen, and the method chosen (sensors mounted on the specimen surface, in grooves, or between interior layers) should be that which yields the highest accuracy in the measurement of the temperature gradient. A discussion of these alternatives is provided in 6.8.2.3 and 6.8.2.4.

6.8.2.1 *Use of Thermocouples*—Precautions should be used to minimize spurious voltages in temperature control and measuring circuits. Spurious voltages, due to wire inhomogeneities, generally increase as the temperature gradients within the measuring leads increase. For the same reason, junctions between dissimilar metal leads should not be made in the regions of appreciable temperature gradients. Low thermal emf switches should be used in the temperature measurement circuits. An insulated, isothermal box of heavy sheet metal can be used when joining leads of dissimilar metals in the thermocouple circuit. It is recommended that all connections of thermocouple wire to copper wire be accomplished within the isothermal box in order that the junctions are at the same temperature; then the copper, not the thermocouple, leads are connected to the needed switching devices and/or voltmeters.

6.8.2.2 *Accuracy*—Thermocouples whose outputs are used to calculate thermal transmission properties shall be fabricated from either calibrated thermocouple wire or wire that has been certified by the supplier, and shall have a standard limit of error equal to or less than the specifications of Tables E230. The resulting error in temperature differences due to distortion of the heat flow around the sensor, to sensor drift, and other sensor characteristics shall be less than 1 %.

6.8.2.3 *Methods of Attachment*—The surface temperatures of the specimens are most often measured by means of permanently mounted thermocouples placed in grooves cut into the surface plates. Precautions shall be taken to ensure that the thermocouple is thermally anchored to the surface being measured. This method of instrumentation is employed when the contact resistance between the specimen and the surface plates is a small fraction of the specimen thermal resistance. The hot- and cold-surface assembly plate sensors on each side are sometimes connected differentially. Thermocouples mounted in this manner shall be made of wire not larger than

0.6 mm in diameter for large apparatus and preferably not larger than 0.2 mm for small apparatus.

NOTE 13—This method of deploying thermocouples is traditionally used for compressible specimens and for rigid specimens possessing flat surfaces that have a thermal resistance of greater than $0.2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ at ambient conditions.

NOTE 14—For rigid specimens not satisfying the requirements of 6.8.2.2, two techniques for attaching temperature sensors are recommended. Small grooves may be cut into the surfaces of the specimens and thermocouples can be affixed into these grooves. As an alternative, thermocouples may be installed onto the surfaces of the specimen and thin sheets of a compressible homogeneous material interposed between the specimen and surface plates. In this latter case, an applied force should be used as indicated in 6.7 to ensure sufficient surface contact. For either of these applications, thermocouples shall be made of wire not larger than 0.2 mm in diameter.

6.8.2.4 *Electrical Isolation*—Temperature sensors can be either completely insulated electrically from the surface plates or grounded to the surface plate at one location. Consequently, thermocouples connected differentially can only have a single junction ground. Computations or experimental verifications, or both, shall be performed to confirm that other circuits do not affect the accuracy of the temperature measurements.

6.8.2.5 *Number of Sensors*—The number of temperature sensors on each side of the specimen in the metering area shall not be less than $10 \times \sqrt{A}$, or 2, whichever is greater.

NOTE 15—It is recommended that one temperature sensor be placed in the center of the metered section and that additional sensor be uniformly distributed radially.

6.9 *Thickness Measurements*—A means shall be provided for measuring the thickness of the specimen, preferably in the apparatus, to within 0.5 %.

6.10 *Metered Section Power Measurement*—Dc power is highly recommended for the metered section. Ac power may be used but the user should note that ac power determinations are more prone to error than dc measurements. The power to the metered section is determined with a wattmeter or from voltage and current measurements across the heater in the metered section. The voltage taps for this measurement should be placed to measure the voltage from the mid-point of the gap. The current can be determined from the voltage drop across a precision resistor placed in series with the metered section heater.

6.11 *Electrical Measurement System*—A measuring system having a sensitivity and accuracy of at least $\pm 0.1 \text{ K}$ shall be used for measurement of the output of all temperature and temperature difference detectors. The system shall have sufficient sensitivity to measure the gap imbalance to a level equal to 1 % of the imbalance detector output that satisfies the requirement of 6.8.1.2. Measurement of the power to the metered section shall be made to within 0.2 % over the entire operating range.

6.12 *Performance Checks*—When a new apparatus is commissioned or an apparatus has undergone significant refurbishment, a series of careful checks shall be performed before initiating routine testing.

6.12.1 *Planeness*—The planeness of each surface plate shall be measured. See 6.3.1.1.

6.12.2 *Temperature Measurements*—With specimens installed in the apparatus, the coolant supply to the cold surface assembly shut off, and no electrical power being supplied to any of the heaters, mount the apparatus inside the enclosure. Allow the system sufficient time to come to thermal equilibrium. With no energy being supplied to the apparatus, note the output of all of the temperature sensors. The temperature sensors shall have an output that agrees to within the uncertainty prescribed in 6.8.2.2. The output of the imbalance detection circuit shall be within the noise level of the electrical measurement system.

6.12.3 *Imbalance Detection*—Determine the maximum imbalance that can be allowed that satisfies the requirements in 6.8.2.2. With the apparatus energized and operating normally, note the thermal resistance of a specimen and the imbalance detector output at equilibrium. Repeat the test at various levels of imbalance. Linearly fit the thermal resistance data as a function of bias. The slope of this relationship will define the maximum imbalance detector output that can be allowed during routine operation.

NOTE 16—The number of bias levels that need to be analyzed will depend on the quality of the curve fit; the scatter within the data set, as defined by twice the standard deviation, shall be less than the noise level of the electrical measurement system as defined in 6.11.

6.12.4 *Edge Heat Losses*—Edge heat losses give rise to the greatest measurement errors when the specimens approach the maximum specified thickness and thermal resistance. This series of experiments will determine which edge loss strategies must be employed to maintain edge losses to levels prescribed by this method.

6.12.4.1 Install specimens in the apparatus that approach the apparatus limits described above and instrument these specimens with the edge temperature sensors described in 6.6. Do not install any components described in 6.6 to reduce edge heat loss. While performing a test, verify that the difference between the specimen mean temperature and edge temperature satisfy the requirements of 6.6. Add additional edge loss apparatus components (edge insulation, secondary guard, enclosure) until the requirements of 6.6 are satisfied. These experiments will define the required levels of edge loss that shall be incorporated into the routine testing. In extreme cases, it is possible that the secondary guard will have to be biased to satisfy these requirements; include these biases as part of the routine test procedure.

6.12.5 *Emissance of Surface Plates*—The emissance of the surfaces can be experimentally verified by testing an air gap, where the thickness of the air gap is limited to prevent the onset of convection. The heat flow rate per unit temperature difference is the sum of the thermal conductance of air and $4\sigma T_m^3 / (2/\epsilon - 1)$. A best fit of the plot of the heat flow rate per unit temperature difference and the inverse of the air space thickness supplies both the thermal conductivity of the air and $4\sigma T_m^3 / (2/\epsilon - 1)$. From this plot, the plate emissance can be verified (42).

6.12.6 *Overall Design Verification*—When all of the other checks have been successfully completed, tests shall be performed on specimens that are traceable to a national standards organization. These tests shall cover the range of temperatures for which the apparatus has been designed. It is possible that

verification of the apparatus will be limited by the temperature range of available standards. See 5.7.

7. Specimen Preparation and Conditioning

7.1 *Specimen Selection*—Only those specimen selection factors important to the performance of the apparatus are considered here. Factors related to the specimens' thermal properties are typically described in material specifications. When two specimens are required, the specimens should be selected to be as similar in thickness and thermal characteristics as possible. The use of Test Method C518 can be used to check the similarity of the specimens' thermal characteristics.

7.1.1 *Thickness*—The maximum specimen thickness that can be measured to a given accuracy depends on several parameters, including the size of the apparatus, thermal resistance of the specimen, and the accuracy desired. To maintain edge heat losses below approximately 0.5 %, for a guard width that is about one-half the linear dimension of the metered section, the recommended maximum thickness of the specimen is one-third the maximum linear dimension of the metered section. For more specific quantitative information on this limitation see Refs (1,5,7,8) and adjunct material given in this test method.

7.1.2 *Size*—The specimen shall be sized to cover the entire metered section and guard area when possible. It is desirable to cover the gap between the guarded-hot-plate and the primary guard when sample size is limited. The guard portion of the volume between the heating and cooling plates should be filled with material having similar thermal conductance characteristics as the specimen. When the specimen has a high lateral conductance such as a dense solid, a gap between the metered section and the primary guard shall be provided within the specimen. Refer to 7.2.3 for special precautions.

7.1.3 *Homogeneity*—Specimens exhibiting appreciable inhomogeneities in the heat flux direction shall not be tested with this method. There are two potential problems in attempting to determine the heat flux through highly inhomogeneous specimens. One is related to the interpretation and application of the resulting data, see Practice C1045. The other is the degradation in the performance of the apparatus. If the specimen is highly inhomogeneous, that is, the heat flux varies appreciably over the metered section, several errors can be significantly increased. The plate temperature distribution can deviate appreciably from isothermal conditions which, in turn, can cause large uncertainties in the average temperature difference across the specimen. The increased plate temperature variations can also lead to increased gap and edge heat losses. The importance of measuring the plate or specimen surface temperatures at numerous points is greatly increased under such conditions.

7.2 *Specimen Preparation*—Prepare and condition the specimens in accordance with the appropriate material specification. Use the following guidelines when the material specification is unavailable. In general, the surfaces of the specimen should be prepared to ensure that they are parallel with and have uniform thermal contact with the heating and cooling plates.

7.2.1 *Compressible Specimens*—It is possible that the surfaces of the uncompressed specimens will be comparatively

uneven so long as surface undulations are removed under test compression. It will potentially be necessary to smooth the specimen surfaces to achieve better plate-to-specimen contact. If the apparent thermal conductivity of the contact void is greater than that of the specimen, compressible or otherwise, the measured heat flux will be greater than the heat flux that would be obtained if the voids were absent. This is most likely the case at higher temperatures where radiant heat transfer predominates in the void. For the measurement of compressible specimens, the temperature sensors are often mounted directly in the plate surfaces. Also, it is possible that plate spacers will be required for the measurement of compressible specimens.

7.2.2 *Rigid and High Conductance Specimens*—The measurement of rigid specimens or high conductance specimens requires careful surface preparation. First, the surfaces should be made flat and parallel to the same degree as the guarded-hot-plate. If the specimen has a thermal resistance that is sufficiently high compared to the specimen-to-plate interface resistance, temperature sensors mounted in the plates may be adequate. However, for materials such as plastics or ceramics, when the thermal conductivity of the material exceeds 0.1 W/m-K, the following techniques shall be used to ensure accurate surface temperature measurement.

7.2.2.1 In some cases it is necessary to mount the temperature sensors directly on the specimen surfaces or in grooves in the specimens. Under vacuum conditions, the slightest space between plate and specimen is essentially an infinite thermal resistance (except for radiative heat transfer). Under these conditions extreme heat flux nonuniformities will occur. In any event the user should always try to minimize the ratio of contact resistance to specimen resistance and to strive for a constant ratio over the entire surface.

7.2.2.2 Another potential solution (that must be used with caution) is to mount a compressible thin sheet (for example, a soft rubber or thin fibrous pad) between the plates and specimen to improve the uniformity of the thermal contact. When this procedure is used, temperature sensors shall be instrumented in or on the surface of the specimens to ensure accurate temperature measurement of the specimen surface. An applied force should be used as in 6.7 to ensure sufficient surface contact.

7.2.3 *Anisotropic Specimens*—Specimens that have a high lateral to axial conductance ratio require that a low conductance gap be created in the specimen directly in line with the gap between the metered section and the primary guard.

7.2.4 *Loose-Fill Specimens*—The measurement of loose-fill specimens requires special handling, conditioning, and measurement techniques. The user is directed to Practice C687 for details.

7.3 *Specimen Conditioning*—Condition the specimens either as stated in the material specification or where no guideline is given, at $22 \pm 5^\circ\text{C}$ and $50 \pm 10\%$ relative humidity for a period of time until less than a 1 % mass change in 24 h is observed.

NOTE 17—Specimens can be conditioned at different conditions in order to determine the effect on the thermal properties of the specimens. Conditioning environments shall be reported with the test results.

8. Procedure

8.1 For a double sided test, select a pair of test specimens as outlined in Section 7.

8.2 Measure and record the specimen mass and dimensions. Also see 8.12.

8.3 Install the specimen into the apparatus at the desired test thickness.

8.4 Install the appropriate secondary guarding and an environmental chamber (as required).

8.5 If the test is to be conducted with gases other than air in the specimen-plate assembly, purge the environmental chamber and backfill with the desired gas. Care should be taken to limit the pressure of the fill-gas to below its condensation point at the lowest temperature expected within the chamber. Since the measured heat flux is dependent on both the type of fill gas and pressure, record both of these parameters.

8.6 Adjust the heating and cooling systems to establish the desired test conditions. For guidance in establishing test temperatures, refer to Practice C1058. The ambient temperature should be the same as or slightly above the mean temperature of the test. It is possible that this will require the use of a temperature controlled surrounding. This can be accomplished utilizing a controlled perimeter heater and insulation materials to aid in the control of the surrounding temperature.

8.7 Record the start time and date of the test. Begin data acquisition. The recorded data shall include: the date and time of data acquisition; power to the guarded-hot-plate; hot side guarded-hot-plate surface temperature; hot side guard temperatures; cold surface assembly temperatures; controlled environment ambient temperature and relative humidity; temperature difference or thermopile output across the gap between the guard and metered section; and calculated heat flux and estimated thermal property of interest.

NOTE 18—Thermal steady-state is the time required for the test apparatus to stabilize. This varies considerably with the apparatus design, specimen to be measured, and test conditions. Generally, however, the stabilization time is on the order of hours. Stabilization times generally increase with thick specimens, specimens with low thermal diffusivity and is dependent on the mass of the metered section area. Measurements in a vacuum and on microporous materials create small monotonic changes over a long period of time and may take longer to stabilize.

8.8 Thermal steady state must be achieved for this test method to be valid. To determine if steady state is achieved, the operator must document steady state by time averaging the data, computing the variation and performing the following tests on the data taken in Section 8.

8.8.1 Thermal steady state for the purpose of this test method is defined analytically as:

8.8.1.1 The temperatures of the hot and cold surfaces are stable within the capability of the equipment at the test conditions. Ideally an error analysis will determine the magnitude of the allowable differences, however the difference is usually less than 0.1 % of the temperature difference.

8.8.1.2 The power to the metering area is stable within the capability of the equipment. Ideally an error analysis will

determine the magnitude of the allowable differences, however the difference is usually less than 0.2 % of the average result expected.

8.8.1.3 The required conditions above exist during at least four intervals 30 min in duration or four system time constants, whichever is longer.

NOTE 19—The thermal time constant of the system is the time required to come to within $1/e$ (37 %) of the fixed value after a step thermal disturbance of the system. The thermal time constant in the constant power mode is the time required to come to within 37 % of the final temperature. The thermal time constant in the constant temperature mode is the time required to come to within 37 % of the final power. The thermal time constant of a system can be approximated from the thermal diffusivities of the system components, but is generally determined experimentally.

8.9 After achievement of the desired steady-state as defined in 8.8.1, three successive repeat data acquisition runs shall be completed. These runs shall be conducted at intervals of at least 30 min and should not be less than the thermal time constant of the system (see Note 19). This combination of three runs shall be considered a valid test if each datum obtained for each measured variable meets the following criteria.

8.9.1 The data do not differ from the mean by no more than the uncertainty of that variable, see A1.5.

8.9.2 The data obtained does not change monotonically with time. This is determined by comparing the average result of the final three test periods to the averages of the previous four periods. Graphing of the test parameters versus time or monitoring the slope of the data are techniques for determining monotonic conditions.

8.9.3 If the data continues to drift, the test shall be considered incomplete and further data acquisition sets shall be conducted until thermal steady state is achieved. Drift, even at low levels, has the potential to indicate that either the specimen characteristics are changing or the system is not at steady-state. For further details see Refs (3,12,13).

8.10 Prior to terminating the test, measure and record the pressure of the chamber.

8.11 Upon completion of the thermal test outlined above, remove the specimen and examine the system components, such as temperature sensor mounting, for proper placement and operation.

8.12 Determine the specimen thickness and weight after the test to ensure that they have not changed from the initial condition. Record any changes in the physical characteristics of the specimen.

9. Calculation

9.1 The primary data required for this test method include electrical power, surface temperatures, area, and thickness. Of these, only thickness is generally a directly measured quantity. The others are either calculated from other more fundamental measurements or are converted by an electrical device. The manner in which these variables can be obtained is discussed in 8.9 and below.

9.2 *Heat Flow*—The heat flow to be reported is that which passes through each specimen. This is equal to the power generated by the metered section heater. For the double-sided mode of operation, only one-half the power generated by the

heater flows through each specimen. Determine the power, Q , from emf, E , and current, I , and calculate as follows:

$$Q = E \times I \quad (2)$$

9.3 *Metered Section Area*—Determine the metered section area, A , from the area, A_m , of the guarded-hot-plate and the gap area, A_g . If there is no discontinuity in specimen characteristics in the gap region, the metered area is calculated as follows:

$$A = A_m + \frac{A_g}{2} \quad (3)$$

For high precision measurements, it is possible that this assumption that the gap contributes half of its area to the effective metered section area, A , will need to be verified for the particular apparatus used. If there is a discontinuity between the specimen in the metered section and the guard region, this equation is modified slightly, as in ISO 8302, to include the effect of heat flux distortion in the gap region:

$$A = A_m + \frac{A_g \lambda_g}{2\lambda} \quad (4)$$

Where significant expansion, or contraction, of the guarded-hot-plate is known during a test, appropriate corrections to the area shall be made.

9.4 *Heat Flux*—The heat flux is obtained from the ratio of the heat flow, Q , and the total metered section area, A , and is calculated as follows:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

9.5 *Temperature*—Electrical readings from the temperature sensors are normally converted to temperature using a mathematical equation based on either the sensor's calibration curve or an appropriate reference such as a thermocouple voltage table.

9.6 *Density*—The metered section area specimen density, ρ_m , or the sample density, ρ_s where metered section area density cannot be obtained, are to be reported as the average of the two pieces. The equation for density, is the following:

$$\rho_m = \frac{m}{A \times L} \quad (6)$$

or:

$$\rho_s = \frac{m_s}{A_s \times L}$$

9.7 *Thermal Transmission Properties*—These properties shall be reported only in accordance with the requirements and restrictions of Practice C1045.

10. Report

10.1 To be in conformance with this test method, report the following:

10.1.1 The report shall be identified with a unique numbering system to allow traceability to the individual measurements taken during each test performed,

10.1.2 The average values as obtained from the test. Standard deviation about that average. The results may be reported in a form similar to that shown in Fig. 3,

10.1.2.1 Identification of the test organization, responsible

person in charge, test operator (optional) and the test sponsor,

10.1.2.2 The generic name, or other identification required to provide a complete and detailed description of the tested material. For hygroscopic materials, such as concrete and wood, the moisture content should also be given,

NOTE 20—A generic description in addition to the brand name should be reported where possible.

10.1.2.3 Information regarding the specimen preconditioning,

10.1.2.4 Variables that effect thermal transmission properties, such as fill-gas and pressure, shall be specified when applicable,

10.1.2.5 The dimensions of the metered section and guard(s) and their relationship to the overall specimen dimensions (m). The plate emittance,

10.1.2.6 Specimen orientation and the direction of heat transfer during the test,

10.1.2.7 The total area of the specimen (m²),

10.1.2.8 The specimen density of the metered section area or sample density where metered section area density cannot be obtained (kg/m³),

10.1.2.9 The thickness of the specimen(s) within the metered section (m),

10.1.2.10 The area averaged temperatures of both hot and cold specimen surfaces (K),

10.1.2.11 Net steady-state average heat flux through the specimen (W/m²),

10.1.2.12 Any thermal transmission properties calculated and reported and their estimated error, and

10.1.2.13 The test date and time, the time required for steady temperature conditions, the time to reach steady-state, the data acquisition time period, frequency of data collection and the end date and time.

10.2 The following is optional information for inclusion in the report:

10.2.1 Values for guard loss, back side energy loss and other losses included in the net energy calculation (W/m²), and

10.2.2 A full description (or references) of test procedures and data analysis techniques used.

10.3 When certification of the test results is required, include the date of the latest apparatus verification and a description of the procedures used. References for the verification report(s) shall also be included. Where applicable, include a statement of laboratory accreditation of the test facility used, including date of latest inspection.

10.3.1 Where agreed upon between the customer and the test laboratory, it is acceptable that less be reported but the remainder of the results shall be made available.

NOTE 21—**Caution:** Where this test method might be specifically referenced in published test reports and published data claims, and where deviations from the specifics of the test method existed in the tests used to obtain said data, the following statement shall be required to accompany such published information: **“This test did not fully comply with following the provisions of Test Method C177.”** This statement shall be followed by a listing of specific deviations from this test method and any special test conditions that were applied.

Test Report

Date:	Test Report Number:
Operator:	Duration of Test:

Specimen Identification:	Product, name, manufacturers description.
Specimen Characteristics:	Unique characteristics such as degree of homogeneity or anisotropy, density (optional).
Specimen Conditioning:	Temperature, time, humidity.
Specimen Dimensions and Mass:	Before and after conditioning and after measurement.

Apparatus Description:	Size, shape and orientation of plates. Single or double-sided operation, description of secondary guarding, unique procedures.
------------------------	--

Experimental Results

Variable	Measured Value	Uncertainty	
		Systematic	Random
Q, W			
Th, K			
Tc, K			
Tm, K			
$\Delta T, K$			
A, m ²			
L, m			
Fill gas pressure, Pa			
Other			

Derived thermal transmission properties including the applicable range of conditions shall be in conformance with Practice C 1045.

FIG. 3 Example Test Report Form

11. Precision and Bias

11.1 This section on precision and bias for the guarded hot plate apparatus includes a discussion of; general statistical terms; statistical control; factors affecting test results; ruggedness tests; interlaboratory comparisons conducted by ASTM Committee C-16; proficiency testing conducted under the auspices of the National Voluntary Laboratory Accreditation Program (NVLAP); and error propagation formulae.

11.2 *General Statistical Terms*—The accuracy of a test result refers to the closeness of agreement between the observed value and an accepted reference value. When applied to a set of observed values, the accuracy includes a random component (imprecision) and a systematic component (bias). The variability associated with the set of observed values is an

indication of the uncertainty of the test result. Additional information on statistical terminology is available in Terminology E456.

11.3 *Statistical Control*—The user of the guarded-hot-plate apparatus shall demonstrate that the apparatus is capable of performing in a consistent manner over time (35). The use of control charts (see Manual 7 (34)) to monitor the operation of the guarded hot plate is one recommended way to monitor the control stability of the apparatus. When possible, it is recommended that a reference material traceable to a national standard laboratory be used as the control specimen. Ideally, the long-term variation should be no greater than the short-term variability.

11.4 *Factors Affecting Test Results*—Experiments and theoretical analyses have identified two principal (systematic) errors that affect the operation of an idealized guarded hot plate apparatus. These errors are edge heat flows at the periphery of the specimens; and, heat flow across the gap due to a thermal imbalance. Other errors studied include the effect of gap width on the heat flow; and, the proper determination of the metered section area. These errors and others are discussed in detail in A1.3.

11.4.1 *Edge Loss Errors*—These have been found to depend on the size (and type) of the guard, the specimen thermal conductivity and thickness, and ambient temperature (7,18,20,21,31,33). By using a sufficiently wide guard (see Section 6), appropriate levels of edge insulation, and proper selection of the ambient temperature (see Section 8), the edge loss error can be reduced to a negligible value relative to the specimen heat flow (see Annex A4.2). There is only limited experience (at room temperature) with measurement of apparent conductivity at large thickness' (above 30 cm), but experience suggests that errors are some times expected to be above 2 %, especially if the user does not reduce the problems associated with long time constants and large lateral heat flows (31).

11.4.2 *Gap Imbalance Error*—These have been found to depend on several parameters including the temperature difference, the gap geometry, the structural support system, the wires crossing the gap (number, size, and type), the gap fill material (gas or insulation), the emittance of the gap surfaces, and the specimen material in the vicinity of the gap (5,6,8,18,22,36). The resulting heat flow due to a temperature imbalance can be obtained either by calculation based on the above parameters or empirical data. An empirical relationship for the gap heat flow can be determined by purposely introducing a temperature imbalance across the gap and measuring the resulting change in the specimen heat flow (see A1.4.3).

11.5 *Ruggedness Tests*—The results of one ruggedness study for a 200 mm² guarded hot plate and two materials having different thermal conductivity's have been reported (37). Matched pairs, 85 mm thick, of polyurethane foam and silicone rubber were measured at a mean temperature of 297 K and a temperature difference of 23 K. For each specimen, the width of edge insulation was set at one of five levels (0, 12.7, 25.4, 50.8, and 76.2 mm) while the ambient temperature was varied at one of three levels. The results indicate that the edge losses are reduced with edge insulation but only become zero when the ambient temperature is at one specific value. The optimum ambient temperature appears to be a function of specimen thickness and thermal conductivity, and edge insulation thickness.

NOTE 22—As noted in Section 8, the value of the ambient temperature is set to either the same value as the mean temperature of the test or a value slightly above the mean temperature. The user should determine the optimum value for their apparatus and test conditions by using the sensitivity analysis described in A4.2. This dependence may change appreciably for different specimens or apparatus conditions and, therefore, should be done under typical test conditions.

11.6 *Interlaboratory Tests*—The results of three published interlaboratory tests for guarded-hot-plate apparatus are discussed below. The results, where appropriate, state an index of

precision (between laboratory) of two-standard deviation limits (2s). Certain aspects of the interlaboratory tests were not conducted completely in accordance with the requirements of Practice E691, for example, the number of test laboratories was less than six in one study and none of the studies required replicates. Furthermore, a study involving a variety of materials is needed. Consequently, a general statement for the index of precision and bias that covers all conditions and materials is unavailable. In the interim, the user is directed to the interlaboratory tests if information on precision and bias is needed (see Practice C687 for loose-fill materials).

11.6.1 In 1951, results of an interlaboratory comparison were reported (38) for 20 guarded-hot-plate apparatus from 17 laboratories. The plates ranged in size from 200 to 600 mm square. Different (numbered) pairs of corkboard (25 mm thick) were measured by each laboratory at a mean temperature from 266 to 322 K. The data from 15 of the 20 apparatus (75 %) were within ± 3 % of the mean value as determined by the National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology). The maximum deviations were + 13 and – 16 %

11.6.2 In 1985, results of a third round of interlaboratory comparisons were reported (41) for five large guarded-hot-plate apparatus ranging from 610 to 1219 mm² and 1016 mm diameter (the last apparatus mentioned being a circular line-heat-source guarded-hot-plate). The same specimens of fibrous-glass blanket (16 kg/m³) were circulated to each laboratory. Matched pairs were tested at 297 K and thicknesses of 25.4, 50.8, 76.2, and 101.6 mm. Imprecision of the data versus a semi-empirical model for a density range of 11 to 20 kg/m³ were 1.9, 2.3, 2.6, 2.9 % (2s level) at thicknesses of 25.4, 50.8, 76.2, 101.6 mm, respectively.

11.6.3 In 1988, results of an interlaboratory comparison were reported (30) for seven high-temperature guarded-hot-plate apparatus. The plates ranged in size from 203 to 406 mm in diameter and 300 to 610 mm². Different matched pairs of fibrous alumina-silica and calcium silicate were measured by each laboratory over a mean temperature range from 330 to 701 K. Reference equations based on NIST-Boulder corrections were fit to the data. Imprecision in the deviations from the model were 15 and 16 % (2s level) for fibrous alumina-silica and calcium silicate, respectively. It was established that a significant percentage of the standard deviation in this comparison was due to material variability and not apparatus error.

11.7 *Proficiency Tests*—In 1985, the results of a series of proficiency tests conducted for NVLAP over a four-year period were reported (39) for guarded-hot-plate apparatus (plate size not reported). Different specimens of four thermal insulation materials were distributed to each laboratory for testing. The materials were expanded polystyrene; foam board; low-density glass-fiber batt (8 to 16 kg/m³); and, high-density glass-fiber batt, foil-faced (64 kg/m³). Each laboratory reported a single test result, that is, no replicates were conducted. Results of the proficiency tests are summarized in Table 1. The index of precision (between laboratory) is expressed as a percentage for the one-standard deviation limit(s) divided by the mean of the test result, or one-coefficient of variation (CV %).

TABLE 1 NVLAP Proficiency Tests for Guarded-Hot-Plate Apparatus Ref (39)

Material	Nominal Thickness, mm	Thermal Conductivity Group Mean, W/(m K)	Number of Labs	Coefficient of Variation, %	Round
Expanded polystyrene board	25	0.037	6	1.80	10
Foam Board, rigid	25	0.040	9	2.52	4
Glass-fiber batt	25	0.040	10	2.15	5
Glass-fiber batt	25	0.040 ^A	6 ^A	2.26 ^A	7 ^A
Glass-fiber batt	25	0.039 ^A	7 ^A	2.82 ^A	3B ^A
Glass-fiber batt	25	0.040	9	3.28	3A
Glass-fiber batt	25	0.040	7	3.43	7
Glass-fiber batt	25	0.040	9	4.66	3B
Glass-fiber batt, foil faced	25	0.032	9	0.98	6
Glass-fiber batt, foil-faced (stacked)	50	0.033	7	1.45	9
Glass-fiber batt, foil faced	25	0.032	8	1.95	8

^A Recalculation with one or more laboratories excluded from the group statistics because their test results deviated from the pre-characterized value by more than 6 %.

11.8 *Error Propagation*—Several formulae are available (40) for determining the apparatus uncertainty by error propagation. For guidelines on using a standard procedure, the user is referred to ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (32). Strictly speaking, determining a statement of uncertainty for a test result requires treating random and systematic errors separately. A description of random and systematic errors and possible sources of error are discussed below.

11.8.1 *Random Error, δ_r* —In a measurement, random errors (imprecision) are considered to be the sum total of all the small (negligible) independent errors that are uncontrolled, for ex-

ample small fluctuations in environmental conditions or plate temperatures. Random errors are assumed normally distributed, uncorrelated, and preferably small. In general, random errors are a function of the capabilities of the control system and, to a lesser extent, the measurement system.

11.8.2 *Systematic Error, δ_s* —A systematic error (bias) is a fixed deviation that is inherent in each and every measurement. If the magnitude and direction of the systematic error are known, the user can make appropriate correction(s) to the measured value. Under such circumstances a justification for the correction should be provided. In general, the magnitude of the error, $|\delta_s|$, is estimated by experience or judgment.

11.8.3 *Statement of Uncertainty*—The statement of uncertainty requires an expression having credible limits for its inaccuracy. Different traditions and usage have resulted in different expressions of uncertainty that can be summarized as follows: both imprecision and bias negligible; imprecision negligible, bias not negligible; neither imprecision nor bias negligible; and, imprecision not negligible, bias negligible.

11.8.4 *Sources of Errors*—The uncertainty of the apparatus as determined by propagation of errors should consider the error in each of the separate measurements used to determine the test result. For a guarded-hot-plate apparatus, these errors in measurements are the uncertainty in: heat flow δQ ; temperature difference, $\delta \Delta T$; metered section area, δA ; and specimen thickness, δL . These errors and an example are discussed in A1.3.

12. Keywords

12.1 error analysis; guarded-hot-plate; heat flow; heat flux; steady-state; thermal conductivity; thermal resistance; thermal transmission; thermal conductance; thermal testing

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. THICKNESS MEASUREMENT, LIMITATIONS AND MEASUREMENT UNCERTAINTY

A1.1 *Importance of the Thickness of the Insulation Specimens in Guarded-Hot-Plate Measurements*—The thickness of the specimen as installed in the apparatus determines both the density of the material and the temperature gradient applied to it during the measurement of the thermal property. If the thickness of a specimen is changed from its room-temperature value by thermal effects (thermally reversible expansion or contraction, or thermally induced irreversible shrinkage or expansion of the specimen), or by compression, then use of the room-temperature thickness outside the apparatus will lead to error in the determination of the apparent conductivity (or resistivity) of the specimen. A given relative (percentage) error in the thickness leads to an equal relative error in the determination of the conductivity. For measurements of thermal properties at mean specimen temperatures near room

temperature it is possible that the error in neglecting any changes in thickness will be negligible, but this can be ascertained only by observation in the specific case at hand.

A1.2 *Suggested Ways to Measure Thickness of Incompressible Specimens*—In determining the thickness of a specimen, one assumes that it is properly shaped, so that the measured thickness is valid. However, two different situations may sometimes occur to affect the thickness measurement. It is possible that the shape of the specimen will be distorted by warping or bowing at the time it is first installed in the apparatus. In this case, either the (flexible) specimen should be compressed enough to remove the distortion when installed, (or, preferably, a specimen of better quality should be selected). Independent of this, it is possible that the specimen will

undergo a change of shape as it is subjected either to high mean temperatures or to large temperature gradients, due to chemical changes occurring in the specimen at high temperatures. In this case it is difficult to define what the thickness of the specimen actually is during the measurement. The thickness of the specimen needs to be measured both before and after the thermal transmission property is measured, to show whether such dimensional changes are occurring. Any warping or bowing of the specimen, before or during measurement of thermal properties, adds to the uncertainty in the value of thickness. Some materials such as polymers have large coefficients of expansion and the material tends to bow unless a small thickness and temperature difference across the specimen is used.

A1.2.1 The recommended procedure for measuring specimen thickness is to measure the thickness while installed in the apparatus. This is necessary if the correct temperature gradient actually applied to the specimen during the measurement of the thermal property is to be obtained. Install rigid rods securely extending laterally from the outer edges of the metered area/primary guard assembly, at two or three equally spaced locations along the circumference of the plate. The portion of the rod extending from the plate shall be smooth and parallel to the plane of the plate surface. Alternatively, the plates may be machined with flat, horizontal plates extending from the circumference. Similar rods (or plates) are likewise located on each auxiliary heater plate, at the same circumferential positions, vertically (within 5° of arc) above or below the rods on the metered area/primary guard assembly.

A1.2.1.1 With no specimens installed, with the heater plates contacting each other in their usual order, and taking care not to change the plate separation, measure the separation between each vertical pair of rods on two adjacent plates with a vernier calliper. Compute the arithmetic mean of the plate separation for each pair of adjacent plates. Then, with specimens installed between the plates in the apparatus, and with the usual mechanical loading applied, measure the separation between the pairs of rods on adjacent plates, taking care not to change the plate separation. Compute the arithmetic mean. Subtract the mean separation obtained with no specimen from the mean separation with the specimen present, for corresponding pairs of plates, to obtain the as-installed thickness of each specimen. The standard deviation about the average of values from repeated measurements of the plate separation, starting from total disassembly, gives a statistical measure of the reproducibility. If contact cannot be made between the plates, standard spacers can be inserted between the plates. Bringing the plates in contact with the spacers can determine the adjustment in specimen measured thickness required.

A1.2.1.2 The accuracy of this procedure is equal to the imprecision with which the vernier can be read. The accuracy of this test method depends on the precision with which the rods are mounted in a true horizontal orientation, and on not changing the plate separation during the measurement. The standard deviation about the average of values from repeated measurements of the plate separation, starting from total disassembly, gives a statistical measure of the reproducibility.

A1.2.2 An alternative is to place the specimen on a flat surface and measure the thickness at various points across the specimen with a thickness gage mounted above the specimen. The zero is first established by resting the foot of the gage on the flat surface. The specimen is then measured. This procedure has the advantage that specimen flatness and warp can be measured. Thickness is measured typically in at least five different locations across the full specimen and within the metered section to establish the metered thickness within the apparatus. The thickness, when applicable, is measured after the test to monitor any significant changes that have the potential to affect the results.

A1.2.2.1 The accuracy of this test method is equal to the imprecision with which the gage can be read. The accuracy and reproducibility of this test method depends on the ability of the operator to reproduce the amount of force exerted on the specimen especially in the case of compressible specimens.

A1.2.3 Another alternative is to use a micrometer or vernier calliper. This assumes that the specimen is not bowed or warped, that should of course be ascertained. During a measurement of thickness with a calliper, prevent the narrow jaws of the measuring tool from penetrating into the surface of the specimen. Cut two small pieces of flat, rigid rectangular metal sheet, about 20 by 40 mm and 0.5 to 1.0 mm thick. Measure the combined thickness of the two metal rectangles; then measure the thickness of the specimen while holding one metal piece under each jaw, between the surface of the specimen and the jaws of the micrometer or calliper. Be sure to subtract the combined thickness of the two metal plates from the total thickness of specimen plus metal pieces, to obtain the net specimen thickness. By this method measure the thickness at eight different, equally spaced locations around the outer margin of the specimen.

A1.2.3.1 The accuracy of this procedure is equal to the precision with which the vernier (or micrometer) can be read. The accuracy and reproducibility of this test method is lower than that described above in A1.2.1 and A1.2.2, due to the variable pressure used by different people in measuring the specimen between the jaws of the micrometer or calliper.

A1.3 Limitations Due to Apparatus:

A1.3.1 *Limitations Due to Contact Resistances*—When testing a rigid specimen of high thermal conductance (that is, specimens of a material too hard and unyielding to be appreciably altered in shape by the pressure of the heating and cooling units), even small, non-uniformities of the surface of both the specimen and the apparatus (surfaces not perfectly flat) will allow contact resistances not uniformly distributed between the specimens and the plates of the heating and cooling units.

A1.3.1.1 These will cause nonuniform heat flow-rate distribution and thermal field distortions within the specimens; moreover, accurate surface temperature measurements will be difficult. For specimens having thermal resistances less than 0.1 m² K/W, special techniques for measuring surface temperatures will be required. Metal surfaces should be machined or cut flat and parallel and stress-relieved.

A1.3.2 Upper Limits for the Thermal Resistance:

A1.3.2.1 The upper limit of thermal resistance that can be measured is limited by the stability of the power supplied to the metered section, the ability of the instrumentation to measure power level and the extent of the heat losses or gains due to temperature imbalance errors between the central and guard sections of the specimens and of the metered section.

A1.4 Limits to Temperature Difference:

A1.4.1 Providing uniformity and stability of the temperature of the hot and cold surfaces of the plates, the noise, resolution and temperature measurements can be maintained within the limits outlined in Section 6, temperature differences as low as 5 K, when measured differentially, can be used. Lower temperature differences shall be reported as not complying with this standard. See Practice C1058.

A1.4.2 If temperature measurements of each plate are made by means of thermocouples with independent reference junctions, it is possible that the accuracy of the calibration of each thermocouple will be the limiting factor in the accuracy of measured temperature differences. In this case, it is recommended that temperature differences of at least 10 K to 20 K are used in order to minimize temperature-difference measurement errors.

A1.4.3 Higher temperature differences are limited only by the capability of the apparatus to deliver enough power while maintaining required temperature uniformity.

A1.4.4 Maximum Specimen Thickness:

A1.4.4.1 The boundary conditions at the edges of the specimens due to the effects of edge insulation, of auxiliary guard heaters and of the surrounding ambient temperature will limit the maximum thickness of specimen for any one configuration, as described in Section 6. For composite or layered specimens, the mean measurable thermal conductivity of each layer should be less than twice that of any other layer.

A1.4.4.2 This is an approximation and the results do not necessarily imply the measurement of conductivity of each layer. The accuracy will remain close to that predictable for tests on homogeneous specimens. No guidelines can be supplied to assess measurement accuracy when the requirement of 2.3 is not met.

A1.4.5 Minimum Specimen Thickness:

A1.4.5.1 The minimum specimen thickness is limited by contact resistances given in A1.3.1. Where thermal conductivity or thermal resistivity is required, the minimum thickness is also limited by the accuracy of the instrumentation for measuring the specimen thickness.

A1.4.5.2 The metered area, that is, the area of the specimen traversed by the heat flow-rate fed by the metered section, is related to the specimen thickness and to the gap width. As the thickness tends to zero, the metered area tends to the area of the metered section, while for thick specimens the metered area is bounded by the line defining the centre of the primary guard gap. To avoid complex corrections, this definition can be retained, provided the thickness of the specimen is at least ten times the width of the gap.

A1.4.6 Maximum Operating Temperature:

A1.4.6.1 It is possible that the maximum operating temperature of the heating and cooling units may be limited by oxidation, thermal stress or other factors that degrade the flatness and uniformity of the surface plate and by changes of electrical resistivity of electrical insulations that affect accuracy of all electrical measurements.

A1.4.7 Vacuum Conditions:

A1.4.7.1 Care must be taken if a guarded hot plate is used for measurements under vacuum conditions. If a high vacuum is desired, the materials used in the design of the apparatus must be carefully selected to avoid excessive outgassing under such conditions. Under vacuum conditions, especially at lower temperatures, serious errors can arise if care is not taken when installing heater and temperature sensor leads so as to minimize extraneous heat flow-rates and temperature measurement errors.

A1.4.8 Apparatus Size:

A1.4.8.1 The overall size of a guarded hot plate will be governed by the specimen dimensions that typically range from 0.2 to 1 m diameter or square. Samples smaller than 0.3 m are potentially not representative of the bulk material, while specimens larger than 0.5 m have the potential to create considerable problems in maintaining the flatness of the specimens and plates, temperature uniformity, equilibrium time and total cost within acceptable limits.

A1.5 Limitations Due to Specimen:

A1.5.1 Thermal Resistance or Thermal Conductance:

A1.5.1.1 *Specimen Homogeneity*—In inhomogeneous specimens, the thermal flux density both within the specimen and over the faces of the metered section area has the potential to be neither unidirectional nor uniform. Thermal field distortions will be present within the specimen and can give rise to serious errors. The region in the specimen contiguous to the metered section area and especially near the edges of this area is most critical. It is hard to give reliable guidelines on the applicability of the method in such cases. The major risk is that the imbalance errors, edge heat loss errors, etc., now unpredictable, can vary in an unpredictable way when inhomogeneities take different relative positions within the specimen.

A1.5.1.2 One way to estimate the error is to compare the results for two specimens from the same sample, selected so that they have as widely different a structure near the edges or the metered section area. If the two extremes cannot be identified, a number of specimens may have to be tested.

A1.5.1.3 In some samples, the variation in structure may occur over small distances. This is true for many thermal insulations. In such cases, it may be possible to use a single specimen cut larger than the apparatus. This over-size specimen is tested twice, in each case with the specimen carefully positioned so that the edges of the test area are exposed to the two extremes in structure. The two results are then compared and the difference credited to distortion. The portion of the specimen(s) protruding from the apparatus should be well insulated in the two tests to reduce the possibility of the exposed section increasing edge losses. The size and thickness of the specimen affects the size of the variations in structure

that can be accommodated. The larger the test area, the smaller the effect on the results. The effect of distortion may either increase or decrease with specimen thickness.

A1.5.1.4 Direct thermal short circuits may exist between the surfaces of the specimens in contact with the plates of the heating and cooling units. The largest effect occurs when sections of material which conduct heat readily, with extended surface area on each side of the specimen, are connected by a path of low thermal resistance relative to other paths. The effect can best be identified by breaking the thermal paths, especially when the collecting surfaces can be disconnected from the rest of the path. Sheets of thermally insulating materials can be used at the critical surfaces to provide the break. Sheets made of finely ground cork, or a similar material 2 mm or more thick, work well. The surfaces must be ground to the same degree of flatness as the heating unit. The thermal resistance of these sheets can be determined in separate measurements. The net change in thermal resistance of the specimen, due to thermal shorting, can thus be determined. If greater than 1 %, another measurement should be made with thicker sheets imposed.

A1.5.2 Temperature-Difference Correlation:

A1.5.2.1 Thermal resistance or thermal conductance are often a function of temperature differences across the specimen. In the report, the range of temperature differences that apply to the reported values of the two properties must be defined, or it must be clearly stated that the reported value was determined at a single temperature difference.

A1.5.3 Mean Measurable Thermal Conductivity of a Specimen:

A1.5.3.1 In order to determine the mean measurable thermal conductivity (or thermal resistivity) of a specimen, the criteria of A1.3.1 shall be fulfilled. The specimen shall be homogeneous. Homogeneous porous specimens shall be such that any inhomogeneity has dimensions smaller than one-tenth of the specimen thickness. In addition, at any one mean temperature, the thermal resistance shall also be independent of the temperature difference established across the specimen.

A1.5.3.2 The thermal resistance of a material is known to depend on the relative magnitude of the heat transfer process involved. Heat conduction, radiation and convection are the primary mechanisms. However, the mechanisms can combine or couple to produce non-linear effects that are difficult to analyze or measure even though the basic mechanisms are well researched and understood.

A1.5.4 The magnitude of all heat transfer processes depends upon the temperature difference established across the specimen. For many materials, products and systems, a complex dependence may occur at temperature differences which are typical of use. In these cases, it is preferable to use a temperature difference typical of use and then to determine an approximate relationship for a range of temperature differences. The dependence can be linear for a wide range of temperature differences.

A1.5.5 Some specimens, while being homogeneous, are anisotropic in that the thermal conductivity measured in a direction parallel to the surfaces is different to that measured in a direction normal to the surfaces. For such specimens, this can

result in larger imbalance and edge loss errors. If the ratio between these two measurable values is lower than two, reporting according to this method is still possible if imbalance and edge heat loss errors are determined separately with anisotropic specimens mounted in the apparatus.

A1.5.6 Thermal Conductivity or Thermal Resistivity of a Material:

A1.5.6.1 In order to determine the thermal conductivity or thermal resistivity of a material, the criteria of A1.3.2 shall be fulfilled. In addition, adequate sampling must be performed to ensure that the material is homogeneous or homogeneous porous, and that the measurements are representative of the whole material product or system. The thickness of the specimens must be greater than that for which the thermal conductivity of the material product or system does not change by more than 2 % with further increase in thickness.

NOTE A1.1—Results obtained on specimens where thermal conductivity is still changing with specimen thickness are only applicable at that specific test thickness.

A1.5.7 Dependence on Specimen Thickness:

A1.5.7.1 Of the processes involved, only conduction produces a heat flow-rate that is directly proportional to the thickness of a specimen. The others result in a more complex relationship. The thinner and less dense the material, the more likely that the resistance depends on processes other than conduction. The result is a condition that does not satisfy the requirements of the definitions for thermal conductivity and thermal resistivity, both of which are intrinsic properties, since the transfer factor shows a dependence on the specimen thickness. For such materials, it may be desirable to determine the thermal resistance at conditions applicable to their use. There is believed to be a lower limiting thickness for all materials below which such a dependence occurs. Below this thickness, the specimen may have unique thermal transmission properties, but do not relate to the material. It remains, therefore, to establish this minimum thickness by measurements.

A1.5.7.2 Determination of minimum thickness above which thermal properties of the material may be defined.

A1.5.7.3 If the minimum thickness for which the thermal conductivity and resistivity can be defined is not known, it is necessary to estimate this thickness.

A1.5.7.4 In the absence of an established method, the procedure outlined below may be used to approximate the thickness and whether it occurs in the range of thickness in which a material is likely to be used.

A1.5.7.5 It is important to differentiate between added thermal resistance in measurements caused by the placement of the temperature sensors below the surfaces of the plates, added resistance caused by poor specimen surfaces, and added resistance caused by the coupling of the conduction and radiation modes of heat transfer in the specimens. All three can affect the measurements in the same way, and often the three may be additive.

A1.5.7.6 Select a sample uniform in density distribution, with the thickness L_5 , equal to the greatest thickness of the material to be characterized or equal to the maximum allowable thickness for the test apparatus.

A1.5.7.7 Cut five sets of specimens in approximately equal increments from the sample ranging in thickness from the smallest likely to be used in practice. The set of specimens shall be designated s_1 to s_5 according to their respective thickness L_1 to L_5 .

A1.5.7.8 For low density materials where heat is transferred by radiation and conduction mechanisms and where the absence of convection has been verified, the slope of a plot of thermal resistance versus thickness will very frequently diminish up to 1 to 2 cm and then will remain constant as the thickness increases. The reciprocal of this constant slope is the thermal conductivity to be assigned to high thickness specimens.

A1.5.7.9 Measure the thickness and thermal resistance of s_1 , s_3 , and s_5 at the same mean temperature and with the same temperature difference across the specimen. Plot the thermal resistance versus thickness. If these three values differ from a straight line relationship by less than $\pm 1\%$, the slope of the straight line shall be computed. If the three values differ by more than 1% , then similar measurements shall be made on s_2 and s_4 to check if there is a thickness above which the thermal resistance does not differ from a straight line by more than 1% .

A1.5.7.10 If this thickness exists, the slope of the straight line shall be determined to compute a thermal conductivity $\lambda_m = \Delta L / \Delta R$ defined as the ratio between the increments of thickness, ΔL , and increments of the thermal resistance, ΔR .

A1.5.7.11 The thickness at which this occurs will vary according to the densities, types and forms of different materials, products and systems for different mean temperatures.

A1.5.7.12 Thermal conductivity and thermal resistivity then characterizes the material, product or system for thicknesses above which the transfer factor differs by less than 2% from λ_m .

A1.5.7.13 Allowance for experimental errors must be made in the interpretation of results. Least-square curve fitting of R versus L may also help. A larger number of specimens may be used where greater definition is required.

A1.5.7.14 Thickness dependence may be a function of temperature difference across the specimens. For the purposes of this test method, the above checks, if performed at typical operating temperature differences, shall be adequate to indicate the degree of thickness dependence.

A1.5.8 *Method of Determining Dependence on Temperature Difference*—If the temperature-difference dependence of the thermal properties is not known for a material, a minimum of three measurements shall be made. These are made with widely differing temperature differences. A second-order dependence can be revealed by these measurements. When a simple linear relationship is known to occur, only two measurements, that is, one extra, need be made. This establishes the linear dependence for that particular sample.

A1.5.9 *Warping*—Special care should be exercised with specimens with large coefficients of thermal expansion that warp excessively when subjected to a temperature gradient. The warping may damage the apparatus or may cause additional contact resistance that may lead to serious errors in the

measurement. Specially designed apparatus may be necessary to measure such materials.

A1.6 *Measurement Uncertainty*—The uncertainty of the apparatus is based upon consideration of the random and systematic components of the following measurement uncertainties (32): uncertainty in heat flow, δQ ; uncertainty in temperature difference, δT ; uncertainty in metered area, δA ; and, uncertainty in specimen thickness, δL .

A1.6.1 Other specimen characterization and test condition data may need to be reported. The precision and bias of these data are to be reported to the extent they have a direct bearing on the accuracy of the results. Prescribed precision and bias of the primary data are not mandated by this test method. However, it is required that the user assess and report the precision and bias of the data. The discussion below provides guidelines to assist the user in performing this uncertainty assessment. A variety of helpful performance checks are included in this discussion. In the following discussion both random and systematic errors are considered. The subscript s is used to denote systematic, and the subscript r is used for the random components.

A1.6.1.1 *Systematic Error, δ_s* —Systematic error, δ_s , is any component of error that remains fixed during the runs that constitute a successful test. To simplify the discussion, this does not include any components of error that are known both in magnitude and sign. Under such circumstances, the user should make appropriate corrections to the conductivity measurements and supply the justification for them. The user may check for the presence of unexpected errors by using a reference specimen or transfer standard available from appropriate sources. If errors are discovered, their source should be identified and removed. A guarded hot plate cannot be calibrated. The task of estimating the remaining systematic errors is based on judgment and experience, including an awareness of the results of interlaboratory comparisons. The implications of such estimates is often that they are the maximum possible systematic errors. In this event the total maximum systematic error is the sum of the errors. It is, however, more likely that these estimates are probabilistic in nature and do not, in fact, represent the worst possible case. The total probable systematic errors are summed in the same manner as random errors, that is, the square root of the sum of squares. In the following discussion the latter approach is taken. However, the user must decide if the bias estimates are worst cases or probabilistic in nature, and sum them accordingly.

A1.6.1.2 *Random Error, δ_r* —Random error, δ_r , is that component of error that may vary both in sign or magnitude during the runs that constitute a successful test. For simplicity, it is assumed that the variations are normally distributed and conventional statistical techniques are applicable. An estimate of random error components can be obtained by repeat measurements of each variable.

A1.6.1.3 It is important to distinguish between random and systematic errors for the following reason. The results reported in the test method are mean values derived from more than a single run. The uncertainties reported generally apply to these mean values. The uncertainty of a mean value due to the

random error component decreases approximately as $1/\sqrt{n}$ where n is the number of repeat runs. In contrast to this, the uncertainty of the mean value due to the systematic error component does not decrease with repeat runs. Thus, it is recommended that the error components be treated separately. The total uncertainty is expressed by reporting both components separately.

A1.7 Error Components—In the following sections, the error components of each reported variable are discussed. The total random or systematic uncertainty for each variable is taken to be the square root of the sum of squares.

A1.7.1 Heat Flow, Q —The objective of the test method is to establish and measure uniaxial heat flow through the metered area of the specimen. Any deviation from this objective represents error in the reported heat flow. The following sources of error should be considered:

A1.7.2 Edge Heat Loss, $\delta_s Q_e$ —Edge heat loss, $\delta_s Q_e$ is a systematic error as the conditions surrounding the plate-specimen stack remain constant throughout the test procedure. Although tests have been reported that shed some light on the magnitude of this error, the results generally are not proven to the point where corrections based on these results are universally accepted (1, 4, 6, 7, 18-22). However, the results are considered sufficiently valid for the basis of defining the maximum specimen thickness. The optimum environmental temperature to minimize this error is a small fraction of T above the mean test temperature. To determine the sensitivity of this error to test conditions, the user should determine the heat flux as a function of secondary guard temperature. This dependence may change appreciably with specimen and apparatus characteristics and, therefore, should be done under typical test conditions.

A1.7.3 Gap Heat Loss—Gap heat loss is considered to be composed of both systematic, $\delta_s Q_g$, and random, $\delta_r Q_g$, components. The systematic component can be, in part, due to the fact that there may be a finite number of locations along the gap at which the imbalance is measured; reducing the temperature difference between a finite number of points on opposite sides of the gap to zero may not necessarily ensure that there is zero net flow of heat across the gap. Improper position of the sensors will lead to systematic error. Spurious emfs within the circuitry will result in a systematic imbalance. The random component is due to short-term control fluctuations. After estimating the probable imbalance across the gap in terms of temperature (or sensor voltage) one needs to determine the effect of this imbalance on the measured heat flow through the metered area. This can be done by measuring the dependence of metered area power on intentionally introduced gap imbalance. A typical way of addressing this is to run three tests, one with the guard balanced and one each biased positive and negative. The results are plotted, λ versus gap balance, and the zero intercept is determined. The imbalance introduced should be large enough to yield an easily measured change in Q , but small enough to remain in the region where the dependence of Q upon imbalance is approximately linear.

A1.7.3.1 It has been found that (3, 15, 16) the gap heat loss, δQ_g is linearly dependent on temperature unbalance across the

gap, ΔT_g , that is, $\delta Q_g = B \Delta T_g$. The proportionality constant, B , is dependent on the wires crossing the gap (number, size, and type), gap geometry (width and cross-sectional shape), the gap fill material (gas, insulation), the emittance of the gap surfaces and the material in the vicinity of the gap between the hot and cold plates. A reasonable approximation of this heat flow can be calculated from this information. It is recommended that this be done to confirm the value measured by the procedure described in the previous paragraph.

A1.7.4 Effect of Drift of the Metered Area Heater—A quasi-heat loss exists due to the changing heat content of the metered area heater as its temperature changes. Typical plates have a relatively high heat capacity and even for small drift rates can produce significant errors in measured heat flow. If the drift is monotonic, the error is systematic, $\delta_s Q_d$; if not, the error is exhibited as random error, $\delta_r Q_d$. Normally, the experiment is conducted so that there is no observable drift. Under this circumstance, the possible drift is determined by the detectability or control limit, dT/dt , of the system. One can compute the magnitude of this error, δQ_d in watts, from a knowledge of the maximum possible dT/dt and the specific heats and masses of the various components of the metered section of the plate as follows:

$$\delta Q_d = dT/dt \sum C_i M_i \tag{A1.1}$$

The specimen heat capacity also contributes to the drift error, but for low-density insulations the heat capacity of the specimen is small compared to the plate. This error also can be determined by measuring the dependence of drift rate on measured heater power. Comparison of the calculated and measured results is advised to increase confidence in the reported result.

A1.7.5 Power determination error, composed of both systematic, $\delta_s Q_p$ and random, $\delta_r Q_p$, components. With high quality instrumentation these errors can be reduced to an insignificant level. The manufacturers' specifications on bias and precision will normally suffice to define these errors.

A1.7.6 Temperature and Temperature Difference—Temperature error is composed of systematic, $\delta_s T$, and random, $\delta_r T$, components. In addition, these errors are further subdivided according to the source of the error:

A1.7.6.1 Calibration error, $\delta_s T_c$, is entirely systematic as long as the same calibration is used. It is, however, not necessarily the same for each temperature sensor. In the case of thermocouples, calibration is frequently performed for each spool of wire, not for each piece of wire from that spool. Therefore, systematic differences can occur as one progresses through the spool. The calibration is frequently represented by an equation which approximates the experimental calibration data taken at selected temperatures. If a digital read-out device is used that yields temperature directly, the calibration formulation is built into the device and the same basis for error exists.

A1.7.6.2 Instrumentation measurement error, δT_m , occurs when the sensor output is measured. This error contains both systematic and random components. Each component should be estimated from equipment manufacturer's specifications and from estimated spurious circuit effects. In addition, temperature errors are introduced by long and short-term control

fluctuations. A helpful procedure to assess the magnitude of these errors is as follows. Place the guarded metered area and primary guard(s) in thermal contact with the adjacent cold plates (insert high conductance plates in place of the specimens if the plates cannot be placed physically together). Adjust the cold plates to the desired temperature; control this temperature until steady-state is reached. The metered area heater should be off. Periodically read the isothermal surface temperatures to detect systematic differences and random variations over an extended time.

A1.7.6.3 Sensor positioning, a potentially significant source of error in temperature measurement can be caused by improper positioning of the sensor or the disturbance caused by the presence of or finite size of the sensor itself. It is intended that the average temperature of each specimen surface be measured. If the sensor is mounted in the plate surface, thermal contact resistance between the plate and specimen is a source of error. If the sensor is mounted in the specimen surface, sensor separation (specimen thickness) is a source of error. If the specimen is inhomogeneous across the metered area, surface temperature variations exist and the indicated temperature will depend on its location on the surface. If heat flows along the sensor leads from the external environment, the measured temperature will be in error because of the presence of the sensor. For a single test on a given specimen, this source of error, $\delta_s T_p$, is systematic. A performance check that is helpful to determine the potential temperature error due to temperature nonuniformity is as follows: Assemble a multi-junction thermocouple and place it between the specimen and plate in question. Establish steady-state at the desired test condition. Determine the variation in temperature across the plate from the multi-junction thermocouple outputs.

A1.7.6.4 A helpful technique to estimate interface temperature errors is to mount sensors both within the plate and within the specimen surface. Then perform a test and calculate the difference between the two sets of data.

A1.7.6.5 Temperature difference error is also composed of systematic, $\delta_s \Delta T$, and random components, $\delta_r \Delta T$. Care must be exercised in estimating these components compared to the error components for temperature itself. The results can depend strongly on whether a differential measurement or two absolute measurements are performed. Because ΔT is frequently small, large percentage errors can occur if care is not observed. For example, at a mean specimen temperature of 300 K, an error of 1 K in the mean temperature, that corresponds to an error of about 0.2 % in thermal resistance for typical insulations. However, this same error of 1 K in measurement of a specimen temperature difference of 25 K corresponds to a 4 % error in both T and in the value of the thermal resistance, independent of the mean temperature. The ad hoc experiment described in A1.7.6.3 is recommended to provide estimates of these error components.

A1.7.7 Specimen thickness error, $\delta_s L$, and meter area error, $\delta_s A$, are both systematic errors. The specimen thickness error is determined by the ability to measure the plate spacing (including variations of this thickness over the metered area) or, in the case of rigid specimens, the specimen thickness and the changes due to thermal expansion. The effect of bowing or

warping at operating temperatures should be given attention.

At relatively large thicknesses (above 5 cm) this error can be maintained below 0.5 %. At small thicknesses (below 0.5 cm) this error may become a dominating factor in the overall accuracy. The meter area error is usually small except for the assumption about what proportion of the gap area to include. This error is difficult to estimate for very thin specimens or when a discontinuity in the specimen occurs at the gap. The specimen thickness error will contain a random component, $\delta_r L$, due to assembly and disassembly.

A1.8 Thermal Conductance or Thermal Resistance—The relative uncertainty in thermal conductance, C , caused by either random errors or systematic errors of indeterminate sign, may be calculated from the following error propagation formula:

$$(\delta C/C)^2 = (\delta Q/Q)^2 + (\delta \Delta T/\Delta T)^2 + (\delta A/A)^2 \quad (A1.2)$$

where $\delta Q/Q$ and $\delta \Delta T/\Delta T$ and $\delta A/A$ are the total relative uncertainties of heat flux, temperature difference, and meter area respectively. The same equation applies to thermal resistance. Included in the total relative uncertainties are those due to the measurement as well as those discussed in Practice C1045. For example for fibrous glass insulation at 24°C mean temperature and a 22°C temperature difference across the specimen the following errors can be realized Note that the example below uses hypothetical values for $\delta Q/Q$ and $\delta \Delta T/\Delta T$. The user must determine their own values for this calculation:

$$(\delta C/C)^2 = (0.5)^2 + (0.25)^2 + (0.01)^2 = 0.31 \quad (A1.3)$$

Therefore, the uncertainty in thermal conductance would be $\sqrt{0.31} = 0.56\%$.

A1.9 Thermal Conductivity or Thermal Resistivity—The relative uncertainty in thermal conductivity caused by either random or systematic errors may be calculated from the following error propagation formula:

$$\left(\frac{\delta \lambda}{\lambda}\right)^2 = (\delta Q/Q)^2 + (\delta \Delta T/T)^2 + (\delta A/A)^2 + (\delta L/L)^2 \quad (A1.4)$$

where $\delta A/A$ and $\delta L/L$ are the total relative uncertainties of area and thickness, respectively. Again, the above total relative uncertainties include not only the measurement uncertainty, but also the effect of material variability and deviations from the definitions as discussed in Practice C1045. In addition, it should be noted that the temperature to which each measured property is assigned also contains a measurement error that affects the uncertainty of the final result. The effect of this error increases as the temperature dependence of the measured property increases.

A1.9.1 For example for fibrous glass insulation at 24°C mean temperature and a 22°C temperature difference across the specimen the following errors can be realized. Again the example below uses hypothetical values for these uncertainties. The user must obtain their own input values.

$$\left(\frac{\delta \lambda}{\lambda}\right)^2 = (0.5)^2 + (0.25)^2 + (0.01)^2 + (0.1)^2 = 0.32 \quad (A1.5)$$

Therefore, the uncertainty in thermal conductivity would be $\sqrt{0.32}=0.57\%$.

A1.10 It is recommended that the user periodically confirm these calculated uncertainties by measuring specimens of established standard reference materials or calibrated transfer

specimens. Comparison of the measurement results with the accepted values will reveal whether the performance of the guarded hot plate is of acceptable quality. The results of such comparative measurements are not to be used to obtain an apparatus "calibration" or "correction" factor. For further information on this see Refs (23-29).

REFERENCES

- (1) Bankvall, C. G., "Mechanisms of Heat Transfer in Permeable Insulation and Their Investigation in a Special Guarded Hot Plate," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations*, ASTM STP 544, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 34-48.
- (2) Brendeng, E., and Frivik, P. E., "New Development in Design of Equipment for Measuring Thermal Conductivity and Heat Flow," *ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 147-166.
- (3) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "A Guarded-Hot-Plate Apparatus for Measuring Effective Thermal Conductivity of Insulations Between 80 K and 360 K," *NBSIR 81-1657*, 1982, 49 pp.
- (4) Pratt, A. W., Chapter 6: "Heat Transmission in Low Conductivity Materials," in *Thermal Conductivity*, Vol 1, R. P. Tye, Ed., Academic Press, 1969, pp. 301-405.
- (5) De Ponte, F., and Di Filippo, P., "Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations*, ASTM STP 544, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 97-117.
- (6) Woodside, W., and Wilson, A. G., "Unbalance Errors in Guarded Hot Plate Measurements," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations*, ASTM STP 217, 1956, pp. 32-48.
- (7) Woodside, W., "Analysis of Errors Due to Edge Heat Loss in Guarded Hot Plates," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations*, ASTM STP 217, 1957, pp. 49-64.
- (8) Woodside, W., "Deviations from One-Dimensional Heat Flow in Guarded Hot Plate Measurements," *Review of Scientific Instruments*, Vol 28, 1957, pp. 1033-1037.
- (9) Hust, J. G., "Thermal Anchoring of Wires in Cryogenic Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol 41, No. 5, May 1970, pp. 622-624.
- (10) ASTM Subcommittee E20.04, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement*, ASTM STP 470B, 1981.
- (11) Sparks, L. L., Powell, R. L., and Hall, W. J., *Cryogenic Thermocouple Tables*, NBS Report 9712, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1968.
- (12) Bertasi, M., Bigolaro, G., and De Ponte, F., "Fibrous Insulating Materials as Standard Reference Materials at Low Temperatures," *Thermal Transmission Measurements of Insulation*, ASTM STP 660, R. P. Tye, Ed., 1978, pp. 30-49.
- (13) Shirliffe, C. J., "Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations*, ASTM STP 544, R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 13-33.
- (14) Bomberg, M. and Solvason, K. R., "Precision and Accuracy of Guarded Hot Plate Method," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 393-410.
- (15) Siu, M. C. I., "Comparison of Results of Measurements Made on a Line-Heat-Source and a Distributed Heat Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 413-418.
- (16) Siu, M. C. I., and Bulik, C., "National Bureau of Standards Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol 52(11), 1981, pp. 1709-1716.
- (17) Horlick, J., "National Voluntary Laboratory Accreditation Program, Proficiency Testing for Thermal Insulation Materials Laboratory Accreditation Program," *NBSIR 84-2890*, 1984.
- (18) Donaldson, I. G., "A Theory for the Square Guarded Hot Plate-A Solution of the Heat Conduction Equation for a Two Layer System," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol XIX, 1961, pp. 205-219.
- (19) Donaldson, I. G., "Computer Errors for a Square Guarded Hot Plate for the Measurement of Thermal Conductivities of Insulating Materials," *British Journal of Applied Physics*, Vol 13, 1962, pp. 598-602.
- (20) Pratt, A. W., "Analysis of Error Due to Edge Heat Loss in Measuring Thermal Conductivity by the Hot Plate Method," *Journal of Scientific Instruments*, Vol 39, 1962, pp. 63-68.
- (21) Somers, E. V., and Cybers, J. A., "Analysis of Errors in Measuring Thermal Conductivity of Insulating Materials," *Review of Scientific Instruments*, Vol 22, 1951, pp. 583-586.
- (22) Troussart, L. R., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Guarded Hot Plate Apparatus and its Computer Implementation," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 4, 1981, pp. 225-254.
- (23) Pelanne, C. M., "The Development of Low Density Glass-Fiber Insulation as Thermal Transmission Reference Standards," *Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 763-776.
- (24) Rennex, B. G., Jones, R. R., and Ober, D. G., "Development of Calibrated Transfer Specimens of Thick, Low-Density Insulations," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 419-426.
- (25) Shirliffe, C. J., "Effect of Thickness on the Thermal Properties of Thick Specimens of Low-Density Thermal Insulation," *Thermal Insulation Performance*, ASTM STP 718, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 36-50.
- (26) Siu, M. C. I., "Fibrous Glass Board as Standard Reference Material for Thermal Resistance Measurement Systems," *Thermal Insulation Performance*, ASTM STP 718, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 343-360.
- (27) Smith, D. R., and Hust, J. G., "Effective Thermal Conductivity of Glass-Fiber Board and Blanket Standard Reference Materials," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 483-496.
- (28) Smith, D. R., and Hust, J. G., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of a Glass Fiberboard Standard Reference Material," *Cryogenics*, Vol 21, No. 7, July 1981, pp. 408-410.
- (29) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of Glass Fibreblanket Standard Reference Material," *Cryogenics*, Vol 21, No. 8, August 1981, pp. 460-462.
- (30) Hust, J. G., and Smith, D. R., "Round-Robin Measurements of the Apparent Thermal Conductivity of Two Refractory Insulation Materials, Using High Temperature Guarded-Hot-Plate Apparatus," *NBSIR 88-3087*, 28 pp., U.S. National Institute of Standards and Technology, April 1988.
- (31) Peavy, B. A., and Rennex, B. G., "Circular and Square Edge Effect Study for Guarded-Hot-Plate and Heat-Flow-Meter Apparatuses," *Journal of Thermal Insulation*, 9, 1986, pp. 254-300.

- (32) International Organization for Standardization (ISO), *Guide to the Expression of Uncertainty In Measurement*, ISBN 92-67-10188-9, 1993, First Edition.
- (33) Bode, K.-H., "Thermal Conductivity Measurements with the Plate Apparatus: Influence of the Guard Ring Width on the Accuracy of Measurements," *Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology*, ASTM STP 879, C. J. Shirtliffe, and R. P. Tye, Eds., 1985, pp. 29–48.
- (34) ASTM, *Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis*, Manual 7, 6th Edition, 1991, Available from ASTM Headquarters, Request PCN:28-0070899-34.
- (35) Eisenhart, C., "Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol 67C, No. 2, April–June 1963, pp. 161–187.
- (36) Pham, Q. T., and Smith, C. G., "Thermal Imbalance Errors and Effective Area in Guarded Hot Plates," *Review of Scientific Instruments*, Vol 57(1), January 1986, pp. 99–105.
- (37) Orr, H. W., "A Study of the Effects of Edge Insulation and Ambient Temperature on Errors in Guarded-Hot-Plate Measurements," *Proceedings of the 7th Thermal Conductivity Conference*, D. R. Flynn, and B. A. Peavy, Eds., 1968, pp. 521–526.
- (38) Robinson, H. E., and Watson, T. W., "Interlaboratory Comparison of Thermal Conductivity Determinations with Guarded-Hot-Plates," *Symposium on Thermal Insulating Materials*, ASTM STP 119, Philadelphia, 1951, pp. 36–44.
- (39) Horlick, J., and Berger, H. W., "NVLAP and the Thermal Insulation Proficiency Testing Program," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 8, April 1985, pp. 278–297.
- (40) Ku, H. H., "Notes on the Use of Propagation Error Formulas," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol 70C, No. 4, October–December 1966, pp. 263–273.
- (41) Hust, J. G., and Pelanne, C. M., "Round Robins on the Apparent Thermal Conductivity of Low Density Glass Fiber Insulations Using Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Apparatus," *NBSIR 85-3026*, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1985.
- (42) Pelanne, C. M., "Experiments on the Separation of Heat Transfer Mechanisms in Low-Density Fibrous Insulation," *8th Conference on Thermal Conductivity*, Plenum Press, 1969, pp. 897–911.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; http://www.copyright.com/

ANEXO 8

norma española

Julio 2002

TÍTULO**Materiales de construcción**

Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor

Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica

Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance.

Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment. Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique. Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 12664 de enero de 2001.

OBSERVACIONES**ANTECEDENTES**

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 92 *Aislamiento Térmico* cuya Secretaría desempeña ANDIMA.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 34409:2002

© AENOR 2002
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR

Asociación Española de
Normalización y Certificación

C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00
Fax 91 310 40 32

70 Páginas

Grupo 40



NORMA EUROPEA
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 12664

Enero 2001

ICS 91.100.01; 91.120.10

Versión en español

Materiales de construcción
Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa
caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor
Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica

Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance.

Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment. Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique. Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique.

Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstan nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand.

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 2000-06-25. Los miembros de CEN están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional.

Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales, pueden obtenerse en la Secretaría Central de CEN, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CEN en su idioma nacional, y notificada a la Secretaría Central, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

CEN
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung
SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

© 2001 Derechos de reproducción reservados a los Miembros de CEN.

ÍNDICE

	Página
ANTECEDENTES.....	5
INTRODUCCIÓN	6
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	6
2 NORMAS PARA CONSULTA	7
3 DEFINICIONES, SIMBOLOS Y UNIDADES.....	8
4 PRINCIPIO.....	10
5 EQUIPO	10
6 MUESTRAS DE ENSAYO.....	17
7 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	20
8 CÁLCULOS.....	27
9 INFORME DEL ENSAYO	29
ANEXO A (Normativo) LIMITACIONES PARA LA IMPLANTACIÓN DEL PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y SOBRE LAS PROPIEDADES MEDIBLES	32
ANEXO B (Normativo) LÍMITES DE LAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO Y DE LAS CONDICIONES DE ENSAYO. UNIDAD DE PLACA CALIENTE GUARDADA	45
ANEXO C (Normativo) LÍMITES PARA LAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO Y DE LAS CONDICIONES DE ENSAYO. MEDIDOR DE FLUJO DE CALOR.	51
ANEXO D (Normativo) DISEÑO DEL EQUIPO	57
ANEXO E (Normativo) PROCEDIMIENTOS RELACIONADOS CON LAS MEDICIONES EN EL EQUILIBRIO DE HUMEDAD.....	64
ANEXO F (Informativo) ACONDICIONAMIENTO PARA UN CONTENIDO EN HUMEDAD EN UNAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS ESPECÍFICADAS	67
ANEXO G (Informativo) ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CONDENSACIÓN	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70

ANTECEDENTES

Esta norma europea ha sido elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 89 *Prestaciones térmicas de los edificios y sus componentes*, cuya Secretaría desempeña SIS.

Esta norma europea debe recibir el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a la misma o mediante ratificación antes de finales de julio de 2001, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de diciembre de 2001.

Este documento forma parte de una serie de normas de métodos de ensayos térmicos que dan soporte a normas de producto para materiales de construcción.

Los anexos A, B, C, D y E, son normativos. Los anexos F y G son informativos.

De acuerdo con el Reglamento Interior de CEN/CENELEC, están obligados a adoptar esta norma europea los organismos de normalización de los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades de la transferencia de calor en un estado estable pueden ser medidas por un número de métodos de ensayos normalizados: la elección del método más apropiado depende de las características de la muestra. Esta norma cubre únicamente los métodos de placa caliente y los métodos del medidor de flujo de calor.

Para ensayos rutinarios, el encargado de estos dos métodos necesitará únicamente esta norma y la correspondiente norma de producto que podrá imponer requisitos adicionales relativos a la preparación de la muestra y a las condiciones del ensayo.

Se dan requisitos más detallados para las medidas, en cualquier condición de ensayo de la resistencia térmica de cualquier plano de la muestra compatible:

- para el método de la placa/caliente guardada en las Normas ISO 8302:1991 y EN 1946-2:1999;
- para el método del medidor de flujo de calor en las Normas ISO 8301:1991 y EN 1946-3:1999.

Esta norma proporciona información general sobre el aparato, todos los límites impuestos para el diseño del equipo y el funcionamiento, así como el procedimientos y especificación del ensayo, para muestras húmedas y secas, con media y baja resistencia térmica, se encuentran descritas en las especificaciones técnicas correspondientes (por ejemplo, una norma europea de producto o una aceptación técnica europea). La información dada es técnicamente equivalente a la de las Normas ISO 8301:1991 e ISO 8302:1991, para estos dos métodos. Esto está solamente destinado para el ensayo de rutina de muestras (dentro de las limitaciones de espesor y heterogeneidad, etc., dadas en el anexo A), usando el equipo que ha sido construido de acuerdo con el apartado 5.1 y que ha sido, previamente validado de acuerdo con las Normas EN 1946-3:1999 o EN 1946-2:1999.

También se incluyen ejemplos de los diseños del equipo que cumplen los requisitos del apartado 5.1, de tal manera que la evaluación de la precisión del equipo diseñado sea conforme y no necesite un análisis del error, y consistiendo únicamente la comprobación en una inspección de las propiedades del equipo.

Aunque esta norma puede ser usada para el ensayo de muestras secas de alta y media resistencia térmica, por ejemplo en los productos que tienen resistencia térmica menor de $0,5 \text{ m}^2\text{-K/W}$, los procedimientos más simples de la Norma EN 12667:2001 son recomendados para dichas muestras. Las medidas del espesor en productos de alta y media resistencia térmica están comprendidas por la Norma EN 12939, ver Bibliografía.

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma, especifica los principios y los procedimientos de ensayo para la determinación, mediante los datos de los métodos de la placa caliente guardada, o del medidor de flujo de calor, de la resistencia térmica de las muestras de ensayo, bien en estado seco o condicionadas a un equilibrio con aire húmedo, teniendo una resistencia térmica no menor de $0,1 \text{ m}^2\text{-K/W}$ y una transmisividad (higro) térmica de conductividad térmica de hasta $2,0 \text{ W/(m.K)}$. Es de esperar que la resistencia térmica de la mayoría de las muestras de albañilería, serán menor de $0,5 \text{ m}^2\text{-K/W}$.

NOTA 1 – El límite más bajo para la medición de la resistencia térmica es, debido al efecto de contacto de resistencias térmicas, y requieren técnicas de ensayo especiales, descritas en esta norma. Aunque esta norma puede ser usada para ensayos de muestras secas de resistencias térmicas altas y medias, es decir productos teniendo una resistencia térmica de no menos de $0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, se recomiendan los procedimientos más simples indicados en la Norma EN 12667:2001 para esas muestras.

Se aplica, en principio, para cualquier ensayo de temperatura media, pero el equipo designado en el anexo D, está esencialmente orientado para funcionar con una unidad de enfriamiento de aire funcionando con una temperatura mínima de $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ y una mitad de calentamiento de $+100 \text{ }^\circ\text{C}$.

NOTA 2 – Los límites para los ensayos de temperatura son únicamente impuestos por los materiales utilizados en la construcción de los equipos y equipos auxiliares.

Se dan límites adicionales para el funcionamiento de equipos y las condiciones del ensayo.

No se suministran los procedimientos generales de diseño del equipo, el error en el análisis del equipo, características de los exámenes de los mismos, y la evaluación de la precisión del equipo.

Se suministran ejemplos de diseños de equipo conformes con los requisitos que se exponen a continuación en esta norma.

Esta norma no suministra guías generales e información de base (por ejemplo: las propiedades de transferencia de calor que deben ser reflejadas, preparaciones de muestras dependiendo del producto, materiales sugeridos para envoltentes con posibilidad hermética contra el vapor cuando se ensayen muestras húmedas, procedimientos que requieran mediciones múltiples, tales como las que evalúan el efecto de muestras no homogéneas, aquellas para muestras de ensayos cuyo espesor excede de las capacidades del equipo de medida, y aquellas para evaluar el efecto del espesor. Debido a todas estas limitaciones, esta norma, debe de ser usada conjuntamente con la norma del producto que deba ser ensayado.

Aunque en principio esta norma está orientada para materiales de construcción también, puede usarse para muestras de cualquier material que cumpla con los requisitos especificados.

Puede ser usada para muestras realizadas a partir de la base del material de uniones de huecos de materiales de obra unidos, pero no serán permitidos, los huecos o uniones en la muestra.

Esta norma, no cubre las mediciones de productos gruesos de resistencia térmica media y alta.

2 NORMAS PARA CONSULTA

Esta norma europea incorpora disposiciones de otras publicaciones por su referencia, con o sin fecha. Estas referencias normativas se citan en los lugares apropiados del texto de la norma y se relacionan a continuación. Para las referencias con fecha, no son aplicables las revisiones o modificaciones posteriores de ninguna de las publicaciones. Para las referencias sin fecha, se aplica la edición en vigor del documento normativo al que se haga referencia (incluyendo modificaciones).

NOTA – Las referencias a las Normas ISO 8301:1991 e ISO 8302:1991, no cubren métodos de ensayos completos, pero sí están sujetas a aspectos tales como el diseño del equipo e inspección de las prestaciones, no cubiertas por las normas europeas, o partes de ellas; nos son nece sarias las referencias a las Normas ISO 8301:1991 o la ISO 8302:1991, para los ensayos rutinarios de acuerdo con esta Norma.

EN 1946-2:1999 – *Prestaciones térmicas de los productos y componentes para edificios. Criterios particulares para la evaluación de los laboratorios que miden las propiedades de transmisión térmica. Parte 2: Mediciones por el método de la placa caliente protegida.*

EN 1946-3:1999 – *Prestaciones térmicas de los productos y componentes para edificios. Criterios particulares para la evaluación de los laboratorios que miden las propiedades de transmisión térmica. Parte 3: Mediciones por el método del medidor de flujo térmico*

EN 12667:2001 – *Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.*

EN ISO 7345 – *Aislamiento térmico. Magnitudes físicas y definiciones. (ISO 7345:1987).*

EN ISO 9288 – *Aislamiento térmico. Transmisión a de calor por radiación. Magnitudes físicas y definiciones (ISO 9288:1989).*

EN ISO 9346 – *Aislamiento térmico. Transferencia de masa. Magnitudes físicas y definiciones (ISO 9346:1987).*

ISO 8301:1991 – *Aislamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica en estado estable y propiedades relacionadas. Equipo medidor de flujo de calor.*

ISO 8302:1991 – *Aislamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica en estado estable, y propiedades relacionadas. Equipo de la placa caliente guardada.*

3 DEFINICIONES, SÍMBOLOS Y UNIDADES

3.1 Términos y definiciones

Para los fines de esta norma son de aplicación los términos y definiciones contenidos en las Normas EN ISO 7345, EN ISO 9288 y EN ISO 9346. Las definiciones correspondientes a la medición de las propiedades sobre la transferencia de calor en productos con media o baja resistencia térmica y la definición sobre la transmisión de humedad y temperatura, deben ser consultadas en A.2.

3.2 Símbolos y unidades

Símbolo	Calidad	Unidad
A	área de la sección inspeccionada en una superficie isotérmica seleccionada	m^2
A_d	área del defecto	m^2
A_m	área de la sección de medida	m^2
D_w	difusión de la humedad	m^2/s
E	error en la diferencia de las temperaturas, en muestras no planas	–
F_o	número de Fourier	–
R	resistencia térmica	$m^2 \cdot K/W$
\mathcal{J}	factor de transferencia	$W/(mK)$
T_1	temperatura de la superficie cálida de la muestra	K
T_2	temperatura de la superficie fría de la muestra	K
T_m	temperatura media del ensayo [habitualmente $(T_1 + T_2)/2$]	K
V	volumen	m^3
Z_v	resistencia a la humedad	s/m
a	factor de humedad	$W \cdot m^2/(kg \cdot K)$
c	capacidad calorífica específica	$J/(kg \cdot K)$
d	espesor; media de los espesores de la muestra	m
e	extremo de la relación de la temperatura	–
e_h	tensión a la salida del medidor de flujo de calor	mV
er_p	error porcentual debido a los cambios de fases	–
er_d	error porcentual debido a la distribución no homogénea de la humedad	–
f	factor de calibración del medidor de flujo de calor	$W/(mV \cdot m^2)$

Símbolo	Calidad	Unidad
f_r	factor de multiplicación para la resistencia térmica medida	–
g	relación de la densidad del flujo de humedad	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
h_e	entalpía latente de evaporación por masa	J/kg
m	masa (de la muestra)	kg
q	relación de la densidad del flujo de calor	W/m^2
p	desviación de la superficie de la muestra desde un plano real	mm
r	resistividad térmica	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
t	tiempo	s
v	humedad por volumen	kg/m^3
v_{sat}	humedad por volumen en la saturación	kg/m^3
w	contenido de humedad en masa la por volumen	kg/m^3
w_m	media de la humedad contenida en la masa, por volumen	kg/m^3
ΔR	incremento de la resistencia térmica	$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
ΔT	diferencia de temperatura (usualmente $T_1 - T_2$)	K
Δd	incrementos de espesor	m
Δm	cambio relativo de la masa	–
Δt	intervalo de tiempo	s
Δw	cambio en el contenido de humedad (masa por volumen)	kg/m^3
Φ	relación del flujo de calor	W
γ	factor condicionante de tiempo	s/m^2 (ó, h/cm^2)
δ_v	permeabilidad a la humedad respecto a la humedad por volumen.	m^2/s
λ	conductividad térmica	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_t	transmisividad térmica	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ^*	transmisividad higrótérmica	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_0	conductividad térmica del material seco	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ξ_d	capacidad diferencial de humedad, dw/dz	kg/m^3
ξ	porosidad	–
ξ_p	porosidad local	–
ρ	densidad	kg/m^3
φ	humedad relativa	–

NOTA – El significado de algunos subíndices adicionales son especificados en el texto.

4 PRINCIPIO

4.2 Equipo

Ambos equipos, el de placa caliente guardada y el del medidor de flujo de calor están destinados a establecer en el interior de muestras homogéneas con caras planas y paralelas, en forma de tablas, una relación constante, unidireccional y uniforme densidad del flujo de calor. La parte del equipo donde ocurre esto, con una precisión aceptable es alrededor de su centro; el equipo, se encuentra, por lo tanto, dividido en una sección central de medida, que es el lugar donde se realizan las mediciones y la sección que lo envuelve, aísla y protege.

4.2 Medición la densidad de la relación del flujo de calor

Con el establecimiento de un estado estable en la sección de medida, la densidad de la relación del flujo de calor, q , se determina a partir de la medición de la relación del flujo de calor, ϕ , y el área de medida, A , que atraviesa el flujo de calor.

4.3 Midiendo la diferencia de temperatura

La diferencia de temperatura a través de las muestras, ΔT , es medida mediante sensores de temperatura fijados en las superficies de los equipos en contacto con la muestra y/o aquellas muestras que son válidas por si mismas, cuando sea apropiado.

4.4 Derivando de la resistencia térmica o el factor de transferencia

La resistencia térmica, R , se calcula a partir del conocimiento de q , A y ΔT si se dan las condiciones apropiadas, dadas en el apartado A.3.2. A partir del conocimiento adicional del espesor, d , de la muestra, el factor de transferencia \mathcal{F} , se calculará.

4.5 Calculando la conductividad térmica, la transmisividad térmica o la transmisividad higrótérmica

La conductividad térmica, λ , o la transmisividad térmica λ_t , o la transmisividad higrótérmica λ^* , de la muestra pueden ser determinadas si se dan las condiciones apropiadas para identificarlas y aquellas dadas en el apartado A.4.3.

4.6 Límites del equipo

La aplicación de este método está limitada por la capacidad del equipo para mantener una relación uniforme, constante y unidireccionalidad de la densidad de la muestra, unido a la capacidad para medir la potencia, la temperatura y las dimensiones con objeto de llegar a la precisión requerida, véase el anexo A.

4.7 Límites de la muestra

La aplicación del método, también esta limitado por la forma física de la(s) muestra(s) y el grado en el que se encuentran estructuras idénticas en espesor y uniformidad (en el caso de equipos de dos muestras) y cuando sus superficies son planas o paralelas, véase el anexo A.

5 EQUIPO

5.1 Generalidades

Un equipo de placa caliente guardada, o un medidor de flujo de calor, usados para efectuar mediciones de acuerdo con esta norma deben cumplir con los límites sobre el funcionamiento del equipo y de las condiciones de ensayo dadas en los anexos B o C de esta norma y deberán cumplir los requisitos concernientes a la evaluación de la precisión del equipo dadas en las Normas EN 1964-2:1999 o EN 1946-3:1999. Esto, requiere que en el diseño del equipo, el error en el análisis y control del funcionamiento, estén de acuerdo a lo indicado en la sección 2, de las Normas ISO 8302:1991 o ISO 8301:1991, respectivamente.

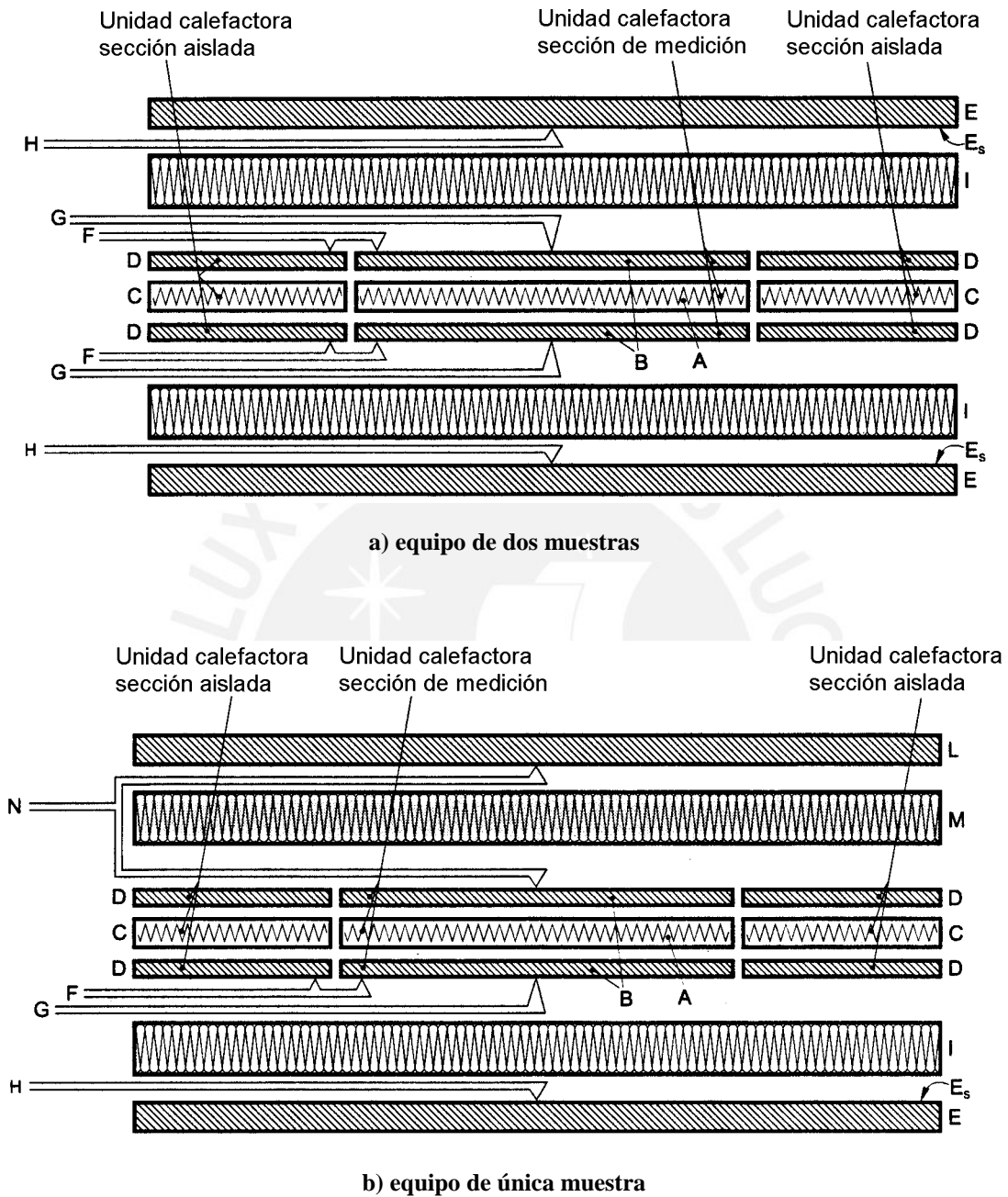
El anexo D proporciona diseños del equipo de placa caliente guardada, que cumplen con estos requisitos. Para un equipo medidor de flujo de calor, véase el anexo D, de la Norma EN 12667:2001. Si el equipo empleado es diseñado con la precisión indicada, no es necesario considerar el error en el análisis, incluso aunque, en todos los casos con un control de funcionamiento conforme con la Norma EN 1946-2:1999 o EN 1946-3:1999, deben ser tomadas previamente para la evaluación inicial del equipo.

Cuando, de otra manera, no se encuentren explícitamente establecidos, los requisitos del equipo de placa caliente, guardada, son asumidos como aplicables también por el equipo medidor de flujo de calor.

El ancho o el diámetro del equipo, debe ser compatible con el agregado o tamaño de poro, véase el apartado A.3.2.1

NOTA – El ancho o el diámetro total preferido del equipo al que se refiere el capítulo B.3 es 0,3 m ó 0,5 m.





Leyenda

- | | |
|---|--|
| A Sección de medida del calefactor | G Termopares en la superficie de la unidad calefactora |
| B Sección de medida de la superficie de la placa | H Termopares en la superficie de la unidad enfriadora |
| C Sección aislada del calefactor | I Muestra de ensayo |
| D Sección aislada de las placas/láminas de superficie | L Placa/lámina aislada |
| E _s Superficie de la placa de la unidad enfriadora | M Aislamiento de la placa guardada |
| F Termopares diferenciales | N Termopares diferenciales de la placa guardada |

El hueco corresponde a la separación entre la sección de medida (ver A y B) y la sección aislada (ver C y D)

Fig. 1 – Condiciones generales para equipos para dos muestras y muestra única en un equipo de placa caliente guardada

5.2 Equipo de placa caliente guardada

5.2.1 Generalidades. En un equipo de placa caliente guardada, la relación del flujo de calor se obtiene a partir de la medición de la potencia suministrada por la unidad calefactora a la sección medida. Las características generales de los equipos, con muestras instaladas, se muestran en la figura 1.

Existen dos tipos de equipos de placa caliente guardada, que cumplen con los principios básicos establecidos en el capítulo 4:

- a) con dos muestras (y una unidad calefactora central);
- b) con una muestra única.

5.2.2 Equipo de dos muestras. En un equipo de dos muestras (véase la figura 1a), una placa plana central cuadrada o redonda, consistente en unas placas con superficie de metal, denominadas unidad calefactora se instala en posición tipo sandwich entre dos muestras prácticamente iguales. La relación del flujo de calor es transferida a través de las muestras para separar las uniones planas, isotérmicas redondeadas o cuadradas, denominadas unidades enfriadoras.

5.2.3 Equipo de muestra única. En el equipo con muestra única, (véase la figura 1b), la segunda muestra, se reemplaza por un conjunto compuesto por una parte de aislamiento y una placa guardada. Se establece una diferencia de temperatura cero a través de este conjunto. Siempre que todos los otros requisitos aplicables de esta norma se cumplan, la medida de precisión, y el informe de acuerdo con este método puede ser realizado con este tipo de equipo, pero referencias particulares a la modificación realizada con respecto al equipo de placa caliente guardada normal, de dos muestras deben ser incluidas en el informe del ensayo.

5.2.4 Unidad calefactora. La unidad calefactora, consta de una sección central, separada, de medición, donde se puede establecer un flujo de calor constantemente unidireccional y con uniformidad de densidad de flujo, rodeado por una sección guardada, separada por un estrecho hueco.

5.2.5 Área de medición. El área de medición, es la que se encuentra situada centralmente en la muestra y delimitada por el centro de la línea del hueco de la unidad calefactora.

Esta definición, que se aplica en principio, para muestras con un cierto espesor solamente, han sido conservadas para todas las muestras que deban de ser ensayadas de acuerdo con la norma debido a esta aproximación el espesor de la muestra debe de ser por lo menos diez veces el ancho del hueco.

5.2.6 Aislamiento de los bordes y protecciones auxiliares. Se requerirán límites adicionales de aislamiento y/o secciones de protección, especialmente, cuando se opere con temperaturas por encima o por debajo de la del habitáculo en que se realizan los trabajos, véase el anexo B de la Norma EN 1946-2:1999.

5.2.7 Unidades enfriadoras. Las unidades de enfriamiento tendrán unas dimensiones por lo menos, tan grandes como los de la unidad calefactora, incluyendo lo/s calentadores protegidos. Deberán consistir en platos/láminas de metal, mantenidas a una temperatura constante y uniforme.

5.2.8 Precisión y repetibilidad. La precisión y la repetibilidad, dependen ambas del equipo y de las condiciones del ensayo. La valoración completa de los errores en el ensayo en un equipo de placa/lámina, caliente aislada, y en cualquier condición específica de un ensayo, debe de ser llevada a cabo de acuerdo con la Norma EN 1946-2:1999. Lo siguiente, es una somera información, aplicable a los ensayos correctamente ejecutados cuando la temperatura media del ensayo está cercana a la temperatura del habitáculo.

El equipo construido y funcionando de acuerdo con esta norma (véase también el anexo B) es capaz de medir las propiedades térmicas, de productos con baja o media resistencia, con una precisión cercana a un $\pm 2\%$.

La repetición de las subsecuentes mediciones realizadas por el equipo sobre una muestra mantenida en el interior del equipo, y sin cambios en las condiciones de ensayo es generalmente mayor de un $\pm 0,5\%$

Cuando las mediciones son realizadas con la misma muestra de referencia, retirada y montada de nuevo, la repetibilidad de las mediciones, es normalmente mayor de un $\pm 1\%$. Esta última cifra se debe a los cambios mínimos en las condiciones de ensayo, tal como la presión en las placas de la muestra (que afecta a las resistencias de contacto), la humedad relativa del aire alrededor de la muestra (que afecta al contenido de su humedad), etc.

La repetibilidad de las mediciones sobre una muestra con humedad, es una combinación de la repetibilidad del equipo, que debería ser mayor del 1% y de la repetibilidad de las condiciones de ensayo, en particular, el contenido de humedad, (véase el anexo F).

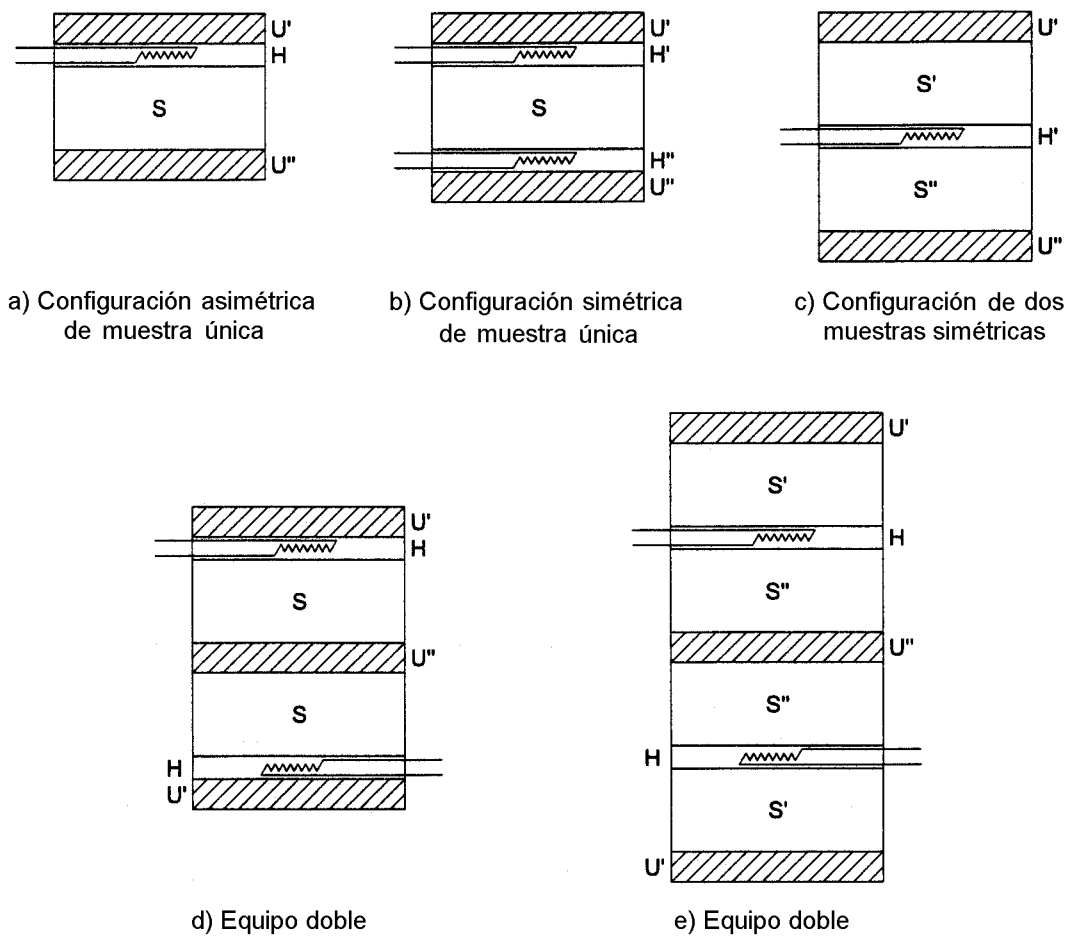
5.2.9 Precisión y repetibilidad cuando se realizan ensayos de muestras con baja resistencia térmica. Tal como se establece en el apartado 5.2.8, la precisión de las mediciones sobre muestras secas, de calidad, teniendo una resistencia térmica igual o mayor que $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ debería de ser mayor del 2% para equipos de placa caliente guardada. Las muestras que posean resistencias térmicas comprendidas entre $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ y $0,02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, pueden ser ensayadas de acuerdo con la Norma ISO 8302:1991 solamente; la precisión correspondiente se reduce progresivamente en un 5% (véase el apartado A.3.6.2). Cuando se ensayen muestras húmedas, pueden haber errores adicionales importantes (véase el apartado 7.2.3.4.)

5.3 Equipo medidor de flujo de calor

5.3.1 Generalidades. En los equipos medidores del flujo de calor, la densidad de la relación del flujo de calor, es medida según indicaciones de uno o dos de(los) medidor(es) del flujo de calor, situados frente a las muestras.

Las características generales de los equipos medidor de flujo de calor, se muestran en la fig. 2; consisten en una unidad calefactora, uno o dos medidores del flujo de calor, una o dos muestras, y la unidad enfriadora. En la configuración a), que es denominada “muestra única asimétrica”, el medidor de flujo de calor puede ser instalado frente a cualquier unidad; la configuración b) denominada “muestra única simétrica”; en la configuración c) que es denominada “muestras dobles simétricas”, las muestras deberían ser sensiblemente idénticas. Cada configuración permite conseguir resultados equivalentes si se usan dentro de las limitaciones establecidas en esta norma.

NOTA – Existen distintas ventajas en la práctica de cada método; un breve comentario se encuentra incluido en el anexo B de la Norma ISO 8301:1991.



a) Configuración asimétrica de muestra única

b) Configuración simétrica de muestra única

c) Configuración de dos muestras simétricas

d) Equipo doble

e) Equipo doble

Leyenda

- U', U'' Unidades calefactoras y enfriadoras
- H, H', H'' Medidores del flujo de calor
- S, S', S'' Muestras

Fig. 2 – Configuraciones típicas de los equipos medidores del flujo de calor

5.3.2 Medidores del flujo de calor. El medidor de flujo de calor, es un conjunto que mide la relación de la densidad del flujo de calor a través de la muestra(s), mediante un diferencial de temperatura originado por esta relación del flujo de calor, que atraviesa la(s) muestra(s) y el propio medidor. Comúnmente consiste en un núcleo homogéneo, un detector diferencial de temperatura de superficie (una termopila multi-función) y lo(s) detectore(s) de temperatura superficial. La zona del medidor de flujo de calor ocupada por el núcleo, donde los detectores del diferencial de temperatura están situados, se denomina área de medición.

Una densidad de la relación del flujo de calor, q , a través del área de medición del mecanismo, genera una salida de e_h :

$$q = f e_h$$

El factor de calibración f , que relaciona a e_h y q , no es una constante en todos los casos, pero puede depender de la temperatura y sobre una extensión más limitada, de la densidad de la relación del flujo de calor.

5.3.3 Principio de calibración. Este es un método secundario o relativo, dado que la relación de la resistencia térmica de la(s) muestra(s) para la que es medida la(s) muestra(s) normalizada(s). A partir de la medición de la relación del flujo de calor Φ_s con la muestra(s) normalizada(s) y Φ_u con la muestra(s) que nos ocupa, y que va a ser medida, y asumiendo que la densidad constante de la relación del flujo de calor en la sección de medición y asumiendo la estabilidad del diferencial de temperatura ΔT y la temperatura media T_m , da la relación entre la resistencia térmica R_s de la muestra(s) normalizada(s) y R_u de la muestra desconocida, tal como sigue:

$$R_u/R_s = \Phi_s/\Phi_u$$

Los procedimientos de calibración son dados en la Norma ISO 8301:1991

5.3.4 Limitaciones debidas a la calibración. El factor de calibración, f , es una función de la temperatura media del medidor de flujo de calor. Si la curva de calibración se ha establecido para un rango de temperatura, la extrapolación no es realizable.

El factor de calibración para una temperatura dada para el medidor de flujo de calor, puede ser también una función de la relación de la densidad del flujo de calor. Los equipos deben poder ser usados, solamente, para las densidades de la relación del flujo de calor, en el interior del rango cubierto por la calibración.

5.3.5 Precisión y repetibilidad. La precisión y repetibilidad dependen del equipo y las condiciones de ensayo.

La evaluación completa de los errores del ensayo, en un equipo con medidor de flujo de calor, en cualquier ensayo con condiciones específicas debe ser realizada de acuerdo con la Norma EN 1946-3. Lo que se expone a continuación es información somera que corresponde a los ensayos ejecutados correctamente, cuando la temperatura media del ensayo esté cercana a la de la habitación.

La repetibilidad de las mediciones subsecuentes, realizadas por el equipo, sobre una muestra mantenida en el interior del equipo, sin cambios en las condiciones de ensayo, es normalmente mayor del $\pm 0,5\%$.

Cuando las mediciones se realizan con la misma muestra de referencia, retirada y vuelta a montar, después de largos intervalos de tiempo, la repetibilidad de las mediciones es normalmente del $\pm 1\%$. Esta cifra mayor esta relacionada con cambios mínimos en las condiciones de ensayo, tales como la presión de las placas y del medidor de flujo de calor en la muestra (que influye en el contacto de las resistencias) y la humedad relativa del aire que rodea la muestra (que afecta al contenido de humedad), etc.

La repetibilidad de las medidas en una muestra húmeda, es una combinación de la posibilidad de repetición del equipo, que deberá ser mayor del 1% y la posibilidad de la repetición de las condiciones de ensayo, en particular en cuanto al contenido de humedad, véase el anexo F.

La precisión de la calibración del equipo medidor de flujo de calor, depende de la precisión del material de referencia y esta comprendida normalmente dentro de un $\pm 2\%$.

NOTA – La precisión en la calibración es principalmente debida a la precisión del método de la placa caliente guardada, cuando se realicen mediciones de las propiedades de las muestras que nos ocupan.

Cuando los límites especificados en el anexo C, son alcanzados, el método del medidor de flujo de calor, es capaz de determinar las propiedades de la transferencia de calor con un $\pm 3\%$ cuando la temperatura media del ensayo está cercana a la del habitáculo.

5.4 Análisis del error e inspección del funcionamiento del equipo

El análisis del error (que no es necesario si el diseño del equipo cumple con uno de los contenidos en el anexo D), la inspección de las propiedades del equipo y las consecuentes evaluaciones de la precisión del equipo dentro del rango de las condiciones de ensayo dadas en las especificaciones correspondientes del producto, deben ser realizadas de acuerdo con el apartado 5.1

6 MUESTRAS DE ENSAYO

6.1 Generalidades

El ensayo debe ser separado entre el manipulado de la muestra, véase a continuación, y las mediciones reales, véase el capítulo 7. Algunas decisiones sobre las propiedades de la transferencia de calor, la manipulación de las muestras y condiciones de ensayo, deben de ser tomadas cuando se comience el ensayo, véase el capítulo A.5. Las conclusiones de estas decisiones deben ser tomadas sólo dentro de esta norma y/o en la norma de producto correspondiente aplicable para la muestra que debe de ser ensayada.

6.2 Selección y dimensiones

Una o dos muestras deben de ser seleccionadas (para cada ejemplo) de acuerdo con el tipo de equipo (véanse los apartados 5.2.2. o 5.2.3, referentes a los equipos con placa caliente guardada, y 5.3.1. para el equipo con medidor de flujo de calor). Las muestra o muestras, deben cumplir los requisitos enunciados en los capítulos A.3 y A.4. Cuando dos muestras son requeridas deben de ser tan idénticas como sea posible con un espesor que difiera en menos de un 2%. La muestra(s), debe(n) de ser de tal dimensión que sea capaz de cubrir completamente las superficies de la unidad calefactora (incluyendo la sección aislada), sin exceder la totalidad de las dimensiones lineales de la unidad calefactora o del medidor de flujo de calor, en más de un 3%. Deben de tener un espesor de acuerdo con la norma correspondiente de producto aplicable, y adicionalmente la relación entre el espesor de la muestra usada y las dimensiones de la unidad calefactora, deberá estar restringida hasta el límite de la suma del error del desequilibrio (sólo para el equipo de placa caliente) y el error debido a las pérdidas de calor en el extremo hasta el 0,5%, ver los límites de espesor de la tabla A.1 en el capítulo A.3. Para el espesor mínimo de las muestras, véase el apartado A.3.4 y tablas A.1 y A.2.

6.3 Preparación de la muestra e instrumentación

6.3.1 Conformidad con las normas de producto. La preparación de las muestras deberá estar de acuerdo con la norma de producto que sea de aplicación a menos que se indique lo contrario en las normas de producto, los criterios generales indicados en los apartados 6.3.2 y 6.3.3 deben ser cumplidos.

6.3.2 Todas las muestras excepto los materiales de relleno

6.3.2.1 Preparación. Como en los materiales de construcción, en particular los de obra, existen en muchas variantes por ejemplo ladrillos, bloques, aglutinados, etc. se deberá de usar el método apropiado para la forma disponible por ejemplo: de extremo a extremo de pequeñas piezas unidas de similar densidad, (pero nunca con las superficies de unión paralelas a las caras de la muestra) mecanizando directamente a partir de piezas mayores o recopilándolas de una mezcla. En todos los casos deberá asegurarse que la muestra del ensayo es lo mas plana posible en lo que se refiere a las dimensiones principales y a otras dimensiones que están dentro de las tolerancias especificadas.

Cuando la unión de extremo a extremo o la unión mediante pegamento sea necesaria, se realizan las juntas entre las superficies mecanizadas, de manera perpendicular a las superficies principales de la muestra y preferiblemente de manera simétrica con la línea que pasa a través del centro de la muestra y perpendicular al origen de sus superficies. Se mantiene el número de piezas usadas en el mínimo dictado por la medida del modulo del producto, especialmente en el área de medición. Se asegura que en el interior del área de medida, la sección, de la junta total, no excede del 0,1% del área de medición. Se usa un adhesivo en frío, una resina epoxy o poliéster, para la unión; se preferirán los adhesivos que se aproximen a la conductividad de la muestra. Se aplica el adhesivo sobre las superficies a unir evitando la impregnación tanto como sea posible. Después de la unión bien suavizar las caras de la muestra utilizando una pulidora o una máquina molidora, o lijar a mano las caras.

El cemento fraguado y los materiales de albañilería para los que las muestras que se preparen a base de estos se deberán hacer 28 días antes de los ensayos para su consolidación, y se deberá registrar la fecha de fabricación. Las muestras deben de contener inicialmente, una cantidad grande de agua como consecuencia de la fabricación y preparación. Se deberá tener gran cuidado al seleccionar las condiciones de ensayo en relación al contenido de humedad con el fin de eliminar la transferencia de masa durante el ensayo, o establecer las condiciones para los que los efectos de transferencia de masa son repetibles y bien comprendidos, véanse los apartados 7.2.2 y 7.2.3.

La superficie de las muestras de ensayo deberán ser lo más lisas posibles mediante tratamientos adecuados (lijado, corte con máquinas tipo radial (disco), lijadoras mecánicas), de tal forma que el contacto entre las muestras y el equipo o puntos interpuestos, sea lo más perfecto posible.

Para materiales rígidos, las caras de las muestras deben ser tan planas como las superficies de los equipos (véase el apartado A.3.6.2) y deberán ser paralelas sobre la totalidad del área de la superficie con un 2% del espesor de la muestra.

La planeidad de las superficies, puede ser comprobada, por ejemplo, con un nivelador de buena calidad (tolerancia de hasta 0,01 mm) y aplicado sobre la superficie y observando la incidencia de grano, con un foco que ilumine la superficie, por detrás del nivelador. Desviaciones tan pequeñas como 25 μm son visibles con facilidad. Desviaciones grandes, pueden ser medidas usando calibradores y comprobadores de nivel, tal como se indica. Los comprobadores de nivel deberían estar soportados sobre un bloque calibrado y de espesor conocido, (1 mm sería correcto) en cada extremo de la superficie que debe de ser inspeccionada. Las desviaciones negativas y positivas pueden ser medidas usando calibres a lo largo de una línea recta. Se deberían inspeccionar ocho líneas, tal como sigue: los cuatro lados de la superficie, las dos diagonales, y la cruz central (dos líneas paralelas a los extremos de la superficie). Cuando este procedimiento, aplicable a ambos aparatos y a las superficies de la muestra, se aplica a la muestra que se inspecciona, se debería de repetir para cada cara de la misma.

Arañazos, astillas o defectos similares que existen naturalmente sobre la superficie, y que originan irregularidades en las caras terminadas de materiales granulados o aglomerados, son aceptados siempre que el total de la superficie de las áreas son una fracción del área de medición, y su profundidad máxima es una fracción aceptable del espesor de la muestra, de tal manera que la resistencia térmica añadida sea mantenida, en orden a las bolsas de aire incluidas, sea lo menor posible. Para el propósito de esta norma:

- si $(A_d/A_m)(R_a/R) < 0,0005$, el efecto puede ser ignorado;
- si $0,0005 \leq (A_d/A_m)(R_a/R) \leq 0,005$ el ensayo puede ser realizado, pero, la presencia del defecto deberá de mencionarse en el informe de la inspección.

donde

A_d es la sección que atraviesa la totalidad del área de los defectos;

A_m es el área de la sección de medida;

R_a es la resistencia térmica de una capa de aire de espesor igual a la máxima profundidad de cualquier defecto;

R es la resistencia térmica de la muestra.

6.3.2.2 Selección e instalación de los puntos de contacto. Los equipos imperfectos y/o muestras planas, producen resistencias térmicas de contacto, véase el apartado A.3.6.2 el límite máximo permitido cuando se ensayan muestras rígidas sin puntos de contacto.

Cuando la resistencia térmica de una muestra es menor de 0,3 $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, o sus superficies no cumplen los requisitos del apartado A.3.6.2, láminas delgadas de material adecuado y comprensible, deberán de ser insertadas entre las superficies de la muestra y las placas del equipo, para establecer un buen contacto térmico entre ellos. La láminas deberán también aislar eléctricamente con respecto a los termopares, que son los que se deben de instalar en las superficies de la muestra para determinar el diferencial de temperatura a través de la muestra (véase el apartado 6.3.2.3).

Si cualquier otro requisito es cumplido (homogeneidad, compresibilidad, etc.), las láminas del material disponible de mayor conductividad térmica, deberían ser elegidas. Cuando se usen láminas de contacto, las resistencias térmicas de las láminas deberían de ser lo más pequeñas compatibles para eliminar las bolsas de aire.

NOTA 1 – Espuma de caucho siliconada con densidad alrededor de 600 kg/m^3 y espesor sobre 0,5% a 1% sobre el conjunto de las dimensiones del equipo (normalmente, de 2 a 3 mm para equipos de mediana dimensión) han sido encontradas, como material que cumple satisfactoriamente los requisitos.

Una presión de apriete suficiente, de más de 10 kPa, es requerida, para producir un contacto térmico uniforme entre las superficies del equipo, los termopares, los puntos de contacto térmico y las muestras.

NOTA 2 – Estas altas presiones pueden dañar los transductores del medidor de flujo de calor del equipo, y por estas razones, los equipos con placa/lámina, caliente, son preferidos para ensayos de muestras que posean una resistencia térmica menor de $0,3 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.

El uso de láminas de contacto, introduce los errores descritos en el apartado A.3.6.3. Cuando la resistencia de contacto es considerada demasiado elevada, una solución alternativa para el uso de láminas de contacto es la de aumentar la terminación de la superficie de la muestra y/o los discos/láminas del equipo.

NOTA 3 – La resistencia térmica mas baja que puede ser medida, de acuerdo con B.5, es de $0,02 \text{ m}^2/\text{W}$ (por ejemplo: 0,04 de hormigón estructural), pero la precisión total, del 2%, alrededor de la temperatura del habitáculo, puede ser alcanzado solamente cuando la resistencia térmica de la muestra es igual o mayor de $0,1 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

6.3.2.3 Termopares montados en la muestra. Cuando se usan láminas de contacto, los termopares montados en las superficies de la muestra, o cementadas en surcos no muy profundos, exactamente colocadas en un surco conocido en las superficies de la muestra, deben ser usados para medir el diferencial de temperatura a través de las muestras. El número de termopares distribuidos uniformemente en cada lado de la muestra y en el área correspondiente a la sección del equipo medidor, no debería ser menor de $N \sqrt{A}$, o 2, la que sea mas grande, donde $N = 10 \text{ m}^{-1}$ y A es el área en metros cuadrados de un lado de la sección del medidor. Para el error en el diferencial de temperatura, cuando se usan láminas de contacto y termopares, montados en la muestra, véase el apartado A.3.6.3.

Se recomienda instalar cuando menos dos o más termopares en cada lado de la muestra, en el área correspondiente a la sección medidora del equipo.

Los termopares montados directamente dentro de las superficies deberán ser:

- alambre fino y aplanado (láminas conductoras), ó
- láminas finas, que pueden ser adquiridas como la variedad del tipo de “ejecución rápida” o
- preparadas rodando o presionando las uniones conjuntamente con un 20 mm de los aledaños del alambre de los termopares convencionales.

Los termopares deben de ser fabricadas a partir de un stock de unidades calibradas de alambre de termopar, o a partir de un alambre que haya sido certificado por el fabricante para cumplir con la tabla B.1 de la Norma ISO 8302:1991 o se deberán calibrar individualmente.

NOTA 1 – Es importante establecer un buen contacto entre las uniones y las superficies de estas. En algunas circunstancias será necesario mejorar el montaje en el área localizada para alcanzar esto. Esto se puede realizar, con efectividad, y con un mínimo de pérdida de precisión mediante “alisamiento” del área local, usando herramientas electro-mecánicas, unos revestimientos rápidos de relleno que realicen un espesor de recubrimiento de menos de 0,5 mm.

Los termopares deben de estar conectados en posición con respecto a estas áreas de las superficies preparadas (aproximadamente 15 mm a 20 mm en diámetro) usando unas bandas estrechas de unión adhesiva con espesor de sobre (2 a 4) mm en anchura, asentada sobre 5 mm de la misma unión.

NOTA 2 – Bandas más anchas de cinta, pueden ser usadas en el área resguardada para aislar y proteger el alambre alrededor de los límites del equipo.

NOTA 3 – La presión de apriete que se transmite a las láminas de contactos térmicos, asegura que los termopares, se encuentran firmemente en contacto con las superficies de la muestra, durante el ensayo. Sin embargo, que cuando sea practicable (es decir: si la superficie preparada no es absorbente), un compuesto termoconductor, con base de óxido de zinc, se puede introducir entre las uniones de los termopares y las superficies para incrementar futuros contactos térmicos.

6.3.3 Materiales de relleno. Cuando se ensayen los materiales con los que se ha realizado el relleno, el espesor de la muestra deberá de ser de al menos 10 veces la dimensión de las materias extras, granos, escamas, etc. del material de juntas/uniones. Para la preparación de la muestra(s), se recomienda que una porción representativa sea ligeramente mayor que la cantidad necesitada para el ensayo y sea tomada de la muestra, de la misma forma que deberá ser pesada antes y después de que haya sido acondicionada según el apartado 7.2. A partir de estas masas, se calcula el porcentaje de las mismas que se ha perdido.

Una cantidad de material acondicionado es pesado, de tal manera que producirá una (o dos) muestras de la densidad perseguida, usando el procedimiento descrito en la norma correspondiente de producto. Dado que el volumen final de la muestra es conocido, la masa requerida puede ser determinada. Las muestras son entonces montadas rápidamente en el equipo o dejados para alcanzar el equilibrio con la atmósfera estándar del laboratorio (23 °C, 50% de humedad relativa), de acuerdo con las de la norma de producto de aplicación o en el apartado 7.2.

7 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

7.1 Generalidades

Un procedimiento de ensayo, comprende un conjunto de operaciones para determinar las propiedades de la transferencia de calor deseada y cumplimentada en la muestra preparada, tal como se indica en el apartado 6.3. Éstas puede ser separadas en el interior del acondicionamiento descrito en el apartado 7.2 y el resto de las operaciones para llevar a cabo el ensayo con la placa guardada o en el equipo medidor de flujo de calor, tal como se describen en el apartado 7.3.

7.2 Acondicionamiento

7.2.1 Generalidades. Existen básicamente dos procedimientos para materiales de albañilería: en muestras secas o húmedas.

NOTA 1 – Para ver datos sobre la base teórica para las mediciones sobre materiales secados o húmedos, dados en [1] y [2], también, ver Bibliografía.

El acondicionamiento debe de realizarse, de acuerdo con la norma de producto que sea de aplicación.

NOTA 2 – El secado, requiere la definición de un estado convencional seco, véase el apartado 7.2.2. Un estado convencional de secado, se produce cuando se calienta en un horno adecuadamente ventilado a una temperatura de 105 °C o tal como se especifique en la norma de producto que sea de aplicación. El proceso de secado no debería de alterar la naturaleza física o química del material. Si el valor de la conductividad térmica es requerido para varios contenidos de humedad, o en un equilibrio del contenido de humedad del material en el ambiente del laboratorio, entonces se somete la muestra que no ha sido previamente secada en el horno a una masa constante por medio de la exposición al aire en un habitáculo con unas condiciones de (23 ± 2) °C y una apropiada humedad relativa con un $\pm 5\%$, véase el apartado 7.2.3.2.

7.2.2 Acondicionamiento para las mediciones sobre materiales secos. Las mediciones de rutina, deberían ser llevadas, dentro de lo posible, sobre los materiales secos.

Se seca la muestra para mantener una masa constante, en un horno a 105 °C hasta 110 °C que toma el aire desde un ambiente a (23 ± 2) °C y $(50 \pm 5)\%$ de humedad relativa.

Se considera establecida la masa, constante cuando el cambio de la misma en la muestra del ensayo, y después de un periodo de 24 h es aleatoria y menor que el equivalente de $0,1 \text{ kg/m}^3$ (o 0,01% por volumen).

Después del secado, la muestra del ensayo debe de ser encerrada en un envoltorio que la mantenga aislada de manera hermética contra el vapor. El envoltorio deberá de ser lo suficientemente impermeable como para prevenir un cambio en el contenido de humedad, que sea mayor de $0,01 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, ver anexo G.

NOTA 1 – Un envoltorio con una resistencia a la humedad (difusión) de $Z_v > 10^5 \text{ s/m}$ es suficiente.

La masa de la muestra debe de ser medida antes y después del ensayo, para determinar el relativo cambio de masa, según el apartado 8.1.2.

La envolvente que proporciona hermeticidad al vapor (traspaso de agua), podrá ser omitida, si la relación de la acumulación de humedad en la muestra del ensayo, y durante éste es menor del $0,01 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ y no se observa condensación en el plato/lámina fría.

NOTA 2 – Un envoltorio para proporcionar hermeticidad al vapor puede cambiar las resistencias en los contactos y se puede tener que tomar precauciones especiales, para medir las temperaturas de superficie, correctamente.

7.2.3 Acondicionamiento para las mediciones en materiales húmedos

7.2.3.1 Generalidades. Las mediciones sobre materiales con humedad, son necesarias, para establecer la transmisión térmica del material húmedo, λ^* , con un contenido de humedad en equilibrio con un 50% de humedad relativa a 23°C , o bien para establecer la relación general entre λ^* , y el contenido de humedad. Estas mediciones no deberán ser normalmente, de rutina, pero realizados en ocasiones especiales, para establecer la relación necesaria con el componente de cada material de construcción. Si se planea previamente mediciones de rutina, sobre materiales con humedad, las precisiones sobre los ensayos y los tiempos de ensayo deben ser ejecutados con cuidado, véase el apartado 7.2.3.4.

7.2.3.2 Acondicionamiento en una atmósfera específica. Se acondicionan las muestras de ensayo con la cantidad contenida de humedad, con anterioridad a las pruebas. Esta norma esta restringida para el contenido de humedad en la relación higroscópica, que muestran los contenidos de humedad en equilibrio con un 98% de humedad relativa o menos.

NOTA 1 – Se da información del ensayo para cantidades altas de humedad, ver [1] en Bibliografía.

NOTA 2 – Los contenidos escogidos de humedad, son:

- 1) en equilibrio con un 50% de humedad relativa (debido a los requisitos de la norma de producto);
- 2) en equilibrio con un 80% de humedad relativa, (debido a que por encima de este nivel, la estimación de errores tal como se dan en 7.2.3.4 serán invalidados).

Los procedimientos de acondicionamiento para una distribución prácticamente uniforme, se llevarán a cabo en dos pasos.

Paso 1. Se sitúa la muestra de ensayo en una atmósfera de 23/xx o en un horno ventilado a 40°C , 70°C ó 105°C . Periódicamente se retira y se pesa la muestra para determinar los cambios de masa, hasta que:

$$\Delta w < \Delta w_1$$

donde

23/xx significa una atmósfera controlada, con la temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ y la humedad relativa de $(xx \pm 5)\%$, siendo xx una humedad relativa comprendida entre el 0% y el 98%;

Δw es el cambio en el contenido de humedad, en kg/m^3 durante un periodo de d^2 horas, siendo d el espesor de la muestra, expresado en centímetros;

Δw_1 es el valor límite apropiado para el cambio del contenido de humedad, en kg/m^3 .

NOTA 3 – El anexo F da indicaciones para la determinación de Δw_1 .

En muchos casos, el contenido de la humedad ya está contenida en el rango higroscópico cuando el producto es llevado al laboratorio de ensayo. En este caso, el paso 1 puede omitirse, y sólo el paso 2, es necesario.

Paso 2. Se sitúa la muestra del ensayo en una atmósfera de 23/xx durante un mínimo de γd^2 horas, donde γ es el factor condicionante del tiempo, y d es el espesor de la muestra, expresado en centímetros.

NOTA 4 – El anexo F da indicaciones para la determinación de γ .

Después del acondicionamiento de la muestra del ensayo, debe de ser incluida en un envoltorio, hermético al vapor. El envoltorio deberá de ser lo suficientemente impermeable, como para prevenir un cambio de humedad mayor del 0,01 kg/m³ por hora.

NOTA 5 – Este criterio está explicado en el anexo G. En la práctica, un envoltorio con una resistencia a la humedad (difusión) de $Z_v > 10^5$ s/m es suficiente.

La masa de la muestra debe de ser medida antes y después del ensayo para determinar los cambios relativos de masa de acuerdo con el apartado 8.1.2.

7.2.3.3 Efectos de la humedad en la determinación de la transmisividad higrotérmica

7.2.3.3.1 Consideraciones preliminares. Para determinar λ^* correctamente, es necesario bien impedir la transferencia de masa durante el ensayo o establecer condiciones para las que el efecto de la transferencia de masa en el resultado medido, puede ser estimado.

Los ensayos pueden ser llevados a cabo según los apartados 7.2.3.3.2 ó 7.2.3.3.3.

7.2.3.3.2 Ensayos en donde los movimientos de humedad son tan pequeños, que los efectos de los cambios de fase, durante el ensayo, pueden ser ignorados

NOTA – Ésta es la opción más sencilla dada, siempre que el error significado a continuación, sea aceptable.

Los errores ocurren debido a los cambios de fase y a una distribución no uniforme de la humedad.

El error, er_p , debido a los cambios de fase, expresado en %, es:

$$er_p = 0,25 \times 10^6 \delta_v \varphi / \lambda^*$$

donde

φ es la humedad relativa en el material, en %;

δ_v es la permeabilidad a la humedad con respecto a la humedad por volumen, en m²/s.

La redistribución de la humedad originará que la resistencia térmica se incremente durante el ensayo. El error en la conductividad térmica, debido a esta redistribución (er_d) está limitado al 0,5 %, e indica que el número de Fourier F_o no excede de 0,25, según:

$$F_o = 4 D_w t / d^2 = (4 \delta_v v_{sat} t) / (d^2 \xi_d) \leq 0,25$$

donde

v_{sat} es la humedad por volumen en el estado saturado, en kg/m³;

ξ_d es la capacidad diferencial de humedad, en kg/m³.

Los valores típicos de δ_v , λ^* , ξ_d y v_{sat} para diferentes materiales, son dados en la tabla 1 y en la tabla 2.

Los errores debidos a los cambios de fase y a la distribución no uniforme de humedad, tienen signos opuestos, de tal manera que el error máximo originado por la combinación de estos dos efectos es:

$$\max(er_p, er_d)$$

donde

er_p es el error debido a los cambios de fases, en %;

er_d es el error debido a la distribución no uniforme de la humedad, en %.

Tabla 1
Valores típicos de δ , λ^* y ξ para diferentes materiales

Material	δ m ² /s	λ^* W/(mK)	ξ_d kg/m ³
Hormigón	$0,3 \times 10^{-6}$	1,75	100
Hormigón fraguado con vapor de agua a gran presión	$3,0 \times 10^{-6}$	0,15	150
Ladrillo	$4,0 \times 10^{-6}$	0,5	20
Hormigón de mortero de cal (enlucidos)	$1,5 \times 10^{-6}$	1,0	150

Tabla 2
Valores de v_{sat} para diferentes temperaturas

Temperatura °C	v_{sat} kg/m ³
0	$4,8 \times 10^{-3}$
5	$6,8 \times 10^{-3}$
10	$9,4 \times 10^{-3}$
15	$12,8 \times 10^{-3}$
20	$17,3 \times 10^{-3}$

7.2.3.3.3 Medida en el equilibrio de humedad. Si no es posible aceptar las imprecisiones de los cambios de fase, ni la distribución no uniforme de humedad, la medición se puede realizar en equilibrio de humedad.

Existen diferentes opciones, dependiendo si es posible medir o calcular la temperatura y la distribución de la humedad en el equilibrio, ver el gráfico del flujo en la figura 3.

NOTA 1 – El contenido medio de humedad en la muestra, w_m , se asume que es siempre conocido.

Existen dos caminos preferentes, marcados como A y B en el gráfico del flujo.

Camino A. La distribución de la humedad es considerada como uniforme y λ^* es determinada al contenido medio de humedad, w_m .

NOTA 2 – Esto sólo proporciona un punto de la curva de la relación entre λ^* y w .

Para conseguir que la distribución de la humedad, pueda considerarse uniforme, el ensayo debe ser llevado con un diferencial de temperatura que no exceda de 10 K y el contenido de humedad en el equilibrio, no excediendo del 80% de la humedad relativa. Siempre que estos requisitos sean realizados, el error debido a la distribución no uniforme de la humedad, es menor que un 2%.

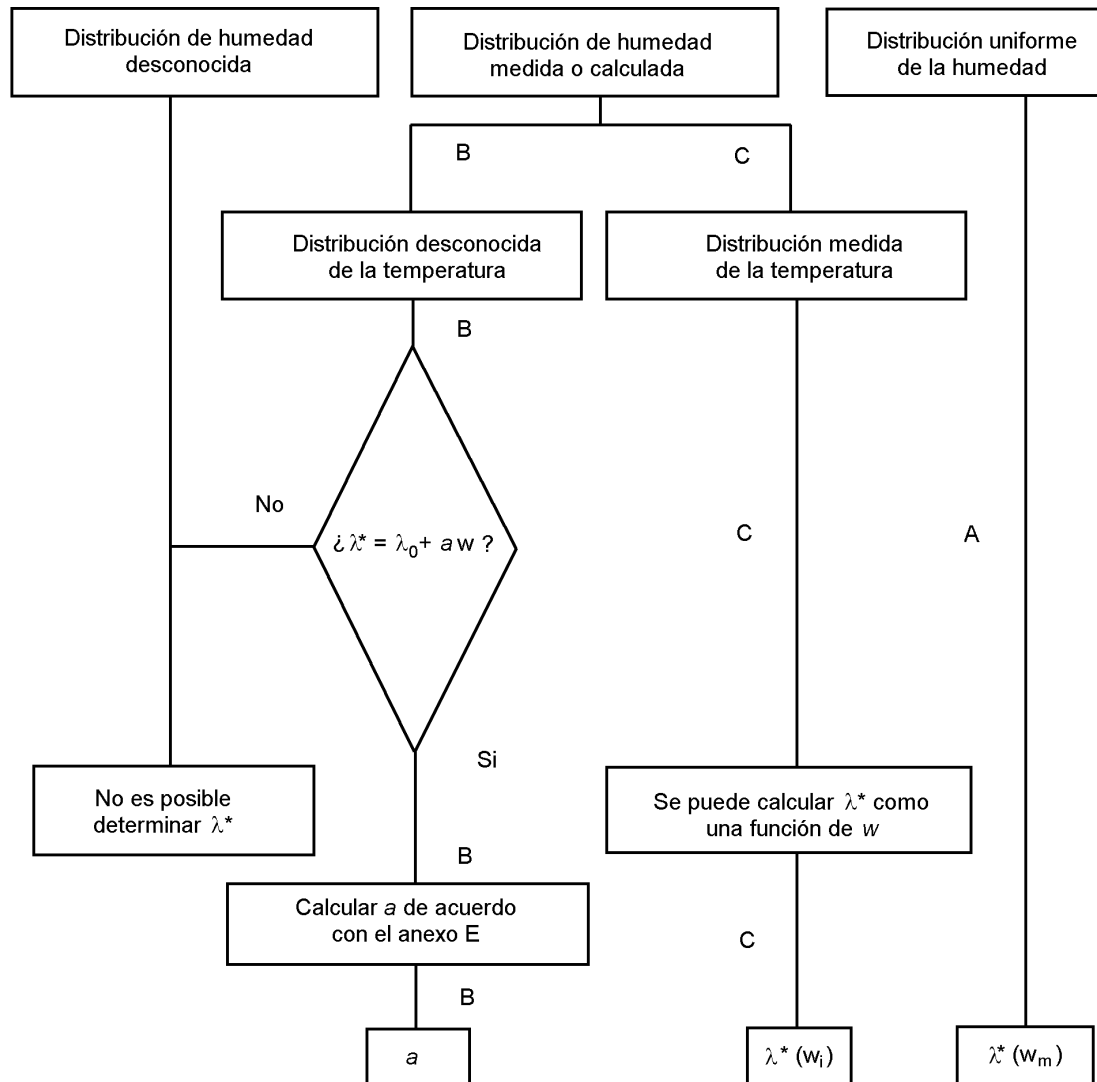


Fig. 3 – Cuadro sinóptico donde se indica como medir o calcular la temperatura y la distribución de la humedad

Camino B. Distribución de la humedad, calculada o medida, y la relación entre λ^* y entre w , asumida como lineal

La distribución de la humedad puede ser determinada bien por:

- ensayos paralelos con el mismo material y las mismas condiciones de contorno ver anexo E, o
- cálculos, tal como se describen en el anexo E

λ^* puede obtenerse a partir de:

$$\lambda^* = \lambda_0 + a w$$

donde la constante a , es calculada según el anexo E.

7.2.3.4 Estimación de los errores

7.2.3.4.1 Consideraciones preliminares. El error total en la determinación de λ^* es la suma del error del equipo y los errores causados por los efectos no deseados de la humedad.

Los errores causados por los efectos no deseados de la humedad, dependen de los procedimientos de medición que han sido usados. La estimación, es por lo tanto, descrita para cada procedimiento.

7.2.3.4.2 Mediciones de acuerdo con el apartado 7.2.3.3.2. Tal como se ha establecido en el apartado 7.2.3.3.2, el error estimado es el mayor de los debidos a los cambios de fase y para la distribución no uniforme de la humedad, calculada para las propiedades específicas del material. Para permitir la variación de las tres propiedades del material, es decir permitir que el $\pm 60\%$ del error estimado de λ^* , calculado por el apartado 7.2.3.3.2 debe de ser incrementado en $\sqrt{3(60\%)^2} \approx 100\%$, el error de λ^* debería de ser tomado como dos veces el valor calculado mediante el apartado 7.2.3.3.2.

NOTA – Para cualidades típicas del hormigón fraguado con vapor de agua a gran presión, el error estimado debido a los cambios de fase y a la distribución no uniforme de la humedad, no excederá del 2%, si la duración del ensayo es, entre 2 y 10 días.

7.2.3.4.3 Mediciones de acuerdo con el apartado 7.2.3.3.3. Para el camino A, el error calculado es del 2% y para contar con las variaciones de las propiedades del material, el error estimado en λ^* se toma como 4%.

En el caso del camino B, el error es causado principalmente por imprecisiones en la determinación de la distribución de la humedad. Los otros errores, se encuentran incluidos en el error del equipo.

El error en el coeficiente a , es de hasta un 20% del error del contenido de la humedad, comparar la ecuación (E.2).

7.3 Mediciones

7.3.1 Masa. Justo antes de montar la/las muestra(s) en el equipo, se determina su masa con una precisión mayor del 0,5%.

7.3.2 Espesor y densidad. El espesor de la muestra puede ser bien impuesto por el posicionamiento de la unidad calefactora o enfriadora o el espesor de la(s) muestra(s) como que es/son medida(s) en el comienzo del ensayo, tal y como se indique en la norma de producto que sea de aplicación.

El espesor de la(s) muestra(s) puede ser medido, bien en el equipo con las condiciones existentes de temperatura y compresión de ensayo o fuera de él, con instrumentación que puede reproducir la presión en la muestra durante el ensayo, ver la norma de producto correspondiente.

Para las mediciones del espesor en el equipo, puntos de medida, o para puntos (botones) montados para el propósito de registro, en la parte exterior de las cuatro esquinas de la unidad enfriadora (o de las unidades calefactoras y enfriadoras, para un equipo de muestra única) o a lo largo de los ejes perpendiculares a las unidades, en sus centros, se deberá de usar.

El espesor de la muestra, está determinado a partir de la media de la diferencia en la distancia entre los puntos de toma de medida, cuando la muestra(s) está(n) en posición en el equipo y cuando no lo está(n) y la fuerza misma es empleada para presionar las unidades del equipo unas con otras.

A partir de las dimensiones de la muestra, el espesor de la muestra medida como se indica anteriormente y la masa de la muestra acondicionada, determinada como en el apartado 7.3.1, entonces la densidad así ensayada, puede ser computada.

7.3.3 Selección del diferencial de temperatura. Se selecciona el diferencial de temperatura para que esté de acuerdo con el apartado A.3.8 y norma de producto que sea de aplicación.

7.3.4 Condiciones ambientales. Cuando las propiedades de transferencia de calor son deseadas para la situación en que la muestra esta rodeada por aire (u otro gas), se ajusta la humedad de la atmósfera que rodea las unidades del equipo, durante un ensayo en un punto de rocío con temperatura de por lo menos 5 K por debajo de la temperatura de la unidad enfriadora.

Cuando se incluya la muestra en una envolvente hermética al vapor, para prevenir la migración de la humedad hacia o desde la muestra, las condiciones del ensayo deben de ser tales que no existirán condensaciones de agua en la porción del envoltorio en contacto con el lado frío de la muestra.

7.3.5 Mediciones de la relación del flujo de calor

7.3.5.1 Relación del flujo de calor en el equipo del plato/lámina caliente aislado. Se mide la media de la potencia eléctrica suministrada al área de medición con un $\pm 0,1\%$.

Fluctuaciones o cambios en las temperaturas de las superficies de la unidad calefactora, durante el periodo de ensayo debido a fluctuaciones fortuitas o cambios en su potencia absorbida, no deberán de exceder de $0,3\%$ de la diferencia de temperatura entre las unidades calefactoras y enfriadoras.

Se ajusta y mantiene la potencia suministrada a la sección aislada, preferiblemente mediante un control automático para obtener la variación y equilibrio de temperatura entre la sección de medida y guardada, que es requerida para mantener la suma del desequilibrio y los errores por pérdida de calor en el $0,5\%$ (véase el apartado 6.2).

7.3.5.2 Relación del flujo de calor en el equipo medidor de flujo de calor. Se observa la temperatura media y la salida de fuerza electromotriz del medidor de flujo de calor, la temperatura media asignada y la caída de temperatura a través de la(s) muestra(s) para inspeccionar cuando estén estabilizadas.

Asegurarse de que las fluctuaciones de la temperatura (como una función del tiempo) en la superficie del medidor de flujo de calor, no cause variaciones eléctricas en sus conexiones de salida de más de un 2% durante el periodo de ensayo.

Asegurarse de que la densidad de la relación del flujo de calor, está en un rango tal, que la precisión de la calibración, factor f , y la instrumentación eléctrica para leer las funciones del medidor de flujo de calor, están de acuerdo con el apartado 5.3.5 y los requisitos correspondientes dados en el anexo C.

7.3.6 Control de la superficie fría (para equipos de placa caliente guardada de dos muestras). Cuando se use un equipo de dos muestras, se ajustan las unidades enfriadoras o calentadoras de las superficies frías de tal manera que las diferencias de temperatura a través de las dos muestras no difieran más de un 2% .

7.3.7 Detección del diferencial de temperatura. Se determinan las temperaturas de la unidad calefactora y enfriadora y el centro de la temperatura "aislada" (solamente para equipos de placa/lámina caliente aislada) por los métodos que tienen suficiente capacidad para ser repetidos y también una precisión para alcanzar todos los requisitos relevantes dados en el anexo B para equipos de placa/lámina caliente aislada, o los requisitos dados en el anexo C para equipos medidores del flujo de calor.

7.3.8 Ajustando el tiempo é intervalo de medición. Se realizan conjuntos de observaciones, tal como se indica en los apartados 7.3.5 y 7.3.7 en los intervalos de medición, tal como se recomienda en el apartado A.3.11, hasta y durante un periodo igual a, o mayor que cuatro veces el intervalo de Δt , definido en el apartado A.3.11. Sucesivos conjuntos de observaciones suministran los valores de la resistencia térmica, que no difieren mas de un 1% y no están cambiando periódicamente.

Cuando una estimación precisa de los grupos de tiempos, no es posible o no existe experiencia sobre el ensayo de muestras similares con el mismo equipo y con las mismas condiciones (por ejemplo, cuando se empiezan a realizar las pruebas de rutina en un nuevo producto), se continúan estas observaciones, por lo menos hasta que hayan transcurrido 24 h desde el comienzo de las condiciones estables, tal como se han definido.

NOTA – Para inspeccionar rápidamente, la consecución de las condiciones del estado estable, puede ser de ayuda el registro gráfico de las cantidades relevantes medidas.

7.3.9 Masa final y mediciones del espesor. Para complementar las observaciones incluidas en el apartado 7.3.8, se medirán inmediatamente la(s) masa(s) de la(s) muestra(s). Se repite la medición del espesor, se informa de cualquier cambio en el volumen de la muestra.

8 CÁLCULOS

8.1 Densidad y cambios de masa

8.1.1 Densidades. Se calcula la densidad ρ_0 y/o ρ_c de la muestra acondicionada que ha sido ensayada, tal como sigue:

$$\rho_0 = m_2/V$$

$$\rho_c = m_3/V$$

donde

ρ_0 es la densidad del material seco tal como se ha ensayado;

ρ_c es la densidad del material después de un procedimiento de acondicionamiento más complejo (muy frecuentemente en equilibrio con la atmósfera estándar del laboratorio);

m_2 es la masa del material después de secado;

m_3 es la masa del material, después de un procedimiento de acondicionamiento más complejo;

V es el volumen ocupado por el material, después del secado o acondicionado.

8.1.2 Cambios de masa. Se calcula el cambio relativo de masa del material tal como es recibido, para su secado, Δm_r , o debido a un procedimiento más complejo, Δm_c :

$$\Delta m_r = (m_1 - m_2)/m_2$$

$$\Delta m_c = (m_1 - m_3)/m_3$$

donde

m_1 es la masa del material en su estado de recepción;

m_2 y m_3 son tal como se definen en el apartado 8.1.1.

Cuando sea requerido por las normas de producto, o cuando sea considerado de ayuda para evaluar las condiciones de ensayo correctamente, además de Δm_c , se calcula el siguiente cambio relativo de masa Δm_d debida al acondicionamiento después del secado:

$$\Delta m_d = (m_3 - m_2)/m_2$$

Se calcula la masa relativa recuperada, Δm_w , de la muestra durante el ensayo, en relación con la masa inmediatamente antes del ensayo, con la ecuación:

$$\Delta m_w = (m_4 - m_5)/m_5$$

donde

m_4 es la masa del material en la muestra inmediatamente después del ensayo;

m_5 es la masa del material de la muestra, secado o acondicionado inmediatamente antes del ensayo (puede ser $m_5 = m_2$ o $m_5 = m_3$)

8.2 Propiedades de la transferencia de calor

8.2.1 Generalidades. Para realizar todos los cálculos, se usan los valores medios de los datos observados del estado estable. El conjunto de observaciones descritas en el apartado 7.3.8, deberán ser usados en los cálculos; otro conjunto de observaciones durante el estado estable, pueden ser usadas, siempre las propiedades de transferencia de calor, derivadas de cada uno de estos conjuntos, no difieran más de un 1% de aquellos que provienen de los conjuntos descritos en el apartado 7.3.8.

8.2.2 Mediciones mediante el equipo de placa caliente guardada. Se calcula la resistencia térmica R , usando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} A$$

o el factor de transferencia \mathcal{T} , usando la siguiente ecuación:

$$\mathcal{T} = \frac{\Phi d}{A(T_1 - T_2)}$$

donde

Φ es la medida de la potencia suministrada a la sección medición de la unidad calefactora;

T_1 es la medida de la temperatura de la(s) muestra(s) en el lado caliente;

T_2 es la medida de la temperatura de la(s) muestra(s) en el lado frío;

A es el área de medida tal como se ha definido en el apartado 5.2.5. Para equipos con dos muestras, el área de medida definida en el apartado 5.2.5, debe de multiplicarse por dos;

d es la media del espesor de la muestra(s).

Si las condiciones descritas en los apartados A.3.2 y A.4.3 son aplicables, se calcula bien la transmisividad térmica λ_t , o la transmisividad higrótérmica, λ^* , o la conductividad térmica, λ , (o la resistividad térmica, $r = 1/\lambda$), usando la siguiente ecuación:

$$\lambda_t \text{ ó } \lambda^* \text{ ó } \lambda = \frac{\Phi d}{A(T_1 - T_2)}$$

donde Φ , A , T_1 , T_2 y d son tal como se han definido anteriormente.

8.2.3 Mediciones con el equipo medidor de del flujo de calor

8.2.3.1 Configuración con muestra única

8.2.3.1.1 Configuración de un medidor de flujo de calor único. Se calcula la resistencia térmica, R , usando la siguiente ecuación.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{f e_h}$$

donde

f es el factor de calibración del medidor de flujo de calor;

e_h es la salida del medidor de flujo de calor;

T_1 y T_2 tal como se han definido en el apartado 8.2.2;

o se calcula el factor de transferencia, \mathcal{J} , usando la siguiente ecuación:

$$\mathcal{J} = \frac{f e_h d}{T_1 - T_2}$$

donde T_1 , T_2 y d , son como se han definido en el apartado 8.2.2

Si las condiciones descritas en los apartados A.3.2 y A.4.3, son aplicables, se calcula bien la transmisividad térmica, λ_t o la transmisividad higrótérmica, λ^* , o la conductividad térmica, λ , (ó la resistividad térmica, $r = 1/\lambda$), usando la siguiente ecuación:

$$\lambda_t \text{ ó } \lambda^* \text{ ó } \lambda = \frac{f e_h d}{T_1 - T_2}$$

donde f , e_h , T_1 , T_2 y d , son como se han definido anteriormente.

8.2.3.1.2 Configuración de dos medidores del flujo de calor. Todos los requisitos de 8.2.3.1.1, son aplicables a esta configuración, con $f e_h$ reemplazado por $0,5 (f_1 e_{h1} + f_2 e_{h2})$, donde los índices 1 y 2 se refieren al primero y segundo medidor de flujo de calor, respectivamente (de los que las temperaturas de superficie, son T_1 y T_2 , respectivamente).

8.2.3.2 Configuración de dos muestras. Se calcula la resistencia térmica total, R_t , tal como sigue:

$$R_t = \frac{(T'_1 - T'_2) + (T''_1 + T''_2)}{f e_h}$$

y si las condiciones descritas en los apartados A.3.2 y A.4.3, son aplicables, se calcula la media de la transmisividad térmica, λ_{tm} , o la media de la transmisividad higrótérmica, λ^*_{m} , o la media de la conductividad térmica λ_m (o la resistividad térmica, $r_m = 1/\lambda_m$), usando la siguiente ecuación:

$$\lambda_t \text{ ó } \lambda^* \text{ ó } \lambda = \frac{f e_h}{2} \left(\frac{d}{(T'_1 - T'_2)} + \frac{d''}{(T''_1 + T''_2)} \right)$$

donde los símbolos son como los señalados en el apartado 8.2.3.1.1 como y' y'' se refieren a las dos muestras (' para la primera muestra, y '' para la segunda).

9 INFORME DEL ENSAYO

Si los resultados deben ser presentados de acuerdo con esta norma, deben de ser incluidos todos los requisitos, que de alguna manera se deben cumplir; para excepciones permitidas, véase *r*.

El informe de los resultados de cada ensayo deberá de incluir lo siguiente (los valores numéricos reportados deberán reflejar los valores medios de las dos muestras, tal como se han ensayado el valor de la muestra para un equipo de una sola muestra).

- El método usado (placa caliente aislada, o el medidor de flujo de calor, de acuerdo con esta norma), tipos de equipos usados (con una o dos muestras, véanse los apartados 5.2.2, 5.2.3 o 5.3.1) y la identificación del equipo. Se establece un método para reducir las pérdidas de calor en los extremos. La temperatura del ambiente que rodea el equipo, durante el ensayo. Norma de producto aplicable a la(las) muestra(s) a ensayar.

- b) Nombrar o identificar por otro medio el material, incluyendo una descripción física, que ha sido ya suministrado por el fabricante.
- c) Descripción de la muestra, y referencia a la norma de producto de aplicación con las que el muestreo y la preparación de la muestra fue llevada a cabo.
- d) Espesor de las muestras en metros, especificando bien si ha sido impuesto o medido. Referencia al método específico usado, si ha sido impuesto por una norma de producto. Criterios a partir de la norma de producto para definir el espesor impuesto.
- e) Método y temperaturas de condicionamiento.
- f) Densidades del material acondicionado tal como se ensaya.
- g) Cambios relativos de masa durante el secado y/o el acondicionado (véase el apartado 8.1)
- h) Cambio relativo de masa durante el ensayo (véase el apartado 8.1). Una vez que se ha observado el espesor (y volumen), que ha cambiado durante el ensayo (véase el apartado 7.3.9).
- i) Promedio de la diferencia de temperatura a través de la muestra(s) durante el ensayo, véase el apartado 7.3.7 en °K.
- j) Temperatura media del ensayo en °K o °C.
- k) Densidad de la relación del flujo de calor a través de la muestra durante el ensayo ($q = \Phi/A$ para equipo de placa/lámina, caliente aislada o $q = f e_h$ para el equipo medidor de flujo de calor, véase el apartado 8.2).
- l) Resistencia térmica o factor de transferencia de la muestra(s). Cuando sea aplicable la resistividad térmica, la conductividad térmica, la transmisividad térmica, o la transmisividad higratérmica.
- m) Fecha de realización del ensayo; duración del ensayo completo y de la parte de estado estable, si esa información es requerida por norma de producto de aplicación.

Para el equipo medidor de flujo de calor solamente: fecha de la última calibración del medidor de flujo de calor. Tipo o tipos de calibración de muestras usadas, su resistencia térmica, fecha de la certificación de la muestra, fuente de la certificación, caducidad de la fecha de calibración, y número de la certificación del ensayo.
- n) Orientación del equipo; vertical, horizontal o cualquier otra orientación. En el caso de un equipo de una sola muestra, la posición del lado caliente de la muestra, cuando no este situada verticalmente superior, inferior o en cualquier otra posición.
- o) Para los ensayos realizados usando envolturas impermeables al vapor de agua, la información deberá ser dada, también, sobre la naturaleza y espesor de la envolvente.
- p) Una representación gráfica de los resultados en los informes, debe de ser suministrada cuando sea requerida por la norma de producto de aplicación. Esto consistirá en el reflejo en un gráfico, de cada valor de las propiedades térmicas obtenidas referido a la correspondiente temperatura media del ensayo, traspasada a un gráfico como ordenadas y abcisas respectivamente. Gráficos de la resistencia térmica o del factor de transferencia, como una función de espesor de la muestra, deben de ser dadas cuando sean requeridas por la norma de producto de aplicación.
- q) El informe deberá contener información sobre la resistencia térmica de una superficie estimada, o sobre los errores asociados cuando se usen láminas de contacto, véase el apartado A.3.6.

Una declaración indicando el máximo error esperado en una propiedad medida, tal como se indica en los apartados 5.2.8 y 5.2.9 para equipos de placa caliente guardada, o en el apartado 5.3.5 para equipos de medidor de flujo de calor, debe de ser incluido en el informe del ensayo.

Cuando uno o más de los requisitos establecidos en esta norma o en la Norma EN 1946-2:1999 o EN 1946-3:1999 no son totalmente cumplimentados por la(s) muestra(s) (ver también r) sobre el estado de no aceptación) se recomienda que una estimación completa del error o errores en la propiedad medida debe de ser incluida en el informe.

Las correcciones sobre el contenido de humedad, no deben de ser incluidas en el informe del ensayo, pero manejados en un informe por separado, por ejemplo: sobre los valores definidos de diseño.

- r) Cuando las circunstancias o requisitos excluyan la completa conformidad con el procedimiento del ensayo descrito en esta norma, las excepciones permitidas por la norma de producto, puedan ser realizados, pero deben de ser específicamente explicados en el informe. Una redacción apropiada, podría ser: Este ensayo cumple con todos los requerimientos de la Norma EN 12664:2001 – *Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica* con la excepción de (a continuación una lista completa de la excepciones que se expone a continuación").
- s) Nombre del operario que ejecuta el ensayo.



ANEXO A (Normativo)

**LIMITACIONES PARA LA IMPLANTACIÓN DEL
PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y SOBRE LAS PROPIEDADES MEDIBLES****A.1 Consideraciones sobre la transferencia de calor y propiedades medidas**

Cuando se ensayan productos con resistencia térmica mediana o baja, bien homogéneos o con una estructura porosa, o conteniendo agregados porosos, las propiedades térmicas del material seco y húmedo, son de interés. La conductividad térmica es una propiedad intrínseca de un material homogéneo, donde el calor es transferido únicamente mediante conducción. La transferencia real de calor, con la mayoría de los materiales de construcción, pueden incluir una combinación compleja de diferentes contribuciones de:

- conducción en las fases sólida y gaseosa;
- transferencia de masa (en materiales húmedos);
- radiación;
- convección (en algunas condiciones de funcionamiento);

además de sus interacciones. Mientras que estos fenómenos de transferencia de masa y calor, son transitorios, alguno de ellos tienen contribuciones térmicas a largo plazo, que deberán ser reconocidas en la evaluación de las prestaciones térmicas. Para tales materiales, donde el calor es transferido no solo por conducción, la propiedad de transferencia de calor, muy frecuentemente y de manera impropia, llamada “conductividad térmica”, calculada para una muestra, aplicando una fórmula definida para la relación del flujo de calor medido, el diferencial de temperatura y las dimensiones, entonces, puede no ser una cualidad intrínseca del material por sí mismo, dado que dependerá de las condiciones de ensayo. Esta propiedad debería por lo tanto, ser llamada “factor de transferencia” (el factor de transferencia, es a menudo, denominado “aparente” o “conductividad térmica efectiva”). El factor de transferencia, puede tener una dependencia importante en la distribución de la humedad y las condiciones de ensayo de una muestra con humedad o sobre el espesor de la misma y/o sobre el diferencial de temperatura para una temperatura de ensayo idéntica, media, y sobre las características de radiación, de las superficies, adjuntando aquellas de la muestra, cuando se ensaya con muestras de alta porosidad.

NOTA – Mientras que el ensayo con una muestra húmeda, se contempla en esta norma, el problema específico del ensayo de muestras cuyo espesor exceda de las capacidades del equipo, y/o exhibiendo el llamado efecto del espesor, queda contemplado en la Norma EN 12939, véase la Bibliografía.

La propiedad intrínseca del material, cuando se combinan la conducción y la radiación, se llama “transmisividad térmica”. Para materiales húmedos, la propiedad intrínseca, dependiendo del contenido de humedad, en un equilibrio de humedad, y no afectada por el movimiento de ella, es llamada “transmisividad higrotérmica”. La transmisividad higrotérmica es necesaria, junto con el conocimiento de la distribución de la humedad, bajo las condiciones de servicio, para la evaluación de los valores de diseño, de las propiedades térmicas.

Por todas las razones anteriormente expuestas, la resistencia térmica, así como el factor de transmisión, es una propiedad que describe adecuadamente el comportamiento térmico de la muestra bajo las condiciones específicas del ensayo. Si existe la posibilidad de la actuación de convección en el interior de la muestra, (por ejemplo: muestras conteniendo agregados gruesos y teniendo una estructura abierta), la orientación del equipo, el espesor y el diferencial de temperatura, pueden influir sobre el factor de transferencia y la resistencia térmica.

Si la propiedad de transferencia de calor de varias muestras del mismo material, es medida, esta propiedad puede:

- 1) variar debido a la variabilidad de la composición del material o muestras del mismo;
- 2) ser afectado por la humedad u otros factores;
- 3) cambio con el tiempo;
- 4) cambio con la temperatura indicada;
- 5) dependiendo sobre el histórico térmico principal.

Será reconocido, por lo tanto, que la selección de un valor típico de las propiedades de la transferencia de calor representativas de un material en una aplicación particular, debe de estar basada en unos esquemas de muestreo apropiados, condiciones de ensayo y reglas de conversión, véase también el capítulo A.4.

A.2 Definiciones

A.2.1 conductividad térmica , λ , en un punto P: Cantidad definida en cada punto P de una conductividad pura media, mediante la siguiente relación entre los vectores q y el gradiente (T):

$$q = - \lambda \text{ grad } (T)$$

NOTA – En el caso mas general, la conductividad térmica es un tensor de nueve elementos y no una constante.

A.2.2 medio térmicamente homogéneo: Medio en el que la conductividad térmica no es una función de la posición dentro del medio pero puede ser una función de la dirección, tiempo y temperatura.

A.2.3 porosidad, ξ : El volumen total de los huecos con poros medios (un poro medio, es aquel que es heterogéneo, debido a la presencia de por ejemplo: fibras, paredes celulares, gránulos) dividido por el volumen total del medio. La porosidad local, ξ_p en el punto P, es la porosidad en el interior de la muestra, cuando el volumen de una parte elemental de la muestra, es pequeña con respecto a ella misma, pero suficientemente grande para evaluar una media significativa.

A.2.4 medio poroso homogéneo: Medio en el que la porosidad local es independiente del punto donde se calcula el valor (EN ISO 9251:1995)

NOTA – Muchos de los medios y de las muestras con resistencia térmica baja, son homogéneos en lo que se refiere a los poros, y no homogéneos (ver la definición de porosidad) térmicamente hablando.

A.2.5 medio isotrópico térmico: Medio en el que la conductividad térmica, no es una función de la dirección, pero sí lo puede ser de la posición dentro del medio, con respecto al tiempo y a la temperatura.

NOTA – La conductividad térmica en un medio isotrópico, es definida a través de un solo valor en cada punto, en lugar de una matriz de valores.

A.2.6 medio térmicamente estable: Medio en el que la conductividad térmica no es una función de tiempo, pero puede ser una función de coordinación entre la temperatura, y cuando sea aplicable, de la dirección.

A.2.7 conductividad térmica media de una muestra: Propiedad definida en condiciones de estado estable en un cuerpo que tiene la forma de una plancha limitada, por dos caras planas, paralelas, isotérmicas, y por extremos adiabáticos perpendiculares a las caras que son realizadas de material térmicamente homogéneo, isotrópico (o anisótropo con un eje simétrico, perpendicular a las caras), estable solamente dentro de la precisión de una medición y del tiempo requerido para ejecutarla, y con la conductividad térmica constante o una función lineal de la temperatura.

A.2.8 factor de transferencia de una muestra: Definido por

$$\mathcal{J} = \frac{q d}{\Delta T} = \frac{d}{R}$$

NOTA – Esta definición es aplicable a cualquier ensayo de estado estable con una placa caliente guardada o un equipo medidor de flujo de calor, incluyendo por ejemplo mediciones con muestras que incluyan capas de aire, donde la conducción, convección, radiación y migración de humedad, tienen lugar conjuntamente. Esto, depende de condiciones experimentales, por ejemplo: diferencial de temperatura, flujo de vapor y de líquido, distribución de la humedad en el interior de la muestra, emisividad del equipo y espesor de la muestra, y en estas condiciones, se caracteriza una **muestra** en relación con el desplazamiento de la humedad y/o la combinación de la conducción, convección y radiación, en lo que se refiere a la transferencia de calor. Es frecuentemente designada como conductividad térmica media equivalente o efectiva de una **muestra**.

A.2.9 Transmisividad higrótérmica de un material, λ^* : Definida como la relación de la densidad del conjunto de mediciones de flujo de calor y del gradiente de temperatura, con la conductividad térmica. Esto se aplica a los materiales húmedos, durante las condiciones del estado estable, cuando las condiciones de distribución de la humedad en el interior del material se encuentran en equilibrio, y no existen desplazamientos de material (con la posible excepción de la circulación localmente o en el interior de poro). Cuando estas condiciones se aplican, también se cumple que:

$$\lambda^* = \frac{q d}{\Delta T} = \frac{d}{R}$$

NOTA – La transmisividad higrótérmica, es una propiedad intrínseca del material, dependiendo del contenido de humedad y la temperatura, pero no, de las condiciones de ensayo. Puede ser tomado como un factor de transferencia, cuando se apliquen condiciones apropiadas de ensayo. Es frecuente, referirse a este tema, en otras partes, como “conductividad térmica de un material húmedo”. Puede utilizarse en un cálculo unidimensional de estado estable solamente.

A.2.10 transmisividad térmica de un material: Definida por

$$\lambda_t = \frac{\Delta d}{\Delta R}$$

cuando $\Delta d/\Delta R$ es independiente del espesor d .

NOTA – La transmisividad térmica, es independiente de las condiciones experimentales y caracteriza a un **material** aislante en relación con las condiciones combinadas de radiación y conducción, en la transferencia de calor. La transmisividad térmica, puede ser tomada como el límite alcanzado por el factor de transferencia en estratos gruesos, donde se encuentran combinadas la conducción y la radiación. Es frecuente referirse a esto, como conductividad equivalente, aparente o efectiva de un **material**.

A.2.11 propiedad de la transferencia de calor en un estado estable: Término genérico para identificar una de las siguientes propiedades: resistencia térmica, factor de transferencia, conductividad térmica, resistividad térmica, transmisividad térmica e higrométrica, conductancia térmica y conductividad térmica señalada.

A.2.12 tiempo estimado: Tiempo necesario para que una medición, alcance las condiciones de régimen estacionario, con un 1% de desviación.

A.2.13 muestra rígida: Una muestra de un material demasiado duro e inflexible para ser alterado de manera apreciable en la forma, por la presión de la unidad de calor o frío, así como para alcanzar contacto térmico uniforme, sobre la totalidad de las superficies calefactoras y enfriadoras que rodean la muestra.

A.2.14 temperatura de la habitación: Término genérico para identificar una temperatura media del ensayo de una medición, de tal manera, que una persona en la habitación, lo encontraría confortable si fuera a la temperatura de dicha zona.

A.2.15 temperatura ambiente: Término genérico para identificar la temperatura en la proximidad del extremo de la muestra o en la proximidad de todo el equipo.

NOTA – Esta temperatura, es la que existe en el interior de la cabina donde el equipo está instalado o la del laboratorio, donde los equipos no se encuentran emplazados en el interior de una cabina.

A.2.16 operario: Persona responsable de llevar a cabo el ensayo, y presentar los resultados de las mediciones, a través de un informe.

A.2.17 usuario de datos: Persona involucrada en la aplicación e interpretación de los resultados de las mediciones para juzgar el material o las cualidades del sistema.

A.2.18 diseñador: Persona que desarrolla los detalles de construcción de un equipo, para alcanzar los límites de las cualidades prefijadas del equipo en las condiciones de ensayo asignadas, y que identifica los procedimientos del ensayo, para verificar la precisión prevista para el equipo.

A.3 Limitaciones debidas a la implantación del principio

A.3.1 Generalidades

La implantación del principio de medición, enunciado en el capítulo 4, a través del equipo descrito en esta norma, conlleva algunas limitaciones.

A.3.2 Homogeneidad de la muestra

A.3.2.1 Criterios generales. El principio del ensayo enunciado en el capítulo 4, asume las muestras homogéneas: algunos productos de media y baja resistencia térmica, no cumplen con la definición de medio homogéneo poroso, véase el apartado A.2.4. Tales productos, pueden ser ensayados siempre que la dimensión nominal del máximo de agregados, poros, granos, o cualquier otro componente no homogéneo tenga dimensiones menores que un décimo del espesor de la muestra. Si el espesor de la muestra no cumple este requisito, pero es mayor que 5 veces el máximo nominal del agregado o dimensión del poro, la medición puede realizarse si lo permite la norma de producto de aplicación, siempre, que muestren, que este límite es compatible con la precisión del ensayo requerida. Los ensayos no se deberán realizar para espesores menores. Para cualquier otra no homogeneidad, con la excepción de muestras estratificadas, véase el apartado A.3.2.2, la Norma ISO 8302:1991 debe ser consultada.

A.3.2.2 Muestras laminadas. Para muestras que posean una composición heterogénea y laminada, la indicación de la conductividad térmica media medible, de cada estrato, debe de ser menor que dos veces, la de cualquier otro estrato. Esto se deberá de tomar como una regla aproximativa para que cuando se demande al operario por una estimación, esto, no implique necesariamente la medición de la conductividad de cada estrato. Se espera, que en esta situación, la precisión, permanecerá próxima a la de los ensayos previstos para muestras homogéneas. No existen guías que puedan suministrarse, para evaluar mediciones con precisión, cuando estos requisitos no sean cumplidos.

A.3.2.3 Muestras anisótropas. Algunas muestras, mientras cumplen los criterios de la homogeneidad, son anisótropas, mientras que el valor medido, de la conductividad térmica en una dirección paralela a las superficies, es diferente a las obtenidas en una dirección perpendicular a ellas. Para esas muestras esto, puede suponer un desequilibrio mayor y un límite en los errores. Si la relación entre estos dos valores medibles, es mayor que dos, se deberá de consultar la Norma ISO 8302:1991.

A.3.3 Espesor máximo de la muestra

Las condiciones de contorno en los bordes de las muestras, debido a los efectos del límite del aislamiento de los calentadores auxiliares aislados y la temperatura ambiental afectará al error del límite del calor perdido, y de este modo, se limitará el espesor de la muestra para cualquier configuración, tal como se describen en la Norma EN 1946-2:1999, anexo B.

NOTA 1 – Se presentan problemas asociados con las resistencias de contacto, entre la muestra y las superficies de contacto del equipo, que son mayores (la mayoría, críticas), la resistencia térmica mas baja de la muestra, aconseja, para el uso de muestras de gran espesor. Sin embargo, que el incremento en la pérdida de calor en el extremo se incrementa, los conjuntos de esto a límites.

En esta norma, el límite de la relación del extremo de temperatura, e , es definida por:

$$e = (T_e - T_2)/(T_1 - T_2)$$

donde T_e es la temperatura del extremo de la muestra (supuesta uniforme) y $T_1 - T_2$, son respectivamente las temperaturas del lado caliente y frío de la muestra. Para muestras con una conductividad térmica de 0,40 W/(m·K) o menos, cuando no existe un extremo de aislamiento y $0,25 \leq e \leq 0,75$, el máximo del espesor de la muestra, no debería de exceder de aquellos que se indicaron para las dimensiones de algunos equipos corrientes en la columna 4 de la tabla A.1. Los datos de la columna 4, guardan concordancia con la expresión dada en el apartado 2.2.1 de la Norma ISO 8302:1991.

EJEMPLO 1, $e = 0,25$ corresponde a una temperatura del extremo de la muestra, que mantiene 5 K por debajo de la temperatura media de ensayo, cuando el diferencial de temperatura entre el lado caliente y frío de la muestra es 20 K.

NOTA 2 – El error de pérdida de calor es cero para muestras homogéneas isotrópicas, cuando e , está cercano a 0,5. El error para $e = 0,25$ proporcióna el máximo error para $0,25 \leq e \leq 0,75$. Entonces, para cualquier otro valor de e , mayor de 0,25 y hasta 0,75, el límite del error de pérdida de calor es menor.

Cuando el extremo del aislamiento es interpuesto entre el extremo de la muestra y las paredes de la cabina directamente en contacto con el aire del laboratorio, la temperatura del laboratorio es la temperatura de borde. Cuando la temperatura de laboratorio difiere significativamente de la temperatura de ensayo media, e , puede ser marcada fuera del rango de 0,25 a 0,75.

EJEMPLO 2 Una temperatura media de ensayo de 50 °C, una diferencia de temperatura de 20 °C y una diferencia de temperatura de laboratorio de 20 °C da $e = -1$. En este caso, los datos en la tabla A.1 no son más aplicables.

Cuando se aplique las mismas condiciones de borde, las columnas 4 a 6 de la tabla A.1. suministrar el espesor máximo de la muestra para conductividades térmicas de la muestra de hasta 1,6 W/(m·K). Para conductividades térmicas, mayores, en la muestra, el espesor de la columna sexta, se puede de aplicar; para conductividades térmicas entre 0,4 W/(m·K) y 1,6W/(m·K) se puede aplicar una interpolación.

Tabla A.1
Espesor máximo y mínimo permitido en la muestra

Medidas en su conjunto	Sección medidora	Anchura de la guarda	Espesor máximo (extremo del límite) para la conductividad de la muestra de			Tolerancia de planicie (0,025%)	Espesor mínimo (tolerancia de la planicie)	Hueco máximo	Espesor mínimo ¹⁾ (límite del hueco)
			≤ 0,4	0,8	≥ 1,6				
200	100	50	30	35	40	0,05	10,0	1,25	12,5
300	200	50	35	40	45	0,08	15,0	2,50	25,0
300	150	75	45	55	65	0,08	15,0	1,88	18,8
400	200	100	60	70	85	0,10	20,0	2,50	25,0
400	100	150	80	95	110	0,10	20,0	1,25	12,5
500	300	100	65	80	90	0,13	25,0	3,75	37,5
500	250	125	75	90	100	0,13	25,0	3,13	31,3
500	200	150	85	100	120	0,13	25,0	2,50	25,0
600	300	150	90	110	130	0,15	30,0	3,75	37,5
800	500	150	100	120	150	0,20	40,0	6,25	62,5
800	400	200	120	140	170	0,20	40,0	5,00	50,0
1000	500	250	150	180	210	0,25	50,0	6,25	62,5

1) Espesor aplicable para anchos de huecos de acuerdo con la columna novena de la tabla A.1; para huecos más finos, véase el apartado 5.2.5

Para equipos de plato/lámina caliente aislada, solamente, cuando se use un plano aislado adicional, el espesor máximo de la muestra puede ser evaluado como si la guarda fuera extendida hasta el límite del plano de guarda adicional.

Para preservar un gradiente o para el aislamiento del borde, bien realizar los cálculos numéricos, o llevar a cabo investigaciones sistemáticas experimentales en un equipo de diseño similar, para determinar el borde del error del calor perdido.

Cuando se usa un equipo medidor de flujo de calor en una muestra única de configuración simétrica, véase el apartado 5.3.1, el máximo del espesor de la muestra, es indicado en la tabla A.1, se puede incrementar en un 50%, cuando los requisitos de los apartados 4.4 y 4.6 de la Norma EN 1946-3:1999, son conseguidos.

A.3.4 Espesor mínimo de la muestra

El espesor mínimo de la muestra, está limitado por las resistencias de contacto dadas en el apartado A.3.6. Donde la conductividad térmica o la resistividad térmica, es requerida el espesor mínimo de la muestra está también limitado por la precisión de la instrumentación para la medición del espesor.

Cuando se ensayen **muestras no rígidas**, la máxima salida de las superficies del equipo desde un plano (que no deberá exceder de un 0,025% del total de la medida del equipo, véase la séptima columna de la tabla A.1), no deberá inducir bajo ninguna circunstancia una incertidumbre en la medida del espesor de la muestra, mayor del 0,5%: correspondiendo al espesor mínimo de la muestra que está referida en la columna octava de la tabla A.1.

Para el equipo de placa caliente guardada, el mínimo del espesor de la muestra, deberá ser por lo menos diez veces el ancho del hueco de la unidad calefactora, véase el apartado 5.2.5. El hueco en turno que nos interesa, deberá tener un área que no exceda del 5% de la de medición: el ancho máximo del hueco, resultante de este requisitos, es dado en la novena columna de la tabla A.1 y el correspondiente espesor mínimo de la muestra, es dado en la columna décima de la tabla A.1.

A.3.5 Límites máximos para la resistencia térmica

El límite superior de la resistencia térmica que puede ser medido, está limitado por la estabilidad de la potencia suministrada a la unidad calefactora, la capacidad de la instrumentación para medir el nivel de potencia, y la extensión de las pérdidas o ganancias de calor, debidos a los errores de la temperatura no balanceada (analizado en la Norma EN 1946-2:1999) entre la central de medición y las secciones aisladas de las muestras y de la unidad calefactora.

A.3.6 Resistencias de contacto, y planicie

A.3.6.1 Generalidades. Cuando se ensayen muestras (en particular, una de alta conductancia térmica y rígida, véase la definición de “muestra rígida” en el capítulo A.2), inclusive con pequeñas no uniformidades en la superficie de ambos, el equipo y la muestra (superficies no perfectamente planas), permitirán que las resistencias de contacto que no se encuentran distribuidas uniformemente entre las muestras y las placas/láminas de las unidades calefactoras o enfriadoras.

NOTA – Estas razones causan una distribución no uniforme del flujo de calor y una distorsión del campo térmico en el interior de las muestras; además, van a originar unas dificultades en las mediciones con precisión, de la temperatura de la superficie, para conseguir e inclusive van a crear una incertidumbre en la determinación del espesor de la muestra.

Para muestras teniendo resistencias térmicas menor es que $0,3 \text{ m}^2\text{-K/W}$, las técnicas especiales para medición de las temperaturas de la superficie serán requeridas. Las superficies de metal deberían ser mecanizadas o cortadas planas y de manera paralela.

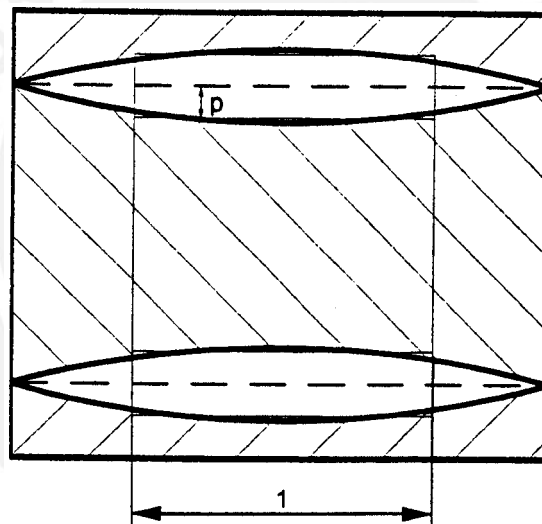
A.3.6.2 Diferencias de temperatura a través de la muestra y las resistencias de contacto. Debido a la posible influencia en las resistencias de contacto entre la muestra y el equipo, véase el apartado A.3.6.1, existen diferentes métodos para determinar la diferencia de temperatura a través de la muestra.

Se recomiendan a continuación algunas técnicas; errores inherentes a métodos comentados descritos en la Bibliografía de la Norma ISO 8302:1991, mientras que en algunas instancias, la elección del método por sí mismo, es dejado a la elección del operador.

- a) Para muestras no rígidas con superficies uniformes y planas, que conforman bien las superficies planas o a las placas, y la resistencia térmica que no es significativamente mas baja que $0,5 \text{ m}^2\text{-K/W}$, el diferencial de temperatura a través de ellos, es normalmente tomado para ser indicado mediante sensores de temperatura, usualmente termopares, permanentemente instalados en las superficies de las unidades calefactoras y enfriadoras.
- b) Las muestras rígidas pueden ser instaladas en el equipo, con láminas de material homogéneo y apropiado, interpuesto entre la muestra y cada placa. La diferencia de temperatura a través de la muestra rígida viene determinada por sensores de temperatura, que se encuentran separados, normalmente termopares montados, en el mismo plano o en el interior de la superficie de la muestra.

Cuando se estén ensayando muestras rígidas sin puntos (láminas) de contacto, tal como se ha indicado en a), para muestras no rígidas, la diferencia de temperatura a través de la muestra es afectada por el contacto imperfecto entre el equipo y las superficies de la muestra. Las bolsas de aire, debidas a las salidas desde las superficies del equipo desde un plano (en ambos lados de la muestra, véase la figura A.1, siendo el caso más desfavorable, en el que la condición supone que la superficie del equipo y de la muestra son cóncavas ["hacen plano"]) y no deberán, bajo ninguna circunstancia, inducir a errores, asociados con la total resistencia térmica añadida, excediendo del 0,5% de la resistencia térmica de la muestra. Este error es independiente del tamaño del equipo: la tabla A.2 muestra, para algunas resistencias térmicas de la muestra, el resultado del máximo permitido de las resistencias de contacto. Desde estas posiciones, el máximo equivalente del espesor del estrato de aire, resultante de la bolsa de aire en ambos lados de la muestra, e inclusive por el efecto de ambos aparatos y de las salidas del equipo y la muestra desde un plano real, han sido derivadas cuando la conductividad térmica del aire esta cercana a $0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, es decir alrededor de la temperatura del habitáculo, ver la tercera columna de la tabla A.2.

NOTA – Considerando los requisitos estrictos de planicie de la tabla A.2, el uso de los puntos de contacto y los termopares montados en superficie, es sugerido inclusive cuando se ensaye con una muestra de material no compresible, teniendo un rango de resistencia térmica desde $0,3 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ hasta $0,5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.



Leyenda

1 Área de Medida

Fig. A.1 – Muestras Rígidas

Tabla A.2
Tolerancias de planicie relativas a la resistencia térmica de la muestra

Resistencia térmica de la muestra $m^2 \cdot K/W$	Resistencia térmica de contacto permitida como máximo $m^2 \cdot K/W$	Equivalente máximo del espesor del estrato de aire (equipo + muestra) mm
0,3	0,0015	0,037
0,4	0,0020	0,050
0,5	0,0025	0,063
0,6	0,0030	0,075
0,8	0,0040	0,100
1,0	0,0050	0,125
1,5	0,0075	0,188

Cuando se ensayen muestras rígidas con puntos de contacto (láminas) de acuerdo con el párrafo b), la incertidumbre adicional en la diferencia de temperatura a través de la muestra indicada por los sensores de temperatura, montados en la muestra, debe de ser menor de 0,5% para las resistencias térmicas de la muestra, mayores de $0,1 m^2 \cdot K/W$ (conductancia térmica menor de $10 W/(m^2 \cdot K)$), pero mayor para resistencia más bajas de la muestra, incrementadas en proporción al incremento de la conductancia térmica de la muestra hasta un máximo de un 4% a $50 W/(m^2 \cdot K)$.

A.3.6.3 Errores en la diferencia de temperatura cuando se usan puntos (láminas) de contacto. Con muestras rígidas, los termopares montados en sus superficies, penetran en las láminas de contacto, por una cantidad al espesor del termopar, de tal manera que la temperatura del mismo, es cercana a la del punto de contacto y a una distancia de la mitad del espesor del termopar desde la superficie. Como los termopares están montados en ambos lados de la muestra, el error total (antes de la corrección) es dos veces tal. Se deberá de efectuar una corrección para este caso, multiplicando la resistencia térmica medida por un factor f_r :

$$f_r = 1 - \frac{d_t}{2d_c} \frac{2R_c}{R}$$

donde

d_t es el espesor de la unión del termopar, en mm;

d_c es el espesor de un contacto único de punto, en mm;

R_c es la resistencia térmica de un punto de contacto único, (lámina) en $m^2 \cdot K/W$

R es la resistencia térmica de la muestra en $m^2 \cdot K/W$.

EJEMPLO Los puntos de contacto (láminas) tienen normalmente una conductividad térmica de $0,1 W/(mK)$ y un espesor de 3 mm, de este modo los dos puntos de contacto, separando la muestra desde el equipo y para que tengan una resistencia térmica total de $0,06 m^2 K/W$. Si los termopares de tipo lámina, son usados con un espesor que no excede de 0,05 mm, la relación $d_t/(2d_c)$ es de $0,05/6$, es decir 0,83%. Esta relación, corresponde también al 0,83% del diferencial de temperatura a través de ambas láminas de contacto. Cuando la resistencia térmica de la muestra, es cercana o mayor que la de los puntos de contacto (láminas), es decir, para $0,06 m^2 \cdot K/W$, el error en la medición de la diferencia de temperatura a través de la muestra es 0,83% o menor. Cuando la resistencia térmica de la muestra, se acerca al límite mas bajo permitido de $0,02 m^2 \cdot K/W$, el error es tres veces mayor, es decir 2,5%. Termopares con mayor espesor inducen proporcionalmente a errores mayores. Sin embargo, este error puede ser corregido en parte, con el factor f_r , dentro de las limitaciones de la incertidumbre en el espesor de la unión y la actual deformación del campo térmico.

Se deberá prestar atención a la temperatura no uniforme de las superficies de las muestras que no tienen un espesor uniforme de los puntos de contacto (láminas), debido a las tolerancias de su planicie o bien las no homogeneidades locales, en la muestra y en los puntos de contacto.

Considerando una muestra que no es perfectamente plana, tal como la de la figura A.1, el error relativo E , en la diferencia de temperatura, que resulta de las superficies de la muestra, que no son perfectamente planas, serán estimadas, según:

$$E = \frac{p/d_c + 2p/d}{R/R_c + 2}$$

donde

p es la desviación de la superficie de la muestra respecto a un plano real, en el punto donde la unión del termopar está situada, en mm;

d es el espesor de la muestra, en mm;

d_c es el espesor de un punto único de contacto (lámina), en mm;

R_c es la resistencia térmica de un solo punto de contacto (lámina), en $m^2 \cdot K/W$;

R es la resistencia térmica de la muestra, en $m^2 \cdot K/W$.

EJEMPLO Para las láminas de contacto descritos en el ejemplo descrito, una tolerancia de planicie, de $p = 0,15$ mm y una muestra que tenga $d = 40$ mm y $R = 0,02$ $m^2 \cdot K/W$, $E = (0,15/3 + 2 \times 0,15/40) / (0,02/0,03 + 2) = 0,02$, es decir un 2% del diferencial de temperatura a través de una muestra ideal, con superficies perfectamente planas. Esto, demuestra que la uniformidad de la temperatura en la superficie de la muestra, es la condición de contorno, para alcanzar la planitud, cuando se ensaya con muestras de muy baja resistencia térmica.

Se debería de tener en cuenta, que cuando se mida el diferencial de temperatura, con el termopar montado en las superficies de la muestra, estas diferencias de temperatura, pueden ser más de cinco veces inferiores, que las que existan entre las superficies del equipo, es decir algunos grados K. Esto, en general, resulta en una reducida precisión en la lectura del termopar. Conexiones diferenciales son recomendadas con muestras de baja resistencia térmica.

Los problemas térmicos de contactos y las mediciones de temperatura se incrementan, mientras que la resistencia térmica del ensayo de la muestra decrecen. Las uniones de los termopares, deberían ser por lo tanto, no mayores de 0,1 mm de espesor, y para muestras con resistencia térmica menor de 0,05 $m^2 \cdot K/W$, una unión de espesor no mayor de 0,04 mm, es recomendada.

Las lecturas de temperatura en una lectura de una superficie fría o caliente de una muestra, deberían coincidir con la media de la temperatura de dicha superficie con un 2% de diferencia de temperatura a través de la muestra y para los termopares situados en el área contigua a la sección de medida. Este requisito, no es fácilmente verificable cuando solamente se utilicen dos termopares por cada lado, o con conexiones diferenciales, y es juzgado para ver si cumple la temperatura del ambiente con una temperatura media del ensayo y extremos de aislamiento conforme con los requisitos que indica la tabla A.1 en el apartado A.3.3 de esta norma. Si, aún así, la variación de la temperatura de cualquier cara, es mayor que 2%, entonces una heterogeneidad local en la muestra o una bolsa de aire entre la lámina fina y muestra o superficies del equipo, es susceptible de ser la fuente de la variación de la temperatura. Si las variaciones de la temperatura, no pueden aportar dentro de los límites especificados en este capítulo, entonces deben anotarse en el informe del ensayo, y con una duda igual a dos veces la desviación estándar de las diferencias de temperatura de la habitación, incluida el error en el análisis.

A.3.7 Paralelismo

El paralelismo no es tan importante como la planicie para los procedimientos descritos en esta norma; la máxima desviación para ver el paralelismo de las superficies de la muestra, es definida por los requisitos del espesor de la muestra y no debe de ser diferente del valor medio en un 2%, véase el capítulo B.5 en el anexo B.

A.3.8 Límites de la diferencia de temperatura

Se recomienda que las diferencias de temperatura en el rango de 10 K hasta 50 K sean usadas, para minimizar los errores en las mediciones de las diferencias de temperatura.

En el caso poco probable que las diferencias de temperatura mas bajas o altas, sean requeridas por la norma de un producto, se deberá de consultar la Norma ISO 8302:1991.

A.3.9 Temperatura máxima de operación

La temperatura máxima de operación de las unidades calefactoras y enfriadoras, puede ser limitada por la oxidación, la fatiga térmica u otros factores que degradan la planitud y la uniformidad de la superficie de la placa/lámina por los cambios de resistividad eléctrica o por los aislamientos sobre componentes eléctricos, que pueden afectar a todas las mediciones eléctricas.

A.3.10 Deformación

Especial cuidado debería de tomarse con las muestras con grandes coeficientes de expansión térmica que deforman excesivamente cuando están sujetas a un gradiente de temperatura. La deformación puede dañar el equipo o puede causar una resistencia de contacto adicional que podrá conducir a errores serios en la medición. Especialmente en equipos diseñados, puede ser necesario tales materiales.

A.3.11 Tiempo establecido y el intervalo de medida

Tal y como el principio del método asume las condiciones del estado estable, para conseguir un valor correcto de las propiedades, es esencial permitir el suficiente tiempo (es decir, el tiempo fijado, véase el apartado A.2.12 para su definición) para los equipos y las muestras, para obtener el equilibrio térmico.

NOTA 1 – En las mediciones sobre buenos aisladores, teniendo una capacidad térmica baja y para casos donde existe una absorción de humedad o al revés, con el consecuente cambio de calor latente, las temperaturas internas (y por lo tanto los contenidos de humedad) de la muestra, pueden requerir un tiempo muy largo para alcanzar el equilibrio térmico. El tiempo requerido para alcanzar el equilibrio, dependerá del equipo, sobre la muestra y sobre otras interacciones, y puede variar en 10 min (por ejemplo cuando se ensaye en un equipo medidor de flujo de calor, bien controlado una fina muestra de material aislante que esta previamente en equilibrio en el laboratorio y mantenida a la temperatura de consigna del ensayo) a más de un día (por ejemplo, cuando se ensaye una muestra gruesa de material aislante, guardada en un equipo de placa/lámina, caliente, aislada, sin control automático de la unidad calefactora o cuando se ensayen muestras donde la redistribución de la humedad, debe de tener lugar durante las mediciones).

Los siguientes documentos deben ser considerados sin falta para evaluar este tiempo:

- a) las capacidades térmicas y el sistema de control de la unidad(es) enfriadora(s) para el equipo de placas/láminas calientes aisladas, o unidades calefactoras o enfriadora para el equipo medidor de flujo de calor.
- b) las capacidades térmicas y el sistema de control de la sección de medición de la unidad calefactora, y la sección aislada de la unidad calefactora (solamente para el equipo de la placa/lámina caliente aislada);
- c) aislamiento del equipo;
- d) difusión térmica, permeabilidad al vapor de agua y espesor de la muestra;
- e) temperaturas de ensayo y ambiente durante el ensayo;
- f) temperaturas y contenidos de humedad en la muestra(s), en el comienzo del ensayo.

NOTA 2 – Como una guía general, los sistemas de control pueden reducir fuertemente el tiempo para alcanzar el equilibrio térmico, pero poco se puede hacer para reducir el tiempo para alcanzar el equilibrio en el contenido de humedad.

Cuando una estimación más precisa para programar el tiempo, no es posible o cuando no existe experiencia en la realización de ensayos en muestras similares, en el mismo equipo y en las mismas condiciones de ensayo, se computa el siguiente intervalo de tiempo, Δt :

$$\Delta t = (\rho_p c_p d_p + \rho_s c_s d) R$$

donde

ρ_p es la densidad;

c_p es el calor específico;

d_p es el espesor.

todo lo relacionado con la placa de la unidad calefactora para el equipo de placa/lámina caliente, aislado o bien la placa de metal (de la unidad calefactora o enfriadora) para el equipo medidor de flujo de calor (el efecto del término $\rho_p c_p d_p$, es minimizado por un control efectivo automático de las temperaturas de las unidades calefactoras y enfriadoras, en un equipo medidor de flujo de calor).

ρ_s es la densidad de la muestra;

c_s es el calor específico de la muestra;

d es el espesor de la muestra;

R es la resistencia térmica de la muestra.

Si se usan controladores automáticos, en particular para alimentar los calentadores eléctricos de la unidad calefactora, entonces Δt se deberá de reducir de acuerdo con la filosofía del control automático para tener en cuenta la presencia de tales controladores.

El tiempo establecido, está relacionado con Δt , normalmente cinco veces para alcanzar el estado estable, con menos de un 1%.

El intervalo de medición es recomendado que no supere el 0,25% de Δt , de tal manera que los valores obtenidos representen los valores medios.

A.4 Limitaciones en las propiedades de las transferencias de calor medibles

A.4.1 Generalidades

Las propiedades de las transferencias de calor medibles en una muestra única, pueden caracterizar el ensayo de la misma en su condición solamente, puede ser una propiedad intrínseca de la muestra o una propiedad que caracterice el producto a partir de la cual el ensayo de la muestra ha sido estudiado. Teniendo en cuenta de los siguientes capítulos, se deben encontrar indicaciones en la norma de producto de aplicación en el significado de los resultados del ensayo.

A.4.2 Resistencia térmica, conductancia térmica o factor de transferencia

Tanto si la resistencia térmica, como la conductancia térmica o del factor de transferencia pueden ser dados como un resultado de una medición de una muestra bajo las condiciones dadas de ensayo, siempre que las condiciones de los criterios de homogeneidad dados en el apartado A.3.2, sean alcanzados.

La resistencia térmica, conductancia térmica o el factor de la transferencia, son a menudo una función de las diferencias de temperatura a través de la muestra. Las diferencias de temperatura pueden ser reflejados en el informe del ensayo.

A.4.3 Conductividad térmica media, transmisividad térmica o transmisividad higrótérmica de una muestra

Para determinar la conductividad térmica media, la transmisividad térmica o la transmisividad higrótérmica de una muestra (cuando se pueda aplicar), los criterios de homogeneidad del apartado A.3.2.1, deben de ser cumplidos, además, para cualquier otra temperatura media, la resistencia térmica deberá ser, también, independiente de la diferencia de la temperatura establecida a través de la muestra. Si este último criterio no es alcanzado, sólo la resistencia térmica de la muestra, en las condiciones dadas de ensayo, debe ser reflejada en el informe.

A.4.4 Conductividad térmica, transmisividad térmica o transmisividad higrótérmica de un material

A.4.4.1 Generalidades. Para determinar la conductividad térmica, la transmisividad térmica, o la transmisividad higrótérmica de un material (cuando sea aplicable), los criterios del apartado A.4.3 deben de ser totalmente cumplidos. Además, una adecuada toma de muestras debe ser realizada, para asegurarse que el material es homogéneo o con poros homogéneos, y que las mediciones son representativas de todo el material, producto o sistema; una guía sobre estas materias se deberá encontrar en la norma de producto, aplicable a la muestra ensayada. El espesor de las muestras debe de ser mayor que aquellas, para las que el factor de transferencia del material, producto o sistema no cambiará en más de un 2%, con futuros incrementos en el espesor.

A.4.4.2 Dependencia del espesor de la muestra. El efecto del espesor de la muestra sobre el factor de transferencia, no es contemplado como relevante para la mayoría de las muestras que deben de ser ensayadas de acuerdo con esta norma.

NOTA – Para evaluar la relevancia del efecto del espesor, consultar la Norma EN 12939, Ver la Bibliografía, conjuntamente con la norma del producto correspondiente.

A.5 Decisiones preliminares

Teniendo establecido que las mediciones válidas son posibles de acuerdo con la norma de producto de aplicación y las limitaciones descritas en este anexo, antes que cualquier medición sea realizada con los equipos de plato/lámina caliente aislada o con medidores de flujo de calor, existentes en el laboratorio, una serie de decisiones se deben tomar, que relacionan las propiedades específicas deseadas o necesitadas, como resultado de cualquier medición directa (por ejemplo: conductividad térmica, la resistencia térmica, o la transmisividad higrótérmica de un material húmedo), o cualquier correlación deseada o necesaria entre las propiedades medidas (por ejemplo: la conductividad térmica como una función de la temperatura o como una función de la densidad a la temperatura dada).

En particular estas decisiones se encontrarán influenciadas por:

- a) La dimensión y la forma del equipo disponible o necesario. Un equipo determinado de una dimensión determinada, puede no ser suficiente para llevar a cabo las mediciones en todos los espesores de la muestra.

Similarmente al rango de ambas, temperatura y condiciones ambientales, tanto disponibles como necesarias, deberán ser contrastadas previamente.

- b) El tamaño y el número de las muestras necesitadas, de acuerdo con la norma de producto de aplicación.
- c) El deseo o la necesidad, de interponer láminas finas de contacto de baja resistencia térmica entre la muestra y el equipo la necesidad o deseo de instrumentar la muestra con sensores de temperatura (termopares), véase el apartado A.3.6.2.

NOTA 1 – Estas técnicas están orientadas para realizar mediciones correctas de las diferencias de temperatura a través de la muestra de resistencia térmica baja, y/o de material rígido.

NOTA 2 – Teniendo en cuenta el riguroso requisito con respecto a la planicie, según la tabla A.2, el uso de las láminas de contacto y de las superficies montadas con termopares, se sugiere que cuando se realicen ensayos con muestras de material incomprensibles, con un rango de resistencia térmica, entre $0,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ hasta $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

- d) La necesidad o no de envolver la muestra en un material impermeable al vapor de agua.

NOTA 3 – Estas técnicas están destinados a impedir bien la absorción de humedad después del secado o el cambio en el contenido de humedad después del acondicionamiento.

e) La necesidad de espaciadores de muestra gruesos o presión aplicada a la muestra.

NOTA 4 – Cuando una persona somete una muestra particular o un estudio de a misma de acuerdo con la norma de producto o requiere información específica sobre las propiedades de la transferencia de calor medida, se asume que el operador puede considerar el impacto en las mediciones de los principios básicos de la transferencia de calor sobre productos con baja o media resistencia térmica y aquellos que se han diseñado y con los que se ha operado en los equipos de la placa/lámina, caliente aislada o el medidor de flujo de calor.

NOTA 5 – Existe una diferencia entre la medición cuyo objetivo es determinar una de las propiedades de la transferencia de calor en las condiciones estables, definidas en el capítulo A.2 y las mediciones requeridas por una norma de producto. Lo último se puede requerir mediante un plan de un muestreo sobre la muestra que no conforma todos los requisitos establecidos en esta norma. Una situación típica es aquella en la que la muestra no es suficientemente plana para asegurar un buen contacto con el equipo, o no es paralela, tal como se requiere en el apartado 6.3.2.1, o es ensayado con un espesor lejos del que posee el extremo del material usado. Los resultados numéricos de tales ensayos, pueden por lo tanto tenerse simplemente presentes, como una base conveniente de información para la aceptación o no de lotes de un material particular, y no necesariamente como una lectura de una propiedad térmica.



ANEXO B (Normativo)

**LÍMITES DE LAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO
Y DE LAS CONDICIONES DE ENSAYO. PLACA CALIENTE GUARDADA**
B.1 Generalidades

Este anexo, define los límites obligatorios para el control del funcionamiento del equipo y las condiciones del ensayo. Todas las referencias a los capítulos de la Norma ISO 8302:1991 son solamente de información; los números del capítulo que se citan a continuación con un asterisco (*), suministran valores modificados en comparación con la Norma ISO 8302:1991.

B.2 Precisión y repetibilidad, estabilidad y uniformidad

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
1.5.3	método de precisión buscado, de placa/lámina caliente aislada (a la temperatura del habitáculo)	2%
1.5.3	método buscado para la precisión de plato/lámina caliente, aislada (rango total de temperatura)	5%
1.5.3	repetibilidad esperada (muestra desmontada y montada de nuevo)	1%
2.1.4.1.1	máximo error permitido, en régimen de desequilibrio	0,5%
3.2.1	valor máximo de la suma del error de desequilibrio y el error debido a la pérdida de calor en el extremo	0,5%
2.1.1.2	uniformidad en la temperatura suministrada por la unidad calefactora relacionada con la diferencia de la misma a través de la muestra	2%
2.1.1.2	máxima diferencia de temperatura entre la media de las temperaturas de las superficies opuestas de la unidad calefactora	0,2 K
3.3.5	máximas fluctuaciones de la temperatura de la unidad calefactora, (relacionadas con la diferencia de temperatura entre las unidades calefactoras y enfriadoras) debidas a las fluctuaciones de la potencia suministrada	0,3%
2.1.2 *	temperatura requerida para la estabilidad a largo plazo de la unidad enfriadora, relacionada con la diferencia de temperatura a través de la muestra	0,5%
2.1.2 *	límite superior requerido de fluctuaciones de temperatura de la unidad enfriadora, relacionada con la diferencia de temperatura a través de la muestra	2%
2.1.2 *	estabilidad requerida de la temperatura de la unidad enfriadora en relación con la diferencia de la misma a través de la muestra	2%
2.1.4.1.2	precisión requerida en la medición de la diferencia de temperatura entre la unidad calefactora y enfriadora	1%
3.3.6	máxima diferencia entre las diferencias de temperatura a través de un equipo de dos muestras	2%

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
2.1.4.1.4	errores normalizados sugeridos para los termopares	ver la tabla B.1 de la Norma ISO 8302:1991
2.14.1.4	error normalizado sugerido para termopares entre 21 K y 170 K	1%
2.1.4.1.4 *	error en la medición de la diferencia de temperatura, debido a la distorsión	anulado
2.1.4.2	precisión requerida en la medición del espesor de la muestra	0,5%
3.2.1	diferencia de espesor máximo para dos muestras que serán montadas en un equipo de dos muestras	2%
2.1.1.1*	máxima incertidumbre en la medida del espesor de la muestra para las que no son rígidas, debido a las partidas desde un plano	0,5%
2.1.1.1	máxima partida desde el plano de la superficie de un equipo o las superficies de muestras rígidas	0,025%
2.1.4.3	precisión requerida de las mediciones eléctricas en los sensores de temperatura, relacionados con la diferencia de temperatura a través de la muestra	0,2%
3.3.5 *	precisión requerida en la medición de la media de la potencia eléctrica suministrada a la sección de medición	0,1 %
2.1.4.3	precisión requerida en la medición de la potencia eléctrica	0,1%
3.3.1	precisión requerida en la determinación de la masa de la muestra	0,5%
2.2.4	máximo error probable como porcentaje del error total	50% al 75%

B.3 Tamaños sugeridos de los equipos

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
1.7.9	dimensiones sugeridas de los equipos	0,3 m; 0,5 m
1.7.9	dimensiones sugeridas de los equipos (sólo para materiales homogéneos)	0,2 m
1.7.9	dimensiones sugeridas del equipo (solamente para valorar el efecto del espesor)	1 m

B.4 Requisitos para el diseño del equipo

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
2.1.1.2; 2.3.6; 3.2.2.3.3	mínima emisividad hemisférica total para cualquier superficie en contacto con la muestra	0,8
2.1.1.1	máxima salida desde un plano de la superficie de un equipo o de las superficies de muestras rígidas	0,025%
2.1.1.3	área del hueco máximo, relacionada con la sección del área de medición	5%
2.1.1.5	máxima distancia del desequilibrio de los sensores, desde el hueco relacionado con el lado o diámetro de la sección de medida	5%
2.1.3	máxima relación del flujo de calor a través de los alambres, relacionados con la relación del flujo de calor a través de la muestra	10%
2.1.1.2	uniformidad de temperatura requerida en la unidad calefactora relacionada con la diferencia de temperatura a través de la muestra	2%
2.1.1.2	máxima diferencia de temperatura entre la media de las temperaturas de las superficies opuestas de la unidad calefactora	0,2 K
3.3.5	fluctuaciones máximas, permitidas de temperatura de la unidad calefactora (relacionada con el diferencial de temperatura entre las unidades calefactora y enfriadora) debido a las fluctuaciones de la potencia suministrada	0,3%
2.1.2 *	estabilidad requerida a largo plazo, de la temperatura de la unidad enfriadora relacionada con la diferencia de temperatura a través de la muestra	0,5%
2.1.2*	estabilidad requerida en la temperatura de la unidad enfriadora en relación con la diferencia de temperatura a través de la muestra	2%
2.1.2 *	límite superior requerido de las fluctuaciones de la temperatura de la unidad enfriadora, relacionada con la temperatura a lo largo de la muestra	2%
2.4.2 *	máxima diferencia de temperatura permitida como porcentaje del mínimo de la diferencia de temperatura a través de la muestra, durante los ensayos isotérmicos	1%
2.4.5	máxima relación entre el borde de la diferencia de temperatura media de la muestra, y la diferencia a través de la muestra (para mayor precisión)	0,1 (0,02)
2.1.4.1.4	máximo diámetro del termopar cuando está montado en la superficie de los platos/láminas, para medir las diferencias de temperatura entre las unidades calefactoras y enfriadoras	0,6 mm
2.1.4.1.4 *	diámetro máximo sugerido, del termopar cuando esté montado como se ha indicado anteriormente, en la superficie de un equipo más pequeño de 0,5 m en su interior o de su diámetro	0,2 mm
2.1.4.1.1	diámetro máximo sugerido de los termopares para detectar el desequilibrio	0,3 mm

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
2.1.4.1.2	mínimo número de sensores de temperatura en cada lado de la sección de medida (cuando sea mayor)	$10\sqrt{A}$ ó 2
2.1.4.1.2	resistencia eléctrica mínima entre los sensores sin protección, y los equipos de placas/láminas de metal	100 MΩ
3.3.4.1	diferencia mínima requerida entre el punto de rocío del aire y la temperatura de la unidad enfriadora	5 K
3.3.4.1	rango sugerido para la diferencia anterior en las comparaciones interlaboratorio	5 K hasta 10 K
2.1.5	presión máxima sugerida en el equipo, sobre la muestra para la mayoría de los materiales aislantes	2,5 kPa

B.5 Características aceptables de la muestra

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
1.1	resistencia térmica mínima medible en un equipo de placa/lámina caliente aislada	0,1 m ² ·K/W
1.1	resistencia térmica mínima medible, en un equipo de placa/lámina caliente aislada, aceptando la reducción de la precisión	0,02 m ² ·K/W
1.7.1 *	resistencia térmica máxima para muestras rígidas que requieren técnicas especiales para medir temperaturas de superficie	0,3m ² ·K/W
2.1.4.1.3	resistencia térmica mínima para muestras no rígidas para usar sensores de temperatura permanentemente montados para medir la diferencia de temperatura, a través de la muestra	0,5 m ² ·K/W
2.1.4.1.3 *	máximo resultado de la resistencia térmica (en ambos lados de la muestra) debido al contacto imperfecto en muestras rígidas, expresado como porcentaje de la resistencia térmica de la muestra	0,5%
3.2.2.2.1 *	resistencia mínima para muestras rígidas para medir la diferencia de temperatura a través de los termopares del equipo	0,3 m ² ·K/W
2.1.4.1.3 *	incertidumbre adicional en la diferencia de temperatura a través de una muestra rígida de resistencia térmica mayor de 0,1 m ² ·K/W cuando se usen láminas de contacto y/o sensores de temperatura, montados en la superficie de la muestra	0,5%
2.1.4.1.3	incertidumbre adicional de la diferencia de temperatura a través de una muestra rígida con una resistencia térmica comprendida entre 0,1 m ² ·K/W y 0,02 m ² ·K/W cuando se usen los puntos de contacto (láminas) y/o los sensores de temperatura, montados en la superficie de la muestra	0,5% a 4%
1.7.6	espesor mínimo de la muestra relacionada con el ancho mínimo del hueco	10 veces

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
3.2.1	máxima diferencia de espesor para dos muestras que deben ser montadas en un equipo de dos muestras	2%
2.1.1.1	máxima salida desde el plano de una superficie de un equipo o de las superficies de muestras rígidas	0,025%
2.1.1.1*	máxima incertidumbre en el espesor medido, del espesor de la muestra, para muestras no rígidas, en orden a las partidas desde un plano	0,5%
3.2.2.2.1*	máximo valor de $(A_d/A_m)(R_d/R)$ para ignorar el efecto de los defectos sobre la superficie de la muestra	0,0005
3.2.2.2.1	máxima desviación respecto a los planos paralelos para las superficies de la muestra relacionados con el espesor de la muestra	2%
1.8.2	máxima dimensión para heterogeneidades relacionados con el espesor de la muestra	1/10
3.2.2.3.1*	relación mínima sugerida entre el espesor de la muestra y la dimensión media de gotas, granos escamas, etc.	10
3.4.1	cambio en la resistencia térmica en muestras que contienen pequeños circuitos que requieren mediciones con láminas más gruesas	1%
3.4.1	diferencias mínimas en las propiedades medidas para considerar una muestra como heterogénea	2%
1.7.4	relación máxima de la conductividad térmica de dos estratos cualquiera en una muestra estratificada	2
1.8.2	relación máxima de la conductividad térmica en la dirección paralela y perpendicular al espesor de la muestra en las que sean anisótropas	2
1.8.3.1	límite para los cambios del factor de transferencia con el espesor para asignar la transmisividad térmica del material	2%
3.4.2	máxima diferencia para el factor de transferencia en diferentes espesores, que será asumido como transmisividad térmica	2%
3.4.2	diferencia máxima aceptable para una relación lineal en relación con el espesor para la resistencia térmica para computar la línea de desviación interpolada	1%
3.2.2.3.3	espesor máximo de la muestra para láminas plásticas de contacto, según el método B para materiales de relleno	50 μm
3.4.1	espesor mínimo requerido para las láminas que se han realizado en corcho fino de base, para romper los pasillos térmicos	0,002 m

B.6 Condiciones aceptables para el ensayo

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
1.1	resistencia térmica mínima medible en un equipo de placa/lámina caliente aislada	0,1 m ² ·K/W
1.1	resistencia térmica mínima medible en un equipo de placa/lámina caliente aislada aceptando una precisión reducida	0,02 m ² ·K/W
1.7.1*	resistencia térmica máxima para muestras rígidas requiriendo técnicas especiales para medir las temperaturas de las superficies	0,3 m ² ·K/W
1.7.3	límite inferior para las diferencias de temperatura medidas diferencialmente	5 K
1.7.3	límite inferior recomendado para las diferencias de temperatura a través de la muestra	10 K
3.3.3	límite inferior para la diferencia de temperatura a través de la muestra cuando se determina y no se conozca la relación entre la temperatura y las propiedades de transferencias de calor	5 K
3.3.3	límite superior recomendado para la diferencia de temperatura a través de la muestra cuando se determine una relación no determinada entre la temperatura y las propiedades de las transferencias de calor	10 K
3.3.6	diferencia máxima entre las diferencias de temperaturas a través de dos muestras en un equipo que albergue las mismas	2%
3.2.2.2.1	número mínimo de termopares en cada lado de la muestra (el que sea mayor de los dos criterios)	10 \sqrt{A} ó 2
3.3.4.1	diferencia mínima requerida entre el punto de rocío del aire y la temperatura de la unidad enfriadora	5 K
3.3.4.1	rango sugerido para las diferencias anteriores en las comparaciones interlaboratorio	5 K a 10 K
3.2.1	valor máximo para la suma del desequilibrio por los errores de pérdida calor en los extremos	0,5%
2.4.5	relación máxima entre el extremo de la diferencia de la temperatura especificada de la muestra y la diferencia a través de la muestra (para mayor precisión)	0,1 (0,02)
1.7.6	espesor mínimo de la muestra en relación con el ancho del hueco	10 veces
3.2.1	máxima diferencia de espesor para dos muestras que deben ser montadas en un equipo de dos muestras	2%
2.1.5	presión máxima recomendada del aparato sobre una muestra para la mayoría de materiales de aislamiento	2,5 KPa
3.2.2.2.1*	máxima resistencia para láminas interpuestas	compatible menor
3.2.2.2.2	temperatura estándar sugerida en el laboratorio en el cual la muestra es dejada para alcanzar el equilibrio con el aire del habitáculo	(296 ± 1) K
3.2.2.2.1	humedad relativa estándar sugerida del laboratorio en el que a la muestra se deja alcanzar el equilibrio	(50 ± 10)% RH
3.3.8	cambio máximo de resistencia en cuatro conjuntos sucesivos de observaciones para valorar si el estado estable se ha alcanzado	1%
3.3.8	tiempo máximo transcurrido desde el comienzo del estado estable para condiciones de ensayo desconocidas para completar las observaciones	24 h

ANEXO C (Normativo)

**LÍMITES PARA LAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO
Y DE LAS CONDICIONES DE ENSAYO. MEDIDOR DE FLUJO DE CALOR**
C. 1 Generalidades

Este anexo define los límites que se imponen para el control del funcionamiento del equipo y las condiciones de ensayo. Todas las referencias a los capítulos de la Norma ISO 8301:1991 son para información únicamente; los números de capítulos que siguen con un asterisco (*) dan valores modificados respecto a los de la Norma ISO 8301:1991.

C.2 Precisión y repetibilidad, estabilidad y uniformidad

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
1.5.3.3	precisión esperada en el método de medida del flujo de calor (cuando la temperatura media del ensayo está cerca de la del habitáculo)	$\pm 3\%$
1.5.3.1	repetibilidad esperada cuando la muestra se mantiene en el interior del equipo	mejor que $\pm 1\%$
1.5.3.1	repetibilidad esperada con una muestra desmontada y montada de nuevo después de intervalos largos de tiempo	mejor que $\pm 1\%$
1.5.3.1	precisión esperada en la calibración para el medidor del método del flujo de calor, (cuando la temperatura media para el ensayo está cerca de la temperatura del habitáculo)	$\pm 2\%$
1.5.4.2	límite superior aceptable en la estabilidad de la calibración	$\pm 1\%$
1.5.4.2	intervalos de calibración sugeridos para el medidor de flujo de calor	24 h antes o después del ensayo
1.5.4.2	intervalos de calibración si las estabilidades a corto y largo plazo del medidor de flujo de calor han demostrado ser mejores que $\pm 1\%$	15 o 30 días después
1.5.4.1	tiempo sugerido para inspeccionar los estándares de la calibración	5 años
2.2.5.3	valor máximo del error por la pérdida de calor en el extremo	0,5%
2.2.1.2	uniformidad en la temperatura requerida en la superficie de trabajo de unas unidades calefactoras y enfriadoras relacionadas con la diferencia de temperatura a través de la muestra	1%
2.2.1.2	estabilidad de la temperatura requerida de la superficie de trabajo correspondiente a las unidades calefactoras y enfriadoras en el periodo de ensayo relacionadas con las diferencias de temperatura a través de la muestra	0,5%
2.2.1.2	estabilidad de la temperatura requerida en la cara del medidor de flujo de calor en contacto con la muestra y relacionada con la medición de la diferencia de temperatura a través de la muestra	menor del 5%
2.2.1.2	precisión requerida en la medición de la diferencia de temperatura de las unidades enfriadoras y calefactoras en contacto con la muestra	1%

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
2.2.3.1.3*	error en la medición de la diferencia de temperatura debido a la distorsión	eliminado
2.2.1.2	error máximo en la medición del flujo de calor cuando el medidor del flujo del mismo está dispuesto en contacto con la superficie de trabajo de la unidad calefactora o enfriadora en orden a su temperatura no uniforme	0,5%
2.2.1.2	fluctuaciones máximas permitidas en la salida del potencial eléctrico del medidor de flujo de calor en relación a las fluctuaciones de temperatura de la superficie del medidor de flujo de calor	2%
2.2.3.3	precisión requerida en la medición del espesor máximo de una muestra	0,5%
2.1.1.1*	máxima incertidumbre en la medición del espesor de la muestra para muestras que no son rígidas en orden a las partidas desde un plano	0,5%
2.1.1.1	máxima partida desde un plano de las superficies de trabajo de las unidades de calor y frío	0,025%
2.2.3.2.2	precisión requerida de mediciones eléctricas referentes al diferencial de temperatura a través de la(s) muestra(s)	± 0,5%
2.2.3.2.2	precisión requerida para las mediciones eléctricas de las salidas desde la termopila	± 0,6%
2.2.3.2.2	sensibilidad requerida mínima de los instrumentos eléctricos con un mínimo de salida de diferencia de temperatura en el detector	0,15%
2.2.3.2.2	máximo error permitido para el instrumento debido a la relación no lineal de todas las salidas esperadas del detector de diferencial de temperatura	0,1%
2.2.3.2.2	error máximo permitido en las señales eléctrica debido a la imperancia de entrada bajo cualquier posible condición	0,1%
2.2.3.2.2	error máximo permitido para cualquier lectura eléctrica en un período normal entre calibraciones de 30 días, la que sea mayor	0,2%
2.2.3.2.2	raíz cuadrada máxima permitida del ruido medio que ocurre en los valores correspondientes a la diferencia de temperatura y la salida de la termopila resultado de la inmunidad del ruido	0,1%
3.3.1	precisión requerida en la determinación de la masa de la muestra	0,5%

C.3 Requisitos de diseño del equipo

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
2.2.2.3.5	mínima emisividad hemisférica total para cualquier superficie en contacto con la muestra	0,8
3.2.2.3.2	mínima emisividad hemisférica total de las superficies vistas desde la muestra en una temperatura de operación	0,8
2.2.1.1	máxima salida desde un plano de la superficie de trabajo de las unidades calefactoras y enfriadoras	0,025%
2.2.2.4	máxima salida desde un plano de un área de medida de un medidor de flujo de calor	0,025%
3.2.2.2.1	máxima salida desde un plano de la superficie de un equipo o de la superficie de una muestra rígida	0,025%
2.2.2.3	relación requerida entre el área de medida y la superficie total del medidor de flujo de calor	$10\% \leq A \leq 40\%$
2.3.2	relación sugerida entre el lado del medidor de flujo de calor en el área de la medición y del espesor máximo de la muestra	4
2.3.2	relación sugerida entre el lado externo del medidor de calor y el máximo del espesor de la muestra	8
2.2.1.1	uniformidad de la temperatura requerida para la superficie de trabajo de unidades calefactoras y enfriadoras relacionadas con la diferencia de temperatura a través de la muestra	1%
2.2.1.1	estabilidad de temperatura requerida para la superficie de trabajo de las unidades calefactoras y enfriadoras durante el periodo, de ensayo relacionadas con las diferencias de temperatura a través de la muestra	0,5%
2.2.1.2	estabilidad de temperatura requerida en la cara del medidor de flujo de calor en contacto con la muestra relacionada con la diferencia de temperatura a través de la misma	menor que 0,5%
2.2.1.2	error máximo en la medición de la relación del flujo de calor cuando el medidor de flujo del mismo, está situado en contacto con la superficie de trabajo de la unidad calefactora o enfriadora, debido a la no uniformidad de su temperatura	0,5%
2.2.1.2	fluctuaciones máximas permitidas en la salida eléctrica de los medidores del flujo de calor relacionadas con las fluctuaciones de temperatura en la superficie en el medidor de flujo de calor	2%
3.3.5.3	variación superior aceptable como función del tiempo en la salida del medidor de flujo de calor con respecto a su valor medio	1,5%
2.2.2.5	diámetro sugerido para los termopares usados como sensores de temperatura de superficie en el medidor de flujo de calor	0,2 mm

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
2.2.3.1.3	máximo diámetro de termopar cuando se encuentra montado en la superficie de unas unidades calefactoras o enfriadoras para medir las diferencias de temperatura entre ellas	0,6 mm
2.2.3.1.3*	diámetro máximo sugerido para el termopar cuando esté montado como se indica anteriormente en la superficie de un aparato más pequeño de 0,5 m de lado o diámetro	0,2 mm
2.2.3.1.1	número mínimo de sensores de temperatura en cada lado de la superficie de trabajo para las unidades calefactoras y enfriadoras	$10 \sqrt{A} \text{ ó } 2$
2.2.3.1.1	área de superficie máxima en la cual el termopar solamente puede ser instalado	0,04 m ²
2.2.2.3	porcentaje del área más central del flujo de calor en la cual los detectores de la diferencia de temperatura deben de ser detectados	40%
2.2.3.1.1	resistencia mínima eléctrica del aislamiento entre los termopares y los platos/lámina de metal del equipo	1 MΩ
2.2.2.3	diámetro máximo sugerido para el área de sección a través de los conductores en la termopila	0,2 mm
2.2.2.3	salida mínima del medidor de flujo de calor sin usar técnicas especiales para prevenir fuerzas extrañas electromotrices térmicas en los indicadores, los circuitos de medida y los propios medidores del flujo de calor	0,0002 V
2.2.2.5	espesor sugerido para láminas de metal o no empleadas para cubrir el área de medida	80 μm
2.2.5.1	diferencias mínimas requeridas entre el punto de rocío del aire y la temperatura de la unidad enfriadora	5 K
2.2.4.2	máxima presión sugerida en el equipo que se ejerce sobre la muestra para los materiales más aislantes	2,5 kPa

C.4 Características aceptables de la muestra

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
1.1.1	resistencia térmica mínima medible en un equipo de medición	0,1 m ² ·K/W
1.7.2.2	máximo incremento en el espesor de una muestra de configuración única que corresponda con dos configuraciones de muestras simétricas	50%
1.7.3*	resistencia térmica máxima para muestras rígidas requiriendo técnicas especiales para medir temperaturas de superficie	0,3 m ² ·K/W
2.2.3.1.2.1	resistencia térmica mínima para muestras no rígidas que usarán sensores permanentes montados en las superficies de trabajo en las unidades calefactoras o enfriadoras	0,5 m ² ·K/W

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
2.2.3.1.2.2*	máxima resistencia térmica resultante (en ambos lados de la muestra) debido a los contactos imperfectos de muestras rígidas expresado como un porcentaje en la resistencia térmica de la muestra	0,5%
3.2.2.2.1*	resistencia térmica mínima de muestras rígidas que no requieren el uso de láminas delgadas o sensores de temperatura montados en la muestra para la medición de la diferencia de temperaturas a través de la misma	0,3 m ² ·K/W
2.2.3.1.2.2*	incertidumbre adicional en la diferencia de temperatura a través de una muestra rígida cuando se usen contactos y/o sensores de temperatura montados en la superficie de la muestra	0,5%
2.3.2	relación sugerida entre el lado externo del medidor de flujo de calor y el máximo del espesor de la muestra	8
3.2.1	diferencia máxima del espesor para dos muestras que deben ser montadas en un equipo para dos muestras	2%
3.2.2.2.1	máxima salida desde un plano de la superficie de un equipo o de la superficie de una muestra rígida	0,025%
2.1.1.1*	incertidumbre máxima en la medición del espesor de las muestras para las que no sean rígidas debidas a las salidas de un plano	0,5%
3.2.2.2.1*	valor máximo de $(A_d/A_m)(R_a/R)$ para ignorar el efecto o los defectos en la superficie de la muestra	0,0005
3.2.2.2.1	máxima desviación desde planos paralelos para las superficies de la muestra, relacionados con el espesor de la misma	2%
1.8.2	límite de la dimensión superior aceptable de cualquier muestra heterogénea	1/10 <i>d</i>
3.2.2.3*	relación mínima referida entre los espesores de las muestras y las dimensiones indicadas de huecos, granos y escamas etc.	10
3.4.1	cambio en la resistencia térmica en muestras conteniendo pequeños circuitos que requieren mediciones con puntos más finos	1%
3.4.1	diferencia mínima en las propiedades medidas para considerar una muestra como no homogénea	2%
1.8.3.1	límite superior aceptable para los cambios del factor de transferencia con un espesor para asignar la conductividad térmica o transmisividad al material	2%
3.4.2	diferencia máxima para el factor de transferencia en un espesor diferente que deba ser asumido como una transmisividad térmica	2%
3.4.2	diferencia máxima aceptable desde una relación lineal en función del espesor para resistencia térmica para computar la interpolación de la línea de desvío	1%
3.2.2.3.2	espesor máximo para láminas de plástico en el método B para materiales de relleno	50 μm

C.5 Condiciones aceptables de ensayo

Apartado en la Norma ISO 8302:1991	Descripción	Valor
1.1.1	mínima resistencia térmica medible en un equipo medidor de flujo de calor	0,1 m ² ·K/W
1.7 3*	resistencia térmica máxima para muestras rígidas requiriendo técnicas especiales para medir temperaturas en la superficie	0,3 m ² ·K/W
3.3.3	límite inferior para las diferencias de temperatura a través de la muestra cuando se estén determinando unas relaciones desconocidas entre la temperatura y las propiedades de transferencia de calor	5 K
3.3.3	límites superiores recomendados para diferencia de temperatura a través de la muestra como se ha determinado anteriormente	10 K
2.4.1	diferencia máxima permitida de temperatura entre las superficies enfriadoras y calefactoras mientras se realizan las calibraciones de las muestras	20 K hasta 40 K
2.2.3.1.3	diámetro sugerido máximo de termopares cuando estén instalados en contra o dentro de la superficie de las muestras	0,2 mm
3.2.2.2.1	número mínimo de termopares en cada lado de la muestra (que siempre será mayor que el criterio doble)	10√A ó 2
2.2.5.1	diferencia mínima requerida entre el punto de rocío del aire y la temperatura de la unidad enfriadora	5 K
2.2.5.3	máximo valor para el error debido a la pérdida de calor en el extremo	0,5%
1.7.2.2	incremento máximo del espesor de una muestra en una configuración de muestra única correspondiendo a la otra de dos muestras simétricas	50%
3.2.1	máxima diferencia del espesor para dos muestras que deben ser montadas para un equipo de dos muestras	2%
2.2.4.2	presión máxima sugerida la muestra por un equipo para la mayoría de los materiales	2,5 kPa
3.2.2.2.1*	resistencia máxima de los puntos (láminas) sensores interpuestos	menor compatible
3.2.2.2.2	temperatura estándar sugerida en el laboratorio en el que la muestra es dejada para que alcance un equilibrio con el aire del habitáculo	(296 ± 1) K
3.2.2.2.2	humedad relativa sugerida en el laboratorio en el que la muestra es dejada para alcanzar el equilibrio	(50 ± 10)%RH
3.3.5.2	cambio máximo de resistencia térmica en cinco conjuntos sucesivos de observación para evaluar un estado estable que se ha alcanzado	1%
3.3.5.3	variación superior aceptable con una función del tiempo del medidor de flujo de calor en su salida y con respecto a su valor calibrado	1,5%
3.4.1	mínimo espesor requerido para los contactos (láminas) realizados a base de una fina base de corcho para quebrar los caminos térmicos	0,002 m

ANEXO D (Normativo)

DISEÑO DEL EQUIPO

D.1 Generalidades

El equipo deberá estar conforme con los requisitos dados en esta norma en las Normas EN 1946-2:1999 y EN 1946-3:1999. Una manera de lograr que esto pueda ser realizado es usar el equipo diseñado en el capítulo D 2 de esta norma o en el capítulo D.3 de la Norma EN 12667:2001. En este caso, el error en el análisis no necesita ser realizado; solamente las inspecciones de características descritas en las Normas EN 1946-2:1999 o EN 1946-3:1999, necesitan ser realizadas.

NOTA – Anexo C de la Norma EN 1946-2:1999 y anexo C de la Norma EN 1946-3:1999, contienen error en el análisis para los diseños explicados en este anexo.

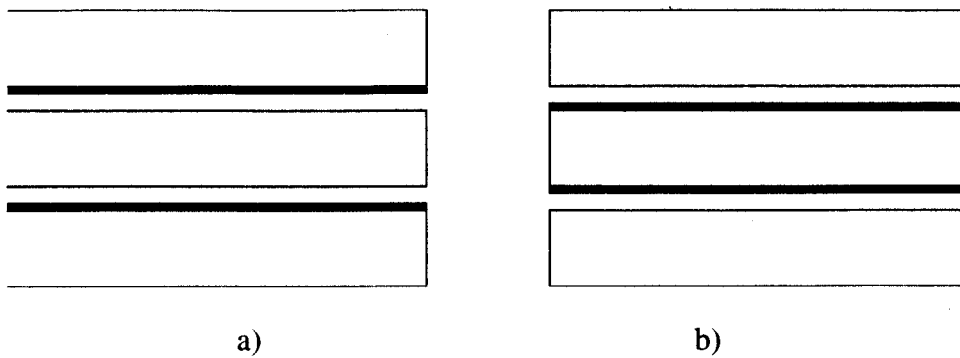
Sólo el equipo de placa/lámina guardada caliente aislada puede cubrir el rango total de las condiciones de ensayo esperadas en este documento. Para un ejemplo, un equipo medidor de flujo de calor sólo en parte cubrirá la condición de ensayo esperada en este documento, véase el capítulo D.3 de la Norma EN 12667:2001.

D.2 Equipo de placa guardada

Dos componentes del equipo son descritos (nombradas como equipo A y B); y un tercer equipo con una dimensión de 800 mm, fue considerado de no interés para las mediciones de acuerdo con esta norma. Las características dadas del aparato de la placa caliente y las condiciones de ensayo deberán ser como siguen:

	EQUIPO	
	A	B
– dimensiones generales en milímetros	300	500
– ancho de la sección de medición en mm (centro del hueco hasta el centro del siguiente)	150	250
– ancho del aislamiento en milímetros (de centro del hueco al límite externo del hueco)	75	125
– ancho del hueco en milímetros	2	3
NOTA 1 – Espesor mínimo de la muestra cuando tenga diez veces el ancho del hueco; si el diseñador intenta reducir el ancho se incrementarán los errores del hueco.		
– conductividad mínima de la muestra en W/(m·K)	0,030	0,030
– conductividad máxima de la muestra en W/(m·K)	3,0	3,0
– resistencia térmica mínima de la muestra en m ² ·K/W	0,02	0,02
– resistencia térmica máxima de la muestra en m ² ·K/W	1,5	2,5
– espesor máximo de la muestra en milímetros	45	75
– espesor mínimo de la muestra en milímetros	20	30
– tolerancias de planitud en milímetros	0,08	0,13

NOTA 2 – Las tolerancias de planitud aseguran la precisión de las mediciones en los espesores de la muestra, en un mínimo de valores que se han detallado anteriormente para muestras no rígidas y que aseguran el perfecto contacto con la superficie de los equipos. Para muestras rígidas, las tolerancias anteriores aseguran las limitaciones requeridas de las resistencias térmicas de contacto sin puntos de contacto (láminas) para resistencias térmicas mayores que 0,6 m²·K/W para el equipo A y mayores que 1,0 m²·K/W para el equipo B.



NOTA – Las líneas en grueso son los separaciones de los bordes del circuito fotografados.

Fig. D.1 – Unidad Calefactora

	EQUIPO	
	A	B
– espesor en milímetros del metal de la unidad calefactora La placa de aluminio será de 150 W/(m·K)	5	8
– espesor total del calefactor en milímetros	3	3

El calentador puede ser bien compuesto por dos placas revisadas fotoeléctricamente de un milímetro de espesor con respecto al estrato, conductos ver las líneas destacadas en la figura D.1, de cada dibujo separado por un límite de aislamiento eléctrico de aproximadamente 1 mm de espesor, ver figura D.1a), o de dos conjuntos con lados de aproximadamente 1 mm de espesor, aislados desde una unidad de placas/láminas de calefacción, por dos capas de aislamiento eléctrico de aproximadamente 1 mm de espesor, ver figura D.1b). Brasa de silicona en otros componentes conductores de calor, deben ser usados entre los platos/láminas de la unidad calefactora y las placas revisadas fotoeléctricamente, para evitar cualquier bolsa de aire. La solución de la figura D.1a), es preferida porque permite una unión más fácil y el desmontaje de la unidad calefactora. Se deberá pegar con pegamento los extremos del calentador y los platos/placas de la unidad calefactora, asegurándose el esfuerzo mecánico máximo y vía más fácil para alcanzar las tolerancias (si la unidad de calefacción está comprimida entre dos planos de placas de metal, durante el pegamento). El pegamento no permite la revisión de la unidad calefactora en caso de fallos. La unidad calefactora puede ser fijada mediante tornillos; su número debe ser mantenido a un mínimo absoluto (por ejemplo: a lo largo de ejes y diagonales) y sus superficies deben de estar finalizadas después de fijarlas para obtener una superficie plana de contacto con las muestras.

	EQUIPO	
	A	B
– sección máxima total, en mm ² , de alambres de cobre (400 W/(m·K) cruzando el hueco	6	6

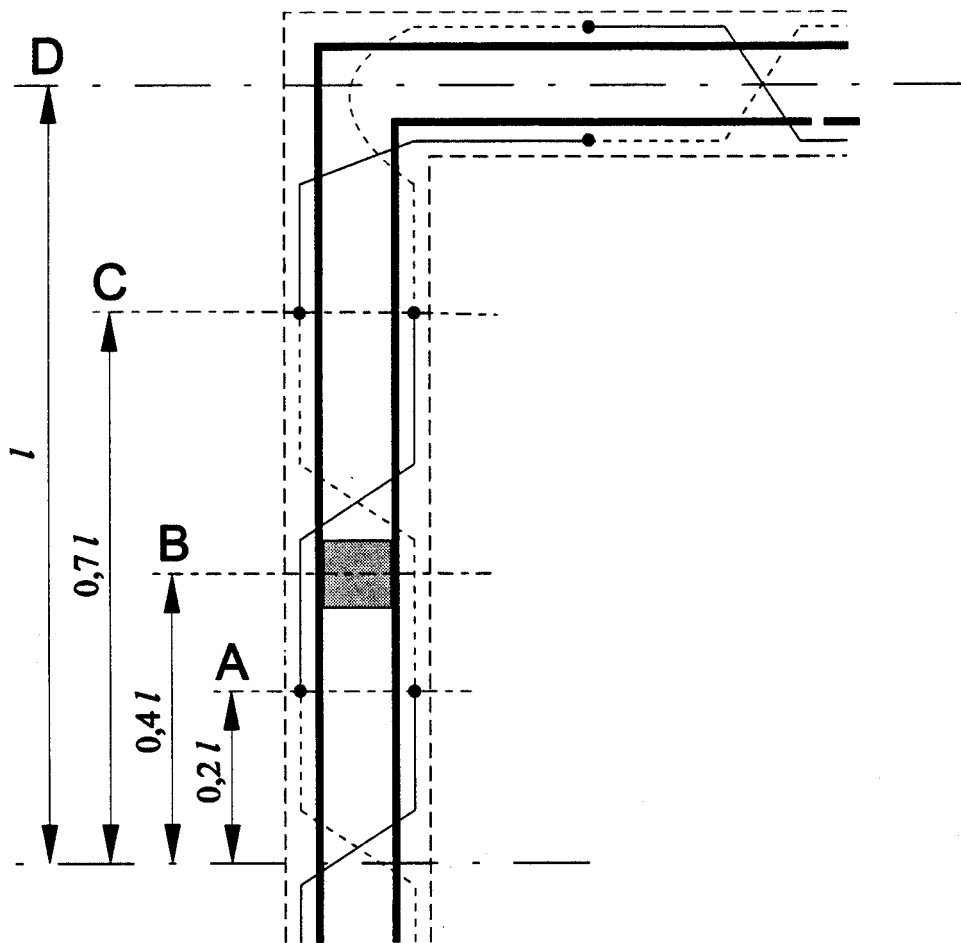
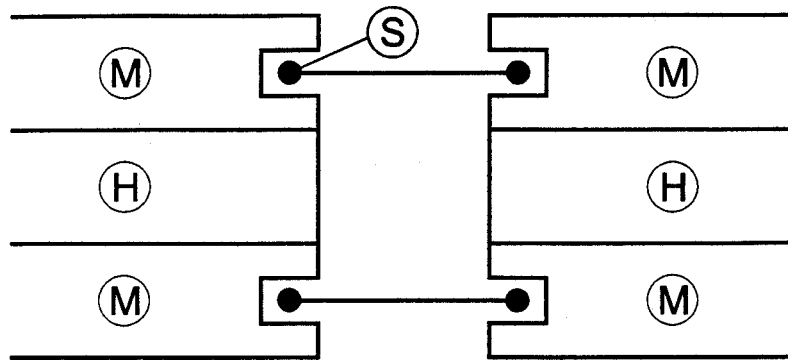


Fig. D.2 – Posición de los espaciadores y uniones para equilibrar de la termopila

NOTA 3 – La sección anterior es resultado por ejemplo de 32 pares de uniones para un equilibrio de una termopila de cobre-constantan, de alambre de 0,25 mm de diámetro ($1,6 \text{ mm}^2$), para no más de 6 termopares de cobre-constantan con un diámetro 0,55 mm. en cada superficie en contacto con la muestra ($2,8 \text{ mm}^2$), 2 alambres de contacto ($1,5 \text{ mm}^2$), para la sección central del calentador y dos alambres correspondientes al potenciómetro ($0,1 \text{ mm}^2$) para la sección central del calefactor.

La unión del equilibrio de las termopilas debe ser localizada en el hueco tal como indica la figura D.2. Los puntos A y C están a la distancia de $0,2 l \pm 0,05 l$ y $0,7 l \pm 0,05 l$ desde el eje de la unidad calefactora, cuando l es la mitad del ancho de la sección de medida. Los alambres de la termopila deben instalarse paralelos al hueco dentro un surco apropiado en las placas/láminas calefactoras de metal, ver el hueco diseñado en la figura D.3 de por lo menos 15 mm.

	EQUIPO	
	A	B
– sección máxima total en mm^2 para alambres que no sean de cobre [$100 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] cruzando el hueco	6	6



Leyenda

- H calefactor
- M unidad calefactora con placa de metal
- S elemento sensor

Fig. D.3 – Detalles del diseño del hueco

Si los límites comprobados fotográficamente cruzan el hueco, las cifras para alambres potenciómetricos y de corriente de cobre deben ser incluidos en el cálculo (descrito en la nota 3), pero la sección cruzada de alambres que no son de cobre puede exceder en 6 mm². En este caso la conductancia térmica de los alambres de cobre y de no cobre debe ser inspeccionada.

	EQUIPO	
	A	B
– Sección máxima total en mm ² de conexiones mecánicas [0,3 W/(m·K)] en el hueco (ocho bloques de las dimensiones indicadas en paréntesis para cada pieza, en mm)	832 (8×13)	1520 (10×19)

La posición aproximada de las conexiones mecánicas se muestra en la figura D.2 mediante el punto B. La distancia de este punto desde el eje de la unidad calefactora es de $0,4 l \pm 0,05 l$, donde l es la mitad del ancho de la sección de medida.

	EQUIPO	
	A	B
– diferencia mínima de temperatura a través de la muestra en K (para resistencias térmicas o menos de 0,1 m ² ·K/W o muestras húmedas)	4	4
– diferencia normal de temperatura a través de la muestra, en K (para resistencias térmicas de más de 0,5 m ² ·K/W)	20	20
– diferencia máxima de la temperatura a través de la muestra en K	25	25
– relaciones máximas del flujo de calor en W, a través de la sección de medición o ambas muestras (a una diferencia normal de temperatura de 20 K y resistencias térmicas de 0,1 m ² ·K/W)	9	25
– sensibilidad mínima del detector nulo para la relación de la termopila de 32 elementos con una potencia termoeléctrica de 40μV/K por elemento, en μV	1,0	2,2

	EQUIPO	
	A	B
El diseño del hueco debe ser tal como se refleja en la figura D.3.		
- error máximo en la medida del potencial eléctrico, en %	0,2	0,2
- tolerancias mecánicas en el lado de la zona de medición, en %	0,1	0,1
- precisión en la calibración de un termopar en % de la diferencia de temperatura	0,4	0,4
- precisión en la lectura del termopar en el voltímetro digital, en %	0,2	0,2

Los termopares deben de ser de grado especial tipo T. Deberán ser montados en huecos, en las placas de las unidades calefactoras y enfriadoras, tal como se indica en la figura D.4, localizaciones A y B para el equipo A, y las localizaciones A, B y C para el equipo B. El punteado en la figura D.4 indica la posición aproximada sobre una superficie de la unidad calefactora en la superficie de la unidad enfriadora, enfrentándose a sus caras; los, círculos indican la posición aproximada de las superficies opuestas.

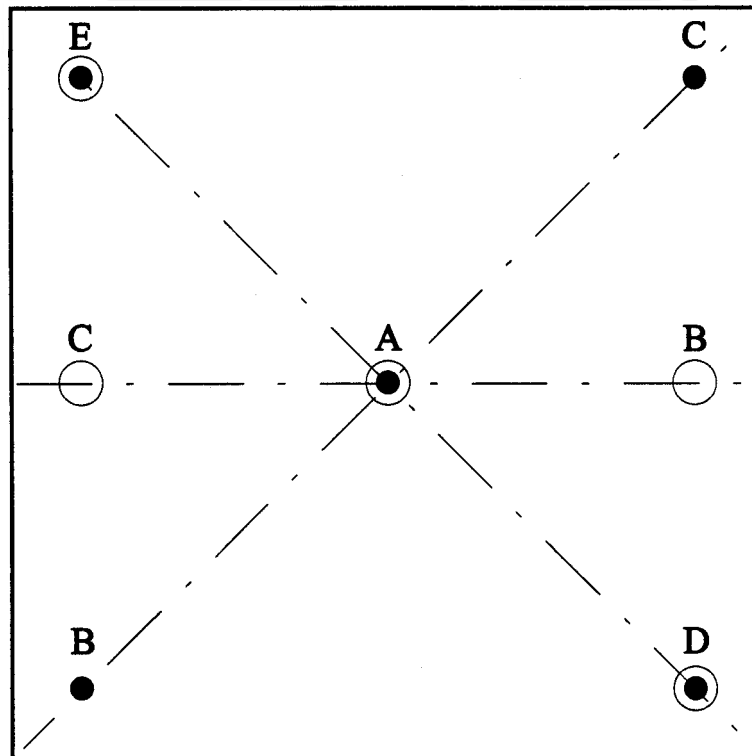
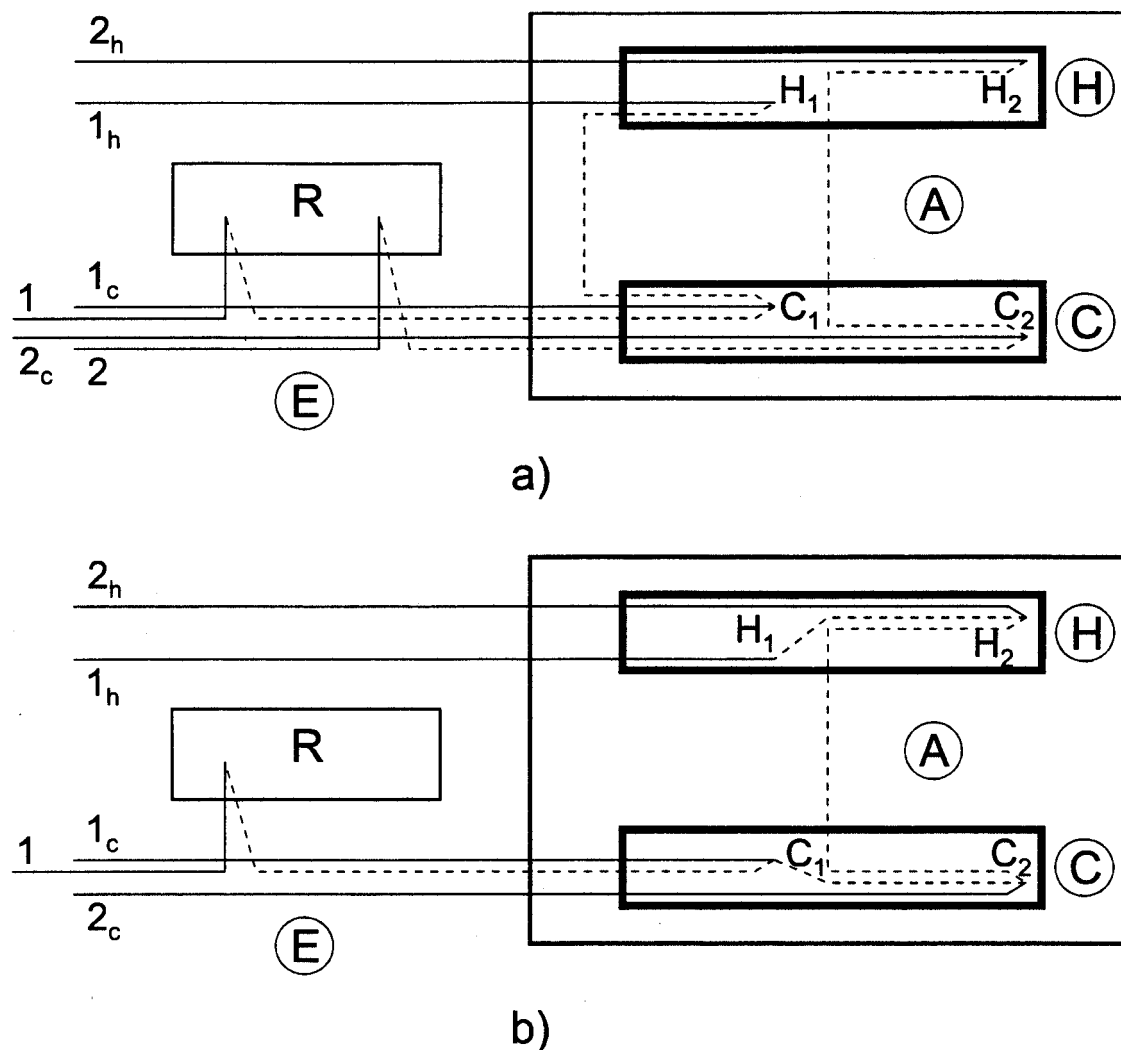


Fig. D.4 – Posición de los termopares en las unidades calefactoras y enfriadoras



Leyenda

H	unidad calefactora
H1, H2	uniones del termopar en la unidad calefactora
C	unidad enfriadora
C1, C2	uniones del termopar en la unidad enfriadora
R	referencia base (punto de congelación)
A	cabina del equipo
E	ambiente (laboratorio)

Fig. D.5 – Conexiones del termopar

El borde de la figura indica la porción correspondiente a la sección del área de medida. Termopares adicionales que se instalen en la porción correspondiente a la sección aislada son opcionales. La conexión eléctrica de los termopares en las unidades calefactoras y enfriadoras deben ser como en las figuras D.5 a) ó D.5 b).

Las unidades enfriadoras deberán estar realizadas con placas de aluminio metalizadas, refrigerado por una circulación con líquido mediante tuberías ensambladas con resina epoxy y metal en la superficie, pero no en contacto con la muestra.

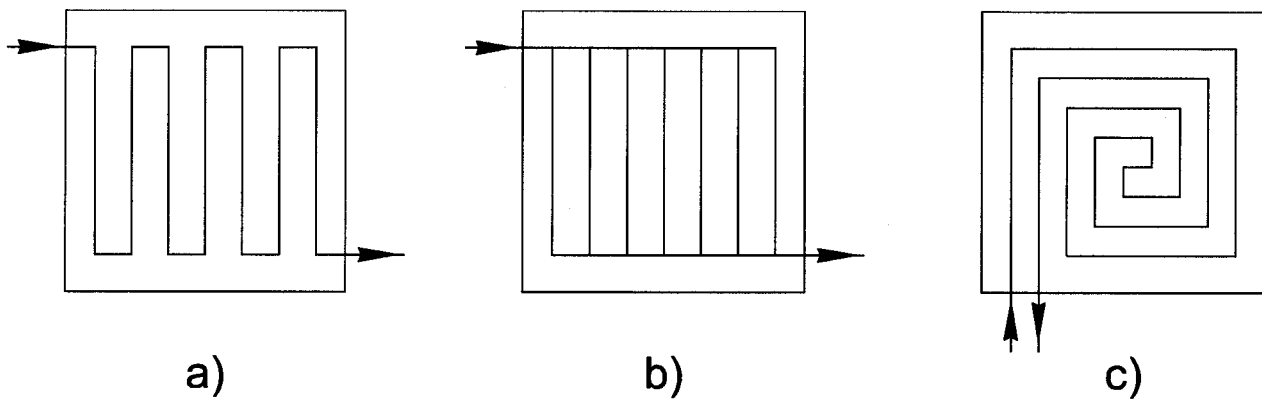


Fig. D.6 – Disposición de las tuberías de enfriamiento en las unidades que las producen

La disposición más aconsejable de las tuberías de refrigeración es la de la figura D.6 c) que con un apropiado dimensionamiento permite la reducción de la relación de masas, si se comparan con los que se indican a continuación.

Las características de las unidades de enfriamiento deben ser como se indican a continuación:

	EQUIPO	
	A	B
– espesor del plato de refrigeración de aluminio en mm	25	35
– espesor del estrato en la superficie de la unidad refrigeradora que no está en contacto con la muestra (conductividad térmica de 0,04 W/(m·K) o menos), en mm	30	50
– relación requerida del flujo de masa para un fluido con un calor específico de 3 300 J/(kg·K) o mayor, en kg/s.	0,031	0,075

El recipiente que engloba al equipo debe ser hermético al vapor de agua; la temperatura interna del aire debe de mantenerse a la temperatura media de ensayo, dentro de 2,5 K. Esto es sólo posible a través del aire acondicionado apropiado en el interior de la cabina. El punto de rocío del aire debe ser, por lo menos, 5 K más bajo que la temperatura del plato de enfriamiento.

Todos los cables (suministro de potencia, termopares, salida de la termopila, etc.) que provienen de una unidad calefactora, deben ser unidos a una distancia de cerca de 100 mm desde el extremo de la unidad calefactora, con un bloque de metal de por lo menos 100 mm de largo y con un diámetro de por lo menos 30 mm, y mantener a la misma temperatura la unidad calefactora dentro de un 0,5 K a través del equipo eléctrico de calefacción.

ANEXO E (Normativo)

**PROCEDIMIENTOS RELACIONADOS CON LAS MEDICIONES
EN EL EQUILIBRIO DE LA HUMEDAD**
E.1 Cálculo de λ^* en el equilibrio de la humedad

En este anexo, cuando una muestra está subdividida en estratos, i es una subscripción que va a identificar un estrato arbitrario de la muestra.

Primero se determina la distribución de la humedad mediante cálculo o medición como se describe en los capítulos E.2 ó E.3. Asumiendo que existe una variación lineal de λ^* con un contenido de humedad w y una variación despreciable de λ^* con la temperatura.

$$\lambda^*_i = \lambda^*_0 + a w_i \quad (\text{E.1})$$

donde a es un coeficiente, $\text{W}\cdot\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{kg})$.

La medición de la relación del flujo de calor, a través de la muestra, se puede escribir entonces como:

$$q_m = (T_1 - T_2) / \Sigma(d_i / (\lambda_0 + a w_i)) \quad (\text{E.2})$$

La única incógnita en la ecuación (E.2) es a , y, por lo tanto, puede ser usado para determinar la variación de λ^* con el contenido de la unidad.

E.2 Estimación teórica de la distribución de la humedad

En equilibrio, puede ser asumido que la humedad en el volumen es uniforme e igual a la humedad de saturación por volumen en la superficie fría de la muestra.

$$v_i = v_{\text{sat}}(T_2) \quad (\text{E.3})$$

NOTA – Esta suposición está basada en una expresión asumida para la transferencia de la humedad que es una aproximación (el flujo de humedad puede depender del gradiente de temperatura, pero este efecto no es conocido y, probablemente, pequeño).

La humedad relativa en la muestra, será calculada entonces en los puntos de porcentajes correspondientes como:

$$\varphi_i = 100 v_i / v_{\text{sat}}(T_i) \quad (\text{E.4})$$

y el contenido de humedad w_i puede ser tenido en cuenta de la curva de absorción higroscópica.

NOTA 1 – Debido a los efectos de la histéresis, el contenido de humedad puede depender si es alcanzada por absorción o desabsorción.

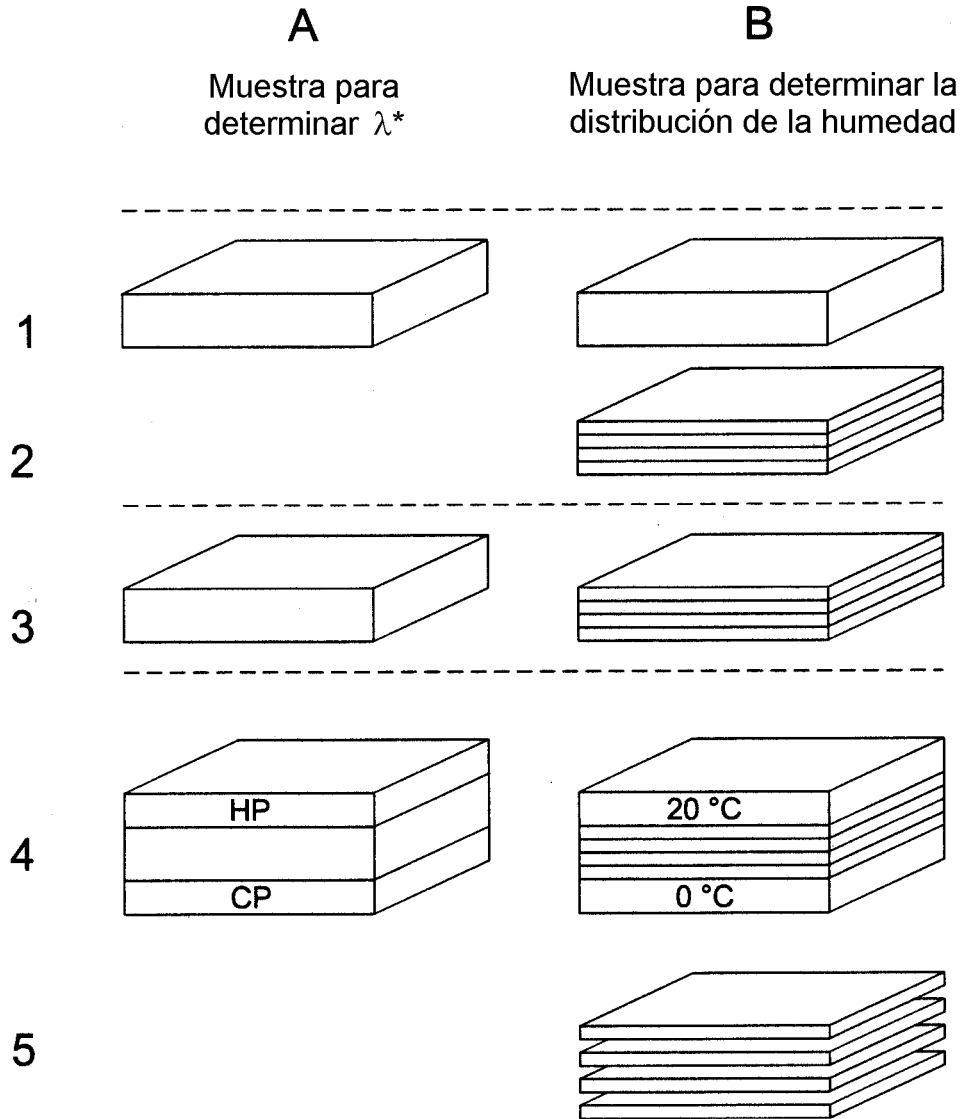


Fig. E.1 – Determinación de la distribución de humedad por ensayos paralelos

NOTA 2 – La distribución de la temperatura es asumida como lineal entre las superficies calientes y frías de la muestra. Esto no es realmente cierto, dado que λ^* depende del contenido de la humedad, que nunca es uniformemente distribuida en un equilibrio de la misma.

El error en los valores individuales de w_i cuando se use este método, es estimado en el 25% al 50%, los mayores errores en los contenidos superiores de humedad.

E.3 Determinación de la distribución de la humedad con un ensayo paralelo con el mismo material y las mismas condiciones de contorno

El procedimiento está descrito en la figura E.1.

- 1) Se prepara dos muestras del mismo material; una para la determinación de λ^* (muestra A) y otra para la determinación de la distribución de la humedad (muestra B).
- 2) Cortar entre cuatro a seis rodajas la muestra B.
- 3) Acondicionar de la muestra A y B (almacenada) el contenido de la humedad deseada, de acuerdo con el apartado 7.2.3.2, entonces incluir cada muestra en una envoltura hermética para la pérdida de vapor de agua.
- 4) Determinar λ^* para la muestra A y almacenar la muestra B bajo las mismas condiciones (las mismas temperaturas de superficie), durante el mismo tiempo que el tiempo de medición de la muestra A.
- 5) Se determina mediante pesaje, secado, y posterior pesaje el contenido de la humedad de cada una de las rodajas de la muestra B.

El error esperado en w_i cuando se use este método, es normalmente mejor del $\pm 10\%$. El seccionamiento en rodajas tiene únicamente un efecto negativo sobre la transferencia de humedad, mientras que el mecanismo de transferencia de difusión de vapor sea predominante. Cuando la acción de capilaridad es substancial (lo que ocurre cuando algún material tiene mayor contenido de humedad), los efectos del seccionamiento deben ser investigados por separado.

ANEXO F (Informativo)

ACONDICIONAMIENTO PARA UN CONTENIDO EN HUMEDAD
EN UNAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS ESPECIFICADAS**F.1 Consideraciones introductorias**

La conductividad térmica de un producto depende de la humedad que contiene. Por lo tanto, los productos deberán tener necesariamente, un contenido en humedad específico preferiblemente uniformemente distribuida durante la determinación de esta propiedad.

El contenido de la humedad es normalmente mejor especificado como "en equilibrio con $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ y $(\times\times \pm 5)\%$ de humedad relativa".

Se debe tener en cuenta que esta norma necesariamente no proporciona valores únicos. El equilibrio de humedad puede debido a efectos de histéresis) diferencias dependiendo si el equilibrio se ha alcanzado por absorción o desabsorción. Otro problema es que el perfecto equilibrio puede requerir un largo tiempo para ser alcanzado y por lo tanto, es necesario aceptar "el contenido de la humedad en el equilibrio con una cierta precisión".

F.2 Definiciones

F.2.1 atmósfera 23/xx: Una atmósfera controlada con una temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(\times\times \pm 5)\%$.

F.2.2 rango higroscópico: Contenido de humedad en el equilibrio con el 98% de humedad relativa o menor.

F.3 Principios de acondicionamiento

Los acondicionamientos son llevado a cabo en dos etapas:

1) **Acondicionamiento para el contenido de una humedad con un rango higroscópico** (en equilibrio con la humedad relativa menor del 98%).

Los criterios para comprobar el rango higroscópico son alcanzados mientras "el cambio de contenido de humedad, Δw , durante un periodo especificado de "tiempo equivalente", Δt_e , sea menor que el límite del valor Δw_l ". El tiempo equivalente es tomado como d^2 horas, donde d es el espesor de la muestra expresado en centímetros; esto es equivalente a decir que el cambio en la cantidad de humedad contenida durante una hora sea menor que el valor límite, Δw_l , dividido por d^2 horas. El valor límite, Δw_l , depende del material y la temperatura de secado.

La aceptación de estos tipos de criterios son tales que la relación del secado, para ciertos materiales, con un cierto espesor y a una cierta temperatura, es siempre la misma para el límite superior higroscópico, sin considerar el contenido de la humedad inicial.

Los valores típicos de Δw_l para diferentes materiales son dados en la tabla F.1 y de acuerdo con ella, por ejemplo una muestra de hormigón de 5 cm de espesor tendrían un límite de cambio de humedad de $2000/5^2 = 80 \text{ kg/m}^3$ en una hora. Valores más precisos o valores para otros materiales pueden ser determinados mediante pesadas periódicas de la muestra para establecer una curva de secado (contenido de humedad en función del tiempo). La desviación de la curva en el límite superior del rango higroscópico se usa para determinar Δw_l .

Tabla F.1
Valores límites del contenido del cambio de humedad Δw_1

Todos los valores de Δw_1 en kg/m^3

Material	Condiciones			
	23/xx	40 °C	70 °C	105 °C
Hormigón	60	150	500	2 000
Hormigón curado con vapor	10	30	130	400
Ladrillo	10	30	130	400
Mortero enlastado	3	13	60	180

2) Condiciones de equilibrio con atmósfera 23/xx

Después del paso 1), solamente un contenido de humedad con un rango higroscópico es garantizado. Si la muestra ha sido secada en atmósfera de 23/xx, todavía se debe realizar un mayor secado. Si la muestra ha sido secada a una elevada temperatura, existe un riesgo que el secado pueda haber sido excesivo y por debajo del equilibrio de la atmósfera de 23/xx, dado que la humedad relativa en un horno ventilado es probablemente considerablemente más baja que una atmósfera 23/xx. Existe también una dependencia de la temperatura en la curva de absorción higroscópica que se deberá considerar.

El segundo paso es en consecuencia un periodo de acondicionamiento en la atmósfera 23/xx, por lo menos durante γd^2 horas, donde γ es el factor condicionante de tiempo y d es el espesor de la muestra en centímetros.

Los valores típicos de γ para los diferentes materiales son dados en la tabla F.2. Valores con más precisión y correspondientes a otros materiales, pueden ser determinados por periódicas pesadas en un ensayo de la muestra para establecer la curva de secado (contenido de humedad en función del tiempo). El tiempo para alcanzar el equilibrio es usado para determinar γ .

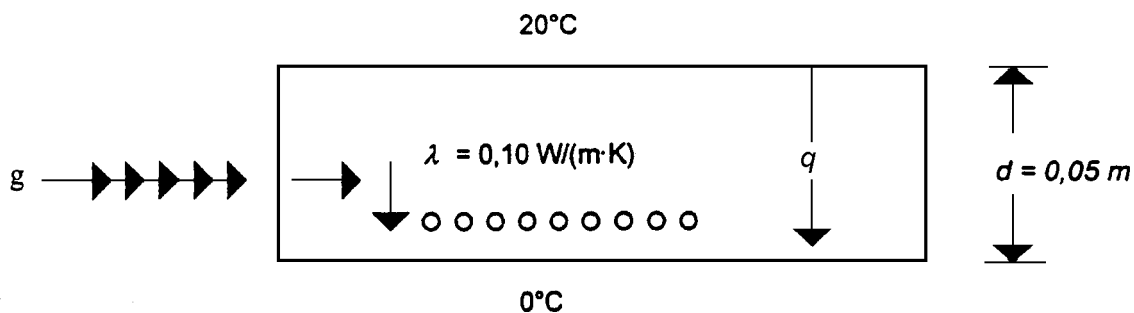
Tabla F. 2
Condicionamiento del factor γ

Material	Para alcanzar el contenido de humedad dentro de un 10% en equilibrio con xx% humedad relativa	Para alcanzar el contenido de humedad con un 5% en relación con un equilibrio en la xx% humedad relativa
Hormigón	100	150
Hormigón curado con vapor	15	20
Ladrillo	1,5	2
Mortero enlastado	30	50

ANEXO G (Informativo)

ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CONDENSACIÓN

Se considera un estrato de material tal como se indica:



La densidad “normal” de una relación de flujo de calor es $q = 0,1 (20-0)/0,05 = 40 \text{ W}/\text{m}^2$.

Un criterio aceptable es que la densidad de la relación del flujo de calor, debido a la condensación sea el 1% de la densidad “normal” de la relación del flujo de calor, es decir, 1% de $40 \text{ W}/\text{m}^2$ que es $0,4 \text{ W}/\text{m}^2$. En este caso

$$g h_e = 0,4 \text{ W}/\text{m}^2$$

donde

g es la relación de la humedad tomada en $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

h_e es la entalpia de la evaporación = $2\,480 \times 10^3 \text{ J}/\text{kg}$;

de tal manera que

$$g = 0,4 / (2\,480 \times 10^3) \frac{\text{W} \cdot \text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{W} \cdot \text{s}} = 1,6 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

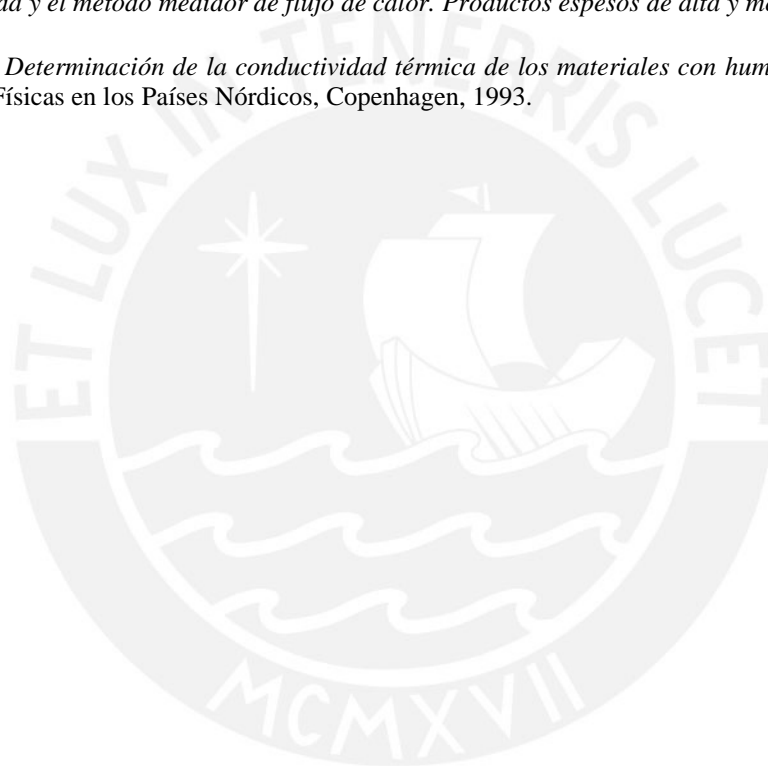
y, puesto que $d = 0,05 \text{ m}$, la relación del cambio en el contenido de la humedad en la muestra es

$$w = 1,6 \times 10^{-7} / 0,05 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}) \text{ o, multiplicando por } 3\,600, \quad \boxed{0,01 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})}$$

La mayoría de la acumulación de la humedad estará en una zona aislada y un requisitos de $w < 0,01 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ es razonable para asumir que la condensación de humedad supone un error despreciable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ISO 10051 – *Aislamiento térmico. Efecto de la humedad sobre la transferencia térmica. Determinación de la transmisividad higrotérmica.*
- [2] CEN Informe Técnico CR¹⁾ – *Componentes y materiales de la construcción. Principios para la determinación de la transmisividad higrotérmica de la humedad de los materiales y de la resistencia térmica de los componentes húmedos.*
- [3] EN 12939 – *Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método medidor de flujo de calor. Productos espesos de alta y media resistencia térmica.*
- [4] Sandberg, P.I – *Determinación de la conductividad térmica de los materiales con humedad. Tercer Simposium del Edificio de Físicas en los Países Nórdicos, Copenhagen, 1993.*



1) Para ser publicado.





AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32