

$$(h) \quad X_a = \frac{\int_0^l \frac{M_s Y ds}{J} + \frac{E \omega t l}{J}}{\int_0^l \frac{Y^2 ds}{J} + \int_0^l \frac{dx}{F}}$$

Por transformaciones análogas se obtiene la  $X_b$ :

$$(i) \quad X_b = \frac{\int_0^l \frac{M_s X ds}{J}}{\int_0^l \frac{X^2 ds}{J}}$$

Finalmente, de (g), se deduce:

$$(j) \quad X_c = \frac{\int_0^l \frac{M_s ds}{J}}{\int_0^l \frac{ds}{J}}$$

Levantada la hiperestaticidad, podrán obtenerse, para cualquier punto del arco el momento flector y la compresión normal. A las fórmulas anteriores se llega también por la aplicación del teorema de Castigliano y por el método del trabajo molecular.

Medellín, septiembre de 1940.

**Luis de Greiff Bravo**  
Profesor de la Facultad

---

COMBUSTIBLES

# 279

(Continuación)

### Determinación por medio de calorímetros

Los calorímetros están basados en el principio físico, bien conocido, que se puede enunciar como sigue: el calor desprendido por un cuerpo al quemarse es igual al que absorbe otro que se ponga en contacto. Aplicando este principio a los calorímetros vemos que al quemar un cuerpo, las calorías desprendidas por ese cuerpo se uti-

lizan en elevar la temperatura de una cantidad conocida de agua. Un calorímetro consta en esencia de una cámara de combustión, en donde se efectúa la oxidación completa del combustible. En estas condiciones se ve claramente, si se tiene en cuenta la definición de caloría, que basta medir el aumento de temperatura sufrido por el agua para calcular la potencia calorífica.

Supongamos un calorímetro ideal, esto es, un recipiente en el cual no se tengan pérdidas de calor por ningún concepto. En este calorímetro tenemos un litro de agua y quemamos 0.5 gramos de carbón; se observa que el agua aumenta su temperatura de 23 a 25 grados c. Esto es en 2° c. De aquí se deduce que 1000 gramos de agua aumentaron su temperatura 2° c., luego absorbieron 2.000 calorías pequeñas, o sea 2 calorías grandes que fueron suministradas por 0.5 gramos de carbón, luego bastará hacer la siguiente proporción para calcular la potencia calorífica.

0.5 gramos de carbón dan 2 cal.

$$1.000 \text{ gramos de carbón dan } X \therefore X = \frac{2.000}{0.5} = 4.000 \text{ calorías.}$$

Se han ideado una serie de calorímetros, todos ellos basados en el mismo principio y con más o menos variaciones, tales como la bomba de Mahler, calorímetro de Emerson, bomba de Berthelot, etc., pero hoy la industria ha generalizado un calorímetro especial y estandarizado su construcción hasta el punto de no encontrarse ya otro en el comercio.

### **Calorímetro Standard de Parr.**

El aparato consta de las siguientes partes (Fig. 1); 1) Un recipiente metálico o cámara de agua con capacidad de 2 litros de agua destilada y que lleva en su interior un soporte en forma de trípode (2) sobre el cual descansa la cámara de combustión (3). La cámara de combustión lleva cuatro paletas o agitadores (4) que sirven para mantener agitada el agua y poder así mantener la temperatura uniforme.

La cámara de agua va colocada dentro de un cilindro de madera (5) o de pasta aislante y esta cámara va dentro de otra cámara (6) de la misma pasta; de tal manera que entre la cámara de agua y el primer cilindro hay un espacio de aire, lo mismo que entre el cilindro (5) y el cilindro (6). Este aire tiene por objeto servir de aislante y así te-



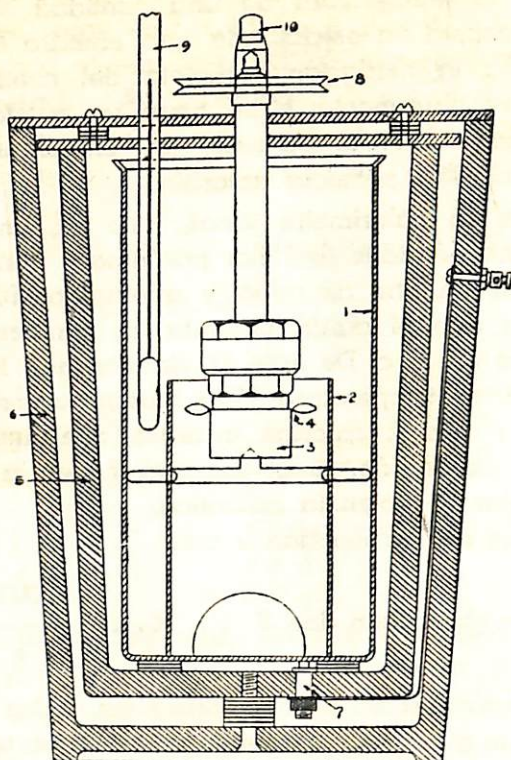
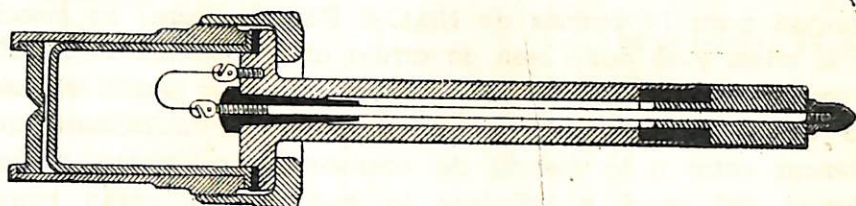


Fig. 1

tener un aislamiento más completo y una temperatura del agua más real. Estos espacios de agua hay necesidad de mantenerlos completamente secos. En el fondo del primer cilindro de pasta se encuentra un borne o contacto (7) que lleva una de las terminales del acumulador y transmite la corriente a la base de la cámara de combustión. En la parte alta de la cámara de combustión se acopla una polea (8) que se mueve con un motor pequeño a una velocidad de 150 v./minuto. El termómetro (9) entra a la cámara de agua atravesando las dos tapas de pasta de los cilindros y está sujeto por una varilla anclada a la tapa exterior del calorímetro. Este termómetro está graduado en centésimas de grado y sólo muestra una variación de temperatura de  $0^{\circ}$  c. a  $40^{\circ}$  c. Baja dentro de la cámara de aire hasta el nivel de la cámara de combustión, la cual está colocada en el centro de la cámara de agua.

**Cámara de combustión.** La cámara de combustión consta en esen-

cia de un crisol de acero (Fig.2.) donde se coloca la mezcla de combustible y reactivos ( $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{KClO}_4$ ). Este crisol tiene en el reborde superior un saliente que ajusta herméticamente por medio de un empaque de caucho a la varilla conductora de la corriente. Este conjunto, crisol y varilla a un segundo crisol el cual se cierra por medio de una tuerca perforada y tornillada, asegurando completamente el cierre entre la varilla de conexión y el crisol interior. El crisol tiene en el fondo un agujero circular que le sirve para apoyar la cámara de combustión sobre el trípode colocado en la cámara de agua.



**Fig. 2**

La varilla conductora está formada por un tubo dentro del cual va el alambre que conduce la corriente de uno de los bornes del acumulador. Este alambre pasa a través de tubos aisladores (guta-percha) y termina en un gancho. La varilla lleva atornillado el gancho que conduce la corriente del otro borne del acumulador pasando por la cámara de agua, teniendo un contacto metálico (Fig. 1) De los ganchos se suspende la resistencia que es la que inicia la combustión al cerrar el circuito.

Uno de los bornes de un acumulador se mantiene conectado al borne (7) del calorímetro, el otro se conecta o se pone en contacto con la terminal de la cámara de combustión en el momento de hacer el ensaye.

**Reactivos.** Los reactivos empleados en este calorímetro son: **peróxido de sodio** ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) químicamente puro. Este peróxido es sumamente higroscópico y por esto es necesario guardarlo completamente aislado de la humedad y del aire húmedo. Lo más recomendable es mantenerlo en recipientes de arcilla vitrificada con tapa ajustable por medio de resortes.

**Perclorato de potasio.** ( $\text{KClO}_4$ ). Con el fin de asegurar la combustión completa del combustible, se acostumbra mezclar a la oxilita ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ), un gramo de perclorato completamente seco. Este perclorato



acelera la combustión y la hace más uniforme; en el comercio se le conoce con el nombre de **acelerador**.

**Modo como se procede para la determinación de la potencia calorífica.** Se llena cuidadosamente con 2 litros de agua destilada la cámara de agua. Se secan completamente el crisol de combustión y la varilla de conducción dejándolas durante unos minutos en una estufa a  $120^{\circ}$  c., lo mismo que la medida del peróxido. Se pesa exactamente 0.5 gramos de carbón (o combustible) triturado hasta 100 mallas y se coloca dentro del crisol mezclando bien con un gramo de acelerador y una medida completa de peróxido (la medida tiene una capacidad para 14 gramos de  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ). Para asegurar la mezcla se tapa el crisol y se agita bien de arriba abajo. Colóquese rígidamente 7 centímetros<sup>3</sup> de resistencia standard, entre los ganchos; colóquese la varilla de conducción sobre el crisol de tal manera que la resistencia entre a la mezcla de combustión, colóquese el conjunto dentro del crisol y acóplese la tuerca atornillando completamente, hasta que el conjunto quede rígido. Colóquese sobre el crisol exterior las palitas agitadoras y llévase la cámara de combustión al trípode colocado dentro de la cámara de agua. Tápese el calorímetro y colóquese el termómetro en su lugar, léase éste cuando no se observe variación en la temperatura del agua. Una vez listo el aparato, ciérrese el circuito que producirá la combustión, manténgase agitada el agua y léase el termómetro cada minuto hasta que el termómetro se estabilice en un punto, cuando esto haya ocurrido, está lista la experimentación.

Cuando este calorímetro se quiera usar para combustibles líquidos como aceites, gasolinas, etc., se aconseja no usar mezcla de más de 0.3 gramos en el experimento.

**Factores de corrección.** El calorímetro Parr, tiene completamente estandarizados sus constantes y las correcciones por temperatura son las siguientes:

Resistencia eléctrica (7cm).	0.0030° c ó 0.005° F
Porcentaje de cenizas multiplicado por	0.0025° c ó 0.005° F
Porcentaje de azufre multiplicado por	0.0050° c ó 0.010° F
1 gramo de acelerador	0.1500° c ó 0.270° F

**Factores de hidratación.**

Para carbones bituminosos	0.0400° c ó 0.070° F
Para lignitos	0.0560° c ó 0.100° F

**Cálculo.** Para el cálculo de la potencia calorífica bastará restar a la temperatura observada, los valores anotados como **factores de corrección**. Esta diferencia multiplicada por la constancia 3.100 dará la potencia calorífica en calorías si se tomó dicha diferencia en grados centígrados y en B. T. U., si se tomó en grados Fahrenheit.

**Ejemplo.****Carbón de Amaqá**

Cenizas	13.40%
Azufre	1.25%

**Lecturas****Tiempo Temperaturas****Temp. salón 24 5.º c.**

1º	minuto	22.45	
2º	"	22.80	
3º	"	22.85	
4º	"	22.95	
5º	"	23.00	
6º	"	23.00	
7º	"	23.00	Inicial 23º c.
8º	"	23.90	
9º	"	24.50	
10º	"	24.85	final 24.85
11º	"	24.85	Pérdidas por radiación del 10º al
12º	"	24.70	15º minuto = $24.85 - 24.60 = 0.25$ ,
13º	"	24.65	o sea 0.05 por minuto
14º	"	24.60	<b>Corrección.</b> $5 \times 0.05 =$ 0.25
15º	"	24.60	Temperatura final corregida para radiación 25.10

**Factores de corrección.**

alambre de resistencia	0.0030	
cenizas $13.40 \times 0.0025$	0.0335	
azufre $1.50 \times 0.0050$	0.0075	
1 gramo de acelerador	0.1500	
hidratación	0.0400	0.234º c.

Temperatura final corregida	24.866º c.
Temperatura inicial	23.000º c.

Elevación de temperatura	1.866º c.
--------------------------	-----------



$$P. C. = 3.100 \times 1.866 = 5.784,6 \text{ calorías.}$$

**Constante.** El factor 3.100 se deduce de la siguiente manera:

El agua usada en la **cámara de agua**, más el agua equivalente al metal es de 2123.3 gramos. En la reacción, 73% del calor es debido a la combustión del carbono y 27% es debido al calor de combinación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

Tenemos que 0.5 gramos de carbón deben dar a 2,1233 kilos de agua las calorías suficientes para aumentar su temperatura en T grados. Este calor es igual a  $2,1233 \times T$  y como de este calor únicamente el 73% se debe a la combustión de carbón, se tendrá:

0.5 gramos de carbón dan  $2,1233 \times T \times 0.73$  calorías.

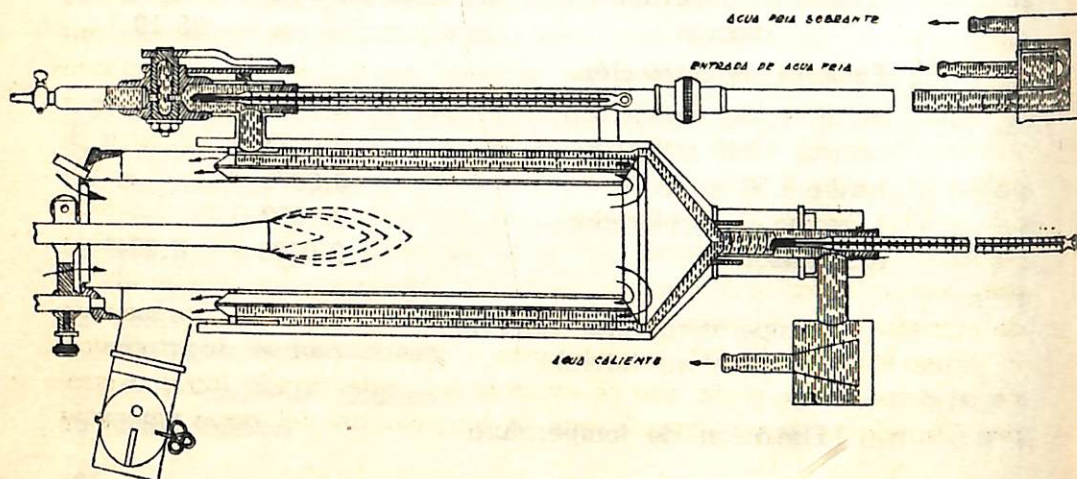
1.000 gramos de carbón darán X

$$X = \frac{2.123 \times 0.73 \times 1.000}{0.5} T \text{ de donde } X = 3.100 \times T, \text{ entonces}$$

tendremos que el factor constante es **3.100**.

**Calorímetro de Junkers.** Este calorímetro está estandarizado hoy, para los combustibles gaseosos. Este aparato quema gas cuyo volumen se mide exactamente por medio de un gasómetro, durante un tiempo dado. Por el aparato circula agua cuyo aumento de temperatura se determina durante este tiempo.

La figura 3 muestra un corte vertical de este calorímetro. El gas entra por un tubo con llave el cual se quema en un mechero Bunsen, si-



**Fig. 3**



tuado dentro de la cámara de combustión, la cual está formada por un cilindro de cobre. Por el espacio anular que forma el cilindro circula el agua, bañando una serie de tubos de cobre por los que descienden los productos de la combustión, que después de ceder al agua el calor, salen por una boca donde hay un diafragma regulador. Para evitar pérdidas por radiación existe una envolvente de cobre niquelado que forma una capa anular de aire. La velocidad del agua de refrigeración se conserva constante, mediante reboses que mantienen invariable los niveles de entrada y salida. El agua entra por donde indica la figura, desciende por el tubo, pasa por la llave que gradúa el gasto, penetra por el espacio anular, repartiéndose uniformemente, merced a un diafragma distribuidor, asciende y sale por donde indica la figura. La temperatura del agua al entrar y al salir se lee en los termómetros que aprecian décimas de centígrados. El agua condensada de los productos de la combustión se recoge. Tanto el agua que sale del calorímetro, como el agua de condensación, se deben recoger en probetas graduadas durante la determinación. En la figura 3 se ve el contador de gas. Para medir el agua hay una probeta de 2.000 cms. cúbicos y otra pequeña de 100 cms. cúbicos, así como un desagüe de embudo. Los distintos elementos que integran el conjunto se montan unos junto a otros, de manera que una sola persona pueda efectuar el ensayo.

El limbo principal del contador está graduado en litros, correspondiendo 3 litros a una vuelta de la aguja; en los contadores modernos hay además un limbo pequeño (en lugar de los 2 que muestra el dibujo) que registra cada vuelta de la aguja mayor. El regulador de presión **P** corrige la fluctuaciones que pudiera haber en la velocidad del gas. Es necesario disponer de 3 litros de agua por minuto. Se empieza empalmando el tubo de caucho **w** con el depósito de agua, e introduciendo los conductos, por donde sale el agua fría y caliente en el canal de desagüe **e**; se abre entonces la llave **g**, graduándola de modo que deje pasar unos 2 litros por minuto y medio, y una vez lleno el calorímetro se enciende el mechero. La temperatura del agua que sale, irá subiendo hasta que a los 5 minutos esta temperatura será aproximadamente constante; las temperaturas de entrada y salida deberán diferir en unos 20° c. y no conviene que la última exceda de 35° c., poco más o menos, porque de lo contrario se corre el riesgo de que se evapore en parte, dando lugar a errores. Cuando se haya logrado que la temperatura del agua que sale



sea constante, y en el momento que la aguja del contador pase por cero, se introduce el tubo de caucho c en la probeta de 2.000 cms<sup>3</sup>; a cada 500 cms<sup>3</sup> de agua que salgan, se leen ambos termómetros. Tan pronto como la probeta se llene se apaga el mechero. Deberá haberse quemado una cantidad de gas suficiente para producir 1.000 a 1.500 calorías por hora. La potencia calorífica podrá calcularse por la fórmula:

$$P. C. = \frac{\alpha (T - t) - 537 A_o}{G} \text{ en donde:}$$

P. C. = potencia calorífica.

$\alpha$  = el volumen de agua que circula por el aparato en litros o en kilogramos por minuto. (Si se hace por pesadas y lecturas al minuto)

T = temperatura media de salida.

t = temperatura media de entrada.

G = el volumen de gas quemado en litros.

Ao = cantidad de agua condensada, en litros por minuto.

Como en las operaciones metalúrgicas el vapor de agua que contienen los productos de la combustión no se condensa, sino que escapa con aquellos, su calor latente (537 calorías) debe restarse del total determinado por el calorímetro.

Este calorímetro sirve también, para calcular la potencia calorífica de combustibles líquidos, cambiando el gasómetro por una campana que quema sobre el platillo de una balanza, para anotar la pérdida de peso a medida que arde.

### **Temperatura de la llama o intensidad calorífica y cálculo de la misma.**

Los productos de la combustión, o sea todos aquellos cuerpos presentes después de la combustión reciben el calor desarrollado en ella, de tal manera que el conjunto tiene al final la misma temperatura. La palabra "productos de combustión" comprende todas las sustancias presentes, aun cuando no tomen parte activa en ella. Si la combustión se lleva a efecto en el aire, el nitrógeno de él forma también parte de los productos de combustión, a pesar de que dicho gas no efectúa ninguna reacción química. La distribución de la energía calorífica desarrollada se efectúa de acuerdo con la masa y calor específico de cada uno de los productos, es decir, según las cantidades de energía relativa que dichos cuerpos exigen para elevar su temperatura a la temperatura final de la combustión. En la industria se da el nombre de **humos** a los productos de la combustión.



La temperatura  $T$ , dependerá por consiguiente, de la potencia calorífica  $W$  del combustible, así como de los pesos o los volúmenes y los calores específicos de los productos de la combustión, de tal manera que:

$$T = \frac{W}{q s + q' s' + q'' s''} \text{ en donde } q, q' \text{ y } q'' \text{ representan los vo-}$$

lúmenes o pesos de los productos de combustión y  $s, s'$  y  $s''$  los calores específicos correspondientes, suponiendo que el combustible se encuentra a  $0^\circ \text{C}$ . y 760 m. m. de presión. De esta fórmula se deduce que la temperatura es directamente proporcional a la potencia calorífica y está en razón inversa del peso y calor específico de los productos; puede aumentarse calentando previamente el combustible y el aire, disminuyendo el peso de los productos, es decir, empleando el menor exceso posible de aire o limitando su proporción de nitrógeno. Una medida muy eficiente y que tiende también a aumentar la temperatura es eliminar la humedad de los combustibles.

La fórmula anotada resulta engorrosa, toda vez que el calor específico de los productos de combustión no es constante, sino que aumenta al crecer la temperatura, por ejemplo:

	Calor específico por $\text{m}^3$	
	a $0^\circ \text{C}$ .	a $t^\circ \text{C}$
Para el nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, y óxido de carbono (CO)	0.303	$0.303 + 0.000054 t$
Para anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ )	0.370	$0.370 + 0.00044 t$
Para vapor de agua	0.340	$0.340 + 0.00030 t$
Para $\text{SO}_2$	0.360	$0.360 + 0.00060 t$

De modo que el calor específico medio entre  $0^\circ$  y  $t^\circ$ , será igual al término constante, más la mitad del segundo; verbigracia para el nitrógeno será  $0.303 + 0.000027 t$ ; entre  $t^\circ$  y  $t'$  el valor medio será  $0.303 + 0.000027 (t' + t^\circ)$ :

Calor específico medio por metro cúbico a  $t^\circ \text{C}$ . para:

Nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y Co.	$0.303 + 0.000027 t$
Anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ )	$0.370 + 0.000220 t$
Anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ )	$0.360 + 0.000300 t$
Vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ )	$0.340 + 0.000150 t$

**Ejemplo.** Calcular la temperatura de la llama del carbón propuesto en el problema 4), cuya composición es la siguiente:



Carbono total	=	75.5%
Hidrógeno	=	4.3%
Oxígeno	=	16.5%
Azufre	=	0.5%
Nitrógeno	=	3.2%
Potencia calorífica	=	7.125 calorías

Supongamos que este carbón se quema con un exceso de aire de 20%.

$$\text{Volumen de CO}_2 \text{ producido} = \frac{755 \times 22.4}{12} = 1.409 \text{ litros.}$$

$$\text{Volumen de H}_2\text{O producido} = \frac{43 \times 22.4}{2} = 482 \text{ ''}$$

$$\text{Volumen de SO}_2 \text{ producido} = \frac{5 \times 22.4}{32} = 3.5 \text{ ''}$$

Volumen de oxígeno necesario para la combustión total descontado el oxígeno del carbono, igual a 1.538 litros.

Volumen de aire necesario igual a  $1.538 \times 4.805$  (relación de oxígeno y nitrógeno en el aire) = 7.390 litros.

Volumen de nitrógeno en el aire igual a  $7.390 - 1.538 = 5.852$  lit.

$$\text{Volumen de nitrógeno en el carbón} = \frac{32 \times 22.4}{28} = 56 \text{ lit.}$$

$$\text{Volumen de exceso de aire} = \frac{7.390 \times 20}{100} = 1.478 \text{ lit.}$$

La composición de los humos será la siguiente:

CO <sub>2</sub>	1.409	m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O (vapor)	0.482	m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	0.0035	m <sup>3</sup>
N (en el combustible) + N (del aire)	5.877,6	m <sup>3</sup>

$$\text{Aplicando la fórmula } T = \frac{\text{Potencia calorífica}}{qs + q's' + q''s''} \text{ tendremos:}$$

$$\text{Potencia calorífica} = T (qs + q's' + q''s'') \text{ Nos}$$

$7.125 = t [1.409 (0.37 + 0.00022 t) + 0.482 (0.34 + 0.00015 t) + 0.0035 (0.36 + 0.0003 t) + (5.8776 + 1.4780 (0.303 + 0.000027 t))]$ ; resolviendo el segundo miembro tendremos:  
 $7.125 = 0.00057 t^2 + 2.9152 t$ . Resolviendo esta ecuación de segundo grado tenemos:

$$t = \frac{-2.9157 \pm \sqrt{(2.9157)^2 + 4 \times 0.00057 \times 7.125}}{2 \times 0.00057}$$

$$t = \frac{-2.9157 + 4.9731}{0.00114} = \frac{2.0574}{0.0014} = 1.804^\circ \text{ centígr.}$$

Si en lugar de quemar este carbón con un 20% de exceso de aire, lo quemamos con un 60%, tendremos el siguiente calor de combustión:

$$\text{Aire en exceso} = \frac{7.390 \times 60}{100} = 4.434 \text{ m}^3, \text{ entonces}$$

$$7.125 = t 1.409 (0.37 + 0.00022 t) + 0.482 (0.34 + 0.00015 t) + 0.0035 (0.36 + 0.0003 t) + (5.8776 + 4.434) (0.303 + 0.000027 t).$$

$$7.125 = 0.000651 t^2 + 3.8108 t.$$

$$t = \frac{-3.8108 \pm \sqrt{14.5221 + 18,5535}}{0.0013} = \frac{1.9402}{0.0013} = 1.493^\circ \text{ c.}$$

Comparando estos dos valores se concluye que mientras menor sea el exceso de aire, tanto mejor será el rendimiento del combustible y por consiguiente es necesario calcular el exceso de aire lo más exacto que sea posible.

## LA VIVIENDA PARA CLIMA CALIENTE

Antes de entrar en detalles de lo que debe ser una vivienda higiénica en nuestros climas cálidos, es conveniente dar algunos datos históricos de la evolución que han sufrido los materiales hasta llegar al actual concreto y sus aplicaciones.

Los procedimientos de construcción estacionarios hasta el siglo pasado, en que la técnica, con los elementos nuevos adquirió un desarrollo cada vez más creciente, transformándose finalmente en una verdadera revolución de excelentes resultados para el progreso de la