

Caso de aplicación práctica:  
**selección de materiales y  
dimensionamiento de paredes de hornos  
de alfarería.**

Guía para el profesor.

(Versión 1.0)

David Sales Lérída, Teresa Ben Fernández y Lidia López Marfil  
Universidad de Cádiz (UCA)

Julio de 2012



*Caso de aplicación práctica: selección de materiales y dimensionamiento de paredes de hornos de alfarería. Guía para el profesor.* by David Sales et al. is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License. Based on a work at <http://rodin.uca.es>

# Preámbulo

La docencia científico-técnica debe contemplar la realización de casos prácticos donde se le plantee al alumnado la resolución de situaciones cercanas a la realidad profesional. En estos casos se fomenta el desarrollo de las siguientes **habilidades**:

- lectura comprensiva de textos con vocabulario técnico, acompañados de información adicional en forma de tablas, diagramas o esquemas,
- evaluación de los aspectos importantes de la situación e identificación del problema,
- realización de cálculos y, en ocasiones, manejo de bases de datos o software específico para selección de materiales,
- toma de decisiones.

El caso que se plantea aquí es una versión ampliada del planteado por Ashby en la referencia [1]. Este trabajo se enmarca en un proyecto de innovación docente desarrollado en la Universidad de Cádiz por profesores de las áreas de Ciencia e Ingeniería de los Materiales y Organización de Empresa. El proyecto tenía como título ‘contribución a la formación práctica y global del graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales mediante la integración de materias técnicas y económicas’.

Éste caso tiene la siguiente **estructura**:

1. un texto breve que describe aspectos sobre el modelo a diseñar,
2. un dibujo esquemático que ayuda a visualizar el problema o que aportan información adicional al texto,
3. una serie de cuestiones, y por último
4. una propuesta de solución, haciendo uso del software educativo *CES edupack 2011* [2].



# Índice general

<b>1. Planteamiento del caso</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción . . . . .	1
1.1.1. Sobre la empresa . . . . .	2
1.2. Cuestiones . . . . .	3
<b>2. Solución propuesta</b>	<b>5</b>
2.1. Soluciones Selección de Materiales . . . . .	5
2.1.1. Cuestión a) . . . . .	5
2.1.2. Cuestión b) . . . . .	5
2.1.3. Cuestión c) . . . . .	7
2.1.4. Cuestión d) . . . . .	9
2.1.5. Anotaciones . . . . .	9
2.2. Soluciones Economía y Empresa . . . . .	10
2.2.1. Cuestión e) . . . . .	10
2.2.2. Cuestión f) . . . . .	11



# Parte 1

## Planteamiento del caso

### 1.1. Descripción

Se requiere diseñar un horno de alfarería a escala industrial. En concreto, como ingeniero técnico industrial, se te ha asignado la selección de materiales para las paredes y el cálculo del espesor de las mismas. El consumo energético de un ciclo de trabajo de un horno de alfarería de grandes dimensiones (ver Figura 1.1) es considerable. Una parte importante del consumo son las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes del horno; estas se reducen seleccionando un material con baja conductividad y aumentando el espesor de las paredes. El resto del consumo se emplea para elevar la temperatura del horno a su temperatura de trabajo; este se reduce seleccionando un material para la pared con baja capacidad calorífica, y disminuyendo el espesor de la misma. La máxima temperatura interna a alcanzar en cada ciclo de trabajo del horno será de  $1000^{\circ}\text{C}$ .

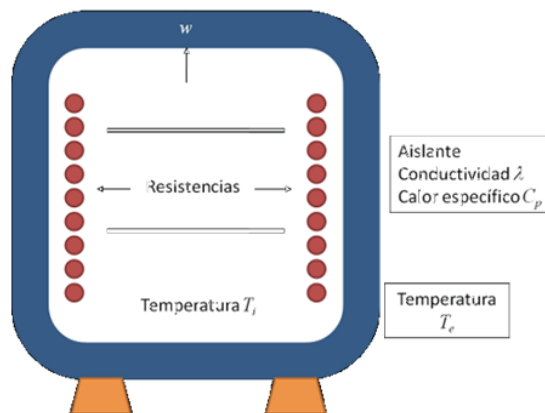


Figura 1.1: Esquema del horno de alfarería.

### 1.1.1. Sobre la empresa

El horno a diseñar va a ser usado por la empresa CERAMUCA para la producción de vajillas de diseño italiano. Se pretende fabricar un lote de 90.000 piezas/mes. Durante el primer mes de actividad de la empresa se incurrirá en los costes que se detallan a continuación:

#### Datos relativos a la materia prima

Se prevé el uso de los siguientes recursos ligados a la producción:

- 40.000 kgs. de materia prima a un coste de 0,30 u.m./kg
- 15.000 litros de agua a 0,02 u.m./l
- 8.000 cajas de cartón, a 0,10 u.m./caja (en cada caja se introducen 5 unidades de producto final)

#### Datos relativos al consumo energético

El horno consume 13 kW/h en condiciones normales de funcionamiento, es decir, cuando ya alcanza la temperatura de trabajo. El tiempo necesario para alcanzar la temperatura de trabajo es de 60 minutos aproximadamente, siendo el consumo en esta etapa de calentamiento de 18 kW/hr. <sup>1</sup>

#### Datos relativos a la mano de obra directa

Se prevé que en un turno de trabajo normal trabajen a tiempo completo cuatro operadores y un jefe de producción que supervisa las labores de dichos operarios. En el caso en que se decida no producir durante la noche, el turno de noche requerirá tan solo una actividad de supervisión y mantenimiento a realizar por un solo operario. Los costes relativos a dicha mano de obra son:

- Salario de un operario: 900 u.m./mes
- Seguridad Social a cargo de la empresa de un operario: 342 u.m./mes
- Salario de un jefe de producción (incluidas las cargas sociales): 2.000 u.m./mes.
- Plus de nocturnidad: 150 u.m./mes

#### Otros datos

- Se sabe que la empresa decide amortizar el valor del horno a través del método lineal, sabiendo que su vida útil es de 5 años y su valor residual al finalizar dicha vida es nula. Se estima que la inversión total del mismo alcanza la cifra de 50.000 u.m.
- Prima de seguro: 650 u.m./año

---

<sup>1</sup>Para calcular el coste tener en cuenta la potencia contratada (>15 kW) y el consumo de energía realizado (prescindir de impuestos y alquileres). Es posible obtener la tarifa de precios en las Webs de compañías suministradoras de energía, por ejemplo: <http://www.electricadecadiz.es/>.



- Gastos en asesoría fiscal-contable: 300 u.m./mes
- Gastos de limpieza: 150 u.m./mes
- Gastos de administración: 2.000 u.m./mes

## 1.2. Cuestiones

a) Rellena la tabla de requerimiento del diseño:

Función
Restricciones
Objetivo
VARIABLES LIBRES O DE DISEÑO

b) ¿Cuál es el Índice de Material a considerar para la selección del material de las paredes del horno? Dedúcelo y explica cada paso.

c) Desde un criterio exclusivamente de optimización de su función ¿qué materiales seleccionarías para fabricar hornos de alfarería?

d) Calcula el espesor óptimo de la pared para los materiales elegidos.

e) Calcular el coste unitario de producción en el primer mes de actividad de la empresa y el beneficio obtenido por la misma, suponiendo que el precio de venta de una pieza terminada es de 0.40 u.m./unidad y que la empresa trabaja en una jornada laboral de 8 horas.

f) Calcular el consumo energético y los costes de personal en el supuesto de que la empresa trabaje a tres turnos. Razonar qué puede ocurrir con el coste unitario de producción de las piezas.



## Parte 2

# Solución propuesta

### 2.1. Solución de las cuestiones de Selección de Materiales

#### 2.1.1. Cuestión a)

*Rellena la tabla de requerimiento del diseño:*

Función	Pared de horno
Restricciones	- Es necesario que el material trabaje de forma adecuada a $1000^{\circ}\text{C}$ : $T_{max} \geq 1000^{\circ}\text{C}$ . - El espesor de la pared podría estar limitado por cuestiones de espacio.
Objetivo	Minimizar el consumo energético
VARIABLES LIBRES O DE DISEÑO	- El espesor de pared, $w$ . - La selección del material.

#### 2.1.2. Cuestión b)

*¿Cuál es el Índice de Material a considerar para la selección del material de las paredes del horno? Dedúcelo y explica cada paso.*

Para conseguir minimizar el consumo energético (objetivo de diseño), será necesario analizar el ciclo de trabajo de un horno de alfarería y observar en qué se emplea la energía que éste consume. Básicamente, este ciclo constará de 3 etapas (ver Figura 2.1:

1. calentamiento del horno desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de trabajo,
2. mantenimiento de la temperatura de trabajo durante el tiempo que requiera la producción,

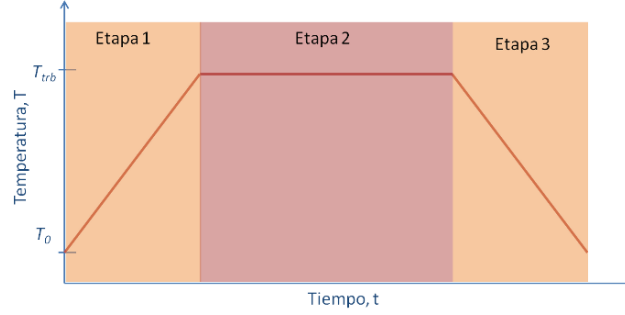


Figura 2.1: Etapas de un ciclo de funcionamiento del horno.

3. enfriamiento del horno hasta la temperatura ambiente, una vez finalizada la producción.

El consumo energético en la etapa 1 se emplea principalmente en calentar el material del horno. El consumo de calor por unidad de área por absorción de las paredes durante el calentamiento hasta alcanzar la temperatura  $T_{trb}$  se puede calcular como

$$Q_{absorcion} = C_p \cdot \rho \cdot w \left( \frac{T_{trb} - T_0}{2} \right) \quad (2.1)$$

donde  $C_p$  es el calor específico del material de las paredes, y  $\rho$  su densidad.

El consumo energético de la etapa 2, corresponderá al calor aportado para contrarrestar las pérdidas por conducción al exterior. Según la Ley de Fourier, las pérdidas de calor por conducción en estado estacionario por unidad de área se calculan como:

$$Q_{conduccion} = -\lambda \frac{dT}{dx} t = \lambda \frac{(T_{trb} - T_0)}{w} t \quad (2.2)$$

siendo  $\lambda$  la conductividad térmica del material de las paredes.

El calor total aportado en un ciclo de trabajo será:

$$Q = Q_{absorcion} + Q_{conduccion} = C_p \cdot \rho \cdot w \left( \frac{T_{trb} - T_0}{2} \right) + \lambda \frac{(T_{trb} - T_0)}{w} t \quad (2.3)$$

La mayoría de las variables de esta expresión están fijadas por el proceso ( $t, T_{trab}$ ), o por las condiciones externas ( $T_0$ ), o vienen definidas por el material que se elija para las paredes ( $\lambda, C_p, \rho$ ). Para minimizar las pérdidas, la única variable en la que puedo incidir, independientemente de la selección del material, es en el espesor de la pared  $w$ . Si elijo un espesor pequeño se reducirá  $Q_{absorcion}$ , pero aumentará  $Q_{conduccion}$ . Si elijo un espesor grande se reducirá  $Q_{conduccion}$ , pero aumentará  $Q_{absorcion}$ . Habrá, por tanto, un espesor óptimo, que minimice la función  $Q$ .

Para buscar el mínimo de esta función, tendré que derivar (2.3) e igualar a cero:

$$\frac{dQ}{dw} = 0;$$

$$C_p \cdot \rho \left( \frac{T_{trb} - T_0}{2} \right) \frac{dw}{dw} + \lambda \cdot (T_{trb} - T_0) \frac{d(w^{-1})}{dw} t = 0$$

Reorganizando y despejando  $w$  se obtiene que el espesor óptimo para minimizar el consumo energético es:

$$w_{optimo} = \sqrt{\frac{2\lambda t}{\rho C_p}} \quad (2.4)$$

Sustituyendo (2.4) en (2.3) para ver cómo queda la expresión que es necesario minimizar:

$$Q = C_p \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{2\lambda t}{\rho C_p}} \left( \frac{T_{trb} - T_0}{2} \right) + \lambda \frac{(T_{trb} - T_0)}{\sqrt{\frac{2\lambda t}{\rho C_p}}} t$$

Simplificando y sacando factor común queda:

$$Q = (T_{trb} - T_0)(2t\lambda\rho C_p)^{1/2}$$

Agrupamos en un mismo paréntesis todas las variables que son propiedades del material,

$$Q = \sqrt{2t}(T_{trb} - T_0)(\lambda\rho C_p)^{1/2} \quad (2.5)$$

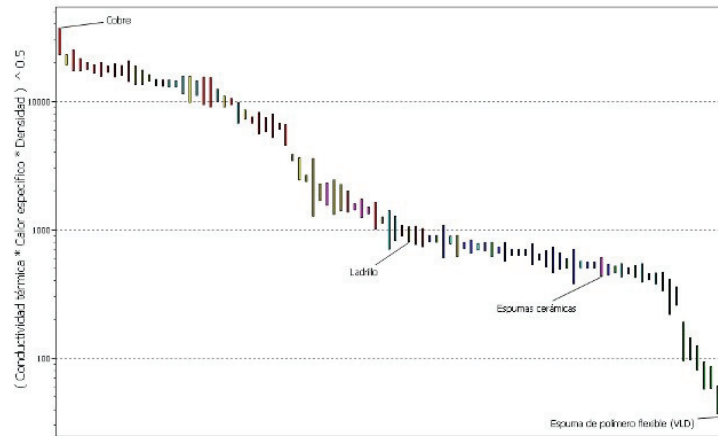
El índice de material que estábamos buscando corresponde con el último paréntesis de 2.5,  $(\lambda\rho C_p)^{1/2}$ . Para minimizar  $Q$ , tengo que tomar un material donde se minimice esta relación.

### 2.1.3. Cuestión c)

*Desde un criterio exclusivamente de optimización de su función ¿qué materiales seleccionarías para fabricar hornos de alfarería?*

El material que debo seleccionar es aquél que optimice el objetivo del diseño, que en este caso es aquél material cuya temperatura máxima de trabajo supere al menos los 1000°C, y en el que se minimice el índice  $(\lambda\rho C_p)^{1/2}$ . Para ello, acudo al software CES Edupack. Se muestra aquí la solución con el nivel 2 de detalle.

1. En Select, pincha en el botón de ‘Graph’ para que se abra la ventana de edición de gráficos.
2. En la pestaña ‘Y-axis’ pincha en el botón ‘Advanced...’ y edita la ecuación del índice de material: ( [Conductividad térmica] \* [Calor específico] \* [Densidad] )  $\wedge$  0.5.
3. Al aceptar se crea el gráfico de barras. El material con mínimo índice es la espuma de polímero flexible (VLD), siendo el cobre la selección para este diseño.

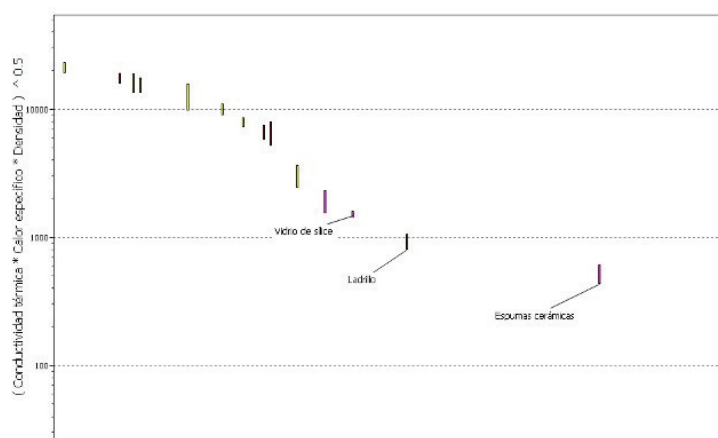


4. No obstante, cuesta creer que un polímero pueda formar parte de las paredes de un horno de alfarería. ¡Cuidado! Falta introducir la restricción de la máxima temperatura en servicio para eliminar aquellos materiales que no puedan trabajar a 1000°C de forma segura. Para ello pincha en el botón 'Limit' y rellena el límite inferior de la variable 'máxima temperatura en servicio' según la figura. Luego dale a 'Apply'.

5. Ahora los materiales que minimizan el índice y que cumple con las restricciones son los que aparecen más abajo en el gráfico de barras, y se comentan en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1: Materiales candidatos para paredes de hornos de alfarería.

Material	Índice $M = (\lambda \rho C_p)^{1/2}$	Comentario
Espumas cerámicas	431-608	Técnicamente la mejor solución, aunque de elevado coste.
Ladrillo	799-1060	Solución de compromiso por bajo coste y bajas pérdidas energéticas.
Vidrio de sílice	1460-1540	Su transparencia permitiría usarlo para incluir una mirilla que permita controlar el interior del horno durante su funcionamiento sin provocar grandes pérdidas de calor.



#### 2.1.4. Cuestión d)

*Calcula el espesor óptimo de la pared para los materiales elegidos.*

La ecuación (2.4) permite calcular el espesor óptimo de la pared para cualquier material, introduciendo los valores de sus propiedades y el tiempo del ciclo de trabajo del horno. En el Cuadro 2.2 se muestra el resultado del cálculo del espesor óptimo para los tres mejores candidatos.

#### 2.1.5. Anotaciones

- Es posible que la conductividad térmica se denomine en otros libros de textos y en otras asignaturas con la letra  $k$  en lugar de  $\lambda$ .
- La ecuación (2.1) se deduce suponiendo que la temperatura media en la pared es  $(T_{Trb} + T_0)/2$

Cuadro 2.2: Cálculo del espesor óptimo para los tres materiales que mejor cumplen la función de pared de horno. Para el cálculo se han tomado los valores promedios de las propiedades de los materiales según la base de datos del CES edupack 2012 [2].

Material	$\lambda$ (W/(m°C))	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/(kg°C))	$M$ ( $\lambda\rho C_p$ ) <sup>1/2</sup>	$w_{opt}$ (m)
Espuma cerámica	0,6	531	870	526,48	0,274
Ladrillo	0,595	1850	800	938,40	0,152
Vidrio de sílice	1,45	2195	705	1497,94	0,232

## 2.2. Solución de las cuestiones de Economía y Empresa

### 2.2.1. Cuestión e)

Calcular el coste unitario de producción en el primer mes de actividad de la empresa y el beneficio obtenido por la misma, suponiendo que el precio de venta de una pieza terminada es de 0.40 u.m./unidad y que la empresa trabaja en una jornada laboral de 8 horas.

$$Q = 90.000 \text{ piezas.}$$

1. Coste materia prima = 40.000 kg · 0,30 u.m./kg = 12.000 u.m.
2. Coste cajas = 8.000 cajas · 0,10 u.m./caja = 800 u.m.
3. Coste agua = 15.000 litros · 0,02 u.m./l = 300 u.m.
4. Coste energético:
  - Potencia contratada: 200 kW contratados · 1 mes · 1,447754 = 289,55 u.m.
  - Consumo: (180 kW/h · 1h · 0,182365 u.m./kW) + (130 kW/h · 7h · 0,182365 u.m./kW) = 198,78 u.m.
5. Coste operario (diurno) = (900 + 342) · 4 = 4.968 u.m.
6. Coste operario (nocturno) = 900 + 342 + 150 = 1.392 u.m.
7. Coste jefe de producción = 2.000 u.m.
8. Coste asesoría =  $\frac{300}{12} = 25 \text{ u.m./mes}$
9. Coste limpieza = 150 u.m.
10. Coste administración = 2.000 u.m.
11. Coste prima seguro =  $\frac{650}{12} = 54,17 \text{ u.m./mes}$



$$12. \text{ Coste amortización} = \frac{10000}{12} = 833,33u.m./mes$$

$$C_T = \sum_{i=1}^{12} \text{Costes} = 23010,83u.m.$$

$$C_{TME} = \frac{C_r}{Q} = \frac{23010,83}{90000} = 0,26u.m./ud$$

$$\text{Beneficio} = 90000 \cdot (0,40 - 0,26) = 12600u.m.$$

$$\text{Margen de cobertura} = 0,14u.m./ud.$$

### 2.2.2. Cuestión f)

*Calcular el consumo energético y los costes de personal en el supuesto de que la empresa trabaje a tres turnos. Razonar qué puede ocurrir con el coste unitario de producción de las piezas.*

**Consumo energético:** Potencia contratada: 200 kW contratados x 1 mes x 1,447754 = 289,55u.m. Consumo: 130 kw/h x 24 hr.x 0,182365 um/kw) = 568,98 u.m.

**Coste de mano de obra:** Coste operarios= (900+ 342+150) x 12 = 16.704 u.m. Coste jefe de producción= (2.000 + 150) x 8 = 17.200 u.m.

Nota: Se supone a falta de más datos del enunciado un incremento de la plantilla proporcional al incremento de los turnos. Además se aplica el plus de nocturnidad para todas las categorías de trabajadores constante (explicar al alumno el cálculo de este plus en la realidad)

**¿Qué ocurre con el coste de producción?** En este supuesto podemos interpretar que si la empresa aumenta sus turnos de trabajo es porque se ha producido un incremento en la demanda del producto. No solo varían el consumo energético y los costes de personal sino también los costes relativos a la materia prima, caja, agua, etc. Es decir, todos los costes variables de la empresa. Los costes fijos permanecen constantes. El efecto sobre el coste unitario podría ser un descenso y no un aumento del mismo debido a las economías de escala.



# Bibliografía

- [1] Ashby M.F., *Materials selection in mechanical design*, 3rd edition, Amsterdam [etc.]: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [2] Granta Desgin Ltd., *software CES Edupack*, <<http://www.grantadesign.com/es/education/index.htm>>.
- [3] García García R., Fernández Pérez de la Lastra S., López Marfil L. , Pérez Fernández V., Cervera Paz A., *Apuntes de Organización y Gestión de empresas*, 2<sup>a</sup> Ed., Cádiz (Depósito Legal CA-246-2012), 2011.
- [4] García García R., Pérez Fernández V., Cervera Paz A., *Problemas de Organización y Gestión de empresas*, 2<sup>a</sup> Ed., Cádiz (Depósito Legal CA-245-2012), 2011.