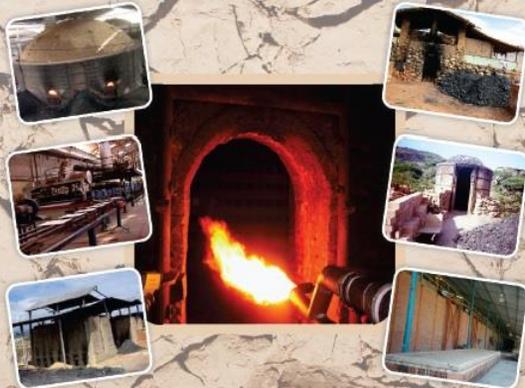




JUAN ISIDRO DÍAZ GARCÍA

Ingeniero de Materiales, Opción Cerámica (Universidad Simón Bolívar-Venezuela), M.Sc. Ingeniería de Materiales. (USB-Venezuela), D.E.A. Caracterización y Procesamiento de Materiales (Universidad de Málaga-España). Ha desarrollado múltiples proyectos como asesor en la industria cerámica en Venezuela y Colombia. Investigador principal de proyectos de investigación realizados en el área de Ingeniería Cerámica. Ha participado en cursos de capacitación en España, Colombia y Venezuela. Ha publicado diversos artículos en el área de Materiales Cerámicos en Revistas especializadas Nacionales e Internacionales.

Actualmente es Investigador en el área de Ingeniería Cerámica, Eficiencia Energética y Control de Emisiones. Miembro del Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica "GITEC". Docencia universitaria en las materias: Materiales y Ambiente, Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y Selección de Materiales en las carreras de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET-Venezuela). Director de diversos proyectos de Grado en los Programas Académicos de Maestría en Mantenimiento Industrial y de Maestría en Ingeniería Mecánica (UNET). Profesor de la maestría: Ingenierías de Fallos de la Maestría en Mantenimiento Industrial (Convenio UNET-UFPPS).



INTRODUCCIÓN A LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DE CERÁMICA TRADICIONAL.

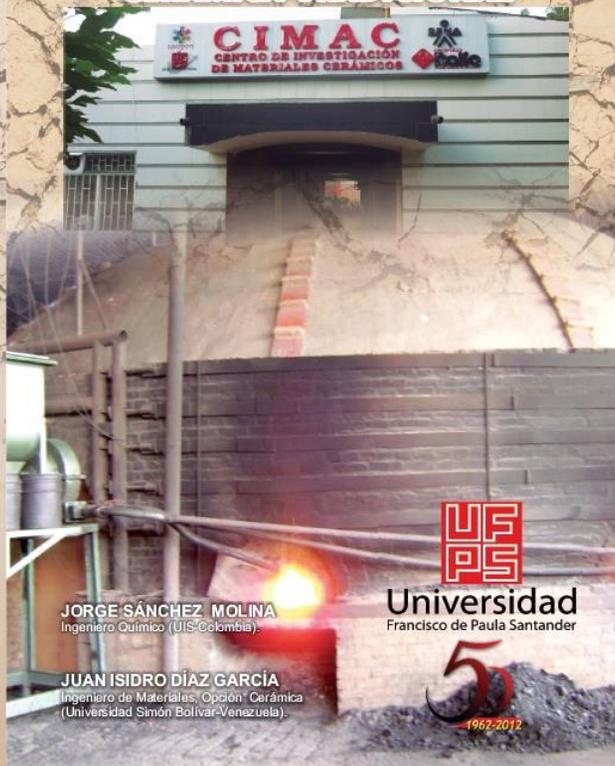
El presente libro condensa los conocimientos básicos sobre los hornos utilizados en la industria cerámica tradicional. Está conformado en capítulos que permiten tener una visión global del desarrollo y clasificación de los hornos cerámicos, los hornos más utilizados en la industria cerámica, los fundamentos para el diseño, construcción y operación de hornos cerámicos y finalmente un capítulo dedicado a los hornos utilizados en el departamento del Norte de Santander de Colombia.

Este texto sirve de respuesta a las inquietudes sobre el tema de parte de los estudiantes de las carreras de Ingeniería y Tecnología que frecuentemente realizan su Trabajo de pasantías en compañías del sector cerámico y a todos aquellos profesionales interesados en conocer un poco más sobre los hornos cerámicos tradicionales. Entre los puntos más importantes a ser tomados en cuenta para el manejo de los hornos cerámicos se pueden destacar: selección del tipo de horno de acuerdo con su uso, capacidad instalada de producción, temperatura máxima de servicio y el combustible apropiado de acuerdo con la disponibilidad y las normativas ambientales vigentes.

ISBN: 978-958-8489-15-5

INTRODUCCIÓN A LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA TRADICIONAL.

INTRODUCCIÓN A LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA TRADICIONAL



JORGE SÁNCHEZ MOLINA
Ingeniero Químico (UIS-Colombia).

JUAN ISIDRO DÍAZ GARCÍA
Ingeniero de Materiales, Opción Cerámica (Universidad Simón Bolívar-Venezuela).

UFPS
Universidad
Francisco de Paula Santander



JORGE SÁNCHEZ MOLINA

Ingeniero Químico (UIS-Colombia), M.Sc. Gerencia de Empresas mención Industria (UNET-Venezuela), Especialista en Gerencia de Empresas (Universidad de Santander), Especialista en Aseguramiento de la Calidad (Universidad Francisco de Paula Santander). Amplia experiencia en la industria cerámica en diversas empresas en Colombia y Venezuela. Investigador principal de proyectos de investigación realizados con el sector productivo y financiado por Colciencias. Ha participado en cursos de capacitación en Italia, España y Venezuela. Ha publicado diversos artículos en el área de Materiales Cerámicos en Revistas especializadas Nacionales e Internacionales.

Actualmente es Director del Centro de Investigaciones de Materiales Cerámicos de la Universidad Francisco de Paula Santander (CIMAC-UFPS), Vicerrector Asistente de Investigación y Extensión (UFPS), Director del Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica "GITEC". Asesor en el área de Materias primas en México y Transferencia de Tecnología Cerámica en Colombia. Docente universitario en las materias Cerámica I y II, Operaciones Unitarias y Balances de Materia de la carrera de Ingeniería Industrial de la UFPS. Director de proyectos de Grado en los Programas Académicos de Ingeniería Industrial.

INTRODUCCIÓN A LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA TRADICIONAL



JORGE SÁNCHEZ MOLINA
Ingeniero Químico (UIS-Colombia).

JUAN ISIDRO DÍAZ GARCÍA
Ingeniero de Materiales, Opción Cerámica
(Universidad Simón Bolívar-Venezuela).



Universidad
Francisco de Paula Santander



1962-2012

Introducción a los Hornos utilizados en la industria cerámica tradicional

JUAN ISIDRO DÍAZ GARCÍA

Ingeniero de Materiales (Cerámica). (USB-Venezuela))

MSc. En Ingeniería de Materiales. (USB-Venezuela)

D.E.A. Caracterización y procesamiento de materiales (UMA-España)

JORGE SÁNCHEZ MOLINA

Director del Centro de Investigaciones de Materiales Cerámicos de la Universidad
Francisco de Paula Santander (CIMAC-UFPS)

Ingeniero Químico (Universidad Industrial de Santander-Colombia)

MSc en Gerencia de Empresas mención Industria (UNET-Venezuela)



Universidad
Francisco de Paula Santander



ISBN: 978-958-8489-15-5

Agosto 2011

INTRODUCCIÓN A LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA TRADICIONAL.

Primera Edición Agosto de 2011

© Jorge Sánchez Molina y Juan Isidro Díaz García.

500 ejemplares

ISBN:978-958-8489-15-5

Editorial. Universidad Francisco De Paula Santander

Diseño, Diagramación e Impresión:

División de Publicaciones UIS

Cra 27 con Calle 9, Ciudad Universitaria

Tel: 6348418 - Bucaramanga - Colombia

Correo Electrónico: publicaciones@uis.edu.co

Está rigurosamente prohibido, sin la autorización escrita de los autores, bajo las sanciones establecidas en la ley, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier procedimiento, incluidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo público.

Impreso en Colombia.

A mi esposa Janeth Lucia Zúñiga Lázaro.
A mi hija Jessica Viviana Sánchez Zúñiga,
quien es la razón de mi existencia.

Jorge Sánchez Molina

Para Heidi por su amor incondicional.

Isidro Díaz García

CONTENIDO

PREFACIO	29
INTRODUCCIÓN	31
CAPÍTULO I. BREVE HISTORIA DE LOS HORNOS CERÁMICOS	33
1.1 Definición de horno	33
1.1.1 Definiciones generales	33
1.1.2 Definición específica	34
1.2 Desarrollo de los hornos cerámicos	34
Referencias	45
CAPÍTULO II. CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS CERÁMICOS	47
2.1 Clasificación de los hornos según el combustible utilizado	47
2.1.1 Hornos de combustibles sólidos	47
2.1.2 Hornos de combustibles líquidos	50
2.1.3 Horno de combustible gaseoso	51
2.1.4 Horno eléctrico	52
2.2 Clasificación de los hornos según el ciclo de trabajo y el sistema de calentamiento	53
2.2.1 Hornos intermitentes	54
2.2.1 Hornos continuos	58
2.3 Clasificación de los hornos según el tiro	61
2.3.1 Hornos de tiro ascendente	61
2.3.2 Hornos de tiro descendente	62
2.4 Clasificación según el movimiento de la carga	63

2.4.1 Hornos de carga periódica o intermitente	63
2.4.2 Hornos de carga continua	63
2.5 Según el método empleado para economizar calor	63
2.5.1 Hornos regenerativos	64
2.5.2 Hornos de recuperación	64
2.5.3 Horno compensador	65
2.6 Otras clasificaciones para los hornos	65
2.6.1 Clasificación según sus nombres	66
2.6.2 Clasificación según su uso	66
Referencias	67

CAPÍTULO III. HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA

71

3.1 Hornos periódicos (intermitentes)	71
3.1.1 Hornos de campana	71
3.1.2 Horno rural o pampa	72
3.1.3 Horno de llama horizontal	73
3.1.4 Hornos redondos o de llama invertida	74
3.1.5 Hornos continuos de zona móvil de cocción	74
3.1.5 Horno Hoffman	75
3.1.7 Horno túnel	79
3.1.8 Horno vertical para ladrillos (VSBK)	81
3.1.9 Horno vertical de cal	82
3.1.10 Horno rotatorio de cemento	86
3.1.11 Horno de fusión de vidrio	89
Referencias	92

CAPÍTULO IV. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HORNOS CERÁMICOS

97

4.1 Consideraciones preliminares para el diseño de un horno	97
---	----

4.2 Principios de diseño de un horno cerámico	98
4.2.1 Principio I	99
4.2.2 Principio II	100
4.2.3 Principio III	102
4.2.4 Principio IV	102
4.2.5 Principio V	103
4.2.6 Principio VI	104
4.2.7 Principio VII	104
4.2.8 Principio VIII	104
4.2.9 Ajustes debido a la altitud	105
4.3 Combustión, combustibles y quemadores	106
4.3.1 Combustible	106
4.3.2 Definición de combustión	108
4.3.3 Reacciones de combustión	109
4.3.4 Cálculos de combustión	110
4.3.5 Combustión en el interior de los hornos	116
4.3.6 Cámara de combustión	117
4.4. Materiales para la construcción de hornos	119
4.4.1 Materiales refractarios	120
4.4.1.1 Definición	121
4.4.1.2 Clasificación de los materiales refractarios	121
4.4.1.3 Propiedades de los materiales refractarios	124
4.4.1.4 Fibras cerámicas	130
4.4.1.5 Instalación tipo papel tapiz	131
4.4.1.6 Instalación de módulos de fibra cerámica	132
4.4.1.7 Instalación tipo enchapado	133
4.4.2. Desarrollo de materiales refractarios	134
4.5 Construcción del horno	136
4.5.1 Paredes del horno	138

4.5.1.1 Procedimiento sugerido para el cálculo de pérdidas de calor en las paredes del horno	139
4.5.1.2 Ejercicio de cálculo de pérdidas de calor a través de las paredes de un horno	141
4.5.2 Medidas de control de los hornos	154
Referencias	158

CAPÍTULO V. OPERACIÓN DE HORNOS CERÁMICOS

5.1 Sinterización y vitrificación	161
5.2 Cocción de los materiales cerámicos	164
5.2.1 Factores que afectan la cocción de los materiales cerámicos	166
5.3 Ciclo de quema de los productos cerámicos	167
5.3.1. Etapas de la quema	168
5.4 Carga de materiales y transferencia de calor dentro del horno	170
5.5 Quemadores	173
5.5.1 Quemadores atmosféricos	174
5.5.2 Quemadores para gas natural	175
5.5.3 Quemadores para aceites derivados del petróleo	176
5.5.4 Quemadores de carbón pulverizado (Carbojet)	178
Referencias	180

CAPÍTULO VI. CARÁCTERÍSTICAS DE LOS HORNOS EXISTENTES EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DE NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

6.1 Hornos colmena (Llama invertida)	185
6.1.1 Puertas del horno	187
6.1.2 Las hornillas o firebox	187
6.1.3 Las brameras	189

6.1.4	Las alfalcas	190
6.1.5	Los colectores de las hornillas	190
6.1.6	Sacos de contención de fuego	191
6.1.7	Las chimeneas	192
6.2	Hornos de fuego dormido	193
6.2.1	La puerta inferior	195
6.2.2	La puerta superior	195
6.2.3	Las paredes	195
6.2.4	El techo	196
6.3	Hornos pampa	196
6.4	Hornos Hoffman	197
6.5	Hornos túnel	201
6.6	Hornos de rodillos	203
6.7	Aspectos productivos de los hornos de la región	204
6.7.1	Productos cerámicos para construcción de paredes	204
6.7.2	Productos cerámicos para pisos	205
6.7.3	Productos cerámicos para pavimento de calles y sitios públicos de tráfico	206
6.7.4	Productos cerámicos para revestimientos	206
6.7.5	Productos cerámicos para techo	207
6.7.6	Piezas cerámicas decorativas	207
6.8	Curvas de cocción en algunos hornos de la región	208
6.9	Manejo del material en el horno y consumo de combustible	209
	Referencias	214

CAPÍTULO VII. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DE LOS HORNOS DE LA INDUSTRIA CERÁMICA	217
7.1 Emisiones atmosféricas en la industria cerámica	217
7.2 Métodos de medición isocinética	219
7.3 Eficiencia energética de la industria cerámica	223

7.3.1 Eficiencia energética	223
7.3.2 Consumo de energía y oportunidades de mejoramiento	227
7.3.3 Buenas y malas prácticas en equipos	228
7.4 Tendencias en el control de la contaminación ambiental asociada a la industria cerámica	230
Referencias	232

Figura	ÍNDICE DE FIGURAS	Pág.
1.1	Calcinamiento de arcilla sobre una hoguera	35
1.2	Cocción dentro de un agujero excavado en el suelo	35
1.3	Horno de pared de ladrillo y barro con aberturas en la parte inferior, utiliza madera como combustible	36
1.4	a) Horno de fuego dormido que utiliza madera como combustible, b) Cámara del horno, c) Horno cargado y en proceso de enfriamiento	37
1.5	Horno de tiro ascendente con chimenea en la parte superior del techo	38
1.6	Ejemplo de un horno tipo cueva	38
1.7	Horno con cámaras interconectadas	40
1.8	Horno de Botella de la fábrica de cerámica Pickman de la Cartuja de Santa María de las Cuevas, Sevilla	41
1.9	Horno tipo colmena a carbón de la empresa Cerámica Murano S.A.	42

1.10	Interior del horno túnel Gaudí instalado en la empresa española Ceranor S. A.	43
1.11	Fechas de desarrollo de los hornos utilizados en la industria cerámica	44
2.1	Esquema de un horno que utiliza combustible sólido (madera)	49
2.2	Ejemplo de elementos calefactores Globar® hechos de carburo de silicio	53
2.3	Diagrama referencial del ciclo de trabajo de un horno cerámico	54
2.4	Esquema de un horno circular brasileño que utiliza combustible sólido (madera)	55
2.5	Esquema de un horno rectangular	56
2.6	Horno eléctrico intermitente de la empresa Hornos del Valles	57
2.7	Horno fijo para industria alfarera con capacidad de 30.000 bloques/quema	58
2.8	Entrada del horno túnel y carros para el transporte de ladrillos refractarios	59

2.9	Horno de transferencia utilizado en la industria cerámica	61
2.10	Horno tipo ascendente tipo mufla	62
2.11	Horno tipo descendente (llama invertida)	62
2.12	Horno de recuperación	64
2.13	Horno de rodillos Sacmi utilizado en la producción de baldosas	65
3.1	Horno de campana	72
3.2	Horno rural o pampa	73
3.3	Vista superior de un horno de llama horizontal	73
3.4	Horno de llama invertida	74
3.5	Horno de zona móvil de cocción para producción de baldosas de barro cocido	75
3.6	Esquema del movimiento de los gases dentro de un horno Hoffman	76
3.7	Funcionamiento de un horno Hoffman antiguo	77
3.8	a) Techo de horno Hoffman, b) Mirilla del techo del horno Hoffman	79

3.9	Diferentes zonas dentro de un horno túnel	80
3.10	Curva de cochura en un horno túnel para el porcelanato de gres Sacmi	81
3.11	Horno vertical producido bajo el auspicio de Swisscontact Sudáfrica	82
3.12	Horno artesanal vertical utilizado para la producción de cal	83
3.13	Horno de cal ABC	85
3.14	Proceso de producción del cemento	86
3.15	Horno rotatorio utilizado para la producción de cemento	87
3.16	Corte longitudinal del horno rotatorio de la Fábrica Nacional de Cemento	88
3.17	Horno utilizado en el proceso continuo de flotación para producir vidrio plano	90
3.18	Esquema de un horno utilizado en la producción de fibra de vidrio	91
4.1	Un cubo es la mejor forma geométrica a ser utilizada en un horno	100
4.2	La dirección del calor debería seguir el arco	101

4.3	El calor fluye presentando dos ángulos rectos dentro del horno	101
4.4	El calor fluye de acuerdo al tiro del horno: cruzado, descendente o ascendente	103
4.5	Esquema de un proceso industrial de combustión	116
4.6	Requerimientos fisicoquímicos y camino termoquímico para el combustible	117
4.7	Sección de un horno utilizado en alfarería	118
4.8	Horno de zona móvil de cocción	119
4.9	Presentación al momento de la venta de los refractarios : aglomerados, monolíticos, preformados y fibras.	123
4.10	Ejemplo del ensayo de fractura de ladrillo refractario (Norma COVENIN 2106-83)	128
4.11	Esquema de instalación de fibra cerámica con pernos roscados	131
4.12	Módulo de fibra cerámica	132
4.13	Patrones de Instalación de módulos de fibra sobre lámina de acero	133

4.14	Patrones de DRX de muestras con 5 % p/p de MgO	135
4.15	Detalle de la formación de espinela en una muestra de concreto	135
4.16	Propiedades mecánicas de los concretos de espinela	136
4.17	Valores asumidos para la conductividad térmica	140
4.18	Valores asumidos para la conductividad térmica	144
4.19	Transmisión en la superficie para diferentes velocidades del aire	145
4.20	Pared del horno del ejemplo 4.2	146
4.21	Pared del horno del ejemplo 4.3	150
4.22	a) Forma de colocar los conos pirométricos b) Lectura de un cono pirométrico	155
4.23	Sistema de medición de temperatura mediante una termocupla	156
4.24	a) Termopar industrial completo, b) funda exterior o termopozo, c) Conectores	157

5.1	Cambios en la forma de los poros durante la quema	161
5.2	Diagrama general de fabricación de productos sinterizados	162
5.3	Baldosa producida a partir de polvos compactados	163
5.4	Diagrama de fase $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	164
5.5	Rangos de temperatura de quema(vitrificación) para diferentes productos cerámicos.	167
5.6	Corte de un carro dentro de un horno túnel utilizado para bicocción de sanitarios	170
5.7	Soportes para baldosas cerámicas (azulejos) hechos de material refractario (cordierita)	172
5.8	Quemador tipo Venturi	174
5.9	Arreglo de ventilador – quemador	176
5.10	Ejemplos de boquillas de atomización para combustibles líquidos	177
5.11	Sistema de alimentación con tornillo para carbón pulverizado	179

6.1	Tipo de conformados empleados en la fabricación de piezas cerámicas en el área metropolitana de Cúcuta	184
6.2	Tipo de hornos utilizados en la industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta	184
6.3	Horno colmena existente en la zona metropolitana de Cúcuta.	185
6.4	Esquema del horno colmena	186
6.5	Registro fotográfico de las partes del horno colmena	186
6.6	Registro fotográfico de las puertas del horno colmena	187
6.7	Registro fotográfico de las hornillas del horno colmena	188
6.8	Brameras del horno colmena	189
6.9	Alfalcas del horno colmena	190
6.10	Colector de hornilla del horno colmena	190
6.11	Sacos de fuego de un horno colmena	191

6.12	Registro fotográfico de un horno colmena en reconstrucción	192
6.13	Tipos de chimeneas utilizadas en los hornos colmena	193
6.14	Horno de fuego dormido de la zona metropolitana de Cúcuta	194
6.15	Registro fotográfico de un horno de fuego dormido existente en la zona metropolitana de Cúcuta	196
6.16	Registro fotográfico de un horno pampa de la zona metropolitana de Cúcuta	197
6.17	Horno Hoffman ubicado en la zona metropolitana de Cúcuta	198
6.18	Interior de un horno Hoffman en proceso de construcción	199
6.19	Registro fotográfico de la parte exterior de un horno Hoffman túnel existente en la zona metropolitana de Cúcuta	199
6.20	Cargue de cámara del horno Hoffman en una empresa de la región	199
6.21	Carbojet utilizado para la dosificación de carbón en los hornos cerámicos de la zona metropolitana de Cúcuta	200

6.22	Horno túnel de la zona metropolitana de Cúcuta	201
6.23	Interior de un horno túnel en construcción	202
6.24	Sistemas implementados en los hornos túnel de la región para la dosificación de combustible	203
6.25	Hornos de rodillos existentes en el área metropolitana de Cúcuta	204
6.26	Productos cerámicos para paredes elaborados en la zona metropolitana de Cúcuta	205
6.27	Baldosas cerámicas elaboradas en la zona metropolitana de Cúcuta	205
6.28	Piezas cerámicas para pavimento fabricadas en la zona metropolitana de Cúcuta	206
6.29	Revestimientos fabricados en la zona metropolitana de Cúcuta	206
6.30	Cubiertas para techo elaboradas en la zona metropolitana de Cúcuta	207
6.31	Piezas decorativas elaboradas en la zona metropolitana de Cúcuta	207
6.32	Acomodamiento del material para la cocción de pisos y enchapes en un horno colmena	212

6.33	Acomodamiento de ladrillo en el horno Pampa y fuego dormido	212
6.34	Acomodamiento de material de revestimiento en un horno túnel	213
7.1	Modelo M5-S Sistema Integral de Muestreos Isocinéticos de la empresa	222
7.2	Consumo final de energía por energético - sector industrial 2006	225
7.3	(a) Consumo de energía eléctrica y térmica por equipos. (b) Ahorros potenciales de energía eléctrica y térmica por equipos	228

Tabla	INDICE DE TABLAS	Pág.
2.1	Poder calórico inferior para biomasa residual en Colombia	48
2.2	Información del carbón utilizado en el Norte de Santander, Colombia	50
2.3	Características de los combustibles líquidos	51
2.4	Características de los combustibles gaseosos	52
2.5	Clasificación de los hornos según su ciclo de trabajo	60
3.1	Características del horno de producción continua ABC	84
4.1	Principios de diseño para hornos cerámicos artesanales	99
4.2	Relación entre el área necesaria para la combustión y el combustible utilizado	102
4.3	Clasificación de los combustibles químicos por fase y disponibilidad	107

4.4	Propiedades físico-químicas, mecánicas y térmicas de los materiales refractarios	124
4.5	Propiedades de los refractarios a ser utilizados en la construcción de hornos	125
4.6	Materiales cerámicos utilizados para la construcción de hornos	126
4.7	Materias primas para morteros y mezclas refractarias	129
4.8	Sectores a los que presta servicio la empresa Combustion Service	137
5.1	Factores que afectan la cocción de los materiales cerámicos	166
6.1	Tiempos de cocción en los hornos de la zona metropolitana de Cúcuta	208
6.2	Productos elaborados y consumo de combustible en los hornos del área metropolitana de Cúcuta	210
7.1	Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para las industrias existentes de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla	219

7.2	Métodos de evaluación de ductos y chimeneas	221
7.3	Valoración cualitativa del consumo de energía en el sector cerámico estructural	225
7.4	Características generales de los combustibles	226
7.5	Ejemplo de buenas y malas prácticas en hornos de la industria cerámica	229

Prefacio

Este libro tiene como objetivo condensar los conocimientos básicos sobre los hornos utilizados en la industria cerámica. Para la producción de materiales cerámicos se utilizan gran variedad de hornos y el profesional a cargo debe conocer los fundamentos básicos sobre los principios del diseño, construcción y operación de cada uno. Entre los puntos más importantes a ser tomados en cuenta para el manejo de los hornos cerámicos se pueden destacar: selección del tipo de horno de acuerdo con su uso, capacidad instalada de producción, temperatura máxima de servicio y combustible apropiado de acuerdo con la disponibilidad y las normativas ambientales vigentes. El libro está organizado en VII capítulos que permiten tener una visión global del desarrollo y clasificación de los hornos cerámicos, los hornos más utilizados en la industria cerámica, los fundamentos para el diseño, construcción y operación de hornos cerámicos; finalmente hay un capítulo dedicado a los hornos utilizados en el departamento del Norte de Santander de Colombia. Este libro sirve de respuesta a las inquietudes sobre el tema planteados por los estudiantes de las carreras de Ingeniería que frecuentemente realizan su trabajo de pasantía en compañías del sector cerámico y para todos aquellos interesados en conocer un poco más sobre los hornos cerámicos tradicionales.

La presente edición ha sido posible gracias al apoyo de la Universidad Francisco de Paula Santander y la Universidad Industrial de Santander, especialmente de la División Editorial y de Publicaciones.

INTRODUCCIÓN

El origen del horno se remonta a tiempos prehistóricos, cuando el hombre, al cocinar sus alimentos en una hoguera sobre recipientes de arcilla, descubrió que estos se hacían resistentes luego de ser retirados del fuego. Mucho tiempo ha pasado desde ese descubrimiento y los artículos cerámicos son cada vez más complejos, y tienen infinidad de aplicaciones en nuestra vida diaria. Desde elementos constructivos, tales como los ladrillos, tejas, bloques y baldosas de pared y piso, así como cerámica utilitaria del tipo vajillas. Es de resaltar que debido a sus extraordinarias propiedades, los materiales cerámicos se han asociado al progreso en las telecomunicaciones y computadoras, así como en la conquista del espacio, al ser usados como barrera térmica en los transbordadores espaciales. Actualmente, para la producción de materiales cerámicos se utilizan hornos que presentan una gran variedad de nombres y estilos, dependiendo del uso al que están destinados, por ello es necesario usar una serie de definiciones y clasificaciones que faciliten la comprensión del tema.

El personal técnico dedicado a la producción de materiales cerámicos debe poseer conocimientos básicos acerca de los hornos a utilizar, muchos de los cuales poseen características muy particulares debido a las condiciones específicas de cada producto. Puesto que es fundamental conocer los principios del diseño, operación y mantenimiento de los hornos en general, es necesario que el personal encargado del mantenimiento de los hornos tenga conocimiento de mecánica de fluidos, termodinámica, materiales refractarios y procesos cerámicos; sin embargo, esto no garantiza un buen desempeño de los hornos ya que en la mayoría de los casos la experiencia prevalece sobre estas áreas de conocimiento.

CAPÍTULO I

BREVE HISTORIA DE LOS HORNOS CERÁMICOS

Para comprender el funcionamiento de los hornos cerámicos es necesario conocer su historia, antecedentes y la forma como han mejorado su desempeño a través del tiempo.

1.1 Definición de horno

En el transcurso de la historia, el horno ha estado sometido a frecuentes mejoras tecnológicas hasta llegar a la magnitud y complejidad que tiene hoy en día. La definición de horno depende de su uso, siendo importante resaltar que para manejar eficientemente los términos se deben especificar a qué tipo de industria estará destinado el horno, entre los términos tenemos:

1.1.1 Definiciones generales

Espacio cerrado en el cual el calor es intencionalmente liberado por combustión, mecanismos eléctricos o reacciones nucleares ^[1].

Mecanismo que provee un procesamiento térmico de un artículo o sustancia en un ambiente de temperatura y atmósfera controladas, a veces por llama directa o a través de transferencia de calor por convección o radiación ^[2].

1.1.2 Definición específica

El horno es una cámara cerrada en la cual los objetos de arcilla son sometidos al tratamiento térmico necesario para hacerlos duros, fuertes e impermeables, y donde se funden los esmaltes. El grado de calor puede regularse, al igual que la atmósfera en el interior del horno [3].

En lengua inglesa se usan diferentes términos de acuerdo al uso del horno; por ejemplo se utiliza “*oven*” cuando el horno opera a una temperatura lo suficientemente alta para requerir paredes hechas con material refractario. El término “*kiln*” se refiere a un horno de alta temperatura utilizado para el tratamiento térmico de materiales no metálicos tales como cerámica, cemento y cal; por otra parte, cuando está involucrada la fusión de metales, como en la producción de acero, el término “*furnace*” es el más apropiado.

1.2 Desarrollo de los hornos cerámicos

El proceso de cocción de la arcilla es muy antiguo, y se remonta al momento en que el hombre controló el fuego y lo utilizó para cocinar sus alimentos, al tiempo que descubrió que los recipientes de arcilla seca que había modelado se endurecían al someterse al fuego. El siguiente paso fue ponerlos envases de arcilla en una hoguera, sistema que se utiliza aún en algunos lugares del mundo.



Figura 1.1. Calcinamiento de arcilla sobre una hoguera [4]

A este método de cocción en hoguera le siguió una variante que consistió en excavar un agujero en la tierra, dentro del cual se colocaban las piezas, se cubrían con madera y se iba atizando el fuego hasta que se consideraba terminada la cocción.

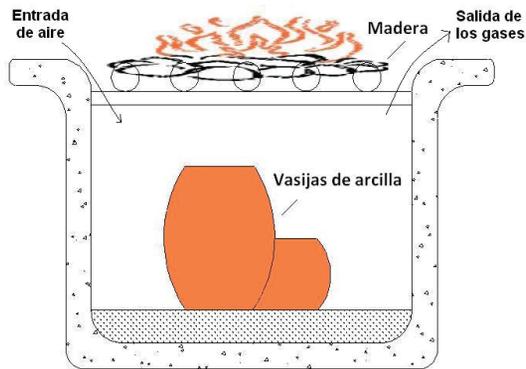


Figura 1.2. Cocción dentro de un agujero excavado en el suelo

Aunque este método de cocción perduró durante un largo tiempo, el ceramista de la antigüedad observó que esto no era del todo eficiente y poco a poco fue perfeccionándolo. Primero edificó una pequeña pared de ladrillo y barro en la que practicó una abertura en la parte inferior, construcción conocida como “hogar”, en la que quemaba la leña. Posteriormente fue techando la estructura (aunque el techo debía reconstruirse después de cada cocción). El techo permite que el calor de la cocción se acumule en el interior del horno, debido a que su construcción cerrada lo aísla completamente.



Figura 1.3. Horno de pared de ladrillo y barro con aberturas en la parte inferior, utiliza madera como combustible. (Sector Los Hornos, Estado Táchira, Venezuela)

El siguiente paso fue la construcción de un horno de tiro alto con una cámara inferior donde se quema combustible. En este horno se separa la zona de carga (cámara de cocción), de la zona de quema (cámara de combustión). Una vez cargado el horno las piezas se cubrían con trozos de cerámica rota y arcilla, para impedir que el calor se escapara.



Figura 1.4. a) Horno de fuego dormido que utiliza madera como combustible, b) Cámara del horno, c) Horno cargado y en procesos de enfriamiento (Hornos ubicados en el Departamento del Cesar, Colombia, fotos cortesía del Cimac/UFPS)

Este tipo de horno fue utilizado en Mesopotamia, Egipto, Grecia y Roma, donde reconstruían, después de cada hornada, la cámara de cocción, generalmente construida con arcilla y paja, dejando en la pared superior uno o varios agujeros para la salida de los humos.

Más tarde se fabricó un horno con techo fijo, en el cual se situó una chimenea para la salida de los gases de la combustión, con lo que se crea un “tiro”, el cual hace referencia a la circulación del aire del interior hacia el exterior; en este horno el aire pasa por el hogar y empuja el calor hacia arriba, como puede observarse en la figura 1.5.

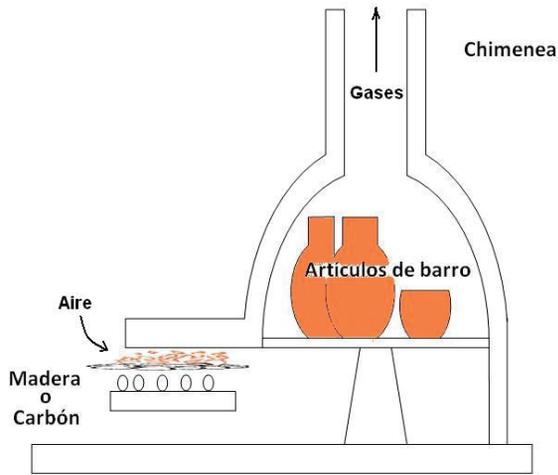


Figura 1.5. Horno de tiro ascendente con chimenea en la parte superior del techo

En el Lejano Oriente, Corea, China y Japón, los hornos fueron distintos a los utilizados por las civilizaciones Mediterráneas y del Medio Oriente, así, los chinos utilizaron hornos tubo pendiente y los japoneses hornos cueva, (ver figura 1.6).

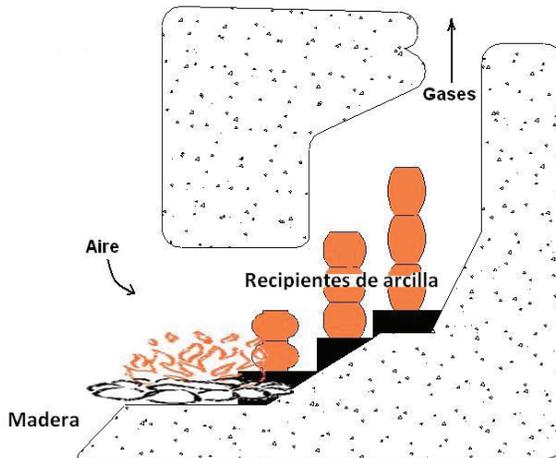


Figura 1.6. Horno tipo cueva

Los hornos japoneses se construían excavando una cueva en un terraplén con un ángulo de hasta 30° aproximadamente. En este horno la misma inclinación de la estructura hace de tiro, de manera que al encender el fuego en el hogar las llamas suben hasta la salida de los humos donde era desalojado. Los hornos chinos y coreanos en pendiente se construían sobre el terreno aprovechando el desnivel de éste. Estos hornos eran básicamente un tubo largo semienterrado con una pendiente de aproximadamente 25° y sin cámaras separadas en su interior. El fuego se encendía en la boca del horno y posteriormente se iba alimentando a través de un grupo de agujeros practicados en su parte alta y a ambos lados del horno. Durante la operación de estos hornos, se observa el color de la pieza cerámica sometida al fuego hasta que esté cocida y se agrega leña por los agujeros y así sucesivamente hasta terminar la cocción.

Más adelante se construyeron los hornos con cámaras independientes, pero comunicadas entre sí, de manera que el calor de la primera se transfiere a la segunda y así sucesivamente (ver figura 1.7). Estos hornos estaban constituidos por un mínimo de tres cámaras y un máximo de veinte, las cámaras van interconectadas de tal manera que el calor pase a través de una cámara hacia la otra, lo que permite el ahorro de tiempo y combustible.

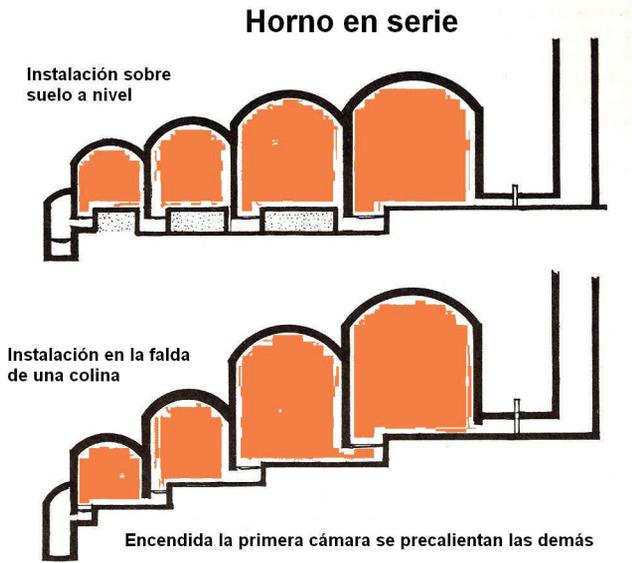


Figura 1.7. Horno con cámaras interconectadas ^[5]

Posteriormente se desarrolla el *horno de botella*, que fue llamado así debido a su forma. El largo cuello de la botella es la chimenea, y el cuerpo es la cámara de calentamiento. Al incorporar la chimenea los alfareros demostraron que estaban aplicando el principio de que el aire caliente se eleva y crea un vacío parcial abajo. La presión atmosférica fuerza el aire dentro, el cual se eleva al ser calentado y produce el tiro necesario en el horno.

El horno de botella llegó a tal perfección que se logró alcanzar temperaturas adecuadas para la cocción de porcelana (ver figura 1.8). Se construyeron hasta con cinco cámaras de calentamiento y tenían aperturas en la base del cuello para agujeros de encendido y para dejar escapar el vapor.



Figura 1.8. Horno de botella de la fábrica de cerámica Pickman de la Cartuja de Santa María de las Cuevas, Sevilla [6]

Para aumentar la producción se construyeron hornos cada vez más grandes, ejemplo de ellos es el *horno colmena* (ver figura 1.9), llamado así por su semejanza a un colmenar invertido. Este horno tiene varios agujeros para encendido dispuestos alrededor de su base circular; el calor se lleva hacia dentro, hacia arriba y después hacia abajo a través de los objetos que se queman y se le da salida por la chimenea. En la práctica moderna se induce una corriente forzada por medio de un ventilador alrededor de una chimenea central que puede ser de 15 a 30 metros de altura, donde se descarga la emisión de gases de combustión de varios hornos colmena.

Los combustibles usados son carbón, alimentado manualmente por el fogonero, carbón pulverizado impulsado por quemadores turboalimentados, fuel oil o gas natural. Los hornos colmena se usan mucho para la producción de ladrillos, tabiques, bloques y baldosas de piso y pared.



Figura 1.9. Horno tipo colmena a carbón de la Empresa Cerámica Murano S.A [7]

En Europa, específicamente en la zona mediterránea, no se produjo ningún avance en tecnología de hornos hasta el siglo XVIII, cuando comienzan a utilizarse nuevos combustibles y, a finales de siglo, los ingleses crean el horno horizontal continuo. Este tipo de horno, en el que la temperatura se mantiene estable y la carga se mueve dentro del horno, está diseñado específicamente para grandes producciones, en empresas de gran tamaño, en las que el sistema de producción suele constar de tres turnos de trabajo y funcionar los 365 días del año.

A partir de entonces los hornos se han venido perfeccionando en aspectos como los materiales empleados para su construcción y diseño, actualmente es corriente trabajar a temperaturas de más de 1000 °C.

Otro adelanto consistió en el uso de la electricidad para los hornos cerámicos, su principal ventaja es la versatilidad y la ausencia de atmósferas reductoras dentro del horno; este tipo de horno permite un mejor manejo de las curvas de quema y un excelente acabado final para esmaltes de difícil cocción.

Como ejemplo de los adelantos alcanzados en años recientes tenemos el horno túnel Gaudí, instalado en la empresa española Ceranor (ver figura 1.10), un horno especialmente preparado y equipado para alcanzar altas producciones de artículos cerámicos de gran tamaño, asegurando la máxima calidad. Este es el mayor horno túnel construido en el mundo para este tipo de productos (199,3 m de largo). Su tamaño y su avanzado sistema de control y gestión, junto con sus numerosos controles, convierten al horno Gaudí en una máquina de alta calidad, flexible y fiable.



Figura 1.10. Interior del horno túnel Gaudí instalado en la empresa española Ceranor S.A [8]

El desarrollo de los hornos industriales utilizados en la industria cerámica en épocas recientes se puede observar en la figura 1.11. El año 1693 corresponde a la fecha de construcción del primer horno industrial de ladrillos en el continente americano, el cual fue utilizado para la fabricación de los ladrillos usados en la construcción de los edificios de la primera universidad de Estados Unidos, College of William and Mary.

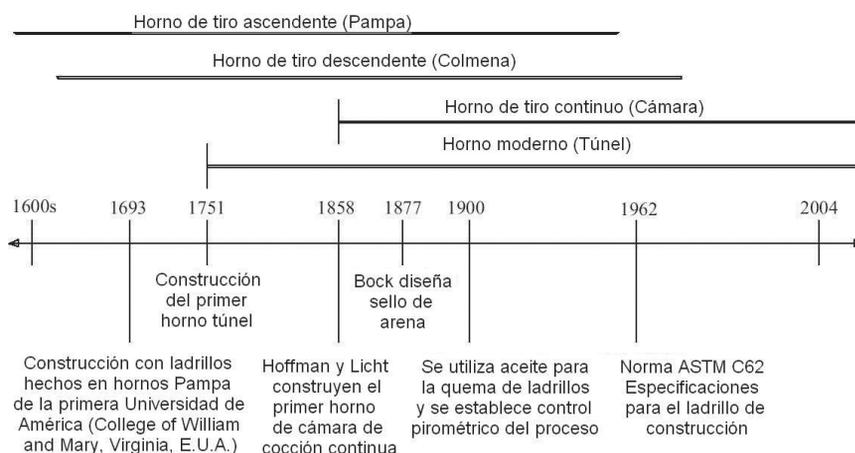


Figura 1.11. Fechas de desarrollo de los hornos utilizados en la industria cerámica ^[9]

REFERENCIAS

- [1] NORTH AMERICAN COMBUSTION (1986). North American Combustion Handbook. Volumen I. A basic reference on the art and science of industrial heating with gaseous and liquid fuels..Cleveland, OH: North American Mfg. Co., p. 289

- [2] MCGRAW-HILL (2004). Encyclopedia of Science and Technology. New york: The McGraw-Hill Companies, p. 2661.

- [3] COSTALES F., OLSON, Delmar (1983). Cerámica para escuelas y pequeñas industrias. México: CECSA. p.185

- [4] CHAVARRÍA, Joaquín (1993). The big book of ceramics. Barcelona, España: Parramón Ediciones, p. 18.

- [5] HOWELL, Frank; WOODWARD, Carol (1981). La artesanía de la cerámica. México: CECSA, p. 54.

- [6] [Fotografía] Disponible en internet en <http://gales.blogueria.org/category/colores/> Consultado 05 de julio 2010.

- [7] [Fotografía] Tomada por el autor durante la visita industrial a una empresa ladrillera del área metropolitana de Cúcuta. Noviembre de 2010.

- [8] Aspectos generales de un horno de altas prestaciones técnicas y productivas para la cocción de artículos huecos de gran formato (2010). Barcelona (España): Edición de revistas técnicas especializadas. Editorial PUBLICA S.A. pp.532-534.
- [9] LAFER Debra, BOGGS Justin, & COOPER Nicole (2004). Engineering Properties of Historic Brick: Variability Considerations as a Function of Stationary Versus Nonstationary Kiln Types. JAIC, Volume 43, Number 3, Article 4, p. 255.

CAPÍTULO II

CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS CERÁMICOS

El horno es la pieza fundamental en las empresas de producción cerámica; en su interior la arcilla pasa de ser maleable y dúctil a ser un material duro de larga duración por el efecto del calor aplicado. El material a transformar se denomina carga. La forma externa del material estará determinada por las operaciones previas de conformado (extrusión, prensado o vaciado), y sufre cambios físicos y químicos dentro del horno, el cual actúa como un reactor a temperatura elevada.

Los hornos se pueden clasificar de diversas formas, entre ellas por la fuente energética con la que trabajan, el sistema de calentamiento, el ciclo de trabajo utilizado, el tiro y la densidad de carga. A continuación se describe en detalle cada una de ellas.

2.1 Clasificación de los hornos según el combustible utilizado

Esta clasificación es muy importante, ya que los problemas asociados al uso de cada combustible son determinantes al momento de diseñar, operar y realizar el mantenimiento de los hornos cerámicos.

2.1.1 Hornos de combustibles sólidos

Son hornos que trabajan con madera, carbón, hulla, lignito, antracita u otro combustible sólido disponible. En Colombia por

ejemplo, se utiliza biomasa residual, que son los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica. Algunos ejemplos de biomasa son los residuos de las cosechas, las podas de zonas verdes urbanas, los efluentes ganaderos, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los residuos orgánicos de plazas de mercado ^[1]. El poder calórico para la biomasa residual se puede observar en la tabla 2.1.

Tabla. 2.1. Poder calórico inferior para biomasa residual en Colombia ^[2].

Sector	Fuente de biomasa	Tipo de residuo	PCI [Kcal/kg]
Agrícola	Palma de aceite	Cuesco	3.988
		Fibra	4.274
		Raquis	4.021
	Caña de azúcar	Rac	3.684
		Bagazo	4.456
	Caña para panela	Bagazo	4.456
		Hojas secas	4.007
		Rac	3.684
	Café	Pulpa	4.259
		Cisco	4.430
		Tallos	4.384
	Maíz	Rastrojo	3.429
		Tusa	3.390
		Capacho	3.815
		Hojas secas	4.274
	Arroz	Tamo	3.113
		Cascarilla	3.603
	Banano	Raquis	1.809
		Vástago	2.032
		Rechazo	2.488
Plátano	Raquis	1.808	
	Vástagos	2.032	

Sector	Fuente de biomasa	Tipo de residuo	PCI [Kcal/kg]
Pecuario	Avícola	Ponedoras	2.248
		Engorde	3.645
	Bovino	Leche	2.801
		Doble propósito	3.680
		Carne	3.783
	Porcino	Tecnificado	6.049
No tecnificado		4.163	
RSOU	Plaza mercado	Sólido orgánico	3.772
	Centro acopio	Sólido orgánico	3.772
	Poda	Sólido orgánico	3.772

Los combustibles sólidos tienen como ventaja sus gastos mínimos de instalación, la combustión económica y su fácil suministro y transporte. Sus inconvenientes son el ataque químico asociado a los humos en las paredes de las cámaras, la necesidad constante de atizar y de evacuar las escorias, la dificultad en la regulación de la temperatura y control de la atmósfera del horno y por último, la necesidad de una chimenea de grandes dimensiones para evacuar los gases asociados a la combustión.

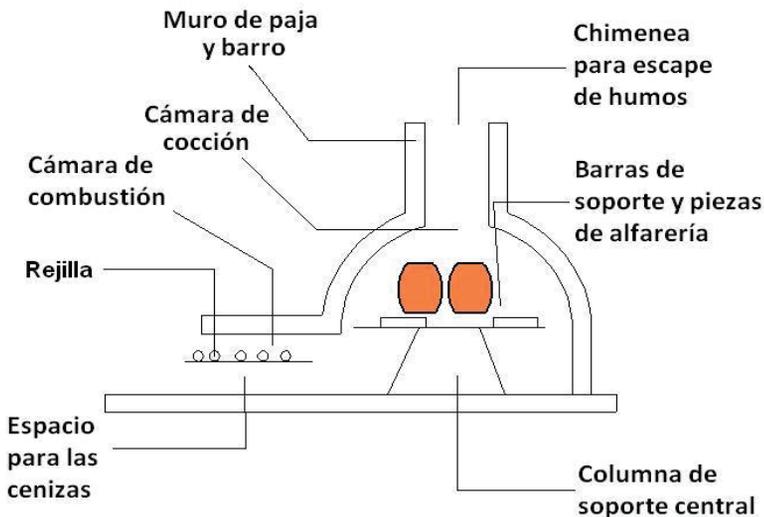


Figura 2.1. Esquema de un horno que utiliza combustible sólido (madera)

En la zona del Norte de Santander se utiliza el carbón como combustible para el proceso de producción de cerámica tradicional (ver tabla 2.2).

Tabla. 2.2. Información del carbón utilizado en el Norte de Santander, Colombia ^[3].

Nombre de la mina	Ubicación	Poder calorífico superior (Kcal/kg)
La Aurora	Cerro San Roque (Sardinata)	7.200 – 7.700
Guacarí	Cerro La Vieja (Sardinata)	
La Esperanza	Cerro León (El Zulia)	
El Guayabo	Vereda El Guayabo (El Zulia)	6.750 – 7.260
El Peñón		
Tienditas		
La Guaqueña	Cerro Guayabo (El Zulia)	6.900 – 7.500
Dinastía	San Pedro (El Pórtico)	7.000 – 7.750

2.1.2 Hornos de combustibles líquidos

El combustible líquido más utilizado es el gasoil, también llamado combustible diesel, petrodiesel o ACPM (aceite combustible para motores), producto de la destilación del petróleo. Sus propiedades, a 15 °C, se pueden observar en la tabla 2.1. La ventaja de estos hornos radica en lo económico del combustible, el fácil y seguro transporte, la alimentación automática del combustible, su alta eficiencia y fácil control de la atmósfera. Entre las desventajas se pueden nombrar la necesidad de atomizar el combustible y en muchos casos, el hecho de que cuando los aceites son muy pesados, se deben calentar para disminuir su viscosidad; en el caso del fueloil (gasóleo industrial) se eleva la temperatura normalmente entre

60 y 70°C; además puede producirse una mala atomización que acelera enormemente la desintegración del revestimiento del horno, elevando el costo asociado a su mantenimiento. Las características del fueloil pueden observar en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Características de los combustibles líquidos [4].

Combustible	Densidad [gr/cm³]	Potencia calorífica [Kcal/Kg]
Gasoil (ACPM , aceite combustible para motor, o diesel fuel)	0,8398	8850 a 9500
Fuel oil	0,96 – 0,99	8850 a 9500

2.1.3 Horno de Combustible Gaseoso

Los hornos alimentados por gas son muy utilizados a pesar de que su costo inicial es elevado; entre las ventajas de este tipo de hornos tenemos el bajo costo de mantenimiento, alta disponibilidad del equipo (reparaciones escasas), permite la obtención de distintas condiciones atmosféricas en su interior, la mayoría de estos hornos alcanza fácilmente los 1400 °C y pueden resistir condiciones de reducción (atmósfera rica en CO), aunque estas se produzcan en todas los ciclos de quema. Se utiliza el gas licuado de petróleo (GLP) y gas natural (mezcla de gases metano, propano y butano).

Tabla 2.4. Características de los combustibles gaseosos ^[4].

Combustible	Gravedad específica a 15°C [kg/m³]	Poder calorífico superior
Gas natural	660 ± 10	10 500 [Kcal/m ³]
Gas licuado de petróleo (GLP)	500 – 580	11 900 [Kcal/kg]

2.1.4 Horno eléctrico

La electricidad es el medio ideal de calentamiento para el tratamiento térmico de los materiales cerámicos, ya que permite un fácil control de la temperatura, no requiere respiraderos, ni tiros (natural o inducido), y además tiene un bajo costo inicial.

Existen dos tipos básicos de hornos eléctricos, los de elementos metálicos y los de elementos no metálicos. Los elementos metálicos están presentes en forma de alambres o de cinta y se hacen de aleaciones que ofrecen gran resistencia eléctrica; los elementos no metálicos son de naturaleza cerámica, se hacen de carburo de silicio fundido en forma de varilla de diferentes diámetros (ver figura 2.4). Los elementos no metálicos son capaces de alcanzar temperaturas mayores que los metálicos, los primeros pueden alcanzar los conos 15 (790 °C) y 18 (696 °C) mientras los últimos alcanzan aproximadamente el cono 10 (887 °C)^[5].

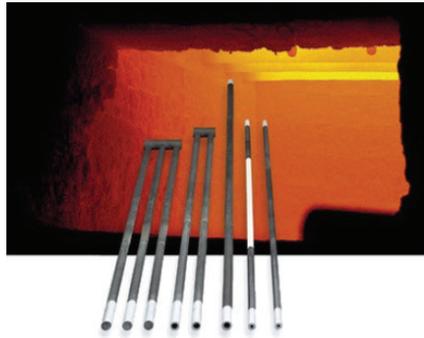


Figura 2.2. Ejemplo de elementos calefactores Globar® hechos de carburo de silicio [6].

Las ventajas de los hornos eléctricos son las siguientes: a) se pueden construir en gran variedad de tamaños, b) son portátiles y utilizables en cualquier lugar donde exista energía eléctrica, c) el costo inicial de los hornos eléctricos es más bajo que el de otros tipos de horno para iguales temperaturas y propiedades, d) son fáciles de construir y mantener, e) son más sencillos de controlar. Su principal desventaja, y muy importante a tener en cuenta a la hora de utilizarlo diariamente, es el alto costo de operación para una fábrica, lo que implica altos costos de producción de los materiales elaborados.

2.2 Clasificación de los hornos según el ciclo de trabajo y el sistema de calentamiento

Se denomina *ciclo de trabajo* al historial térmico al que se somete la pieza cerámica durante la quema; es muy importante el control de la temperatura respecto al tiempo transcurrido, ya que se deben respetar los coeficientes de expansión térmica, que permiten la dilatación del material sin problemas de fisuras ni

daños superficiales. Por otra parte, el sistema de calentamiento es determinante a la hora de escoger los hornos para un proceso de producción.

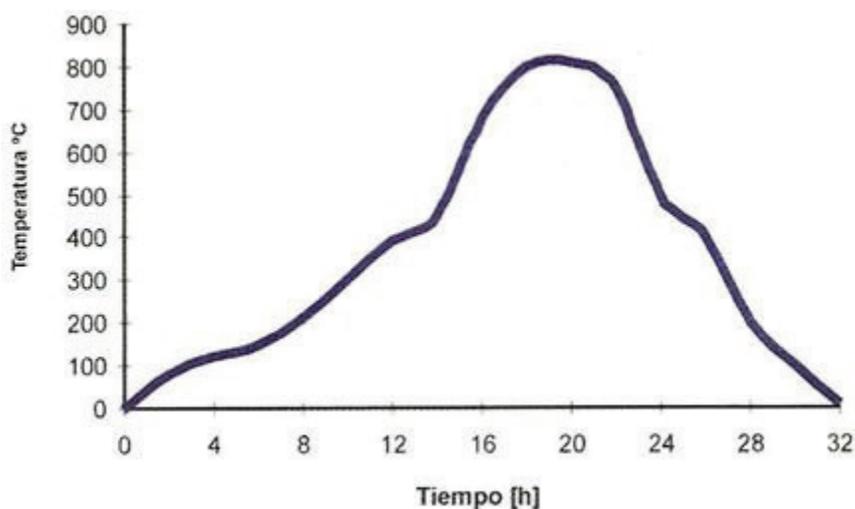


Figura 2.3. Diagrama referencial del ciclo de trabajo de un horno cerámico

Los hornos se clasifican por su ciclo de trabajo en *intermitentes* (periódicos) o *continuos*.

2.2.1 Hornos intermitentes

Los *hornos intermitentes* se cargan, encienden, enfrían y descargan en lo que podría llamarse un ciclo vertical y se fabrican en tamaños y capacidades que varían desde pequeños hornos de prueba para laboratorios hasta los grandes hornos de ladrillos refractarios de tipo industrial. Los hornos intermitentes se adaptan especialmente a encendidos ocasionales y a las instalaciones en las que el costo inicial bajo es la condición

primordial; estos hornos pueden ser de planta circular, ovalada, cuadrada o rectangular.

- a) El horno circular posee la ventaja de sus reducidos cortes de material al momento de la construcción y el bajo mantenimiento, en comparación con su capacidad para almacenar carga; además posee una distribución más uniforme de temperatura. Su desventaja principal es la dificultad en la colocación de la carga y la permanente vigilancia durante la quema para obtener resultados satisfactorios.

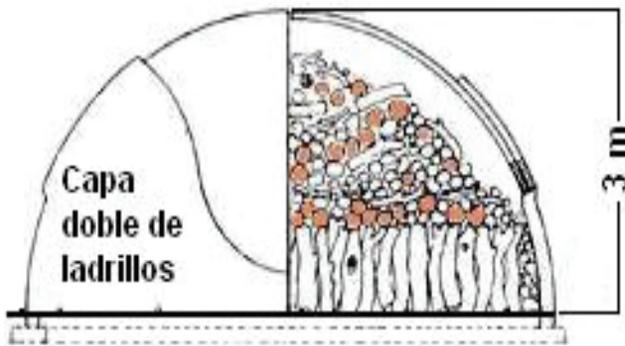


Figura 2.4. Esquema de un horno circular brasileño que utiliza combustible sólido (madera) ^[7]

- b) El horno rectangular presenta la ventaja del pleno aprovechamiento del espacio, se utiliza para productos de gres (mezcla de arcillas, feldespato y arenas silíceas) y material sanitario (artículos de baño como tazas y tanques) que no pueden disponerse económicamente en un horno circular. Las paredes y el techo pueden construirse con base en una capa

interior doble de refractarios y una capa de ladrillos en el exterior o una distribución de triple capa, en la que los ladrillos están reforzados por aislantes. El techo también puede construirse por vaciado de concreto refractario, como puede observarse en la figura 2.5. El uso de materiales refractarios aislantes permite conseguir una gran economía en el consumo de energía, peso de construcción y tiempo de cocción de la carga.

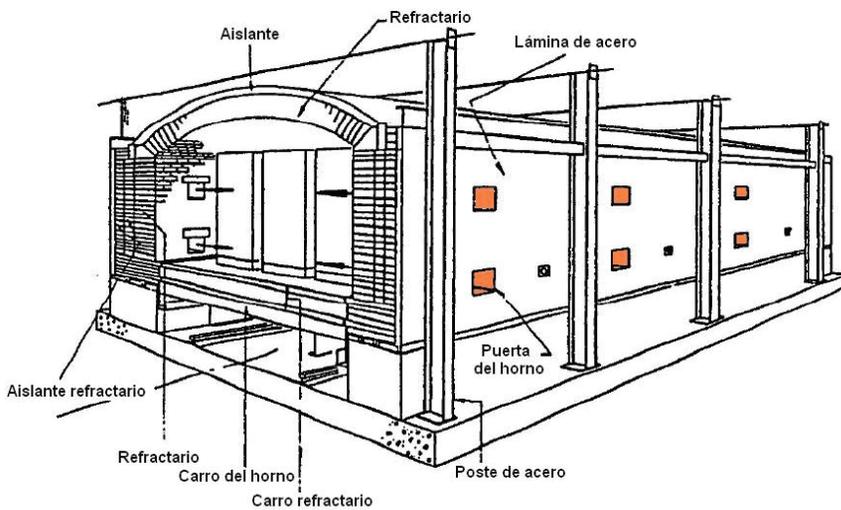


Figura 2.5. Esquema de un horno rectangular [8].

El horno intermitente puede tener una o dos puertas de acceso para introducir y extraer las piezas a calcinar, dichas aberturas se cierran con puertas construidas con ladrillos refractarios o fibras cerámicas durante la cocción; también se utilizan puertas verticales deslizantes que se mueven mediante el uso de contrapesos.

La tendencia en los hornos intermitentes para uso artesanal de baja producción está orientada hacia la construcción de hornos pequeños con paredes de materiales aislantes calentados eléctricamente, debido a factores como cocción más uniforme, mayor calidad en las piezas producidas con cocción automática programada y condiciones de trabajo más agradables. Estos hornos pueden permanecer estáticos o pueden ser móviles; un ejemplo puede observarse en la figura 2.6.



Figura 2.6. Horno eléctrico intermitente de la empresa Hornos del Valle ^[9].

Los hornos intermitentes tradicionales utilizaban combustibles sólidos, que presentaban resultados desfavorables en comparación con los actuales en lo que se refiere a rendimiento y eficiencia, por lo que su construcción ha sido descartada en los países desarrollados. Sin embargo, tienen una vida útil prolongada y por esto se seguirán utilizando en algunas pequeñas empresas ubicadas en países con reservas de

combustibles sólidos. Entre las desventajas que presentan está la contaminación ocasionada por los humos del sitio de trabajo y del ambiente externo. Además necesitan mayor cantidad de mano de obra para su manipulación y la cocción es menos uniforme y de menor calidad.



Figura 2.7. Horno fijo para la industria alfarera con capacidad de 30 000 bloques/quema (Cortesía de la empresa Combustion Service S.A)^[10].

2.1.2 Hornos continuos

En los hornos continuos los objetos que van a calcinarse se mueven en un sistema transportador desde la zona de carga, a través de las zonas de calentamiento y enfriamiento, siendo después descargado todo esto en un ciclo sin fin. Los objetos se cargan y descargan simultáneamente.

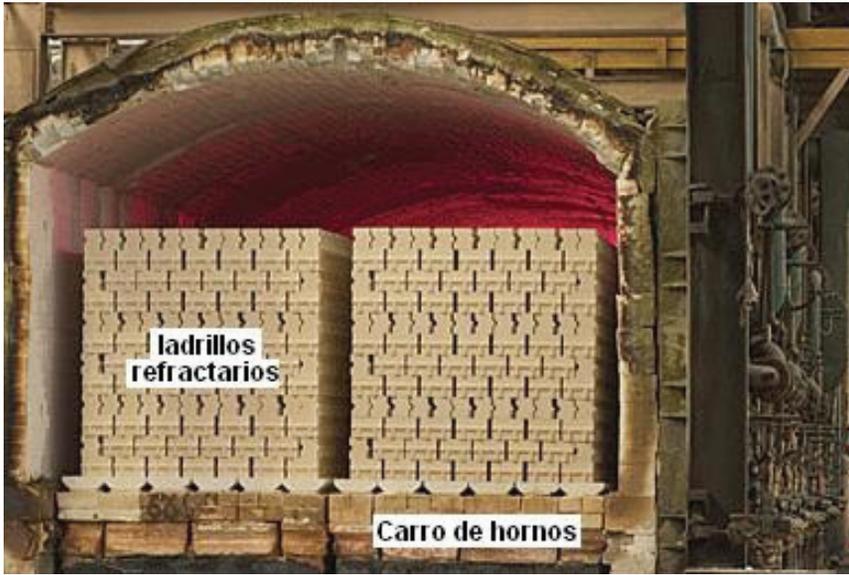


Figura 2.8. Entrada del horno túnel y carros para el transporte de ladrillos refractarios ^[11].

Los hornos continuos son especialmente útiles cuando se trata de una gran producción. Su costo inicial es mayor, pero el consumo de combustible utilizado por unidad producida [Btu/kg] es más bajo, ya que el calentamiento por unidad de objetos es menor porque se desperdicia menos calor durante el ciclo de calentamiento-enfriamiento. El aire caliente se usa para secar los objetos crudos (verdes) en los secaderos de material recién conformado.

A continuación se presenta un cuadro resumen de la clasificación de los hornos según su ciclo de trabajo y sistema de calentamiento:

Tabla 2.5. Clasificación de los hornos según su ciclo de trabajo^[12]

Sistema de calentamiento		
Hornos continuos		Hornos intermitentes
A	B	
Caldeo directo con llama o corriente eléctrica	Con llama a través de mufla	Caldeo directo con llama o corriente eléctrica
Sistema de desplazamiento de los productos:	Sistema de desplazamiento de los productos:	
- En vagonetas	- En vagonetas	- Horno de cámara
- Sobre rodillos	- Sobre rodillos	- Horno de solera móvil
- Sobre deslizaderas	- Con solera lisa	- Horno de campana ascendente
- Con solera móvil		
- Transportador de tela metálica		
- Sobre soportes y bandejas		
- Sobre "colchón de aire"		
- Otros tipos de mecanismos transportadores		

El *horno de transferencia* presenta una combinación entre el horno periódico y el horno continuo. Las piezas cerámicas se cargan en carros con ruedas metálicas y soportes refractarios y al entrar al horno cada carga permanece en una zona de calentamiento por un tiempo determinado. Es muy utilizado en la industria de los artículos sanitarios (ver figura 2.9).



Figura 2.9. Horno de transferencia utilizado en la industria cerámica ^[13].

2.3 Clasificación de los hornos según el tiro

El tiro del horno corresponde al flujo de gases dentro del horno y puede ser natural (debido al ascenso de los gases por ser más ligeros que el aire) o inducido mediante ventiladores (tiro forzado).

2.3.1 Hornos de tiro ascendente

En este tipo de horno los gases calientes de la combustión entran en la zona principal del horno directamente desde el hogar, para luego salir por la chimenea que se encuentra en su parte superior (ver figura 2.10); su desventaja es que deja escapar gran cantidad de calor por la chimenea trayendo como consecuencia mayor gasto de combustible.

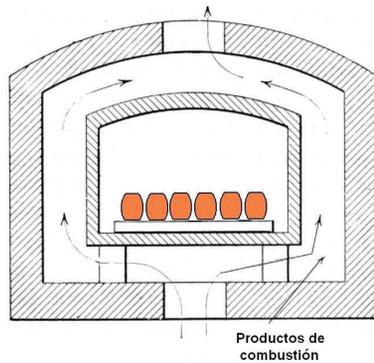


Figura 2.10. Horno tipo ascendente tipo mufla [14].

2.3.2 Hornos de tiro descendente

En los hornos de tiro descendente los gases calientes producto de la combustión son obligados a describir recorridos más largos dentro del horno y por lo tanto a transferir más calor a las piezas que se queman (ver figura 2.11). Estos hornos tienen los conductos de salida de los gases en su base, y por ello las piezas superiores se calientan antes que las del fondo.

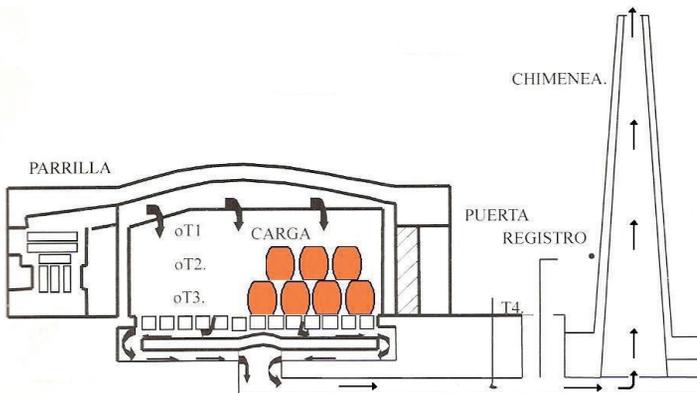


Figura 2.11. Horno tipo descendente (llama invertida) [15].

2.4 Clasificación según el movimiento de la carga

El movimiento de la carga dentro del horno puede ser periódico o continuo. El desplazamiento de los productos dentro del horno cerámico depende del tamaño de la producción final, prefiriéndose los hornos periódicos para producciones pequeñas y los hornos continuos para grandes volúmenes de producción.

2.4.1 Hornos de carga periódica o intermitente

En este tipo de hornos la carga no se mueve durante el calentamiento; en esta clasificación se encuentran comprendidos los hornos de tratamientos térmicos para piezas muy grandes, segundas quemas de esmalte, muflas de baja capacidad y templado de vidrio.

2.4.2 Hornos de carga continua

En los hornos continuos la carga se mueve constantemente: esta entra por un punto y sale por otro, pudiendo moverse por un empujador, sobre transportador en vagonetas y por gravedad. Las vagonetas se usan en los hornos túnel mientras la gravedad se aprovecha en los hornos verticales rotativos como el de producción de cal y de clinker (cemento).

2.5 Según el método empleado para economizar calor

Cuando se aprovecha el calor sensible de los productos de la combustión para precalentar el aire comburente, el combustible o la carga entrante, se ahorra combustible.

2.5.1 Hornos regenerativos

En los hornos regenerativos el aire comburente y los productos de combustión circulan alternativamente por el mismo regenerador y la llama pasa por el horno en sentido alternativamente opuesto.

2.5.2 Hornos de recuperación

En un horno de recuperación, los productos de la combustión y el aire comburente circulan por los lados opuestos de una pared divisoria transmisora de calor y la llama recorre el horno siempre en el mismo sentido.

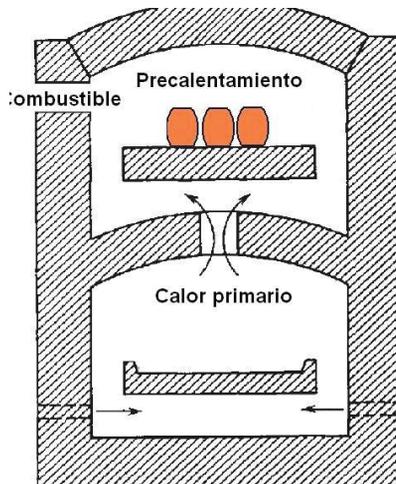


Figura 2.12. Horno de recuperación [16].

2.5.3 Horno compensador

Cuando la carga sale del horno a la temperatura ambiente o cercana a ella, el aire necesario para la combustión o la carga entrante puede calentarse previamente con el calor liberado por los productos que salen. Un ejemplo de ello es el horno túnel utilizado para producir baldosas de piso y pared, fabricado por la compañía italiana Sacmi y utilizado en Colombia por empresas del ramo.

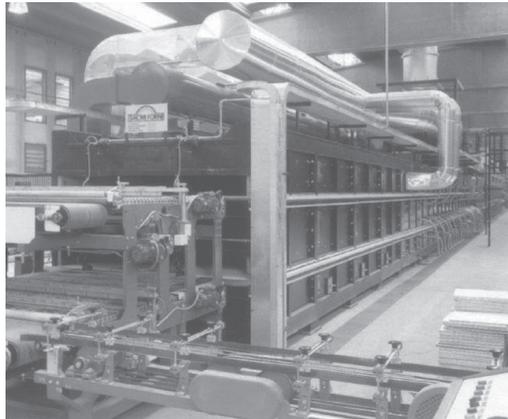


Figura 2.13. Horno de rodillos Sacmi utilizado en la producción de baldosas^[17].

2.6 Otras clasificaciones para los hornos

Existen otras clasificaciones basadas en diferentes características de los hornos, entre ellas tenemos:

2.6.1 Clasificación según sus nombres

Algunos términos utilizados en el ámbito industrial son fogón, mufla, retorta y tostador. Las distintas industrias utilizan estos términos con diferentes significados, por lo que la clasificación según sus nombres es confusa y poco útil en la práctica.

2.6.2 Clasificación según su uso

La industria cerámica otorga el nombre del proceso productivo al horno utilizado en cada una de estas, por ejemplo, hornos de cemento, vidrio y cal por mencionar algunos. Estos hornos serán analizados en profundidad en el próximo capítulo.

REFERENCIAS

- [1] Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia (2010), Ediciones Universidad Industrial de Santander. Pág.118.
- [2] Biomass Users Network Centroamérica – BUN-CA. (2002)
- [3] GELVES DIAZ, John y BETANCOURT SIERRA, Juan. Diagnóstico de los procesos de secado, cocción y manejo ambiental en las empresas productoras de tableta vidriada de la zona metropolitana de San José de Cúcuta, Proyecto de grado de Ingeniería Producción Industrial de la Universidad Francisco de Paula Santander (2006).
- [4] NORMA COVENIN 662 -1998: Productos derivados del petróleo. Combustibles para motores diesel y gasóleo industrial. FONDONORMA
- [5] NORTON, F.H. (1984). Cerámica para el artista alfarero. Mexico: C.E.C.S.A. p.127
- [6] [Fotografía] Disponible en internet en http://merrimacindustrial.com/HeatProd_Kanthal.html Consultado 5 de julio 2010.
- [7] Métodos simples para fabricar carbón vegetal Métodos simples para fabricar carbón vegetal. ESTUDIO FAO: MONTES 41. (1983). Cap. 7.2. Tomado de <http://www.fao.org/docrep/X5595S/X5595S00.htm> Consultado 15 de Julio 2010.

- [8] STEPHEN C., GORDON L. H. (1992). Handbook of Industrial Refractories Technology, principles, Types, Properties and Applications. Westwood, New Jersey, U.S.A.: Noyes Publications, p. 12.
- [9] Hornos Eléctricos, Gas y Gasoil. (2004). Barcelona, España. : Catálogo de Hornos del Valles, S.A. p. 8.
- [10] Catálogo de productos de la empresa CombustionService S.A. (2005). Barquisimeto. Estado Lara. Venezuela
- [11] Refractories for The Ceramics Industry from Shinagawa Refractories Including Refractory Bricks and Insulating Fibre Products. Disponible en internet en <http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=3540>. Citado en noviembre 13 de 2010.
- [12] AVGUSTINIK, A.I. (1983) Cerámica. Barcelona, España: Editorial REVERTÉ. p.p. 103
- [13] [Fotografía] Tomada por el autor durante la Visita Industrial a la empresa Sanitarios Maracay. Materia MT-4901T Procesos Cerámicos de la carrera de Ingeniería Mecánica, UNET. Marzo, 2003.
- [14] TRINKS, W., MAWHINNEY, M., Shannon, R., Reed, R. (2004). Industrial Furnaces. Canada: Sixth Edition, John Wiley & Sons, Inc. p. 19.

- [15] ECOCARBON LTDA (1998). Hornos ladrilleros a carbón. Medellín. Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana. p.14.
- [16] Ibidem... [11], pp 20
- [17] SACMI (2003). Tecnologia ceramic Applicata, Volume II. Imola (BO) Italy: SACMI IMOLA, p. 224.

CAPÍTULO III

HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA

La cocción o quema de productos de alfarería necesita de un equipo destinado a someter el producto a la temperatura deseada con el mayor aprovechamiento de combustible; este es el horno cerámico. En la industria moderna diversos tipos de hornos que se construyen atendiendo a varios factores, tales como combustible disponible, tipo de materia prima a usar, volumen de producción, entre otros.

Los tipos de hornos empleados en la alfarería constituyen dos grupos fundamentales: los hornos periódicos (intermitentes) y los hornos continuos.

3.1 Hornos periódicos (intermitentes)

Los hornos periódicos, de acuerdo con su diseño, pueden ser de una sola cámara (cámara simple), o de varias cámaras (cámaras múltiples), como el horno Hoffman.

3.1.1 Horno de campana: Tiene la ventaja de que en él se pueden calcinar de una vez gran cantidad de objetos, en su mayoría de alta densidad (la densidad de carga se define como kilos de carga por metro cúbico del horno).

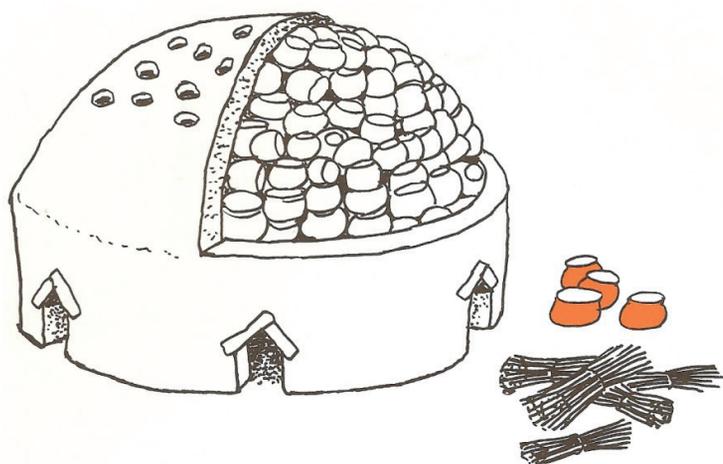


Figura 3.1. Horno de campana ^[1].

En el caso del ladrillo se superponen en hiladas de 10 a 15 cm de lado, y a partir de la sexta se colocan ladrillos crudos; la desventaja es que en condiciones aceptables, la superficie de dos terceras partes de los ladrillos cargados en el horno al estar algunos de estos en contacto con el combustible y escorias, ven afectado su aspecto.

3.1.2 Horno rural o pampa: Consiste en cuatro paredes gruesas sin techo, dentro del cual los objetos a cocer se recubren con dos capas de estos mismos objetos sin quemar y una capa superior de tierra; esto aunque permite regular el fuego, trae como consecuencia un mayor consumo de combustible que si tuviera bóveda.



Figura 3.2. Horno rural o pampa ^[2].

3.1.3 Horno de llama horizontal: La diferencia con el horno rural es que tiene una posición alargada, provista de hogares, requiere menos fuego y la llama es obligada a pasar horizontalmente por entre los objetos por medio de una pared de pantalla o mufla, lo que trae mayor homogeneidad en la calidad de los productos obtenidos.

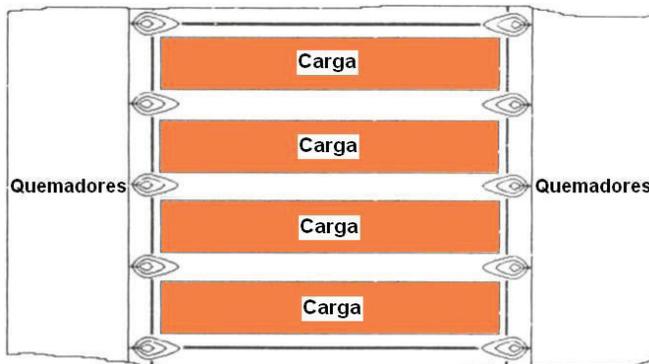


Figura 3.3. Vista superior de un horno de llama horizontal, se pueden observar los pasillos entre la carga para que circulen las llamas de los quemadores ^[3].

3.1.4 Hornos redondos o de llama invertida: Se emplean para la cocción de materiales especiales como tejas, ladrillos y tubos, productos que requieren una elevada temperatura de cocción. Una ventaja de estos hornos es que el producto no está en contacto directo con el combustible y los residuos, como es el caso de los hornos de campana, rural y de llama horizontal.

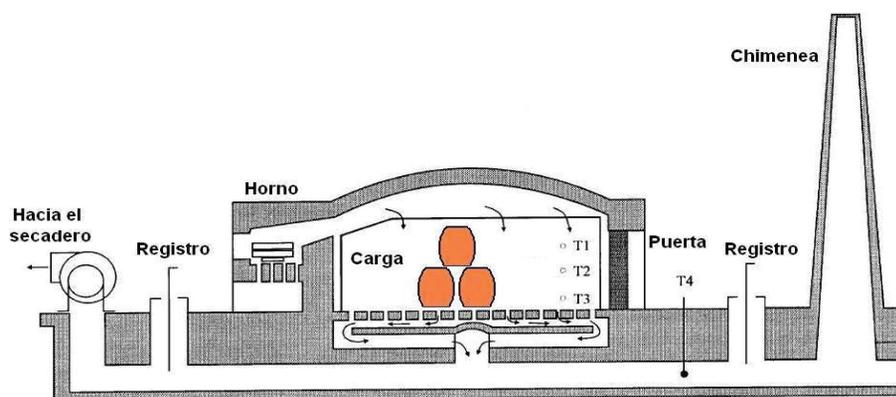


Figura 3.4. Horno de llama invertida [4].

3.1.5 Hornos continuos de zona móvil de cocción: El uso de los hornos intermitentes tiene como inconveniente el consumo excesivo de combustible, el cual se aminora con el uso de una cocción continua en vez de intermitente; el calor desprendido por las piezas al enfriarse se emplea para calentar las piezas crudas economizando combustible. Un ejemplo es el que se ilustra en la figura 3.5, que muestra un horno de zona móvil de cocción. Se puede observar dos muflas fijas construidas con ladrillos refractarios densos y una zona externa de paredes (chapa metálica recubierta internamente con fibra cerámica) que descansan sobre rieles y cuyas puertas se levantan mediante el uso de contrapesos. El horno puede ubicarse sobre

cualquiera de las dos zonas de quema, de esta manera optimiza el rendimiento del combustible así como el tiempo de carga y descarga del material.

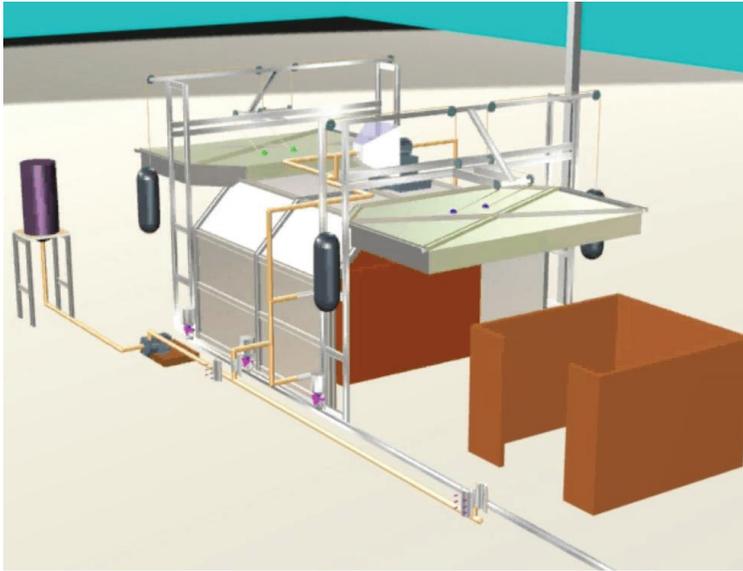


Figura 3.5. Horno de zona móvil de cocción para producción de baldosas de barro cocido ^[5].

3.1.5 Horno Hoffman: Este horno, que revolucionó la producción de ladrillos en serie, tomó el nombre de su inventor, Friedrich Hoffman, arquitecto alemán, fabricante de materiales de construcción en Berlín y ganador de un gran premio en la Exposición Universal de 1867. El primer horno de esta clase se construyó en 1859 en Prusia y en 1867 ya había 250, la mayoría en la zona prusiana de Alemania, 50 en Inglaterra y 3 en Francia. En Italia, su difusión fue a partir de 1870 tras su presentación en la Exposición de París ^[6].

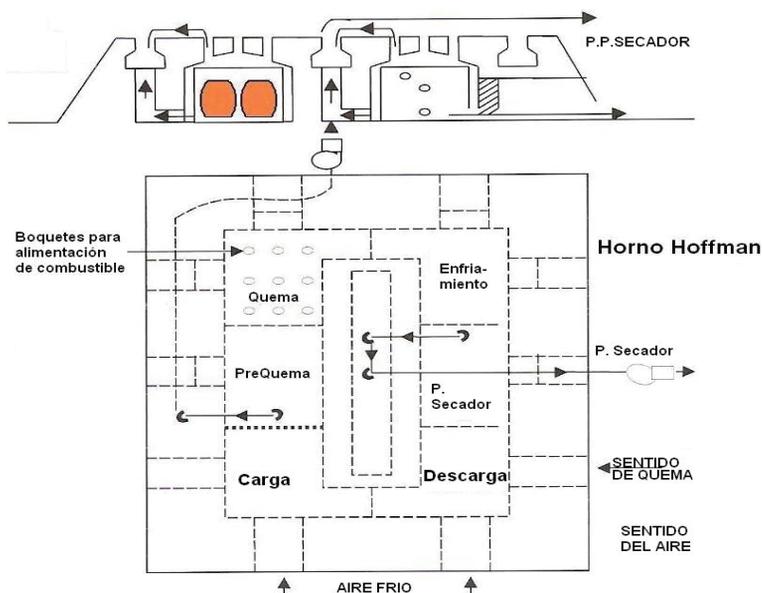


Figura 3.6. Esquema del movimiento de los gases dentro de un horno Hoffman [7].

La tipología del horno Hoffman más extendida es la de planta rectangular, compuesta por una gran galería anular de sección abovedada dividida en cámaras cuya longitud y número de bocas es variable, como el mostrado en la figura 3.6. Este sistema permite que el fuego circule de forma permanente, durante todo el proceso de cocción a lo largo de cada uno de los compartimentos. De este modo, la cocción se desplaza por la nave de forma secuencial: mientras en una sección se está cociendo el material, en la siguiente, se empieza a elevar la temperatura al tiempo que en la anterior, el material ya cocido comienza a enfriarse, lo cual permite descargar el horno y llenarlo de nuevo. Así, se evitan cambios bruscos de temperatura, consiguiendo una cocción paulatina y homogénea y un funcionamiento del horno más económico al aprovecharse al máximo el calor.

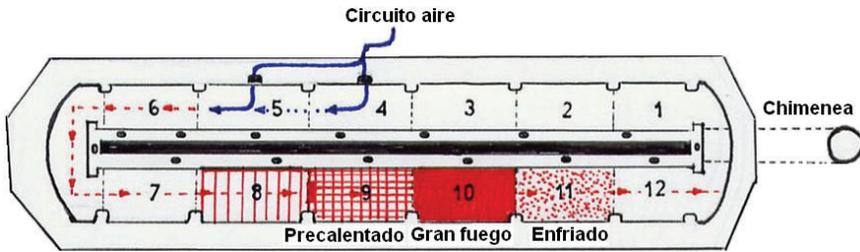


Figura 3.7. Funcionamiento de un horno Hoffman antiguo [8].

En los hornos intermitentes ordinarios, la cocción se interrumpe mientras se enfrían los ladrillos cocidos y se retiran para reemplazarlos por otros. En el horno Hoffman, por su parte, se efectúa simultáneamente la cocción, la carga y la descarga de las piezas, lográndose además un ahorro de combustible, ya que este tipo de horno consume menos de la tercera parte que los hornos intermitentes (ver figura 3.7).

La chimenea es otro elemento fundamental del horno, que permite, por un lado, la expulsión de los humos que se generan y, por otro, extrae, por succión, la corriente de aire necesaria para la combustión. El combustible más utilizado es el carbón, que se vertía a través de unas boquillas verticales que atravesaban la bóveda de la galería pasando en forma de llama por entre los ladrillos depositados.

Debido al funcionamiento continuo de este horno, fue necesario hacer cambios en el manejo del personal, estando el reposo de los operarios en función de la operación del horno.

Por otra parte, el funcionamiento de la cocción continua marcaba el ritmo de los trabajadores empleados en la carga y descarga del horno, ya que, dada la naturaleza manual del trabajo, estos tenían que soportar las peores condiciones de trabajo dentro de las alfarerías, siendo las más difíciles las soportadas por el personal que descargaba manualmente los ladrillos que todavía se encontraban a elevadas temperaturas para su manejo.

Los hornos Hoffman actuales consisten en una bóveda circular en forma de túnel de unos cuarenta metros de longitud media, divididos en diez a doce cámaras, la alimentación del combustible se realiza por unos orificios en el techo, a través de dispositivos denominados arañas. Una variante de este tipo de horno es el de zig-zag, que es más pequeño y puede tener entre diez a dieciséis cámaras. En Venezuela se utiliza como combustible el fuel oil, mientras en países con abundante combustible sólido como Colombia, se utilizan equipos que pulverizan el carbón (carbojet) y lo impulsan como una mezcla de aire y carbón hasta el quemador.





Figura 3.8. a) Techo de horno Hoffman,
b) Mirilla del techo del horno Hoffman^[9].

3.1.7 Horno túnel: Consiste esencialmente en un largo túnel recto, de superficie interior relativamente pequeña. En estos hornos a diferencia de los hornos Hoffman, la carga se desplaza a lo largo del túnel en el que la temperatura va aumentando hacia la zona de quema y luego disminuye, pero en cada punto fijo del túnel la temperatura es constante. La longitud del horno varía normalmente entre veintidós a ciento noventa y nueve metros y un ancho entre dos a tres metros. Los objetos se transportan a lo largo del túnel mediante sistemas controlados de movimiento: a través de rodillos (caso de producción de baldosas) o carros de horno (material de gres de gran volumen y peso como los sanitarios). Su principal limitación es que una vez puesto en funcionamiento solo se pueden quemar piezas hechas de la misma pasta cerámica (mezcla de materiales cerámicos y agua), es decir con igual composición química, para que su coeficiente de expansión y porcentaje de contracción sean similares, de manera que reaccionen al aumento de temperatura de la misma manera, con el fin de evitar defectos de producción asociados al ciclo de quema.

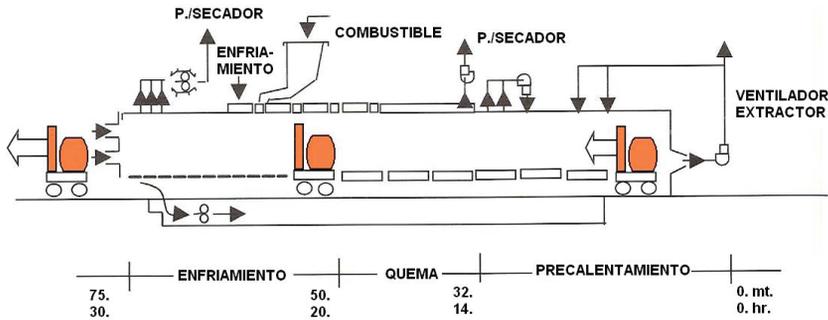


Figura 3.9. Diferentes zonas dentro de un horno Túnel [10].

A lo largo del horno túnel la carga se desplaza mediante rieles, rodillos, vagonetas o carros. Este sistema de transporte lleva los materiales a lo largo del túnel (ver figura 3.9). Cuando se utilizan carros, se les suele denominar horno de transferencia.

El ciclo de quema de un horno túnel para baldosas cerámicas se presenta en la figura 3.10, se indican las temperaturas de la zona superior e inferior del horno. En el gráfico la temperatura de los productos cerámicos aumenta conforme avanzan a lo largo del túnel, al transcurrir veinte minutos, ya la baldosa cruda ha alcanzado una temperatura de meseta o “soaking”, que corresponde a la cota más alta y estable o zona temperatura de sinterización (1150°C), luego de atravesar esta zona dentro del horno, la baldosa se enfría rápidamente mediante la extracción del calor que es reutilizado en el calentamiento de los productos que ingresan en el horno túnel y sale finalmente del horno a los sesenta minutos de ciclo térmico a una temperatura entre los 200 – 300 °C.

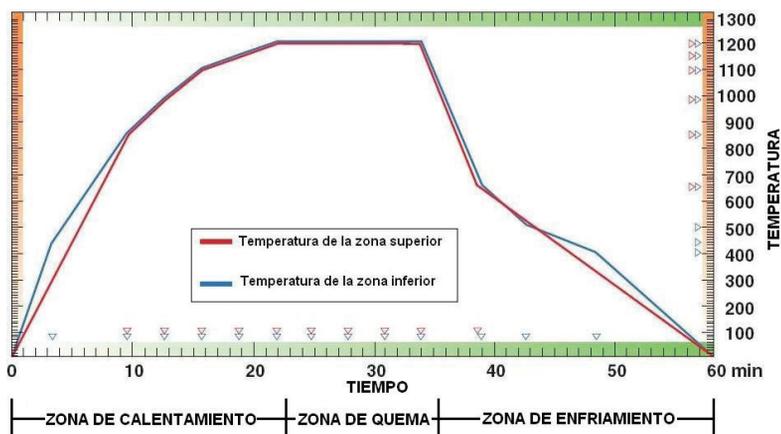


Figura 3.10. Curva de cocción en un horno túnel para porcelanato de gres Sacmi ^[11]

Los materiales avanzan contra una corriente de aire que extrae calor de los que se encuentran en la zona de enfriamiento y lo transfiere a aquellos que se hallan en fase de calentamiento. En el centro del horno (zona de quema) se aplica calentamiento directo (convección o radiación), ya sea quemando cualquier combustible o utilizando electricidad.

3.1.8 Horno vertical para ladrillos (VSBK): Este tipo de horno utiliza el principio de contracorriente y se denomina VSBK (vertical shaft brick kiln); en él, el aire caliente de la combustión sube y los ladrillos bajan dentro del horno, siendo un proceso de producción continuo en el cual el diseño estructural y el aislamiento térmico son fundamentales para un buen desempeño. La carga y la descarga se lleva a cabo cada dos horas, siendo el tiempo de cocción aproximadamente de veinticuatro horas. La principal ventaja de la adopción de la tecnología VSBK consiste en el uso de una cantidad menor de energía para quemar, la reducción de

las emisiones, el ciclo de producción reducido y el monitoreo de la fuente de emisiones en un solo punto. Entre las desventajas se tiene el cambio organizacional (24/7, gestión y manejo), el mayor costo de inversión en la tecnología y la necesaria cualificación de los operarios para garantizar un funcionamiento perfecto del horno. Un ejemplo se puede observar en la figura 3.11, que ilustra el horno vertical fabricado en Sudáfrica bajo el auspicio de Swisscontact Sudáfrica, con un costo aproximado de 75 000 dólares americanos.



Figura 3.11. Horno vertical producido bajo el auspicio de Swisscontact Sudáfrica ^[12].

3.1.9 Horno vertical de cal: Los hornos de cal tienen formas y disposiciones muy diversas; unas veces sirven para producir cal de una manera intermitente y otras son de producción continua.

Los *hornos de producción intermitente* son los más sencillos de fabricar. En su parte baja se construye una bóveda con los trozos más grandes de piedra caliza, la cual sirve de hogar y sostiene los pedazos restantes de la carga que contiene el horno. El horno, en conjunto, tiene forma ovalada o cilíndrica y sus paredes están construidas de piedras refractarias; en el hogar formado por la bóveda se pone leña, carbón, kerosén o gasoil en cantidad suficiente, se le prende fuego y se calienta hasta que toda la caliza se haya transformado en cal viva; entonces se deja enfriar y después se saca la cal. Los hornos llamados de *embudo* o a cielo abierto, tienen junto al suelo una parrilla sobre la cual se ponen capas alternadas de combustible y piedras calcáreas. Un ejemplo de horno de cal artesanal se puede observar en la figura 3.12.



a)
Zona de carga
del horno



b)
Vista interior
del horno

c)
Zona de
descarga
del horno

Figura 3.12. Horno artesanal vertical utilizado para la producción de cal ^[13].

Los *hornos de producción continua* son generalmente hornos de corriente forzada de aire, por ejemplo el horno ABC, el cual se utiliza cuando la principal exigencia es la simplicidad, una inversión reducida, una estructura robusta y de fácil mantenimiento. El horno ABC es el horno vertical de cuba única, con predisposición para flujo en contracorriente que representa el último paso en la evolución de los hornos de cuba única. Sus características se pueden apreciar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características del horno de producción continua ABC^[14].

CARACTERÍSTICAS	
Producción	50 a 160 t/d
Materia prima	Caliza con alto contenido de calcitas dolomitas
Tamaño en alimentación	Mínimo. 25 mm, máximo. 150 mm
Combustible	gas, gas oil, fuel oil
Calidad del producto	CO ₂ residual < 1,5%
Consumo térmico específico	Inferior a 950 Kcal/kg de cal
Consumo eléctrico específico (solo horno)	Inferior a 20 kWh/t

La carga se realiza desde arriba, por medio de un sistema de tolvas y válvulas que garantizan que el horno quede herméticamente cerrado y la distribución uniforme del material en la sección del pozo. La parte superior del horno actúa como zona de precalentamiento y posee amplias dimensiones para obtener el mejor intercambio de calor entre gas de combustión y caliza, recuperando el mayor calor posible.

La zona de cocción se encuentra en la parte intermedia del horno y está proyectada para garantizar una calcinación uniforme del material (ver figura 3.13); Los quemadores están instalados en grupo radialmente. En la parte inferior del horno se produce el enfriamiento de la cal, cuya extracción se lleva a cabo por medio de cajones hidráulicos, de este modo el descenso uniforme del material queda asegurado en toda la sección del pozo.

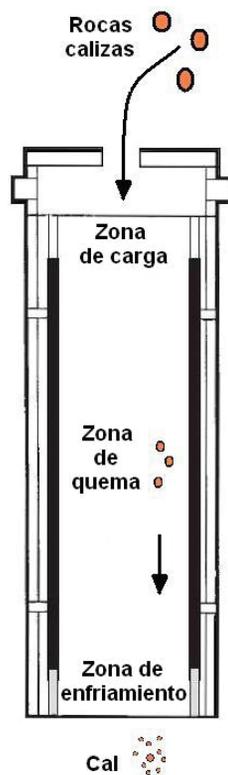


Figura 3.13. Horno de cal ABC ^[15].

El revestimiento refractario del horno ABC garantiza una larga resistencia al desgaste, así como el aislamiento y seguridad para limitar la dispersión de calor. Para ello se utilizan diferentes tipos de ladrillos: básicos en la zona de combustión, y ladrillos aluminosos y silicoaluminosos en las zonas de precalentamiento y enfriamiento.

En términos de calidad de la cal y de consumo de calor, las prestaciones del nuevo horno son mejores respecto al horno tradicional vertical de cuba única, ya que el calor está distribuido mucho mejor en su sección transversal.

3.1.9 Horno rotatorio de cemento: Frederick Ramsone introdujo el horno rotatorio en la industria del cemento; patentó su invención primero en Inglaterra en mayo de 1885 y después en Estados Unidos en abril de 1886^[16]. Este horno utilizaba carbón, el combustible por excelencia en aquellos tiempos, años después se sustituyó por derivados del petróleo. Para comprender su uso es necesario conocer el proceso de producción del cemento. La piedra caliza, arcilla y arena silícea se someten a un proceso de molienda, luego se almacenan y se introducen en un extremo del horno rotatorio, produciéndose el clinker que nuevamente es triturado y mezclado con yeso para formar la mezcla final del cemento (figura 3.14).

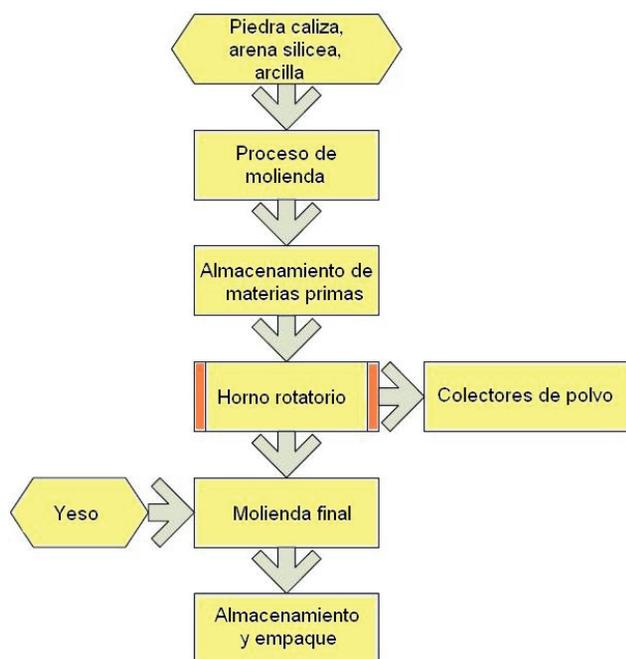


Figura 3.14. Proceso de producción del cemento^[17]

El horno rotatorio se puede definir como un tubo cilíndrico de diámetro único donde ocurre la transformación de materias primas cerámicas mediante reacciones químicas a elevadas temperaturas. El objetivo es la producción de clinker a partir de harina cruda homogeneizada (mezcla de arcilla y caliza molidas) a una temperatura de 1450°C.

En Latinoamérica existen diversos hornos rotatorios, por ejemplo en la Fábrica Nacional de Cemento (planta Ocumare, Venezuela), la cual dispone de dos hornos, el N° 1 con una capacidad de 1650 Ton/día y el horno N°2 con una capacidad de producción de 1750 Ton/día de clinker, para un total de 3400 Ton/día; ambos hornos utilizan gas natural [18]. El casco del horno es un tubo cilíndrico metálico en el que la longitud y el diámetro se define en función del proceso de fabricación y del tonelaje previsto.

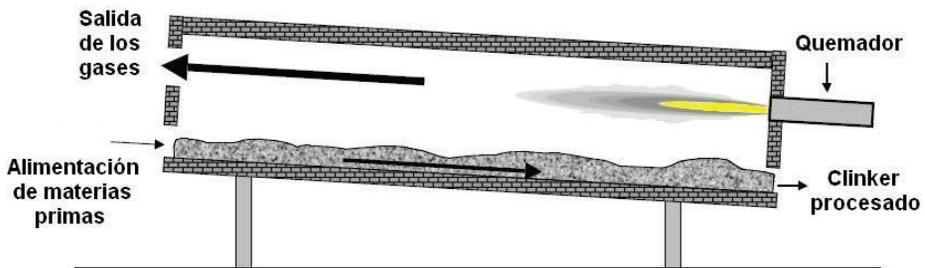


Figura 3.15. Horno rotatorio utilizado para la producción de cemento, el flujo de material va de izquierda a derecha, se observa el perfil de temperatura en un horno rotatorio a contraflujo [19].

El horno rotatorio puede tener el flujo de materiales y gases en el mismo sentido o en contraflujo, como se puede observar en la figura 3.15. Para el desplazamiento de los sólidos dentro del horno se utiliza la gravedad, la materia prima va aumentando de temperatura a medida que se desplaza a través del horno, hasta llegar a la temperatura máxima en la zona de calcinación.

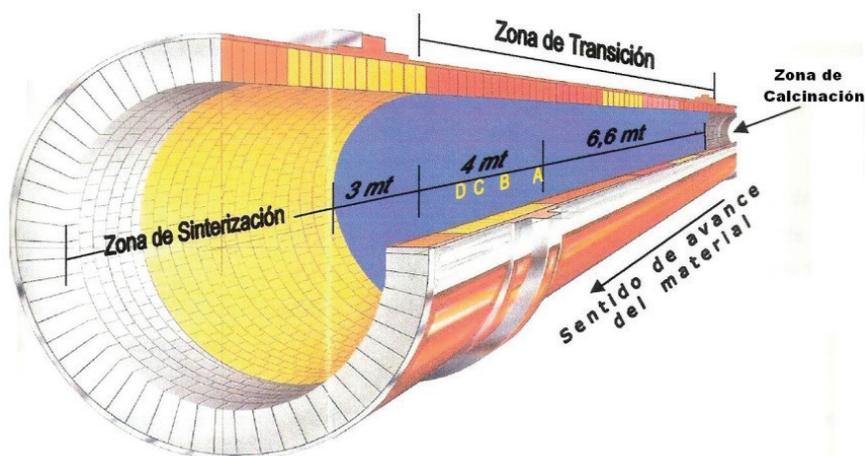


Figura 3.16. Corte longitudinal del horno rotatorio de la Fábrica Nacional de cemento (planta Ocumare). Detalle de la instalación de los ladrillos refractarios sobre el casco del horno [20]

Dentro del casco del horno rotatorio hay un revestimiento refractario (ver figura 3.16) que asegura un buen aislamiento (para reducir las pérdidas caloríficas por radiación) y una protección térmica (para evitar las deformaciones importantes y la destrucción del casco del horno, debidas a las altas temperaturas).

A lo largo del horno rotatorio se pueden observar cinco zonas que son:

- a) Zona de precalentamiento: compuesta por la torre intercambiadora de calor; en esta zona se expulsa el agua de hidratación y la materia prima es calentada hasta temperaturas de aproximadamente 700°C.
- b) Zona de calcinación: corresponde a una zona del horno que mantiene temperaturas entre 700 y 900°C.
- c) Zona de transición: la zona de transición es la sección entre la zona de calcinación y la de sinterización, allí las temperaturas de la materia prima oscilan entre 900 y 1300°C.
- d) Zona de sinterización: en esta zona se genera una costra estable de clinker y fase líquida. La temperatura máxima del material es del orden de 1400 °C-1450°C.
- e) Zona de enfriamiento: va desde la boquilla del quemador hasta la salida del horno. Dentro de esta zona, el clinker es enfriado desde su temperatura máxima de cocción de 1450°C hasta los 1350°C mediante los enfriadores planetarios.

3.1.10 Horno de fusión de vidrio: El vidrio es un material inorgánico no cristalino, producido mediante la solidificación de un material fundido. La estructura del vidrio luego de un tiempo se aproxima a la densidad en equilibrio que corresponde a un líquido súper enfriado a esa temperatura [21].

Por ejemplo, una mezcla conocida normalmente como 70-20-10, corresponde al vidrio de ventana común, 70% de SiO_2 , 20% de Na_2O y 10% de CaO aproximadamente. En realidad se utiliza como material inicial arena sílice de alta pureza obtenida en un río o cantera (SiO_2), carbonato sódico (Na_2CO_3) y caliza (CaCO_3). Se produce entonces un vidrio sódico-cálcico a temperaturas de fusión superiores a 1500°C . Los álcalis (Na_2O y CaO) actúan como fundentes de la mezcla.

Existen cuatro operaciones primarias para la manufactura del vidrio: mezclado, fusión, afinado y conformado, siendo las tres primeras comunes para todos los procesos de manufactura de vidrio con algunas variaciones de acuerdo con el tipo de vidrio (ver figura 3.17).

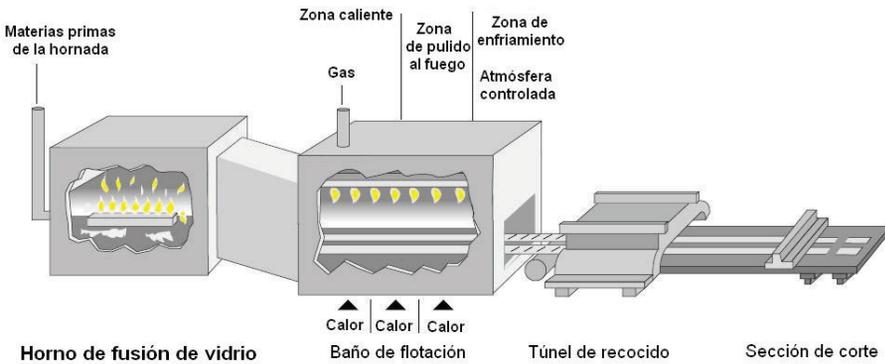


Figura 3.17. Horno utilizado en el proceso continuo de flotación para producir vidrio plano [22]

Los hornos de vidrio son usados para fundir las materias primas en polvo y transformarlas en vidrio. Diferentes hornos son usados para producir envases, fibra de vidrio, vidrio plano y especialidades vítreas. Normalmente utilizan gas natural como combustible. Como dato interesante, en este tipo de hornos se utilizan ladrillos refractarios muy específicos, debido al ataque constante de los gases a altas temperaturas (ver fig. 3.18).

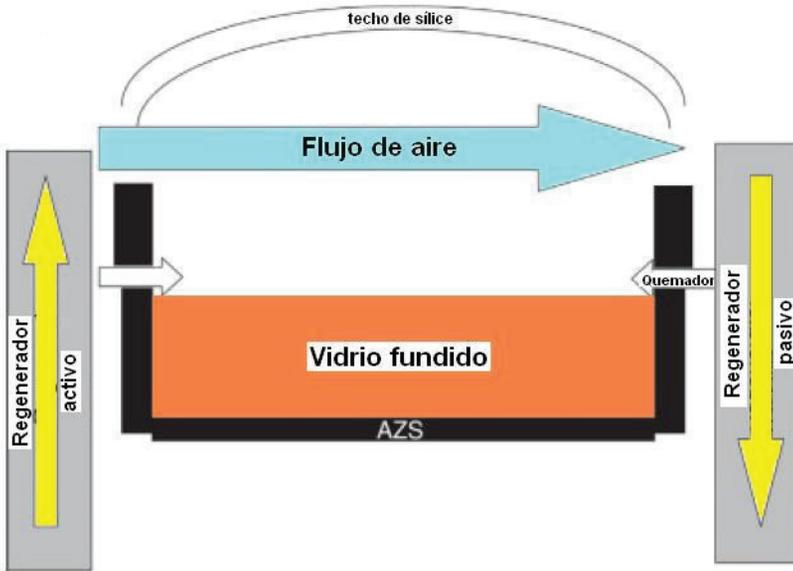


Figura 3.18. Esquema de un horno utilizado en la producción de fibra de vidrio. El techo del horno está construido con ladrillos refractarios de SiO_2 , las paredes y el piso están formados por ladrillos refractarios de AZS ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$) [23]

REFERENCIAS

- [1] RHODES, Daniel (1968). Kilns: Design, Construction, & Operation. New York: Chilton Book Company. p. 8.

- [2] SIERRA MARÍN, Jorge Mario (2003). Tecnologías e impactos de la industria ladrillera, Lunsa. Consultado el 13 de noviembre de 2010 en http://www.gobant.gov.co/organismos/smedioamb/codeam/foroindustrialadrillera/lunsa_tecnologiasdelaindustrialadrillera.pdf.

- [3] NÚÑEZ MARIÑO, Mervick; (2005). Diseño de un sistema automatizado para el horno túnel de la empresa C.A. industrial Táchira. San Cristóbal, Táchira: Tesis presentada para optar al título de Ingeniero Mecánico Unet. Asesor: Ing. Isidro Díaz. p.21.

- [4] LAIETE SOTO, Mesías (1996). Recuperação de Gases Quentes em Fornos Intermitentes. Aplicação na Indústria de Cerâmica Estrutural. Cerâmica Industrial, 01 (02) Maio/Junho, 27-36.

- [5] RUBER SANTOS, Utman Edgardo (2003) Diseño y Construcción de un Horno de Gas-Oil para Alfarería Artesanal para la Empresa Pisos y Tejas Rústicos C.A. Tesis para optar al grado de Ingeniero Mecánico Unet. (2003).Tutor: Isidro Díaz

- [6] Disponible en internet en <http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/patrimonio/rutas/arqueologia/Memoria/Memoria-barro/Horno-Hoffman.asp> Consultado el 12 de Agosto de 2010.

- [7] ECOCARBON LTDA (1998). Hornos ladrilleros a carbón. Medellín. Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana. pp 16
- [8] Fotografía] tomada de <http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/patrimonio/rutas/arqueologia/Memoria/Memoria-barro/Horno-Hoffman.asp>. Consultado el 12 de Agosto de 2010.
- [9] Fotografía] Tomada de <http://www.inmaco.com.gt/sitio.html>. Consultado el 15 de Agosto de 2010.
- [10] Ibidem... [7], pp 18
- [11] Sacmi (2003). Tecnología ceramic Applicata, Volume I. Imola (BO) Italy: Sacmi Imola. p. 343.
- [12] Presentación en el Congreso de Intercambio de Experiencias Internacionales para el sector ladrillero de Latinoamérica los días 6 y 7 de octubre de 2011. Tomado de : http://www.corporacionambientalempresarial.org.co/documentos/704_4._Horno_VSBK_-_Sur_África.pdf Consultado el 18 de Octubre de 2011.
- [13] ROJAS, Fernando y SÁNCHEZ Leonardo (2002). Diseño de un horno y animación del proceso de calcinación para la producción del óxido de calcio en la Corporación Industrial C.A. "Cisanca". Tesis para optar al grado de Ingeniero Mecánico Unet. Pág. 27 Tutor: Jesús Díaz. Asesor y Jurado: Isidro Díaz

- [14] Tomado de:<http://www.cimprogetti.it/html/abc.htm>. Consultado el 18 de Agosto de 2010.
- [15] Ibidem... [7], pp 16
- [16] DUDA, Walter H. (1978). Manual Tecnológico del Cemento. España, : Editores Técnicos Asociados, p.199
- [17] SHACKELFORD, James F.; Doremus o Robert H. Editores (Ed.). (2008). Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing, Cap. 8 Concrete and Cement. New York, Springer Science+Business Media, LLC. p.137.
- [18] GARCÍA, Carlos (1992). Procedimiento de Precalentamiento de Hornos Rotativos. Empresas Delfino: Planta Ocumare, p. 9.
- [19] BAUKAL, Charles E. (2003). Industrial burners handbook. Boca raton Florida: CRC Press LLC 3.
- [20] VERA HERRERA, Ricardo Javier (1999). Evaluación del revestimiento refractario de la zona de transición de un horno rotatorio productor de clinker. Tesis para optar al grado de Ingeniero de Materiales USB. p.50. Tutor: Isidro Díaz.
- [21] KINGERY, W.D., BOWEN, H.K., UHLMANN, D.R (1976). Introduction to Ceramics. John Wiley & Sons. 2da Edición: USA, p.p 91.

- [22] BENDER, Joel (2001). Vidrio, Cerámica Y Materiales Afines, Enciclopedia de Salud Y Seguridad en el Trabajo. New York: Organización Mundial del Trabajo (OIT). Tercera Edición. p. 84.7
- [23] LE BOURHIS, Eric (2008). Glass: Mechanics and Technology. Weinheim, Alemania: wiley-VCH Verlag. p. 206

CAPITULO IV

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HORNOS CERÁMICOS

En este capítulo se abordan algunos fundamentos teóricos del diseño y construcción de hornos cerámicos.

4.1 Consideraciones preliminares para el diseño de un horno

Deben considerarse cinco factores críticos antes de comenzar el diseño de un horno. Entre ellos se tienen:

- a) *Clase de horno*: Ya que puede ser de tiro ascendente, descendente, de tiro cruzado, circular o horno de esmalte salino.
- b) *Material a ser calcinado*: El tipo de mezcla de arcillas a ser utilizado determina el tipo de horno que se necesita, tamaño y combustible, diferenciándose los hornos para alfarería de aquellos para porcelana y materiales esmaltados de alta calidad.
- c) *Condiciones atmosféricas*: En el interior del horno se pueden establecer una atmosfera oxidante, reductora o neutra, dependiendo de los esmaltes que se apliquen a los productos y del acabado final deseado.

- d) *Combustible disponible*: La disponibilidad de gas natural, propano/butano, aceite combustible, fueloil, gasoil, madera, carbón-coque o electricidad debe ser considerada al momento de diseñar el horno, siendo preferible, por razones ambientales, utilizar gas natural, mezcla propano/butano o electricidad en los alrededores de las ciudades, y combustibles fósiles y madera en terrenos lejanos a los centros urbanos.

- e) *Localización del horno*: Dentro de la ciudad, en la cercanía de las ciudades, zonas industriales, terrenos alejados de los centros urbanizados. Cada localización tiende a influir en el tipo de horno a ser construido, por ejemplo las regulaciones ambientales existentes en cada zona en particular.

4.2 Principios de diseño de un horno cerámico

Para garantizar un diseño que funcione adecuadamente es necesario seguir una serie de principios sencillos que permitirán un buen manejo del calor y los gases dentro del horno, recordando en todo momento que el objetivo es tener una correcta distribución de la temperatura dentro del horno. A continuación se presenta un listado de los principios de diseño sugeridos por Frederick Olsen^[1].

Tabla 4.1. Principios de diseño para hornos cerámicos artesanales

N°	Principio de diseño
I	El cubo es la mejor forma a ser utilizada para los hornos de altas temperaturas
II	La forma de la cámara estará determinada por la dirección del flujo del calor
III	El área de quema o “firebox” depende del combustible utilizado
IV	El área de salida de la chimenea controla la velocidad de tiro de los gases calientes
V	Relación de la altura de la chimenea respecto al tiro
VI	Relación del diámetro de la chimenea
VII	Relación de la altura de la chimenea
VIII	Las áreas críticas deben ser fácilmente modificables
IX	Ajustes necesarios debido a la altitud

4.2.1 Principio I

El cubo (forma geométrica de aristas de igual valor), es la mejor forma a ser utilizada para los hornos de altas temperaturas. El mejor diseño para un horno de tiro superior consiste en un arco que debe encajar en la parte superior de un cubo no conteniéndolo, esto permite el aprovechamiento del espacio de apilamiento (para un mejor acomodo de la carga) y también del volumen del arco que sirve como área de recolección de los gases de combustible (ver la figura 4.1). Al incrementar la altura del compartimiento, decrece la eficiencia del quemado a temperatura uniforme.

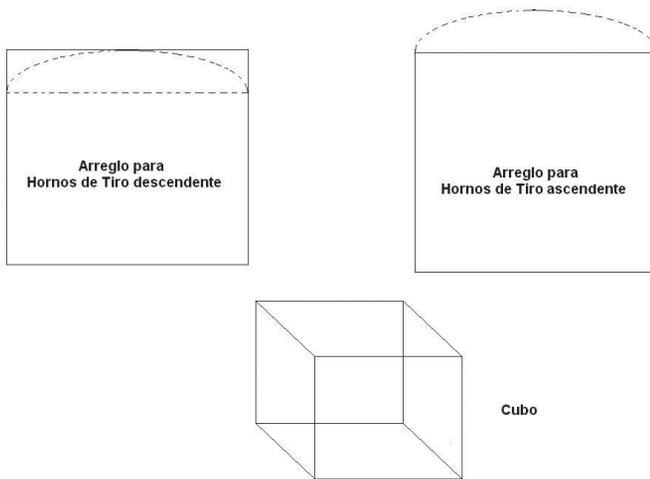


Figura 4.1. Un cubo es la mejor forma geométrica a ser utilizada en un horno

Por otra parte, al incrementar la longitud del cubo no se afecta la uniformidad de la quema, siendo ejemplo de esto los hornos tipo túnel, donde la relación entre el diámetro y la altura es aproximadamente igual.

4.2.2 Principio II

La forma de la cámara del horno estará determinada por la dirección del flujo de calor y el movimiento de los gases para permitir un tiro natural. Dos reglas importantes para recordar son:

1. La dirección del calor debe seguir el arco interno del horno, y no debe encontrar en su camino ningún ángulo recto (ver la figura 4.2).

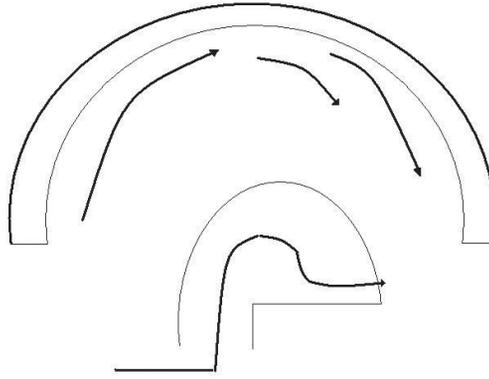


Figura 4.2. La dirección del calor debería seguir el arco

2. El movimiento de la flama y la dirección del calor sólo deben tener dos ángulos rectos para franquear o cruzar la cámara, que usualmente está ubicada en la entrada del horno y en la salida de la chimenea. Los ángulos rectos pueden crear calentamiento irregular o puntos calientes, que podrían llevar a fallas por termofluencia y una cocción ineficiente (ver figura 4.3).

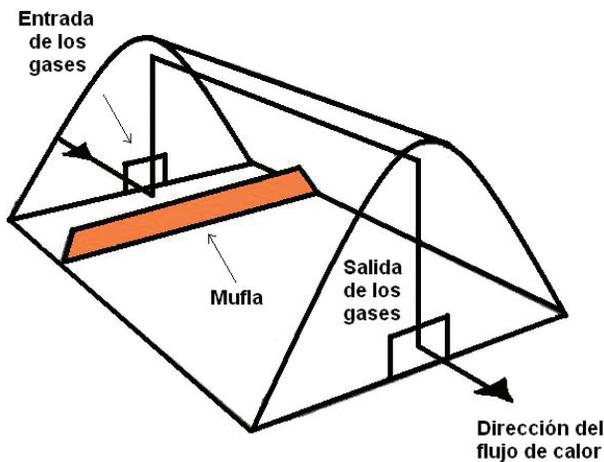


Figura 4.3. El calor fluye presentando dos ángulos rectos dentro del horno

4.2.3 Principio III

Es necesario reservar una cantidad específica de área de combustión para que se establezca un tiro natural. El área de emparrillado (sección de quema de combustible o “firebox”), depende del combustible utilizado.

Tabla 4.2. Relación entre el área necesaria para la combustión y el combustible utilizado

Combustible	Área necesaria para la combustión
Madera	El área de la rejilla de combustión debe ser diez veces el área de la sección horizontal de la chimenea.
Carbón	Un pie cuadrado (929,03 cm ²) de rejilla por cada seis pies (33 445 cm ²) de área de piso del horno.
Gasoil	Un pie cuadrado (929,03 cm ²) de área de combustión por cada cinco pies cuadrados (23225.76 cm ²) de área del piso.
Gas	4 ½ pulgadas (11,43 cm) de canal de combustión entre los productos y las paredes del horno, usualmente a lo largo de la pared del horno.

4.2.4 Principio IV

El área de salida de la chimenea controla la velocidad de tiro de los gases calientes. El estrechamiento reduce la presión atmosférica e incrementa la velocidad del flujo, por lo tanto controla la tasa del flujo, la cual normalmente debería estar entre cuatro y cinco pies por segundo para hornos de tiro natural.

De la observación directa de numerosos hornos artesanales se puede tomar como regla que los orificios de entrada y salida de los gases a la cámara interna deben tener la misma área para evitar la acumulación de gases dentro de los hornos, la cual puede ser muy perjudicial, ya que en un principio enfrían el horno y en último caso pueden llevar a una explosión, con consecuencias fatales para los operarios del equipo.

4.2.5 Principio V

Para que exista una corriente de aire natural dentro del horno es recomendable tomar tres pies (91,44 cm) de altura en la chimenea por cada pie (30,48 cm) de tiro descendente, dentro del horno, además de un pie de chimenea por cada tres pies de tiro horizontal. Es necesario recordar que en un horno de gas de tiro ascendente se debe mantener un área igual para la entrada y la salida de los gases.



Figura 4.4. El calor fluye de acuerdo al tiro del horno: cruzado, descendente o ascendente

4.2.6 Principio VI

El diámetro de la chimenea es aproximadamente de $\frac{1}{4}$ a un $\frac{1}{5}$ del diámetro de la cámara. Si la cámara tiene cinco pies de diámetro (152,4 cm), entonces la chimenea debe tener por lo menos un pie de diámetro (30,48 cm).

4.2.7 Principio VII

Una chimenea alta incrementa la velocidad del flujo de los gases dentro de la cámara de cocción; si es demasiado elevada puede causar calentamiento irregular arrastrando el calor fuera del horno.

4.2.8 Principio VIII

Las áreas críticas de un horno deben ser planificadas y construidas de manera que puedan ser alteradas fácilmente. Es conveniente utilizar ladrillos refractarios de tamaño estándar, ladrillos rectos de 9" x 4½" x 2½" (22,8 cm x 11,43 cm x 6,35 cm). La correcta construcción de la chimenea permitirá posteriores modificaciones del diámetro de la boca de salida en la pared trasera del horno, permitiendo que la chimenea tenga una entrada de flujo ajustable y que su altura sea variable.

4.2.9 Ajustes debido a la altitud

Para el correcto funcionamiento de un horno a grandes altitudes es necesario realizar ajustes para compensar la falta de oxígeno por metro cúbico de aire. La diferencia se hace muy evidente en elevaciones superiores a los mil metros sobre el nivel del mar en los desiertos calientes, y en elevaciones de montaña a partir de los 1500 metros a 3000 metros. La temperatura del aire exterior, así como la elevación, tienen un efecto directo en la cantidad presente de oxígeno.

Hay cuatro pasos en el procedimiento para hacer alteraciones apropiadas al bosquejo de un horno natural para compensar la elevada altitud y la baja densidad del aire.

1. Diseñar el horno según los principios estándares, calculando el diámetro de salida de la chimenea, los tamaños de la entrada y de la salida de los gases producto de la combustión, y la altura de la chimenea.
2. Aumentar el diámetro de la chimenea en 50 %.
3. Aumentar la altura de la chimenea en por lo menos 30 % para promover un mayor tiro que impulse el volumen de aire necesario debido a la altitud.

4. No es necesario aumentar el área de la rejilla en lo referente a la chimenea (para la madera) o a la superficie cubierta (para el carbón y el aceite). Es de resaltar que no es necesario más combustible, solamente más aire para quemar el combustible, dado el bajo porcentaje de oxígeno presente en el aire.

4.3 Combustión, combustibles y quemadores

Para el diseño de hornos cerámicos deben de tomarse en cuenta los factores asociados al proceso de combustión, el tipo de combustible a utilizar y los quemadores a seleccionar de acuerdo con las necesidades de la empresa.

4.3.1. Combustible

Un combustible se puede considerar como un recurso finito de energía química potencial, en el cual la energía está almacenada en la estructura molecular de compuestos particulares y es liberada a través de reacciones químicas complejas. Los combustibles pueden clasificarse en diversas formas, incluyendo su fase y su disponibilidad.

Tabla 4.3. Clasificación de los combustibles químicos por fase y disponibilidad [2].

Natural	Sintético
Sólido	
Carbón	Coque
Madera	Carbón vegetal
Vegetación	Desechos sólidos inorgánicos
Desechos sólidos orgánicos	
Líquidos	
Petróleo crudo	Crudos sintéticos
Aceites biológicos	Destilados del petróleo
Plantas combustibles	Alcoholes
	Combustibles coloidales
	Benceno
	Gas natural
	Hidrógeno
Gas	
Gas natural	Hidrógeno
Gases de pantano	Metano
Biogas	Propano
	Gasificación de carbón

Algunos de los requerimientos básicos para un combustible incluyen: alta densidad de energía (contenido), alto calor de combustión (liberación), buena estabilidad térmica (almacenamiento), baja presión de vapor (volatilidad) y no tóxico (impacto ambiental).

4.3.2 Definición de combustión

De acuerdo con Glassman^[3], la combustión es una reacción química relativamente rápida de carácter notablemente exotérmico que se desarrolla en fase gaseosa o en fase heterogénea (gas-líquido, gas-sólido), con o sin manifestaciones de llamadas o de radiaciones visibles. Por otra parte, las llamas pueden definirse como reacciones de combustión que se propagan a través del espacio, a velocidad inferior a la del sonido, acompañada normalmente de radiaciones visibles; su característica de propagación en el espacio en condiciones de velocidad limitada, la diferencia claramente de otras reacciones.

Los principales elementos que se encuentran en el proceso de combustión son los siguientes:

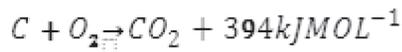
1. Carbono
2. Hidrógeno
3. Azufre
4. Oxígeno
5. Nitrógeno

Para que se produzca una llama es necesaria tanto la presencia del combustible y del comburente como la de un iniciador, que puede ser una chispa o una fuente de calor como un hilo incandescente o una llama piloto.

4.3.3 Reacciones de combustión

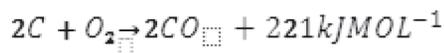
Los combustibles industriales más utilizados son los hidrocarburos, y sus constituyentes primarios son el carbón y el hidrógeno; al oxidarse liberan calor durante la combustión. La química de este proceso de oxidación envuelve reacciones en cadena muy complejas, sin embargo, para la mayoría de los cálculos se pueden simplificar en cuatro reacciones básicas.

Oxidación completa del carbono



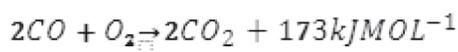
Si se suministra suficiente oxígeno a la mezcla, la reacción llevará a la completa oxidación del carbono. Sin embargo esta reacción siempre va asociada a reacciones en cadena que involucran el monóxido de carbono como producto intermedio.

Oxidación incompleta del carbono



Durante la combustión incompleta, no todo el carbón presente en el combustible puede oxidarse hasta dióxido de carbono, por lo que una parte de él permanecerá en forma de monóxido de carbono, este hecho reduce la liberación de calor a partir del combustible. De las ecuaciones presentadas se puede observar que se libera sólo la mitad del calor durante la formación del monóxido de carbono, al comparar con la combustión completa del carbono.

Oxidación del monóxido de carbono



Normalmente la oxidación se lleva a cabo a gran velocidad hasta que se forma el CO, luego lentamente hasta que todo el CO se quema.

4.3.4 Cálculos de combustión

Para alcanzar la combustión completa en sistemas reales de combustión siempre es necesario proveer un exceso de aire. Esto es una cantidad de aire sobre el mínimo requerido para completar la combustión, por ello es necesario definir el exceso de aire como:

$$\% \text{ de exceso de aire} = \frac{\text{aire total} - \text{aire estequiométrico}}{\text{aire estequiométrico}} * 100$$

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de combustión

Ejemplo 4.1

Un combustible (gasoil) presenta el siguiente análisis de especies químicas que lo componen (base %p/p), el cual va a ser quemado con 15% de aire en exceso dentro de un horno.

Elemento	%p/p
Carbono	84,6
Hidrogeno	10,9
Azufre	0,7
Oxigeno	3,8
Total	100,0

Asumiendo que la combustión sea completa, determine:

1. La masa de aire requerida para quemar 1 kg de combustible (gasoil)
2. La masa de los gases producida por la combustión de 1 kg de gasoil

3. La composición de los gases volumen/volumen (%v/v)
4. El volumen de gases producido (a 300°C y 1 atm) a partir de 1 kg de combustible.

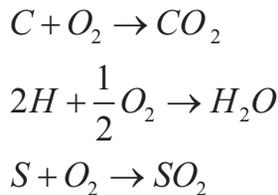


Donde F , A y G están en kilogramos. Asumiendo la composición del aire en

23,3% p/p para el oxígeno y 76,7% p/p para el nitrógeno. Se utilizan las siguientes bases para el cálculo.

Masa para el cálculo : 1 kg gasoil
 Balance de masa total : $F + A = G$
 Y, como $F = 1 \text{ Kg}$: $1 + A = G$

La combustión completa implica las siguientes ecuaciones:



La cantidad de gases producidos se puede abreviar de la siguiente manera:

<i>Dióxido de carbono</i>	<i>c kmol</i>
<i>Agua</i>	<i>w kmol</i>
<i>Dióxido de azufre</i>	<i>Skmol</i>
<i>Nitrógeno</i>	<i>Nkmol</i>
<i>Exceso de oxígeno</i>	<i>y kmol</i>

Considere ahora el balance de masa en estado estacionario para las especies atómicas individuales:

Masa que entra = Masa que sale

Especie química (kg):	% p/p	=	Peso molecular (PM) *Elemento(E)	E= (Valor)kmol
Carbono	(kg): 0,846	=	12c	entonces c = 0,0705 kmol
Hidrogeno	(kg): 0,109	=	2w	por lo tanto w = 0,0545 kmol
Azufre	(kg): 0,007	=	32s	se obtiene s = 0,00022 kmol
Nitrógeno	(Kg): A * 0,767	=	28n	
Oxigeno	(Kg): A* 0,233 + 0,038	=	32c + 16w + 32s + 32y	= 3,135 + 32y
Entonces	A * 0,233	=	3,097 + 32y	

Así, el requerimiento estequiométrico de oxígeno es = 3,097 Kg

$$\text{Total de aire suministrado} = (3,097 + 32y) \text{ Kg}$$

Como el exceso de aire requerido es 15%

$$3,097 * 1,15 = 3,097 + 32y; \text{ Entonces se obtiene finalmente:}$$
$$y = 0,0145$$

De acuerdo con las relaciones obtenidas anteriormente, se obtienen las siguientes respuestas:

1. La masa de aire requerida para la combustión de 1 kg de gasoil:

$$A * 0,233 = 3,097 + 32(0,0145)$$

$$\frac{3.561}{0.233} = 15,283$$

$$A = 15,283 \text{ Kg}$$

2. La masa de los gases producida por la combustión de 1 kg de gasoil:

De acuerdo con el balance de masa total: $F + A = G$

$$G = 15,283 + 1$$

$$G = 16,283 \text{ Kg}$$

3. La composición de porcentajes de los gases (%v/v):

Composición de los gases	Kmol	% mol (= %v/v)
CO_2	0,0705	12,62
H_2O	0,0545	9,76
SO_2	0,0002	0,03
N_2	0,4188	74,99
O_2	0,0145	2,60
Total:	0,5585	100,00

4. El volumen de gases producido por 1 kg de combustible. (a 300°C y 1 atm). Utilizando la ley de estado para gases $pV = nRT$, donde

$$R \text{ (constante de gas universal)} = 0,03697 \text{ m}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

$$\text{De esta manera } V = (0,5585 \cdot 0,03697 \cdot (273 + 300)) / 1,0 = 12 \text{ m}^3$$

4.3.5 Combustión en el interior de los hornos

En los hornos la combustión se produce como una reacción química, resultado de la combinación del oxígeno con materiales combustibles, ver figura 4.5.

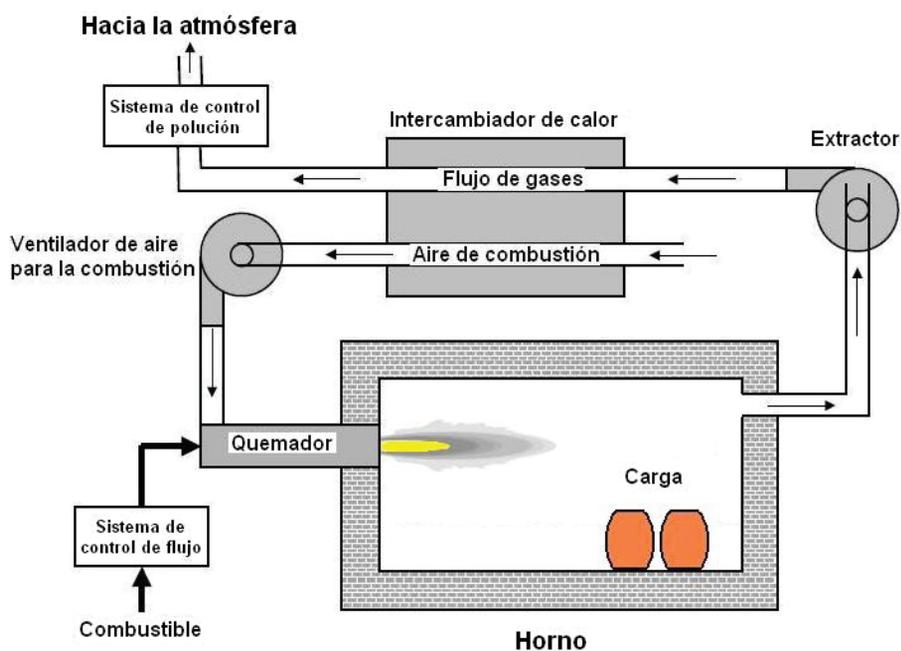


Figura 4.5. Esquema de un proceso industrial de combustión [4]

Para que exista una apropiada combustión y el adecuado aprovechamiento del calor liberado durante la operación de hornos cerámicos deben cumplirse una serie de etapas que involucran desde los combustibles reactantes (almacenamiento, transporte, preparación e inducción) hasta los productos de la reacción (ignición, conversión química, transferencia de energía y extracción), ver esquema en la figura 4.6.

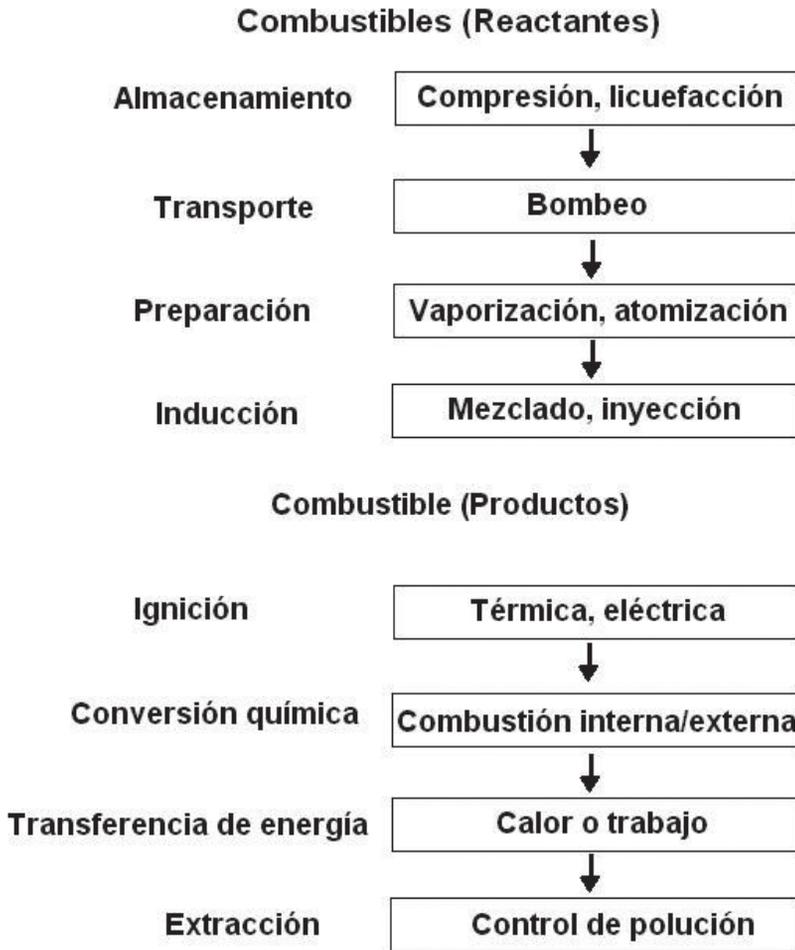


Figura 4.6. Requerimientos fisicoquímicos y camino termoquímico para el combustible ^[5]

4.3.6 Cámara de combustión

La cámara de calentamiento de un horno también llamada “*firebox*” o *cámara de combustión* es un recinto cerrado con revestimiento interior refractario, una capa exterior de aislamiento térmico y una cubierta exterior de lámina de acero, o una capa exterior de ladrillo.

Normalmente se emplea refractario aislante o un material semi-refractario, para el revestimiento interior de la cámara de combustión, este material tiene propiedades térmicas y físicas que lo ubican entre los ladrillos de arcilla refractaria y los materiales usados para aislamiento térmico. Un revestimiento de esta clase tiene menos capacidad para almacenar calor que uno de ladrillos de arcilla refractaria y su uso disminuye los periodos de calentamiento y enfriamiento de la cámara y también las pérdidas por calor almacenado por cada ciclo de funcionamiento. Otra ventaja es su alto poder de aislamiento al calor y su baja densidad (gr/cm^3).

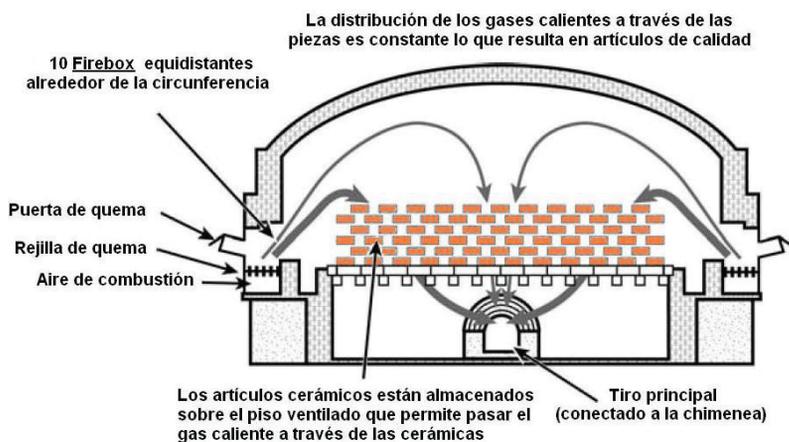


Figura 4.7. Sección de un horno utilizado en alfarería, es de hacer notar la ubicación de las cámaras de combustión (firebox) alrededor del horno circular a distancias equidistantes [6]

La temperatura máxima de la cara interna de la capa de aislamiento térmico determina el carácter del material requerido por dicho aislamiento. Las estructuras de paredes compuestas con un revestimiento interno semirefractario de 11,5 cm (4,5

pulgadas) y una capa de aislamiento térmico de 23 a 33 cm (9,5 a 13 pulgadas) representa la práctica general para los hornos estándares. Estos valores corresponden a los múltiplos de las medidas de los ladrillos refractarios usualmente utilizados en la construcción de hornos de mampostería, los cuales son; en el ladrillo recto de 2 ½ - 4 ½ y 9 ½ pulgadas de lado (6,35 – 11,43 y 24,13 cm). También se puede utilizar concreto refractario vaciado en la forma requerida para contener el calor.

4.4. Materiales para la construcción de hornos

El horno ideal será una caja refractaria con gran eficiencia térmica. Los hornos están dotados normalmente de una estructura o armazón de acero y de un revestimiento de ladrillo u otro material refractario. En la figura 4.8 se muestra un horno de zona móvil de quema, diseñado para la producción de bloques de arcilla.



Figura 4.8. Horno de zona móvil de cocción ^[7]

La selección de los materiales a utilizar en la construcción de hornos es difícil, dado que no existe ningún producto que sea el más adecuado para todos los casos por ello se deben tomar

en cuenta las condiciones de servicios tales como temperatura, carga máxima, abrasión debida a las cenizas, ataques por humos, vapores, escorias y la presencia de atmósferas oxidantes o reductoras.

Los materiales más utilizados son los materiales cerámicos, tales como ladrillos, bloques y perfiles refractarios, fibras aislantes, concreto refractario al igual que morteros, mezclas apisonadas, revoques refractarios, bases de hormigón y perfiles de acero.

Las partes metálicas se emplean en los hornos en forma de rieles para transporte de carga, placas divisoras, armaduras, tirantes y soportes de puertas. Los componentes eléctricos (cables) y electrónicos (controladores), forman parte primordial del horno.

4.4.1 Materiales refractarios

La elección del material refractario debe ser acertada, por cuanto este debe adaptarse al trabajo que se realiza y debe ser tan buen aislante como sea posible. La expansión térmica (dilatación) también se debe tener en cuenta, para ello, usualmente se dejan espacios entre los ladrillos durante la construcción, ya que en caso contrario la armadura se deformaría porque la expansión de los materiales refractarios es de tres a cuatro veces mayor que la del acero.

4.4.1.1 Definición

Los refractarios son materiales cerámicos heterogéneos que pueden resistir una gran variedad de condiciones de servicio: alta temperatura, choque térmico, desgaste físico y ataque químico, y pueden retener su integridad por un periodo aceptable de tiempo^[8].

4.4.1.2 Clasificación de los materiales refractarios

Los materiales refractarios pueden clasificarse de acuerdo con su composición química, apariencia física, método de instalación, tipo de enlace, características fisicoquímica, refractariedad y su presentación al momento de la compra.

a) Clasificación química

- Ácidos, básicos y neutros

b) Clasificación según su apariencia física

- Secos (concretos, mezclas de proyección, recubrimientos, morteros secos)
- Semihúmedos (plásticos, apisonables, mezclas de parchado)
- Húmedos (morteros húmedos, mezclas inyectables y recubrimientos)

- c) Clasificación basada en el método de instalación
 - Vaciado (concretos)
 - Aplicado con cuchara (concretos y morteros)
 - Proyectados (mezclas de proyección y plásticos)
 - Vibrado (mezclas para vibración)
 - Apisonado (plásticos y apisonables)
 - Inyectado (mezclas inyectables)

- d) Clasificación basada en el tipo de enlace
 - Enlace hidráulico (concretos, mezclas de proyección)
 - Fraguado al aire (plásticos, apisonables y morteros)
 - Fraguado al fuego (plásticos, apisonables y morteros)
 - Enlace químico (plásticos, apisonables, concretos, mezclas de proyección y morteros)

- e) Clasificación según su composición química y/o características físico-químicas
 - Refractarios silicoaluminosos
 - Refractarios de alta alúmina
 - Refractarios de sílice
 - Refractarios básicos
 - Refractarios aislantes
 - Refractarios de carbón
 - Refractarios especiales

- f) Según su presentación al momento de requerir su compra
- Aglomerados, monolíticos, preformados y fibras



Figura 4.9. Presentación al momento de la venta de los refractarios:
Aglomerados, monolíticos, preformados y fibras [9]

- g) Una clasificación general se establece en función de la refractariedad de los materiales, o su capacidad de resistir altas temperaturas, en los siguientes rangos [10]:
- Materiales refractarios que se funden entre 1580-1780 °C
 - Materiales altamente refractarios que se funden entre 1780-2000 °C
 - Materiales super refractarios los cuales funden por encima de 2000 °C

4.4.1.3 Propiedades de los refractarios

Las exigencias del ciclo térmico asociado a la producción de artículos cerámicos implica el conocimiento de las siguientes propiedades:

Tabla 4.4. Propiedades físico-químicas, mecánicas y térmicas de los materiales refractarios ^[11]

Propiedades físico – químicas	Propiedades mecánicas	Propiedades térmicas
Peso volumétrico	Resistencia a la compresión	Expansión Térmica
Porosidad aparente	Ensayos termomecánicos	Conductividad térmica
Absorción de Agua	Resistencia a la abrasión	Resistencia al choque térmico
Refractariedad	Modulo elástico	
Granulometría	Resistencia a la flexión	
Análisis dimensional		
Resistencia al ataque químico		
Resistencia a la hidratación		
Permeabilidad		
Análisis químico		

Los refractarios son materiales de elevado costo respecto al peso en kilogramos (\$/kg), siendo esencial su elección cuidadosa de acuerdo con las condiciones de trabajo dentro del horno, la temperatura máxima y la carga mecánica asociada.

Las propiedades más importantes a ser tomadas en cuenta al momento del diseño y selección de materiales refractarios para los hornos se presentan en la tabla 4.5

Tabla 4.5. Propiedades de los refractarios a ser utilizados en la construcción de hornos ^[12].

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Refractariedad en servicio "refractoriness"	Temperatura máxima que el material puede soportar durante periodos prolongados, en ocasiones repetidas y bajo la carga de estructura que descansa sobre él, más un factor de seguridad.
Resistencia al choque térmico	Factor importante puesto que un material que soporte bien temperaturas elevadas pero se agriete si enfría rápidamente carece de utilidad.
Resistencia que ofrecen los materiales a los gases de combustión	En particular a los gases sulfurosos en presencia de vapor de agua al precipitar, vapores desprendidos de los vidriados en particular los de plomo y vapor de cloruro de sodio.
Propiedades termomecánicas	Debe conocerse todo lo relativo a las propiedades de soporte de cargas tanto en frío como en caliente junto con la densidad aparente, posibilidad de contracción, expansión reversible, conductividad térmica y calor específico, a fin de tomar decisiones sobre espesores de pared y métodos de construcción.

Todos los refractarios pueden ser unidos entre sí por polvos muy finos denominados morteros, mezclas para apisonado, mezclas para pulverización y reparación. Estas mezclas son

necesarias para la construcción y el mantenimiento de los diferentes tipos de hornos y deben seleccionarse con igual cuidado que los refractarios propiamente dichos. Es necesario recordar que el material que se utilice para unir los ladrillos o efectuar las reparaciones debe ser de igual o mejor calidad, es decir, capaces de soportar mayores temperaturas y poseer mejores propiedades mecánicas, que el material a unir.

A continuación se presentan los materiales refractarios más utilizados en la industria y sus usos más frecuentes.

Tabla 4.6. Materiales cerámicos utilizados para la construcción de hornos

(En forma de ladrillos o de concreto refractario “castables”) [13]

Material refractario	Usos
Arcilla super refractaria	Empleada como revestimiento de hornos periódicos y de túnel.
Arcilla refractaria de servicio severo	Revestimiento general para hornos de temperatura más baja y revestimiento del extremo caliente en zona de precalentamiento y enfriamiento en hornos de túnel; muros laterales de hornos periódicos.
Arcilla refractaria de servicio intermedio	Empleada como refuerzo de zonas calientes detrás de arcillas de servicios super o severo, y revestimiento para secciones intermedias de las zonas de precalentamiento y enfriamiento en los hornos de túnel, muros laterales de hornos periódicos.

Material refractario	Usos
Arcilla refractaria de servicio ligero	Material de refuerzo general y para partes frías de hornos, entradas y salidas y fondos de carros de horno.
Arcilla rica en alúmina, con un contenido aproximado de 60 % de Al_2O_3 ,	Para revestir alrededores de parrillas, quemadores, paredes delanteras huecas de cámaras de combustión de muflas. Resistente a la abrasión.
Arcilla rica en alúmina con un contenido de 90-99 % Al_2O_3	Solera y pared posterior de cámaras de combustión de muflas. Resistente a la abrasión.
Semisílice	Bóvedas y revestimientos de hornos.
Caolín	Bóvedas y revestimiento de hornos, incluso periódicos empleados en vidriados salinos.
Mullita	Solera, pared posterior y pared anterior hueca de cámaras de combustión de hornos de túnel de mufla. Aberturas para quemadores de aceite y de gas. Revestimiento de hornos eléctricos con canales de resistores.
Ladrillo de sílice regular	Revestimiento de horno en una zona caliente.
Ladrillo de sílice super	Solera y pared posterior de cámara de combustión de horno de mufla. Resistente a la abrasión.
Carburo de silicio	Pared hueca anterior a la cámara de combustión de horno de mufla. Resistente a la abrasión.

Los *morteros* refractarios se utilizan en construcción de hornos para establecer unión y cierre entre los ladrillos y bloques refractarios. En general la calidad, composición y refractariedad del mortero deben asemejarse a la de los ladrillos que han de unir, y sus propiedades de expansión deben también ser comparables.

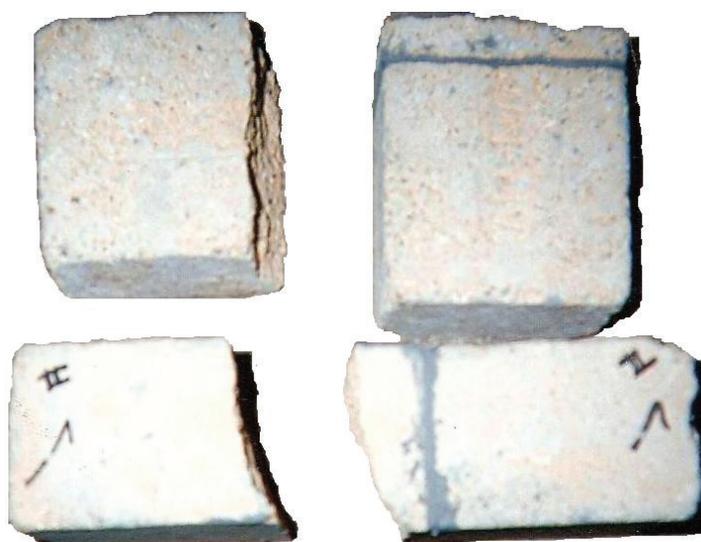


Figura 4.10. Ejemplo del ensayo de fractura de ladrillo refractario unido con mortero refractario por sus extremos planos (Norma Covenin 2106-83)^[14].

Las *mezclas para apisonar* se emplean para revestimiento de hornos y hogares monolíticos, para reemplazar molduras especiales complicadas en bóvedas y aberturas, y para reparar daños de cualquier tamaño o forma sin necesidad de desmontar todos los ladrillos dañados. Estas mezclas pueden ser totalmente cerámicas, compuestas exclusivamente por chamota (arcilla refractaria calcinada y triturada) y arcilla, o bien pueden ser aglutinadas por un cemento aluminoso.

Los *revestimientos* y *revoques* refractarios pueden aplicarse a brocha o a pistola sobre superficies de mampostería calientes o frías a fin de protegerlas contra las escorias o el ataque abrasivo, y en particular para mantener intactas las juntas.

Tabla 4.7. Materias primas para morteros y mezclas refractarias ^[15]

Materias primas	
Aglutinantes	1. Aglutinantes cerámicos endurecidos durante el servicio.
	- Arcillas: arcillas refractarias, de gres, caolines, bentonitas
	- Coloides: vidrio soluble, sal de alúmina
	- Fritas: silicatos de bajo punto de fusión
	2. Fraguado hidráulico en frío seguido por vitrificación durante el servicio: cemento aluminoso, hidróxido de magnesita.
3. Aglutinantes orgánicos que se endurecen en frío y se queman después.	
Chamota	Arcilla refractaria quemada, bauxita calcinada, mullita, corindón, alúmina sintetizada, dolomita sintetizada, cromita, óxido de zirconio, espinelas, cuarzo, sílice, pizarra, arenisca, coke, grafito carburo de volfranio, nitruro de boro.
Termoadhesivos	Son materiales que pueden aplicarse como morteros pero contienen fundentes, de tal modo que funden durante el servicio. Se utilizan para reparar grietas y poros y obturar cubiertas, puertas.

4.4.1.4 Fibras cerámicas

Los productos de fibras cerámicas están disponibles en muchas formas las cuales incluyen fibra cerámica a granel, mantas, módulos, placas, fieltro, piezas conformadas al vacío, papel, fieltro húmedo y telas. La configuración física de cada uno de estos productos es muy variada y consecuentemente sus procesos de instalación son diferentes. En muchos casos los fabricantes desarrollan sus propios sistemas de instalación para un producto específico.

Los revestimientos con fibras cerámicas ofrecen ciertas ventajas como son:

1. El espesor del revestimiento puede ser delgado debido a la baja conductividad térmica del material
2. Baja capacidad calorífica y excelente resistencia al choque térmico
3. La conservación energética es muy buena
4. La instalación es muy sencilla y no requiere destrezas especiales

Como desventajas se consideran la susceptibilidad al ataque químico dada la alta área superficial expuesta y el posible desgaste por el paso de gases de proceso. A continuación se describen algunos de los métodos más comúnmente utilizados para la instalación de fibras cerámicas.

4.4.1.5 Instalación tipo papel tapiz

Este método fue básicamente implementado para la instalación de mantas de fibras cerámicas. Las mantas son productos suaves que retienen su forma por el entrelazado de las fibras. El proceso de aplicación consiste en soldar un perno a la carcasa del equipo y luego colocar placas de aislamiento como soporte, las cuales se mantienen en sitio con un clip retenedor. Posteriormente se fija la manta de fibra cerámica sobre el aislamiento de soporte y se afianza con un tornillo tipo arandela, como se muestra en la figura 4.11.

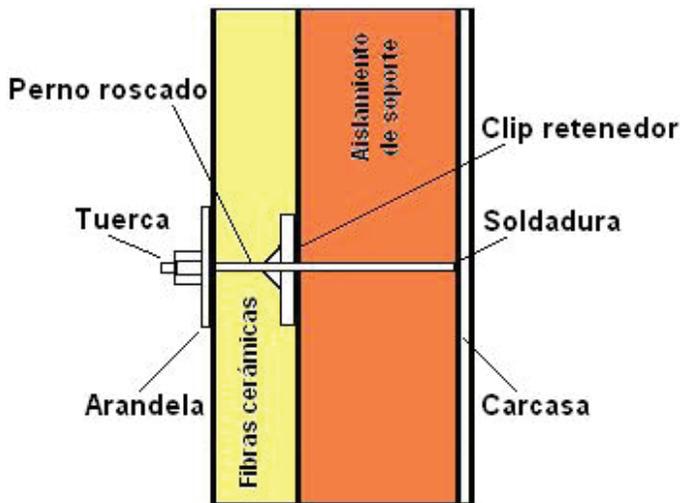


Figura 4.11. Esquema de instalación de fibra cerámica con pernos roscados (método del “papel tapiz”)

4.4.1.6 Instalación de módulos de fibra cerámica

La instalación con módulos tiene la ventaja de que el anclaje metálico del material no está en contacto con la cara caliente, por lo cual puede ser utilizado a mayores temperaturas. También que la orientación de las fibras es perpendicular a la cara caliente, lo cual suministra mejor resistencia al paso de gases. Dentro de las desventajas se incluyen la dificultad de realizar un aislamiento del soporte con este sistema, con lo cual se incrementan los costos y la conductividad térmica en el revestimiento es superior a los recubrimientos aplicados por la técnica del papel tapiz. En la figura 4.12 se ilustra un módulo de fibra cerámica antes de su instalación.



Figura 4.12. Módulo de fibra cerámica [16]

4.4.1.7 Instalación tipo enchapado

En el método de enchapado, la fibra cerámica es instalada sobre un revestimiento ya existente en el equipo. Es una técnica muy útil para disminuir las pérdidas calóricas por radiación y reducir el almacenamiento de calor en las paredes del revestimiento. En este proceso se cortan piezas de mantas o fieltro del tamaño requerido y se ensamblan pegadas, posteriormente se instalan sobre el revestimiento del equipo usando un pegamento orgánico como mortero. En la figura 4.13 se pueden observar dos patrones de instalación de fibras cerámicas.

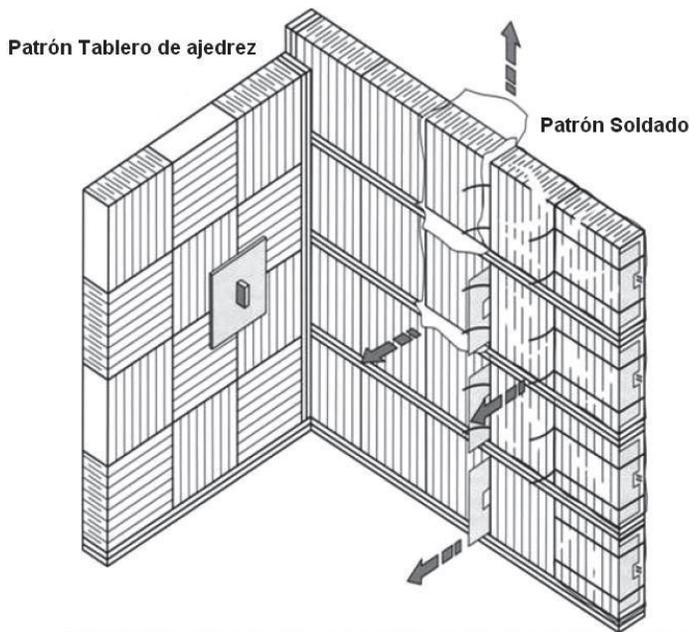


Figura 4.13. Patrones de Instalación de módulos de fibra sobre lámina de acero^[17]

4.4.2 Desarrollo de materiales refractarios

La presencia de grandes empresas consumidoras de refractarios ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales refractarios adaptados a las condiciones específicas de cada aplicación. Por ejemplo, para la producción de acero y cemento se utiliza como revestimiento interno de los hornos concretos moldeables ricos en una fase denominada espinela ($MgAl_2O_4$), regularmente esta fase se sintetiza y luego se tritura para añadirla en el tamaño adecuado a la mezcla seca del concreto en la planta de producción. Esta materia prima es importada y traída a alto costo.

En Venezuela se ha estudiado una manera de hacer este tipo de materiales mediante la formación de espinela insitu a través de los concretos de alúmina-magnesia con autoformación de espinela (alúmina-magnesia/self-forming spinel castable).

El trabajo desarrollado por Gutiérrez-Campos D., Díaz J. I., y Rodríguez R. M.,(1999)consistió en la determinación de la formación de la espinela “in situ”, mediante la difracción de rayos X en las probetas de concreto refractario suministrado por la empresa REVESA de Puerto Ordaz, Venezuela.

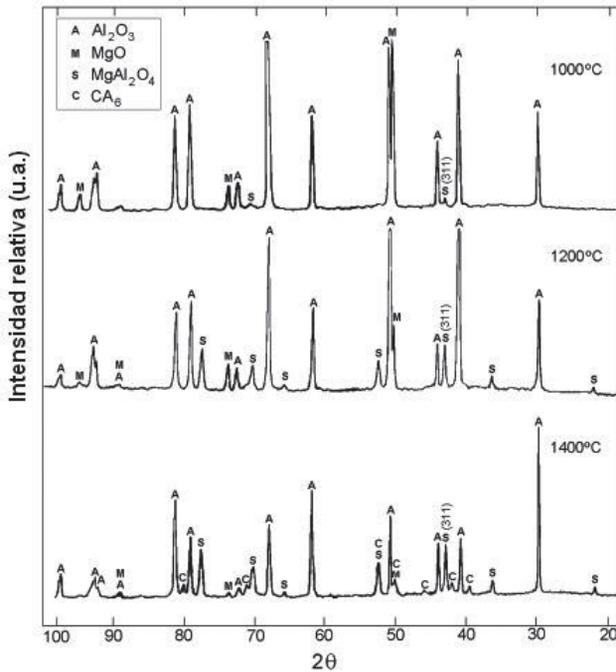


Figura 4.14. Patrones de DRX de muestras con 5 % p/p de MgO^[18].

Como se puede observar en la figura 4.20, a medida que aumenta la temperatura del tratamiento térmico (una hora), aumenta el pico correspondiente a la espinela ($MgAl_2O_4$).

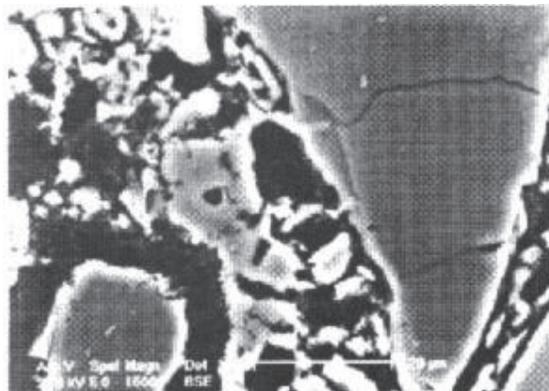


Figura 4.15. Detalle de la formación de espinela en una muestra de concreto con 6 % p/p de MgO, utilizando microscopía electrónica de barrido ^[18]

Al obtener la formación de espinela, se procedió a realizar estudios de las propiedades mecánicas de los concretos de espinela (ver figura 4.16).

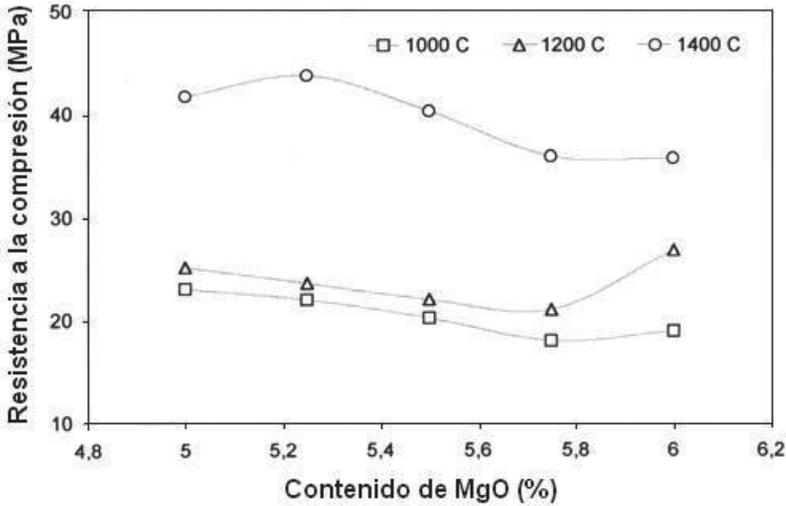


Figura 4.16. Propiedades mecánicas de los concretos de espinela [19]

Los resultados alcanzados permiten predecir que el desarrollo de este tipo de refractario sin el uso de partículas de espinela sintética importada parece tener un futuro prometedor en el diseño de revestimientos refractarios de alta calidad y bajo costo en Venezuela.

4.5 Construcción del horno

La construcción de los hornos cerámicos implica el uso de amplios conocimientos de ingeniería. No es suficiente plantear un horno imitando el diseño de un horno primitivo. Cada vez se requieren hornos más eficientes con mayores capacidades de producción y para ello es necesario utilizar nuevos materiales refractarios y un mejor aislamiento térmico. La competencia entre los diversos fabricantes de productos terminados requiere que los costos de cocción se conserven en su mínimo.

Actualmente, la industria necesita de hornos eficientes, rápidos y económicos, por lo que se han establecido empresas que se especializan en el diseño, manufactura y mantenimiento de hornos, por ejemplo *Combustion Service C A.*

Tabla 4.12. Sectores a los que presta servicio la empresa Combustion Service ^[20]

	<p>✓ ÁREA DE INCINERACIÓN Y CREMACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Desechos hospitalarios y laboratorios ➤ Basura ➤ Incineradores de cadáveres
	<p>✓ INDUSTRIA ALFARERA</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Hornos ➤ Secadores ➤ Tratamiento térmico
	<p>✓ SECADORES INDUSTRIALES</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Sangre ➤ Pintura ➤ Café ➤ Filtros automotrices

4.5.1 Paredes del horno

Las paredes del horno se construirán con ladrillos o fibra cerámica de acuerdo con el uso al que esté destinado, es de resaltar que se deben instalar juntas de dilatación, ya sea que se trabaje con un solo material o con diferentes materiales en capas o revestimientos. En ocasiones la pared será totalmente maciza, sean uno o varios los materiales que la componen. Otras veces el revestimiento refractario y la estructura exterior son independientes y pueden estar separadas por un espacio relleno con un material aislante suelto.

Las compañías constructoras de hornos modernos han llegado a combinar hábilmente materiales, reduciendo mucho los espesores, aumentando el aislamiento y consiguiendo reducir el costo de los hornos, mejorando el rendimiento económico y la capacidad de producción.

Las exigencias en la construcción de hornos cerámicos implican generalmente el conocimiento de las siguientes propiedades de los materiales refractarios a utilizar:

- a) Refractariedad en servicio
- b) La resistencia térmica al resquebrajamiento o resistencia al choque térmico
- c) Resistencia a la abrasión y al impacto
- d) Resistencias a escorias

Otras propiedades de los materiales a tomar en cuenta para la construcción de hornos son: capacidad de carga en frío y en caliente, densidad aparente, coeficiente de expansión (α), conductividad térmica y calor específico, a fin de tomar decisiones sobre espesores de pared y métodos de construcción.

4.5.1.1 Procedimiento sugerido para el cálculo de pérdidas de calor en las paredes del horno

El calor generado en hornos industriales se transmite a la carga, a las paredes circundantes y al suelo. A continuación solo se considerará la transferencia térmica por conducción a través de la pared en condiciones constantes, sin tomar en cuenta los efectos causados por infiltración, presión, juntas abiertas y puertas.

El calor es transmitido principalmente a través de las paredes refractarias por conducción, luego es transmitido hacia el aire circundante y los cuerpos vecinos por radiación y convección desde la superficie de la pared externa.

Hay una caída de temperatura de los gases del horno a la superficie interior de las paredes del horno. Su magnitud depende de muchas variables, tales como temperatura, naturaleza y espesor de la llama, si la llama está o no afectando la pared, condiciones de presión dentro del horno, y otros factores.

La cantidad de calor transmitida por la conducción a través de la pared por área de unidad varía directamente con la diferencia de temperatura entre las superficies externas e internas de la pared y la conductividad térmica del aislamiento refractario. Las conductividades de materiales refractarios y aisladores se dan generalmente en función de la temperatura media o promedio (ver figura 4.17).

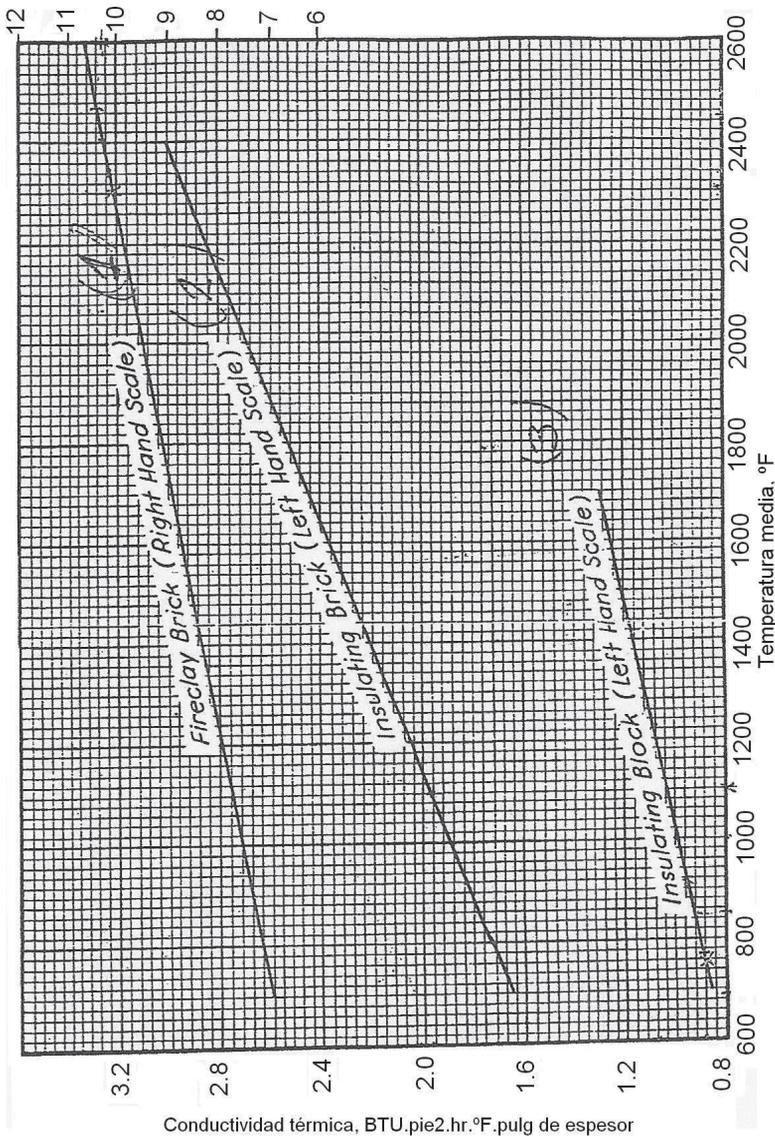


Figura 4.17. Valores asumidos para la conductividad térmica [21].

Siguiendo el procedimiento clásico sugerido por Weinland, C.E. (1936) en el artículo, "A Graphical Method Of Calculating Heat Loss Through Furnace Walls", tenemos lo siguiente: para calcular el flujo de calor a través de las paredes de un horno en condiciones de equilibrio se debe asumir una temperatura para la superficie de la pared exterior y calcular el flujo de calor a través de las paredes desde una temperatura media asumida de los diferentes componentes de la pared y sus conductividades. El flujo de calor que pasa a través de la pared calculado es comparado con la pérdida de calor en la superficie exterior por radiación y convección, esto podría ocurrir cuando la temperatura de la superficie exterior fuera la misma que la asumida. Si las dos pérdidas son iguales y la temperatura media para los componentes de la pared es válida, el cálculo está completo.

4.5.1.1 Ejercicio de cálculo de pérdidas de calor a través de las paredes de un horno

La pérdida por la radiación de la superficie al aire circundante para una temperatura superficial asumida y la temperatura circundante conocida se puede calcular por medio de la fórmula bien conocida de Stefan-Boltzmann:

$$h_t = 17.4 \times 10^{-10} \epsilon (T_1^4 - T_2^4)$$

En la que

h_t = pérdida de calor por la radiación, en (Btu/(pie².h))

ϵ = emisividad de la superficie, generalmente cerca de 0,95

para las superficies de pared hechas de materiales tales como ladrillo y el cemento o el acero áspero (ϵ es aproximadamente 0,28 para la pintura de aluminio fresca),

T_1 = temperatura de la superficie externa, grado. Fahrenheit absoluto (grado. Fahrenheit +460), y

T_2 = temperatura de los alrededores, grado. Fahrenheit absoluto (grado. Fahrenheit +460)

La pérdida de calor de superficies grandes por convección libre o natural, o cuando no hay corrientes de aire soplando sobre la superficie, puede ser obtenida para las mismas condiciones de la fórmula:

$$h_c = 0.53C \left(\frac{1}{T_{prom}} \right)^{0.18} dt^{1.27}$$

En la que:

h_c = pérdida de calor por convección en Btu/(pie².h),

C = constante que depende de la forma de la superficie (para una pared vertical, el valor es 1,39, para la corona de un horno el valor es 1,79),

T_{prom} = temperatura promedio de la superficie de la pared y los alrededores, en grados Fahrenheit,

dt = diferencia de temperatura entre la superficie de la pared y los alrededores, en grados Fahrenheit.

Para facilitar la determinación de las pérdidas de calor superficiales, la radiación y las fórmulas de la convección para una pared vertical se han combinado para una emisividad de 0,95 y temperatura del aire de 70 a 100 °F. Los resultados para estos cálculos se pueden observar en la figura 4.18.

El horno puede estar localizado a menudo en donde existan flujos de aire que estén soplando sobre la superficie, en tales casos, el coeficiente superficial de transferencia térmica puede ser aumentado enormemente si la velocidad del aire que sopla sobre la superficie aumenta en una gran medida.

Una fórmula que expresa la transmisión del calor de superficies planas de gran tamaño para la convección forzada es la siguiente:

$$h_{fe} = 1 + 0.225V$$

Donde: h_{fe} = transmisión del calor en Btu/(h.pie².°F)

V = Velocidad del aire en pie,seg

La fórmula para la convección ha sido combinada con la fórmula de la radiación de Stefan-Boltzmann con el fin de obtener las curvas presentadas en la figura 4.25 con un valor de la emisividad de 0,95 y temperatura del aire de 70 °F.

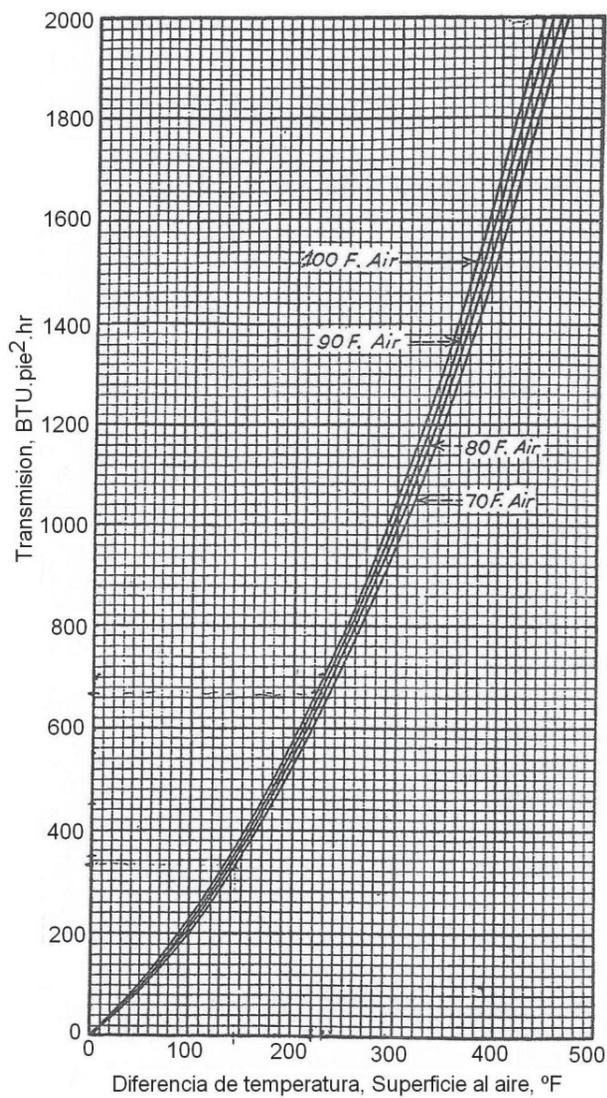


Figura 4.18. Valores asumidos para la conductividad térmica [21].

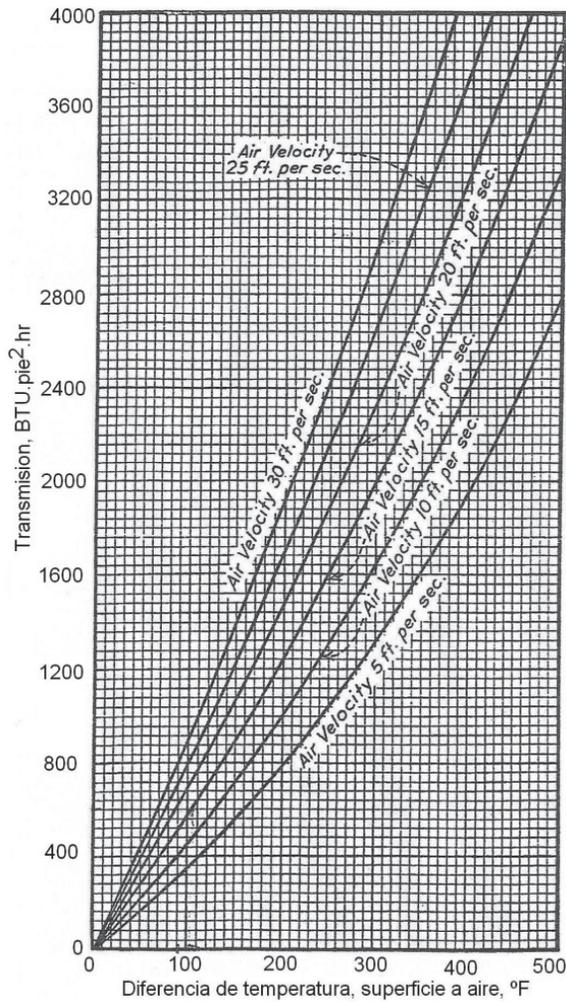


Figura 4.19. Transmisión en la superficie para diferentes velocidades del aire [21]

Estas curvas deben ser utilizadas para la determinación de la resistencia superficial cuando las corrientes de aire externas estén soplando sobre el horno. Si la temperatura del aire es considerablemente diferente a 70 °F; se podrían calcular las nuevas curvas mediante la fórmula presentada.

La manera de utilizar los datos precedentes en el cálculo de las pérdidas de calor través de las paredes del horno pueden ser ilustradas en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 4.2. Caso de la pared con dos componentes:

Un horno tiene una pared de $13\frac{1}{2}$ pulgadas de espesor de ladrillo de arcilla refractaria “fireclay” y $4\frac{1}{2}$ pulgadas de ladrillo aislante. La temperatura interior de la pared del horno se asume en $2800\text{ }^{\circ}\text{F}$; y el horno está situado en un edificio para proteger las paredes del horno contra las corrientes de aire externas o contra la radiación de alta temperatura. La Temperatura del aire se asume en $70\text{ }^{\circ}\text{F}$.

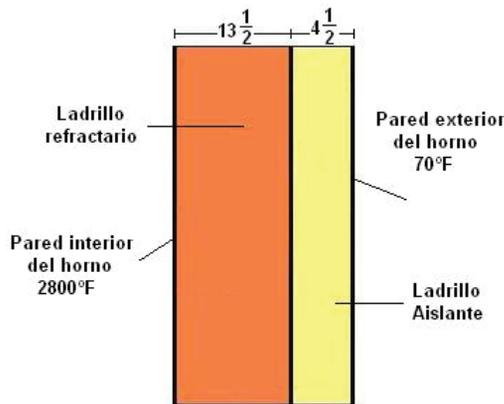


Figura 4.20. Pared del horno del ejemplo 4.2. (unidades en pulgadas)

La fórmula para flujo de calor a través de paredes compuestas por dos o más materiales es como sigue:

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \dots + \frac{L_n}{k_n}}$$

En la que:

Q: Cantidad de calor conducido en Btu/(pie².h)

t₁: Temperatura de la superficie más caliente en °F

t₂: Temperatura de la superficie más fría en °F

L₁, L₂,...L_n: Espesor en pulgadas de cada tipo de material

K₁, k₂,...kn: Conductividad de cada material Btu/(pie².h*°F).

Para el cálculo de la pérdida de calor a través de la fórmula anterior, es necesario primero hacer una suposición para la temperatura externa t₂ y la temperatura en el empalme de cada uno de los componentes de la pared a partir del cual un estimado preliminar de la temperatura promedio de cada material puede ser obtenido y la conductividad térmica correspondiente a la temperatura promedio de cada material sustituida en la fórmula.

La primera prueba para el cálculo se realiza basada en suposiciones amplias, debido a que no se conocen cuales serán las temperaturas exactas. Para hornos aislados de alta temperatura, la temperatura externa puede asumirse en algún punto entre 250 y 350 °F, por ejemplo 350 °F.

Haciendo las primeras suposiciones para las temperaturas en los empalmes de los materiales, es probablemente más

rápido hacer una conjetura de estas temperaturas que tratar de estimarlas debido a la proporción de los espesores relativos y las relativas conductividades de los materiales. En este ejemplo, se asumirá una temperatura de 2000 °F, entre el ladrillo de arcilla refractaria y el ladrillo aislante. La correspondiente temperatura media del ladrillo de arcilla refractaria sería:

$$\frac{2800 + 2000}{2} = 2400^{\circ}F,$$

y la correspondiente temperatura del ladrillo aislado sería

$$\frac{2000 + 350}{2} = 1175^{\circ}F,$$

La conductividad del ladrillo de arcilla refractaria y el ladrillo aislante a estas temperaturas medias asumidas se obtienen de la figura 4.23. y el primer intento de cálculo es como sigue:

$$Q = \frac{2800 - 350}{\frac{13.5}{10.25} + \frac{4.5}{2.03}} = \frac{2450}{1.32 + 2.21} = 694 \frac{Btu}{pie^2 * h}$$

La caída de temperatura desde la temperatura de la superficie externa de la pared a la temperatura de los alrededores, produce una pérdida de calor de 694 Btu. En la figura 4.18 se puede observar que es de 242 °F. La temperatura de la superficie es por lo tanto, 242 + 70 °F (temperatura ambiente) o 312 °F. Como se asumió inicialmente una temperatura de superficie de 350 °F, será ahora deseable asumir una temperatura más cercana a 312 °F, o digamos 320°F; y recalculamos en base a esta. Esto es recomendable dado que el error en la suposición original de

la temperatura de la superficie no solo afectó el estimado de la temperatura de la cara interior sino que también influenció la escogencia del valor de conductividad térmica. Este nuevo cálculo disminuirá los errores.

Con este nuevo cálculo la caída de temperatura a través de la pared será ahora de 2480 °F. Eso es (2800-320) y el flujo de calor para la nueva temperatura de superficie asumida será de $(2480 / ((13,5/10,25) + (4,5/2,03)))$: 702 Btu. Como la caída de temperatura a través de cada material es igual a la multiplicación del flujo de calor por la resistencia actual de cada material, tenemos:

Caída de la temperatura	Temperatura de la cara caliente (°F)	Temperatura de la cara fría (°F)	Temperatura media (°F)
Ladrillo de arcilla $702 \cdot 1,32 = 928$	2800	1872	2336
Ladrillo aislante $702 \cdot 2,21 = 1552$	1872	320	1096

Las conductividades del ladrillo de arcilla refractaria y el ladrillo aislante son tomadas de nuevo de la figura 4.23 para las temperaturas medias anteriores, por lo que la ecuación de flujo de calor resulta:

$$Q = \frac{2800 - 320}{\frac{13.5}{10.15} + \frac{4.5}{1.96}} = \frac{2480}{1.33 + 2.29} = 685 \text{ Btu} \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2 \cdot \text{h}}$$

De la figura 4.18 se ve que para una pérdida de calor de 685 Btu la caída de temperatura es de 240°F, o que la temperatura de superficie es de 310°F. Este resultado se acerca lo suficiente para propósitos prácticos a la temperatura de superficie de 320°F asumida anteriormente, por lo tanto la pérdida de calor es de 685 (Btu/ (pie².h)).

EJEMPLO 4.3 Pared de tres componentes:

Se asume una pared de horno de 13½ pulgadas de ladrillo de arcilla refractaria, 4½ pulgadas de ladrillo aislante, y 2 pulgadas de bloque de fibra aislante. La temperatura de la pared interior del horno se asume en 2800 °F, y la superficie externa, la cual está envuelta en una cubierta de acero, está expuesta a una corriente de aire de 15 pie/s o ligeramente por encima de 10 MPH. Se asume que la temperatura del aire es de 70 °F.

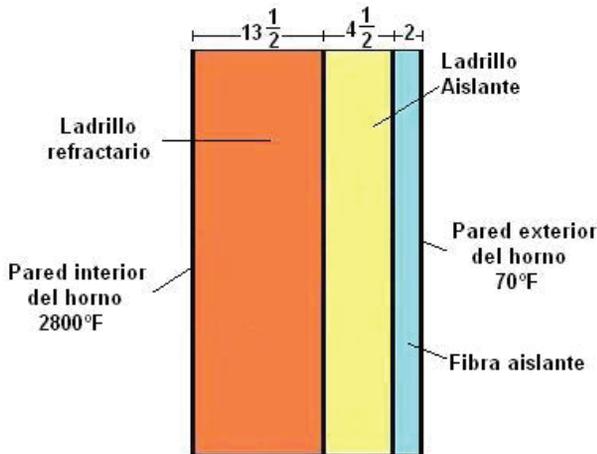


Figura 4.21. Pared del horno del ejemplo 4.3 (unidades en pulgadas)

En este caso el flujo del aire disminuirá la temperatura de la superficie externa y aumentará la pérdida de calor. Para el primer intento de cálculo, se asume una temperatura externa de 180°F, una temperatura de 2200 °F en la cara fría del ladrillo de arcilla refractaria, y una temperatura de 1500°F en la cara fría del ladrillo aislante. Las temperaturas medias de los diferentes materiales para las suposiciones anteriores son:

$$\text{Ladrillo de arcilla refractaria: } \frac{2800 + 2200}{2} = 2500 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\text{Ladrillo aislante: } \frac{2200 + 1500}{2} = 1850 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\text{Bloque de fibra aislante: } \frac{1500 + 180}{2} = 840 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Las conductividades correspondientes a estas temperaturas medias son obtenidas de la figura 4.17 y el primer cálculo es:

$$Q = \frac{2800 - 180}{\frac{13.5}{10.45} + \frac{4.5}{2.56} + \frac{2}{0.92}} = \frac{2620}{1.29 + 1.76 + 2.18} = 501 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2 * \text{h}}$$

La caída de temperatura de la superficie externa al aire de los alrededores produce una pérdida de calor de 501 Btu. En la figura 4.25 y es de 88°F, la temperatura de la superficie es por lo tanto (88+70) °F (temperatura del aire) o 158 °F.

La temperatura de la superficie de 158 °F, puede ser asumida y se hará un nuevo cálculo basado en ella, la caída de temperatura a través de la pared será ahora de 2642 °F. El flujo de calor para la nueva temperatura asumida será de 2642 dividido entre la resistencia total de la pared obtenida anteriormente o 505 Btu. Como la caída de temperatura a través de cada material es igual al flujo de calor multiplicado por la resistencia de cada material tenemos que:

Caída de la temperatura	Temperatura de la cara caliente (°F)	Temperatura de la cara fría (°F)	Temperatura media (°F)
Ladrillo de arcilla 505 1,29=652	2800	2148	2474
Ladrillo aislante 505,1,76=889	2148	1259	1704
Bloque aislante 505,2,18=1101	1259	158	708

Las conductividades de la arcilla refractaria y del material aislante son tomadas de nuevo de la figura 4.17 para las temperaturas medias anteriores, por lo tanto:

$$Q = \frac{2800 - 158}{\frac{13.5}{10.4} + \frac{4.5}{2.45} + \frac{2}{0.86}} = \frac{2642}{1.3 + 1.84 + 2.33} = 483 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2 * \text{h}}$$

De la figura 4.17 se puede observar que para una pérdida de calor de 483 Btu. La caída de temperatura es de 85°F por lo que la temperatura de superficie es de 155°F. El flujo de calor para una temperatura asumida de 155 °F y una resistencia total de la pared de 5.47 = (2645/5.47) es de 484 (Btu/ (pie².h)). El gradiente de temperatura y las temperaturas medias para el flujo de calor anterior y para las resistencias individuales es por lo tanto:

Caída de la temperatura	Temperatura de la cara caliente (°F)	Temperatura de la cara fría (°F)	Temperatura media (°F)
Ladrillo de arcilla 484*1,3=628	2800	2172	2486
Ladrillo aislante 484*1,84=890	2172	1282	1727
Bloque aislante 484*2,33=1127	1282	155	719

Las temperaturas medias indicadas anteriormente se asemejan muy bien a las temperaturas medias a partir de las cuales se hicieron los cálculos anteriores, también la temperatura de la superficie externa no cambiará por un cambio de flujo de calor de 483 a 484 Btu. La pérdida de calor a través de la pared del horno es por lo tanto 484 Btu/ (pie².h).

4.5.2 Medidas de control de los hornos

Para obtener el mejor producto posible a un precio competitivo es necesario mantener un estricto control de la temperatura interna del horno, la velocidad de calentamiento y otras variables relacionadas con el ciclo térmico del material. La temperatura puede registrarse continuamente, y ser controlada de un modo automático. A su vez se efectúan mediciones sobre el tiro, el porcentaje de humedad y el porcentaje de CO_2 de los gases de combustión, el caudal de aire y de gas que llega a los quemadores.

Los dos medios comunes usados en la fabricación de cerámica para medir temperatura, son los conos pirométricos y los sistemas eléctricos pirométricos.

Conos pirómetricos

Desarrollados por Edward Orton Jr. en 1896, los conos pirométricos son usados para medir los efectos tanto del tiempo como de la temperatura de quema dentro del horno. Se trata de cuerpos piramidales triangulares de 6 cm de altura, moldeados y prehornados con materiales de primera calidad para asegurar su correcto desempeño, acorde a su rango térmico(ver figura 4.22).

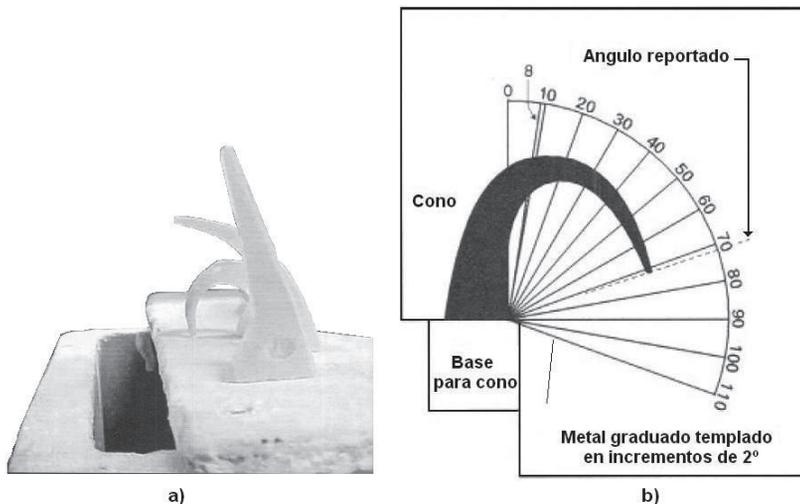


Figura 4.22. a) Forma de colocar los conos pirométricos b) Lectura de un cono pirométrico [22].

Están compuestos por mezclas de arcilla y otros materiales cerámicos, en forma tal que adquieren cierta plasticidad y se deforman cuando llegan a una temperatura predeterminada. Los conos se usan para indicar el punto de quema óptimo y la intensidad y la uniformidad de la distribución del calor en toda la carga. Normalmente se colocan con un ángulo de 8° respecto a la vertical sobre una base refractaria que se sitúa dentro de la carga. Los conos pirométricos se deformarán con el ángulo de la punta del cono formando un arco hacia abajo. La distancia que la punta del cono se dobla puede relacionarse con las manecillas de un reloj y la temperatura buscada será alcanzada cuando el cono se doble y forme un ángulo de 90°C .

Termocupla

Una termocupla o termopar es un dispositivo formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto

Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente” o unión caliente o de medida, y el otro denominado “punto frío” o unión fría o de referencia. La corriente eléctrica se mide y se convierte en grados para su lectura.

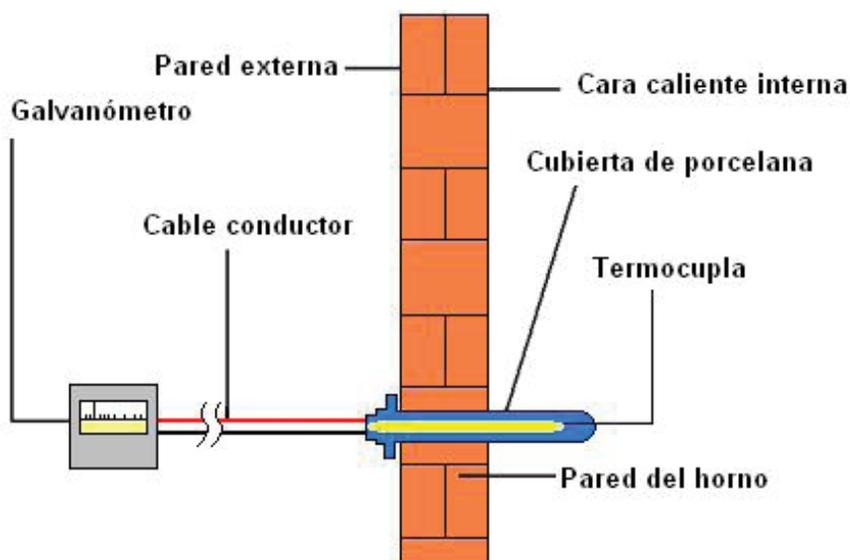


Figura 4.23. Sistema de medición de temperatura mediante una termocupla revestida con una cubierta de porcelana para aumentar su vida útil.

Es importante que este instrumento de medición se coloque debidamente en la cámara si se va a medir temperaturas máxima, mínima o promedio. En los hornos cerámicos suele usarse un arreglo en X a través del corte transversal de la cámara de quema, para tener una medición de la temperatura en la parte alta, media y baja del horno. Es normal un diferencial de temperatura que puede oscilar entre 10 a 50°C, entre techo y piso del horno, este diferencial va a depender de las condiciones de la carga y del movimiento de los gases dentro del horno.

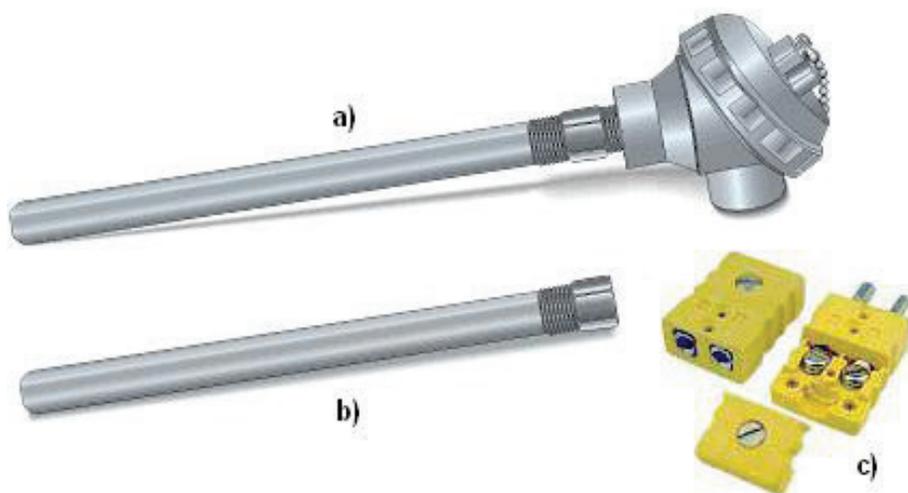


Figura 4.24. a) Termopar industrial completo. Consta de elementos, aisladores cerámicos, funda exterior o termopozo con su rosca npt a proceso, block de conexión y cabezal. b) Funda exterior o termopozo que puede ser de acero inoxidable o cerámica alta alúmina. c) Conectores para termopar (tomado de <http://www.mikai.com.mx/sensores.htm>)

REFERENCIAS

- [1] OLSEN, Frederick (2001). The Kiln Book, Materials, specifications & construction. USA: ThirdEdition, Krause Publications. p. 41

- [2] EL-MAHALLAWY, F. y EL-DIN Habik S (2002). Fundamentals and Technology of Combustion. New York. : ELSEVIER. p.3

- [3] GLASSMAN, Irvin (1996). Combustion. San Diego, California, USA: Elsevier Academic Press. p.3

- [4] BAUKAL, Charles (2004). Industrial Burners Handbook. New York: CRC Press. p.14.

- [5] Ibidem... [2], Pág. 33

- [6] MULLINGER, P., Jenkins, B. (2008). Industrial And Process Furnaces Principles Design And Operation. Hungary: Elsevier. p. 8

- [7] CASTELLANOS, Ronny; USECHE, Ramón. (2003). Diseño de un Horno para cocción de productos de alfarería. Tesis para optar al grado de Ingeniero Mecánico Unet. p. 42 Tutor: Isidro Díaz.

- [8] K. Shaw (1972). Refractories and their Uses. London: Applied Science Publishers LTD., p. 6.

- [9] [Fotografía] Tomada de <http://www.carbosanluis.com.ar/index.asp> Consultado el 20 de agosto de 2010.
- [10] ASTM C27 - 98(2008) Standard Classification of Fireclay and High-Alumina Refractory Brick
- [11] HUGGETT, L.G. (1979, septiembre). Refractories in the chemical industries. International Journal of Materials in Engineering Applications, pp. 280-294.
- [12] ASTM C71 - 08 Standard Terminology Relating to Refractories
- [13] GUTIÉRREZ D. (2000). Refractarios Industriales: Materiales Cerámicos Heterogéneos. Caracas (Venezuela): Dpto. de Ciencia de los Materiales, Universidad Simón Bolívar, p. 42.
- [14] DÍAZ G., J. I. (1994). Diseño e Implementación de una línea de Producción de Morteros Refractarios, Vía Húmeda (Tesis para optar al grado de Ingeniero de Materiales USB, p. 70.
- [15] TORRES T., A. (1971). Tecnología de los refractarios. La Habana: Instituto Cubano del Libro, p. 19.
- [16] [Fotografía] Tomada de <http://thermost.en.made-in-china.com/product/yemxncPgmRUT/China-Ceramic-Fiber-Module-Blok-1260C-1400C-1500C-1600C-.html> Consultado el 25 de Agosto de 2010.

- [17] [Imagen] Tomada de www.carbosanluis.com.ar/Refractories%20-%20-%20CPI%20realations.pdf p.p. 13 WorldChemicalPetrochemicalIndustry, Seminario para América Latina. ThermalCeramics Consultado el 15 de Agosto de 2010.
- [18] GUTIÉRREZ-CAMPOS D., Diaz J. I., RODRÍGUEZ R. M (1999, Mar./Jun.). Evolution of an alumina-magnesia/self-forming spinel castable. Part I: Microstructural features. *Cerâmica* vol.45, São Paulo pp. 292-293.
- [19] GUTIÉRREZ-CAMPOS D., Diaz J. I., RODRÍGUEZ R. M (1999, Aug./Oct.). Evolution of an alumina-magnesia/self-forming spinel castable. Part II: physico-chemical and mechanical properties. *Cerâmica* vol.45, pp. 295-302, São Paulo.
- [20] Catálogo de productos de la empresa Combustion Service S.A. (2005). Barquisimeto. Estado Lara. Venezuela: Combustion Service S.A. .
- [21] Weinland, C.E. (1936). A Graphical Method Of Calculating Heat Loss Through Furnace Walls. *Journal of the American ceramic Society*, 19, pp. 74-80.
- [22] Guía para el uso correcto de los conos pirométricos Orton tomada de http://www.ortonceramic.com/resources/pdf/Guia_Conos.pdf Consultado el 12 de julio de 2010.

CAPITULO V

OPERACIÓN DE HORNOS CERÁMICOS

El aumento de temperatura o calentamiento interno del horno es la operación más crítica en la producción cerámica, si no se controla adecuadamente, la carga puede verse afectada, incluyendo la estructura y materiales de las paredes del horno.

5.1 Sinterización y vitrificación

La *sinterización* es una técnica de procesamiento utilizada para producir materiales con densidad controlada a partir de polvos metálicos o cerámicos por aplicación de energía térmica [1]. Durante la sinterización, las partículas se unen por coalescencia mediante difusión en estado sólido a altas temperaturas, pero por debajo del punto de fusión del compuesto que se desea sinterizar (ver fig. 5.1).

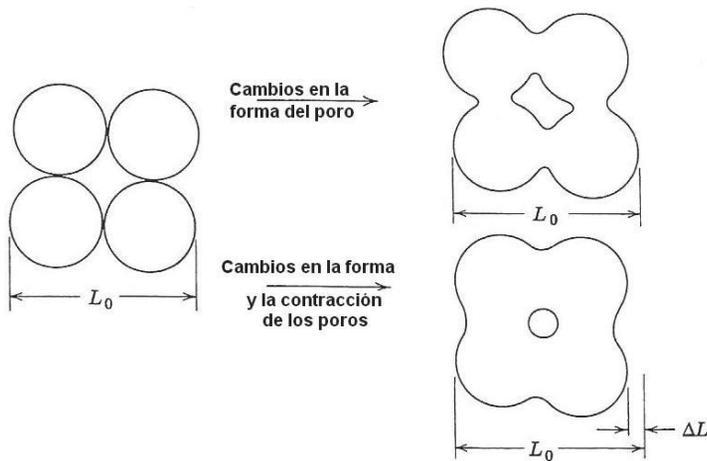


Figura 5.1. Cambios en la forma de los poros durante la quema, es de observar la formación de enlaces entre granos por sinterización en estado sólido debido al tratamiento térmico [2]

Para los materiales cerámicos la quema debe realizarse a temperaturas tales que permitan la sinterización del material; el objetivo es producir el tratamiento térmico de un polvo compactado a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza, la resistencia y consolidar la pieza cerámica.

En el proceso, la difusión atómica tiene lugar entre las superficies de contacto de las partículas a fin de que resulten químicamente unidas. De esta manera, se endurece y vitrifica la arcilla, de modo que tenga una forma permanente e impermeable.

En el medio cerámico, la sinterización se utiliza en prácticamente todas las ramas de la industria, por ejemplo, fábricas de baldosas de piso y pared, plantas de refractarios, sanitarios, aislantes eléctricos, etc. En general, el diagrama de proceso de manufactura que incluye la sinterización se puede observar en la figura 5.2.

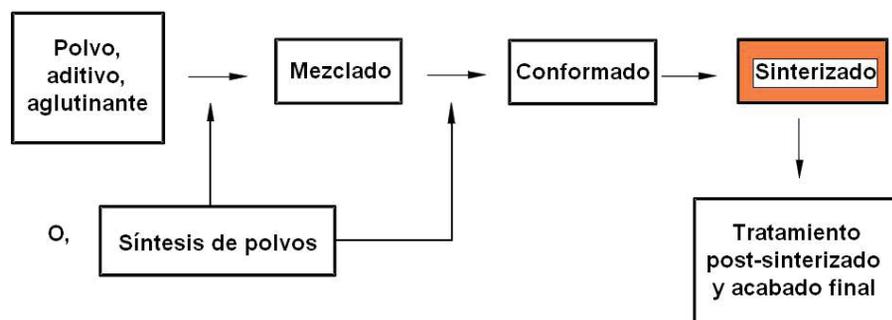


Figura 5.2. Diagrama general de fabricación de productos sinterizados [3]

La vitrificación es el término utilizado para describir la sinterización en fase líquida, en la que la densificación se alcanza mediante el flujo viscoso de una cantidad suficiente de líquido que llene los poros entre los granos sólidos^[4]. El objetivo es la consolidación de la pieza mediante la aparición de una fase vítrea entre los granos que conforman el material.

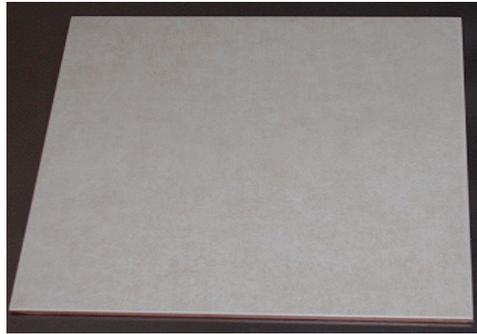


Figura 5.3. Baldosa producida a partir de polvos compactados mediante prensas y luego sometida a tratamientos térmicos para su vitrificación ^[5]

A medida que aumenta la densidad obtenida por vitrificación del material, disminuye la porosidad, lo que permite alcanzar mejores propiedades mecánicas y aumentar la resistencia a la penetración de sales marinas. Por otra parte, si la baldosa es de baja porosidad, es posible evitar la falla por efecto de la helada en países de clima templado, donde el agua penetra los poros y al congelarse provoca un aumento de volumen dentro de las baldosas, lo cual destruyen la superficie del material.

5.2 Cocción de los materiales cerámicos

La cocción constituye el último paso en el proceso de producción de la cerámica. Para que un producto cerámico industrial tenga un acabado final usualmente son necesarias dos cocciones. La primera recibe el nombre de bizcochado o primera quema. Este proceso transforma la mezcla de materias primas en un cuerpo compacto y homogéneo. El producto cocido que sale del horno se denomina bizcocho. Durante esta etapa se producen una serie de reacciones químicas que permiten la cohesión de las partículas del cuerpo cocido.

Las reacciones químicas que se llevan a cabo siguen las pautas dadas por los diagramas de fase o equilibrio de las mezclas involucradas (ver figura 5.4), por ejemplo, la mayoría de los productos cerámicos de producción industrial tienen como base arcillas que en gran porcentaje están compuestas por caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), compuesto formado por óxido de aluminio (Al_2O_3 , llamado alúmina), sílice (SiO_2) y agua.

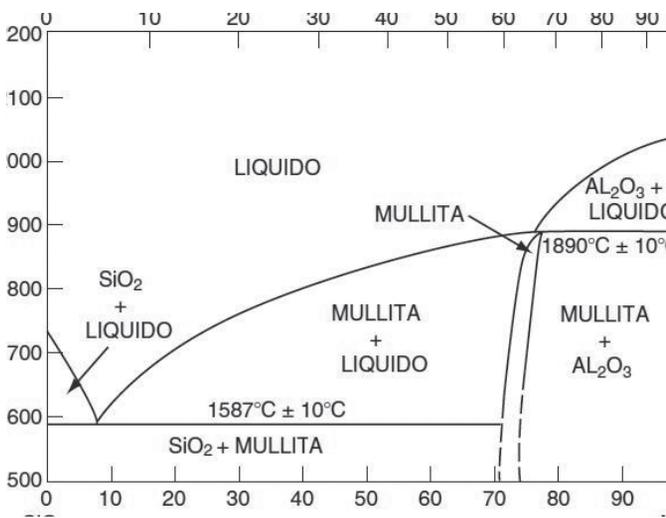


Figura 5.4. Diagrama de fase SiO₂-Al₂O₃ [6].

El objeto en el horno sufre una verdadera transformación físicoquímica y durante la cocción se elimina toda la humedad remanente en el objeto, los hidrosilicatos se disocian, los óxidos se liberan, los carbonatos se descomponen y toda la pasta está sujeta a imperceptibles movimientos de dilatación y contracción por el cambio de volumen de los productos de las reacciones. La temperatura de cocción varía de acuerdo con el tipo de pasta utilizada y en consecuencia, con el tipo de objeto que se quiera fabricar.

Para los productos en terracota, la temperatura del horno oscila entre los 850° y los 1000° C; para el gres y la loza, de los 1000° a los 1300° C; y para la porcelana, de los 1300° a los 1500° C, aproximadamente.

La segunda fase es el esmaltado, durante la cual se colocan los recipientes de modo que no se toquen entre sí, pero procurando al mismo tiempo que tengan cabida en el horno en el mayor número posible. Durante la cocción el esmalte se funde y distribuye con uniformidad sobre la superficie. La temperatura de cocción ha de ser regulada cuidadosamente. En particular la cocción de materiales cerámicos no implica simplemente llevarlos a la temperatura deseada, sino que es importante las velocidades de calentamiento y enfriamiento.

5.2.1 Factores que afectan la cocción de los materiales cerámicos

El programa de cocción óptimo para una pasta está regido por varios tipos diferentes de reacciones que se producen en transformaciones sucesivas. Estas a su vez son afectadas por otros factores descritos en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Factores que afectan la cocción de los materiales cerámicos

Factores que afectan la cocción de los materiales cerámicos		
Composición de la pasta	Preparación de la pasta	Métodos de cocción
Eliminación del agua libre	Granulometría de los constituyentes	Tiempo y calor necesarios para calentar la estructura y los accesorios del horno.
Combustión y eliminación de impurezas y adiciones orgánicas	Geometría de los materiales	Intervalo de tiempo entre los momentos en que la primera y la última pieza de la carga alcanzan una temperatura determinada.
Combustión y eliminación de impurezas sulfurosas		Control del método de calentamiento.
Reducción u oxidación de constituyentes de la pasta		
Variación de los volúmenes graduales durante el calentamiento y el enfriamiento		
Temperatura de maduración		

5.3 Ciclo de quema de los productos cerámicos

El ciclo de quema comprende el tratamiento térmico al que se someterán los productos cerámicos para alcanzar sus propiedades finales. El objetivo principal del ciclo de quema consiste en sinterizar el cuerpo de modo que se obtenga las cualidades deseadas de fuerza y densidad, además de asegurar su forma y estructura.

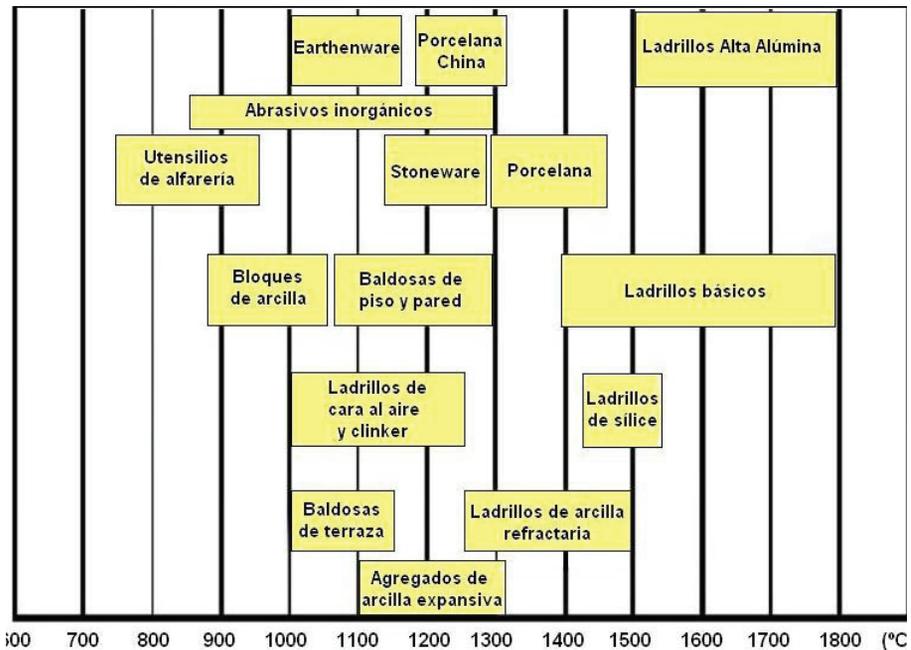


Figura 5.5. Rangos de temperatura de quema (vitrificación) para diferentes productos cerámicos industriales [7]

5.3.1. Etapas de la quema

Hay cinco etapas básicas en el ciclo completo de cocción y enfriado de materiales cerámicos. Para asegurar una buena cocción es importante comprender la naturaleza de cada una de las etapas y su relación:

1. Evaporación del agua: Es necesario extraer el agua libre que tengan los objetos. Esto se hace con un fuego muy bajo y por todo el tiempo que sea necesario para secarlos completamente, el agua libre se convierte fácilmente en vapor en la arcilla y cuando no puede escapar los objetos explotan.

El periodo de evaporación de agua comienza cuando el calor se introduce inicialmente, y continúa hasta que todos los objetos han alcanzado una temperatura de 100 °C. La duración del proceso de evaporación del agua varía según el tipo y cantidad de objetos y contenido de humedad del combustible.

2. Deshidratación: Es una cocción más allá de la evaporación, en la que se extrae el agua química de la arcilla. La evaporación se completa cuando los objetos alcanzan una temperatura aproximada de 540 °C a 650 °C, una vez extraída el agua de la arcilla esta ya no puede reblandecerse otra vez con agua, durante este periodo, se quema la materia orgánica. Este hecho más la evaporación del agua producen la porosidad de los objetos.

3. *Oxidación*: El periodo de oxidación del carbón en la arcilla se presenta casi simultáneamente con el periodo de deshidratación, cuando el material volátil se ha quemado, los combustibles que quedan son azufre y carbón. La oxidación se presenta a temperaturas que comienzan con el periodo de deshidratación y continua con el periodo de vitrificación que es la siguiente etapa.

4. *Vitrificación*: El incremento continuo de calor produce una consolidación de la arcilla al empezar a fundirse los ingredientes fundentes. Para objetos muy densos se recomienda un periodo de temperatura constante a la temperatura máxima, esto garantiza una penetración completa y eliminación de tensiones dentro del objeto.

5. *Enfriado*: El enfriado completa el ciclo de calentamiento y es necesario para el buen éxito de la cocción. Como regla general se estipula que el enfriamiento debe tomar tanto tiempo como la cocción, esto se aplica especialmente a hornos grandes.

Para productos tales como baldosas, refractarios y sanitarios el ciclo de quema utilizado para la cocción es usualmente la única cocción, y por ello se le denomina monococción.

Cuando es necesario aplicar dos ciclos de quema, debido a que primero se quema el bizcocho (por ejemplo, una baldosa de gres sin esmalte) y luego se aplica un esmalte de diferente temperatura de quema, se denomina bicocción (ver figura

5.6). Cuando se requiere un tercer ciclo de quema por agregar esmaltes con metales preciosos como el oro, se le llama tercer fuego.

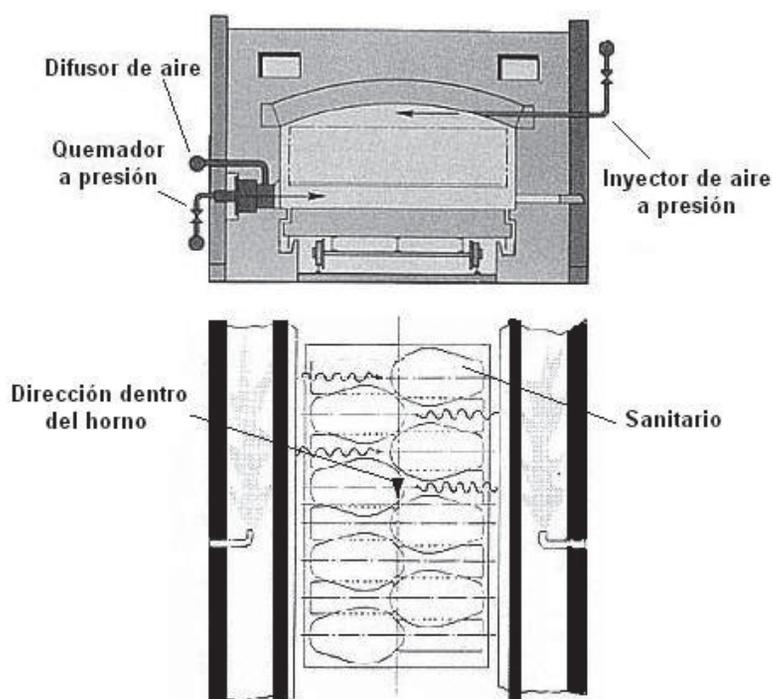


Figura 5.6. Corte de un carro tipo trineo dentro de un horno túnel utilizado para bicocción de sanitarios [8]

5.4 Carga de materiales y transferencia de calor dentro del horno

En los hornos para materiales cerámicos es necesario proporcionar mucho calor a altas temperaturas, pero sin que el objeto esté expuesto a la flama (producida por combustible líquido gasificado). El calentamiento resulta de la combinación de la radiación, conducción y difusión de calor [9].

Radiación: El calor se transfiere por ondas de calor de un cuerpo caliente a uno más frío.

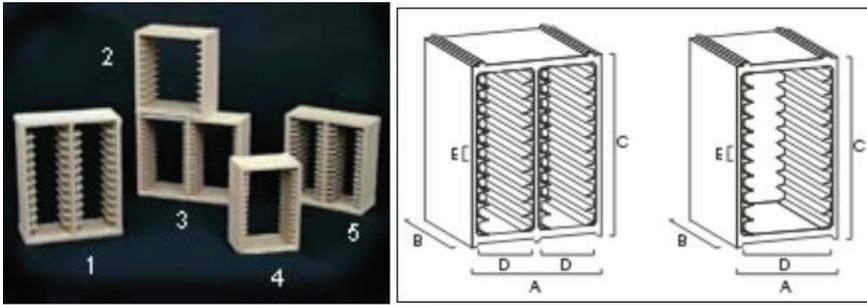
Conducción: El calor se desplaza de una parte de un objeto a la parte más fría, sabiendo que la arcilla es relativamente un mal conductor de calor. Por lo que la sola conducción no basta para el calentamiento.

Convección: El calor se transfiere a través del movimiento del aire caliente y los gases por todo el horno.

En un horno es deseable que todos los objetos se calienten de una forma uniforme, a fin de que su cocción se realice con un mínimo de distorsión y agrietamiento. Estos defectos están asociados normalmente con los diferenciales de temperaturas producidos por la presencia de zonas calientes y el manejo inadecuado de los gases calientes dentro del horno.

Para evitar los defectos asociados al impacto de las llamas en los productos, se construye una caja refractaria (mufla) en la cual se colocan los objetos, por lo tanto, la flama envuelve la caja pero no toca los objetos.

En algunos hornos periódicos y en hornos continuos es necesario colocar los productos a quemar en cajas refractarias que permiten apilarlos fuera de los hornos y después acomodarlos en la cámara de calentamiento, o en carros que se introducen en el horno (ver figura 5.7).



N° de foto	código	formato	Dimensiones mm según acotamientos					N° apoyos	Peso unitario kg
			A	B	C	D	E		
1	77.0040	12x12D	293	120	360	127	27	24	6.300
5	77.0045	12x12D	281	118	297	121	19.38	28	5.850
4	77.0050	15x15D	178	120	258	158	16.80	14	2.300
3	77.0060	15x15D	353	120	280	160	17	30	4.700
2	77.0065	20x20D	234	150	267	212	24	10	3.550
	77.0070	30x30D	341	123	277	315	25	10	4.200

Figura 5.7. Soportes para baldosas cerámicas (azulejos) hechos de material refractario (cordierita) capaz de soportar esfuerzos mecánicos a altas temperaturas ^[10]

Para tener una quema exitosa se pueden seguir algunas instrucciones sencillas y aunque los detalles de la carga varían con el tipo de horno y la clase de objeto que se trate, se pueden aplicar ciertas reglas generales:

1. Los objetos deben agruparse por altura más o menos uniforme de modo que se desperdicie el mínimo de espacio en el horno.

2. Cuando se tienen que cargar diversas formas en una sola quema es aconsejable colocar las piezas de cuerpos pesados y gruesos en la parte más caliente del horno.

3. Se debe dejar un espacio libre entre las paredes del horno y las cajas refractarias para permitir la circulación de los gases.

4. Los controles de temperatura deben estar en puntos sensibles del horno de manera que permitan un control uniforme del calentamiento y enfriamiento.

5. Los arreglos de hiladas con los objetos sujetos a cocción, varían según el tipo de carga.

5.5 Quemadores

Un quemador es un aparato en cuyo interior se mezcla el combustible con el aire, a fin de hacer posible la combustión, con salida de llama y calor por uno de sus extremos.

En los hornos cerámicos, se utilizan diversos tipos de quemadores los cuales funcionan con gas natural, gas licuado de petróleo (GLP), fueloil, carbón pulverizado y gasoil.

5.5.1 Quemadores atmosféricos

Se denomina atmosférico al quemador que toma de la atmósfera el aire necesario para producir la combustión. Es el quemador más sencillo que existe y el más económico, ya que no necesita de un ventilador industrial para inyectar aire a presión, lo que genera un ahorro de energía eléctrica apreciable.

Existen quemadores atmosféricos de baja y de alta presión. Los quemadores atmosféricos de baja presión no se comportan bien en atmosferas reductoras ni con hornos de tiro descendente, a diferencia de los atmosféricos de alta presión, que permiten una óptima reducción y manejo en todo tipo de hornos.

La pieza clave de este quemador es el tubo Venturi, que es un tubo de acero bicónico (o de otra aleación más liviana), el que produce un efecto de succión precisamente debido a su diseño interior, que aumenta la presión de salida del gas.

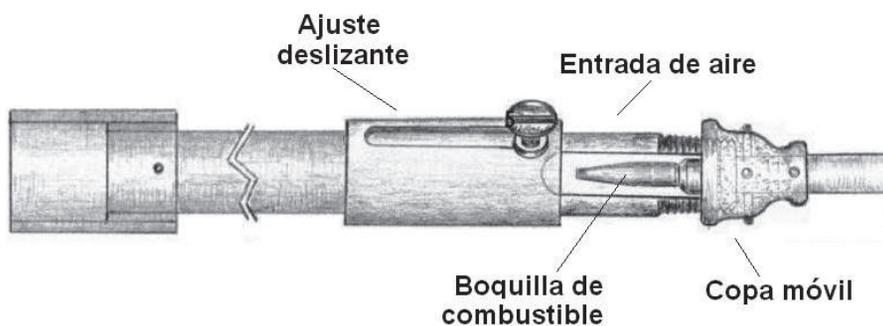


Figura 5.8. Quemador tipo Venturi (el ajuste deslizante permite alargar el quemador para ajustar al espesor de pared y la copa móvil controla la cantidad de aire que ingresa al quemador [11])

El aire que actúa como comburente de la combustión, es mezclado dentro del tubo Venturi con la adecuada cantidad de gas. Existen dos clases de aire, el denominado aire primario que es el succionado al interior del quemador y penetra por la abertura existente en su parte trasera. La cantidad de aire primario que penetre al interior del quemador debe regularse exacta y cuidadosamente ya que el exceso de aire primario hace descender la temperatura de la llama.

El aire secundario también es necesario para la eficiente combustión del gas. La correcta proporción de aire necesario para la combustión es 20% de aire primario y 80% de aire secundario. Dicho aire penetra por el agujero o abertura de entrada de llama al horno, es tomado directamente desde el exterior por la llama de la misma que arde en el extremo de la boquilla, y parte es succionado al interior del horno por el tiro donde se completa la combustión.

5.5.2 Quemadores para gas natural

Para gas natural se utilizan los quemadores de aire – gas, que son aquellos en los cuales el aire, inyectado a presión por un ventilador industrial centrífugo, arrastra al gas, a diferencia de lo que ocurre en los quemadores atmosféricos, en los cuales el gas a presión es el que succiona y arrastra el aire atmosférico. Los quemadores de gas natural requieren un ventilador o soplador industrial.

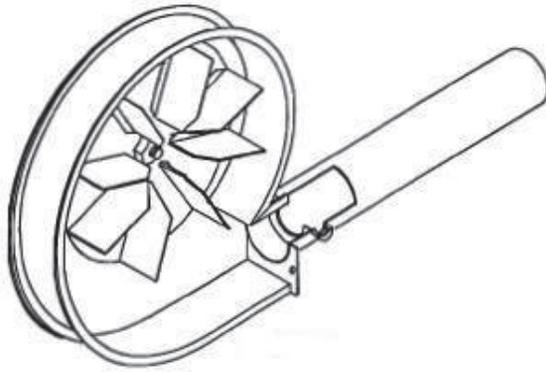


Figura 5.9. Arreglo de ventilador – quemador ^[12]

5.5.3 Quemadores para aceites derivados del petróleo

En este tipo de quemadores el combustible debe ser suministrado al quemador en determinadas condiciones de viscosidad y presión. En una instalación industrial que trabaja con combustibles líquidos se distinguen los siguientes equipos principales:

- Tanque de almacenamiento: debe calcularse teniendo en cuenta el consumo de combustible del horno y la facilidad de reposición del combustible. Usualmente se utilizan tanques elevados para aprovechar la gravedad, si es necesaria mayor presión se colocan bombas de suministro de combustible a los quemadores.
- Grupo de precalentamiento e inyección del líquido que tiene los siguientes componentes: filtros, bomba y dispositivos de calentamiento (resistencias eléctricas o piloto de gas).

- Aparatos de medida: indicadores de nivel (tanques), Manómetros (presión de combustible).
- Aparatos de regulación: boquillas de atomización, válvulas de seguridad.
-

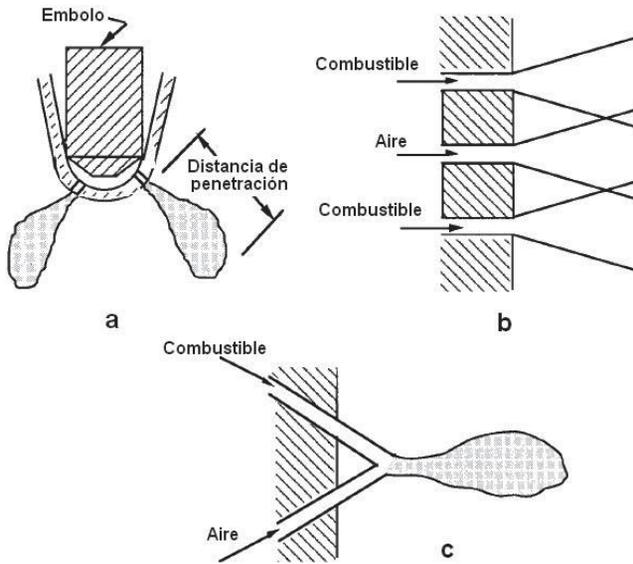


Figura 5.10. Ejemplos de boquillas de atomización para combustibles líquidos: a) Inyector de salida múltiple para combustible diesel, b) Boquilla de rocío tipo regadera, c) Boquilla de impacto doble ^[13]

Los aceites combustibles derivados del petróleo son livianos como el gasoil y el querosén y pesados como el fueloil. El horno que funciona con estos aceites debe tener amplias zonas o espacios libres delante de cada rompe llamas, ya que el tipo de combustible pulverizado a fina niebla exige ser mezclado con abundante cantidad de aire para quemarse u oxidarse bien y por completo, sin dejar residuos, olores o humo negro. Se debe dejar un mínimo de 18 a 20 cm de espacio libre ante cada rompe llamas para quemar el combustible.

El control de atmósferas no es fácil con estos quemadores, la regulación proviene de fábrica y no tiene la versatilidad de un quemador a gas, en el que es fácil pasar de una atmósfera a otra con solo abrir un poco la arandela de aire primario o la llave de entrada de gas al Venturi.

El quemador para aceites y derivados consta de un ventilador centrífugo, capaz de proporcionar todo el aire necesario para la combustión del aceite, que es mucho mayor en este tipo de quemadores que los quemadores a gas. Dicho aire proviene a alta presión, por lo que el quemador trabaja presurizado, de manera que el aceite resulte vaporizado o atomizado a niebla, lo que hace posible la correcta combustión.

5.5.4 Quemadores de carbón pulverizado (Carbojet)

Este tipo de quemador actualmente se emplea en hornos ubicados en países con elevadas reservas de carbón, donde se aprovecha la fracción más barata del carbón que corresponde al tamaño de partícula más pequeña de éste. Para obtener el carbón pulverizado, que será el combustible requerido en el quemador, se necesitan una serie de accesorios y equipos tales como molino para pulverizar el carbón y un ventilador de aire primario que va junto al quemador.

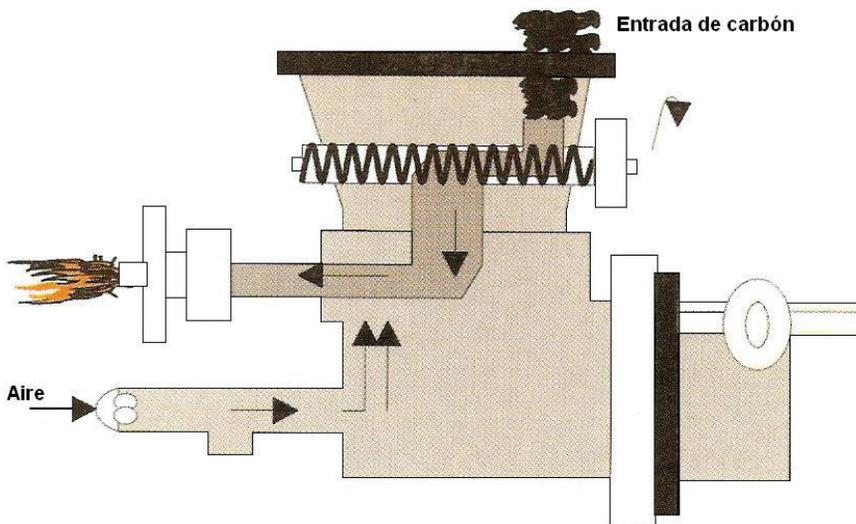


Figura 5.11. Sistema de alimentación con tornillo para carbón pulverizado ^[14]

REFERENCIAS

- [1] SUK-JOONG L. Kang (2005). Sintering, Densification, Grain Growth, and Microstructure. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. p. 3.

- [2] KINGERY, W.D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D.R (1976). Introduction to ceramics. EEUU: Wiley-Interscience ; 2 edition. p. 469.

- [3] Ibidem... [1], p. 4

- [4] RAHAMAN, M.N. (2003). Ceramic Processing and Sintering. New York: Taylor & Francis. p. 677.

- [5] FLÓREZ, E., DÍAZ, J. I., DULCE, J., PEÑA, G. y SÁNCHEZ, J. (2009; S1). Efecto de la resistencia a la helada en baldosas cerámicas esmaltadas. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, pp. 377-381.

- [6] SHACKELFORD, James F.; DOREMUS o Robert H. Editores (Ed.). (2008). Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing, Cap. 8 Concrete and Cement. New York: , Springer Science+Business Media, LLC. p. 6

- [7] Comisión Europea (2007). Ceramic Manufacturing Industry. Consultado el 23 de agosto de 2010 en <http://eippcb.jrc.es/>.

- [8] REED, J. (1995). Principles of Ceramics Processing. USA: John Wiley & Sons. p 586.
- [9] KRAUS, A. D. (2003). Heat Transfer Handbook. USA: John Wiley & Sons. p. 42
- [10] [Fotografía] tomada de <http://www.lacasadelceramistajuan.com/gacetas.asp> Consultado 18 de julio 2010.
- [11] PORTER, M. (2004). Gas Burners for Forges, Furnaces & Kilns. USA: Michael Porter, p. 30.
- [12] GINGERY, D. J. (1998). Building a Gas Fired Crucible Furnace. USA: David Gingery Publishing LLC, p. 12.
- [13] KREITH, F. (2000). The CRC Handbook of Thermal Engineering . Boca Raton: CRC Press. p. 435.
- [14] Ecocarbon LTDA (1998). Hornos ladrilleros a carbón. Medellín. Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana. p.71.

CAPÍTULO VI

CARACTERÍSTICAS DE LOS HORNOS EXISTENTES EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DE NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

La zona metropolitana de San José de Cúcuta, Norte de Santander, República de Colombia, se caracteriza por la alta concentración de empresas dedicadas a la transformación de materiales arcillosos en productos cerámicos destinados a la industria de la construcción, existiendo más de sesenta empresas legalmente constituidas.

La industria cerámica existente en la zona se caracteriza porque la mayor parte de las empresas de la región se dedican a la fabricación de piezas no esmaltadas: baldosas rústicas, revestimientos varios, tejas y productos de mampostería en general. Las dos empresas más grandes fabrican piezas esmaltadas y un gran número de pequeñas unidades productivas dedican sus actividades a la producción de piezas decorativas o de ornamentación en arcilla.

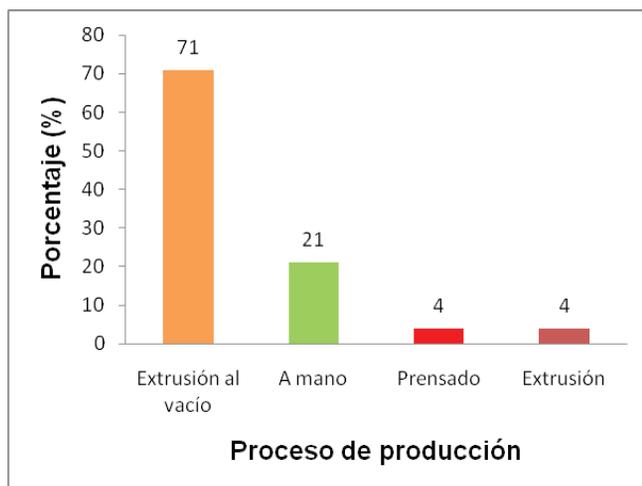


Figura 6.1. Tipo de conformados empleados en la fabricación de piezas cerámicas en el área metropolitana de Cúcuta^[1]

Debido a las características de moldeo existentes en la región, la mayor parte de la infraestructura instalada corresponde a procesos de fabricación intermitentes, principalmente para la fabricación de piezas no esmaltadas.

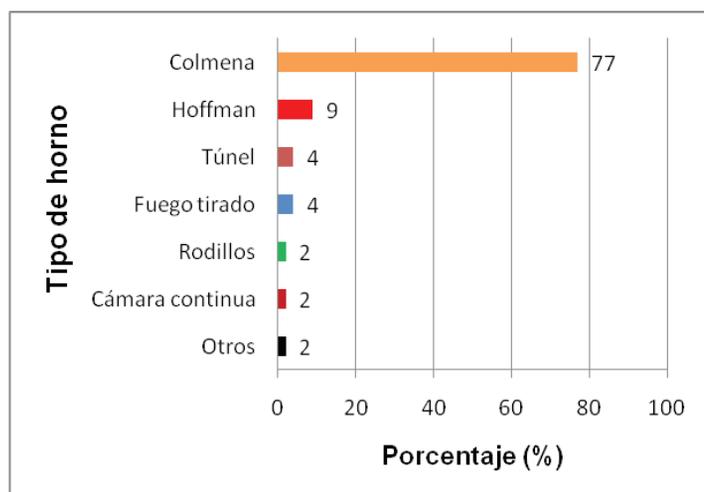


Figura 6.2. Tipo de hornos utilizados en la industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta ^[2]

En la figura 6.2 se puede apreciar que los hornos de llama invertida (colmena) son los de mayor uso en la zona, en segundo lugar están los hornos Hoffman, dejando en evidencia que los hornos de producción por lotes son los de mayor uso en la región.

6.1 Hornos colmena (Llama invertida)

En la zona metropolitana de San José de Cúcuta existen alrededor de 220 hornos de este tipo, los cuales se pueden encontrar en diferentes tamaños; los hay desde los siete metros de diámetro interno hasta hornos de trece metros de diámetro interior, siendo los más comunes los de diez y once metros, aunque sus características de diseño no presentan diferencias notables.



Figura 6.3. Horno colmena existente en la zona metropolitana de Cúcuta. Foto cortesía del Centro de Investigación de Materiales Cerámicos (Cimac-UFPS).

Los diseños construidos en la región tienen forma circular y su parte superior o techo tiene forma de cúpula. El horno se encuentra conformado por dos puertas, hornillas, colectores de las hornillas, brameras, sacos de contención del fuego, alfalcas, túneles y chimeneas, que se pueden ver en las figuras 6.4 y 6.5.

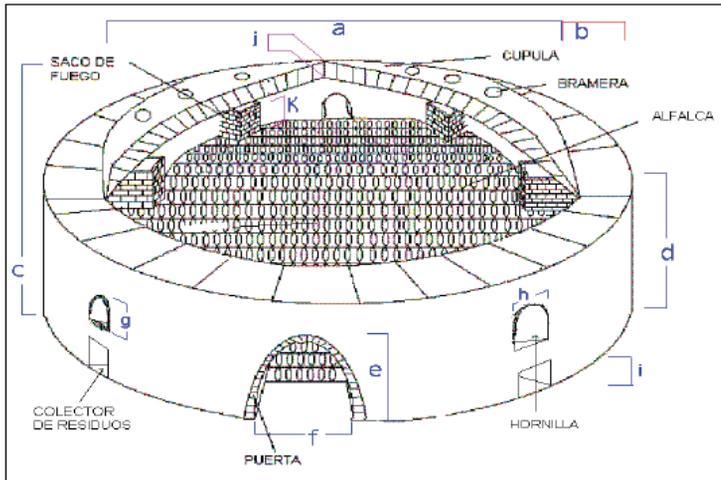


Figura 6.4. Esquema del horno colmena ^[3]. Convención: a: Diámetro interno, b: Espesor de pared, c: Altura del horno, d: Altura hasta la base de la cúpula, e: Altura de la puerta, g: Altura de la hornilla, h: Ancho de la hornilla, i: Altura del colector, j: Espesor de la cúpula y k: Altura del saco de contención.

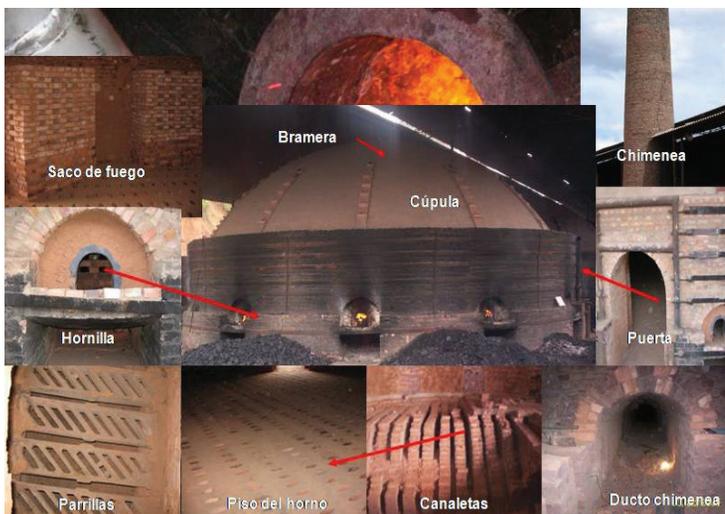


Figura 6.5. Registro fotográfico de las partes del horno Colmena ^[4]

6.1.1 Puertas del horno

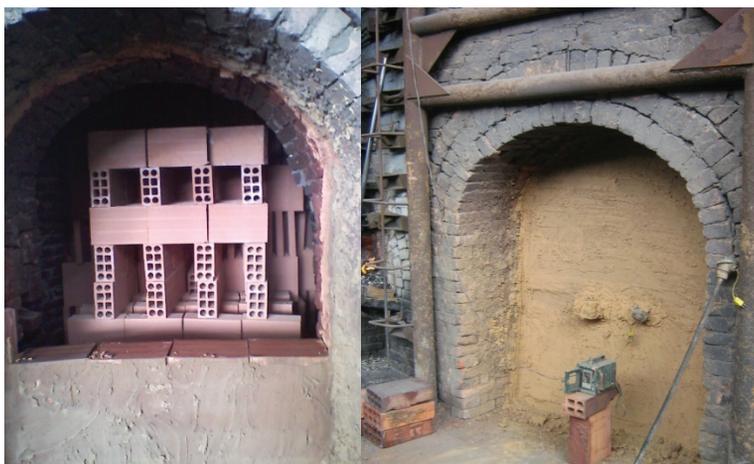


Figura 6.6. Puertas del horno Colmena. Foto cortesía del CIMAC-UFPS.

Las puertas del horno permiten el cargue y descargue del material al inicio y final de la cocción, su cierre, una vez cargado el horno se hace con ladrillo macizo o con bloques cocidos y material arcilloso humectado que actúa como revestimiento externo tal como se aprecia en la figura 6.6.

6.1.2 Las hornillas o firebox

Son las zonas del horno donde se introduce el combustible y se lleva a cabo su combustión. En las empresas cerámicas de la zona el combustible empleado es el carbón mineral. La mayoría de los hornos posee doce hornillas, sin embargo, algunos hornos pequeños (7, 9 y 10 m de diámetro interior) poseen ocho o diez hornillas. Entre menor es el espacio existente entre hornillas, menores serán las zonas frías dentro del horno. Las hornillas se encuentran ubicadas a 0,6 m del suelo y sus dimensiones

varían entre 33 y 43 cm de ancho y entre 30 y 40 cm de alto. En las hornillas el combustible es dosificado principalmente por operarios, pero en algunos casos se emplean sistemas mecanizados conocidos como Stoker (ver figura 6.7), los cuales requieren que el combustible tenga un tamaño pequeño de partícula (entre 0,5 y 1,5 pulgadas). En hornos que trabajan con Stoker las dimensiones de las hornillas son de 40 cm x 50 cm aproximadamente, donde los hornos cuentan con cuatro Stoker, cada uno con un par de hornillas. Las hornillas poseen en su interior un emparrillado sobre el cual permanece el combustible durante la quema, dichas parrillas se encuentran en desnivel hacia el interior del horno y la diferencia de altura entre la parte alta y baja de la misma es de 20 a 30 centímetros aproximadamente. Generalmente en cada hornilla se tienen entre cuatro y seis parrillas y sus dimensiones son 85 cm de largo y 18 cm de ancho aproximadamente.



Figura 6.7. Hornillas del horno colmena. Foto cortesía del Cimac-UFPS.

6.1.3 Las brameras

Son orificios ubicados en la cúpula del horno, las cuales permiten el escape de los gases que se encuentran en su interior del mismo cuando la cocción está en la etapa inicial y final. El número de brameras con que cuentan los hornos generalmente es igual al número de hornillas, además de la central, aunque existen algunas excepciones; dichas brameras se encuentran al mismo nivel de la cúpula, pero en ocasiones presentan un orden especial, quedando a dos niveles. Las brameras son utilizadas en muchas ocasiones por aquellas empresas que realizan el vidriado salino en sus productos, especialmente en baldosas, muy conocidas en la región como productos vitrificados.

Las brameras permanecen abiertas en la etapa de calentamiento, y se cierran de acuerdo con criterios propios de la empresa, esto ocurre entre 110°C y 300°C y permanecen así hasta la etapa de enfriamiento, cuando son nuevamente abiertas.



Figura 6.8. Brameras del horno colmena.

Foto cortesía del Cimac-UFPS.

6.1.4 Las alfalcas

Son conductos que permiten el paso de los gases de combustión hacia los ductos, los cuales conducen dichos gases hacia las chimeneas.

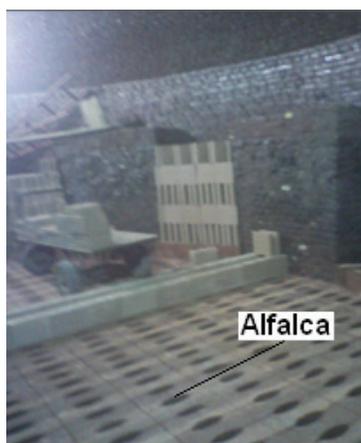


Figura 6.9. Alfalcas del horno colmena. Foto cortesía del Cimac-UFPS.

6.1.5 Los colectores de las hornillas

Son cavidades en las cuales se recolectan los residuos de carbón quemado en las hornillas.



Figura 6.10. Colector de hornilla del horno colmena.
Foto cortesía del Cimac-UFPS.

6.1.6 Sacos de contención de fuego

En los hornos colmena la llama producida por la quema del carbón en las hornillas asciende por las paredes gracias a los sacos de contención de fuego hasta alcanzar la parte alta del horno, luego desciende a través de las piezas, produciéndose así la cocción de estas. Dichos sacos poseen las siguientes dimensiones: alturas entre 1,30 y 1,60 m, ancho exterior entre 1,35 y 1,40 m, ancho interior de 0,90 m y entre la pared interna del saco y la del horno la distancia es 0,50 m aproximadamente, que equivale a la longitud de la parrilla. La distancia existente entre los sacos de fuego en hornos pequeños es menor en comparación con hornos grandes, donde se alcanza un metro entre uno y otro saco aproximadamente. En los hornos que trabajan con Stoker, se ha logrado establecer que estos sacos tienen dimensiones superiores a las antes mencionadas, principalmente en cuanto a la altura, que alcanza un valor de dos metros aproximadamente. En hornos con el mismo diámetro interno, las dimensiones de los sacos no siempre son las mismas, es decir, no existe un patrón definido.



Figura 6.11. Sacos de fuego de un horno colmena.
Foto cortesía del Cimac-UFPS.

La figura 6.12 deja ver el interior de un horno colmena, se aprecia su profundidad y los túneles para el transporte de los gases de combustión hacia la chimenea.

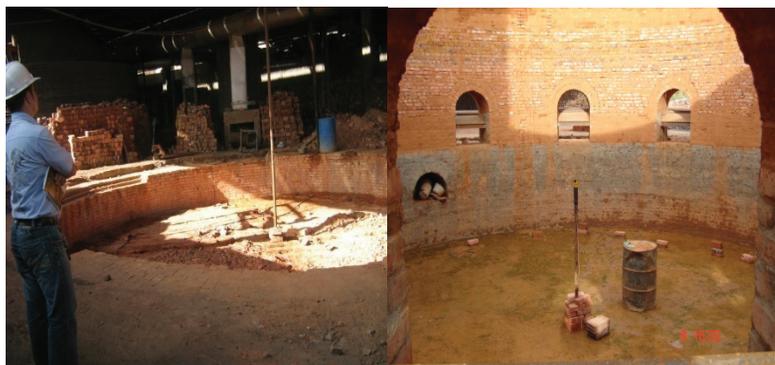


Figura 6.12. Registro fotográfico de un horno colmena en reconstrucción.
Foto cortesía del Cimac-UFPS.

6.1.7 Las chimeneas

Son las que reciben los gases de combustión provenientes de los ductos, para permitir su evacuación. Las chimeneas pueden ser diseñadas para evacuar los gases de uno o más hornos, dos por lo general. Las alturas de las chimeneas debe corresponder a la establecida por la legislación ambiental colombiana (Decreto 02 de 1982), según la cual para las empresas de la industria del gres esta se ubica sobre los 15 m. En la zona de influencia es posible encontrar dos tipos de chimenea, las de tipo circular y las de tipo rectangular, siendo las primeras las de mayor uso, y cuyos diámetros se encuentran entre los 0,9 y los 1,5 m.



Figura 6.13. Tipos de chimeneas utilizadas en los hornos colmena.
Foto cortesía del Cimac-UFPS.

6.2 Hornos de fuego dormido

Es el horno artesanal más antiguo existente en la zona metropolitana de Cúcuta, es de tipo rectangular y se caracteriza por poseer una puerta lateral por donde se carga el material. Es un horno intermitente de baja producción y alta contaminación. Generalmente su uso se restringe a productos de poco valor agregado y con ciclos de producción muy largos que habitualmente superan los quince días, además estos hornos no poseen chimenea. Debido a una quema no homogénea, el material producido es de baja calidad, es decir, algunos objetos quedan requemados mientras otros quedan crudos.



Figura 6.14. Horno de fuego dormido de la zona metropolitana de Cúcuta.
Foto cortesía del Cimac-UFPS.

En estos hornos se coloca una capa de carbón, posteriormente una de ladrillos y consecutivamente una de carbón y otra de ladrillos, hasta que se alcanza el tope del horno. Una vez se ha terminado el encañado o endague (ubicación de los ladrillos dentro del horno) se enciende.

En la construcción de este tipo de horno se utilizan ladrillos de obra que no pueden considerarse como refractarios, ya que su contenido de alúmina es muy bajo, existiendo gran cantidad de pérdida de energía a través de las paredes del horno.

Las dimensiones de los hornos de fuego dormido de la región son muy variadas, no es posible establecer un valor promedio del número de instalaciones, pues constantemente nacen y desaparecen unidades productivas, de acuerdo con

las investigaciones realizadas por el Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica Gitec de la Universidad Francisco de Paula Santander [5]. A continuación se presenta una breve descripción de las partes del horno.

6.2.1 La puerta inferior

Esta puerta permite la entrada de las piezas y del carbón para el llenado de la parte inferior del horno; igual que en el horno colmena esta se cierra con ladrillos de obra previamente cocidos y se recubre con una capa de arcilla que obstruye toda la puerta.

6.2.2 La puerta superior

Esta entrada se utiliza para el llenado del horno una vez el material cargado ha superado cierto nivel que no permite la entrada del material por la puerta inferior, esta entrada también es sellada para dar inicio al proceso de encendido del horno.

6.2.3 Las paredes

Como se ha dicho con anterioridad el horno es de tipo rectangular, las puertas se ubican entre un par de paredes paralelas, la altura y espesor de cada pared es muy variado.

6.2.4 El techo

Para los hornos existentes en la región es típico que estos hornos tengan un techo elaborado con tejas de arcilla cocida, y comunmente con un diseño a dos aguas. La figura 6.15 muestra un horno de fuego dormido de la región



Figura 6.15. Registro fotográfico de un horno de fuego dormido existente en la zona metropolitana de Cúcuta. Foto cortesía del Cimac-UFPS.

6.3 Hornos Pampa

Este horno presenta gran similitud con el horno de fuego dormido, la diferencia radica en la existencia de hogares para la combustión del carbón mineral en las paredes laterales del horno; también son conocidos como hornos árabes. El tiempo de cocción oscila entre seis y diez días. Su capacidad de carga es mucho mayor, muy común para la cocción de ladrillo de obra.



Figura 6.16. Registro fotográfico de un horno pampa de la zona metropolitana de Cúcuta. Foto cortesía del Cimac-UFPS.

6.4 Hornos Hoffman

En la zona metropolitana de Cúcuta los hornos de producción semicontinua y continua no son muy empleados; el horno Hoffman no es de uso común, sin embargo algunas empresas, los utilizan para la fabricación de piezas cerámicas de mampostería, principalmente en la producción del ladrillo a la vista o multiperforado, ver figura 6.17.

Los diseños no presentan cambios significativos entre uno y otro, la gran diferencia se encuentra en el tamaño del horno y la tecnología empleada para la dosificación del combustible, que para el caso particular de las empresas de la región es el

carbón; sin embargo es posible encontrar hornos Hoffman que trabajan con fuel oil en el municipio fronterizo de Pedro María Ureña, estado Táchira, Venezuela.



Figura 6.17. Horno Hoffman ubicado en la zona metropolitana de Cúcuta^[6]

Los diseños son muy similares, en la figura 6.18 se puede observar el interior de una sección de este horno que aún no ha entrado en funcionamiento, se aprecian las puertas que harán parte de cada sección de trabajo del horno. La figura 6.19 muestra una vista exterior de un horno Hoffman en la que se puede ver la altura del horno y espesor de la pared de la zona de la puerta. El material de construcción de este horno no es muy refractario, casi puede catalogarse como un producto tradicional empleado en obras civiles. El cerramiento de las puertas una vez cargado el horno es muy similar al empleado en los hornos colmena y de fuego dormido.



Figura 6.18. Interior de un horno Hoffman en proceso de construcción^[7].



Figura 6.19. Registro fotográfico de la parte exterior de un Hoffman túnel existente en la zona metropolitana de Cúcuta. Foto cortesía del Cimac-UFPS.



Figura 6.20. Cargue de cámara del horno Hoffman en una empresa de la región ^[8]. Foto cortesía del Cimac-UFPS.

La tecnología utilizada en la región para la combustión del carbón se caracteriza por el uso de sistemas neumáticos conocidos como carbojet (Ver figura 6.21), aunque también se hace mediante dosificación manual; este combustible se adiciona por la parte superior del horno, a través de orificios distribuidos por todas las secciones del horno en forma de filas. El carbón dosificado presenta un tamaño de partícula entre 3 mm y 5 mm. El tiro del horno es forzado mediante el uso de sistemas de impulsión que transportan el calor entre secciones.



Figura 6.21. Carbojet utilizado para la dosificación de carbón en los hornos cerámicos de la zona metropolitana de Cúcuta. Cortesía Ladrillera Merkagres de Colombia

6.5 Hornos Túnel

Este horno de producción continua es utilizado por dos empresas en la región, variando entre ellos el tipo de combustible empleado: gas natural y carbón. Estos hornos son los de mayor inversión tecnológica en la región en cuanto a la fabricación de productos rústicos se refiere.



Figura 6.22. Horno túnel de la zona metropolitana de Cúcuta.
Cortesía Ladrillera Merkagres de Colombia

El tamaño de los hornos túnel es muy relativo, pero pueden encontrarse desde los ochenta metros hasta los ciento noventa metros, los hornos túnel de la región son de alrededor de ochenta metros de largo. En este tipo de hornos el producto que se va a sinterizar se coloca sobre vagonetas hechas de material refractario, las cuales circulan sobre rieles. A intervalos regulares se introduce una vagoneta de producto crudo y se extrae otra de producto cocido por el otro extremo. El movimiento de las vagonetas en el interior del horno es continuo y uniforme. Las vagonetas están constituidas por una parte metálica inferior, con

ruedas que contienen una capa de material aislante y refractario. La parte superior de la vagoneta que sostiene el material que se va a sinterizar, tiene espacios a través de los cuales pasan las llamas y gases de combustión. Las vagonetas circulan por la acción de un mecanismo de empuje, generalmente hidráulico. El movimiento puede ser intermitente o continuo y suele estar comprendido entre cuarenta y noventa minutos, la figura 6.22 muestra el interior de un horno túnel en proceso de construcción.

Como se ha dicho con anterioridad, en la región estos hornos son utilizados con gas natural y carbón pulverizado. La figura 6.23 muestra el sistema implementado en la zona para la dosificación del combustible.



Figura 6.23. Interior de un horno Túnel en construcción, Cortesía de Maquilob, Maquinaria para cerámica.



Figura 6.24. Sistemas implementados en los hornos Túnel de la región para la dosificación de combustible. Cortesía de Cerámica Andina (Izquierda) y de Ladrillera Merkgres(Derecha).

6.6 Hornos de rodillos

Este tipo de hornos sólo es utilizado en la región por dos empresas, su uso se limita a la cocción de baldosas cerámicas, tanto esmaltadas como no esmaltadas. Este horno se caracteriza por ser de producción continua y de un alto nivel tecnológico, con poca presencia de mano obra para su operación en comparación con los demás hornos existentes en la zona. Las temperaturas de cocción en estos hornos son de las más altas que se utilizan en la región y sobrepasan los 1100 °C, siendo el gas natural el combustible empleado para la generación de energía calórica dentro del horno.

La tecnología empleada es casi en su totalidad importada, los diseños son muy variados de acuerdo con cada fabricante y el movimiento del material dentro del horno se hace a través de rodillos.



Figura 6.25. Horno de rodillos existente en el área metropolitana de Cúcuta. Cortesía de Cerámica Andina.

6.7 Aspectos Productivos de los Hornos de la Región

La zona metropolitana de Cúcuta se caracteriza por poseer una gran cantidad de reservas arcillosas que han permitido el desarrollo de la industria cerámica en la región. Los productos no esmaltados son fabricados en casi todas las empresas, utilizando el método de extrusión para el conformado; los productos esmaltados con conformado por prensa sólo se lleva a cabo en dos empresas. Los productos fabricados en la región se pueden clasificar de la siguiente forma:

6.7.1 Productos cerámicos para construcción de paredes

Dentro de esta agrupación podemos encontrar ladrillos perforados para fachadas, ladrillos estructurales, ladrillos macizos, ladrillos arquitectónicos y bloques (H10, H5, estructural).

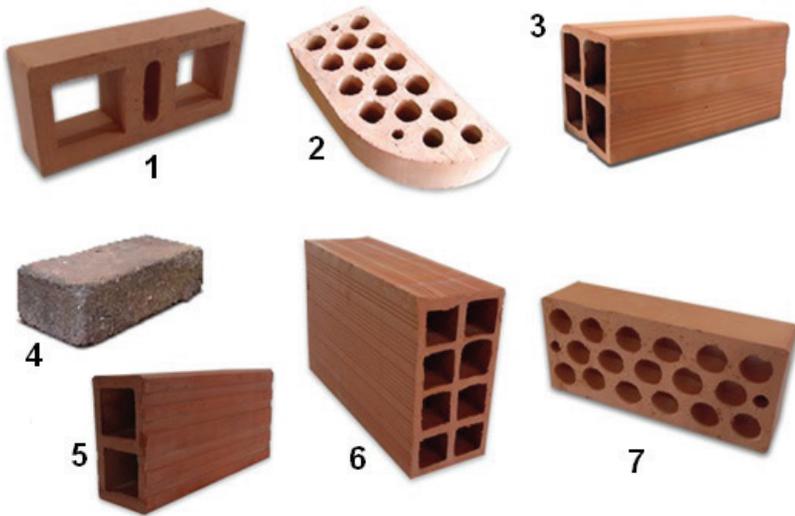


Figura 6.26. Productos cerámicos para paredes elaborados en la zona metropolitana de Cúcuta. 1.) Ladrillo estructural, 2.) Ladrillo curvo, 3.) Bloque número 8 gemelo, 4.) Ladrillo macizo, 5.) Ladrillo número 7, 6.) Bloque número 5 o H10 y 7.) Ladrillo multiperforado o a la vista

6.7.2 Productos cerámicos para pisos

Bajo este término podemos encontrar las baldosas cerámicas esmaltadas y no esmaltadas utilizadas para tráfico peatonal dentro de instalaciones o aceras de viviendas.

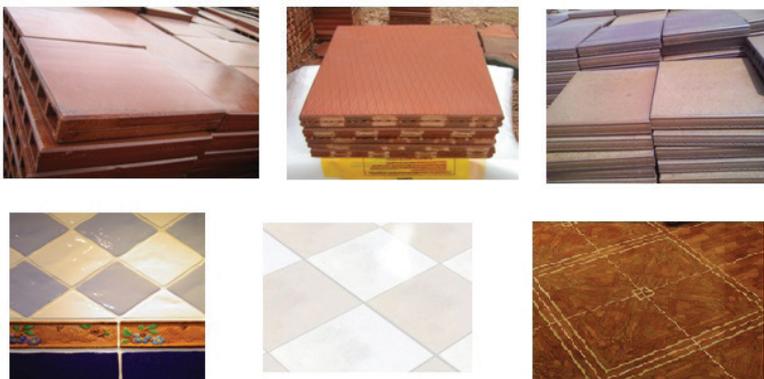


Figura 6.27. Baldosas cerámicas elaboradas en la zona metropolitana de Cúcuta

6.7.3 Productos cerámicos para pavimento de calles y sitios públicos de tráfico liviano

A este grupo podemos asociar los adoquines cerámicos, que son una forma especial de ladrillo.



Figura 6.28. Piezas cerámicas para pavimento fabricadas en la zona metropolitana de Cúcuta

6.7.4 Productos cerámicos para revestimientos

Pueden ser esmaltados y no esmaltados, para ser usados en paredes; son de uso común en baños, cocinas, laboratorios, hospitales y como fachada exterior de casas y edificios para simular el efecto del ladrillo caravista o de fachada.



Figura 6.29. Revestimientos fabricados en la zona metropolitana de Cúcuta

6.7.5 Productos cerámicos para techo

Este grupo lo conforman los diferentes tipos de tejas cerámicas, las más comunes son la teja curva o española, teja plana, teja en S, teja canal y tejas de redoblón, caballetes y demás accesorios.

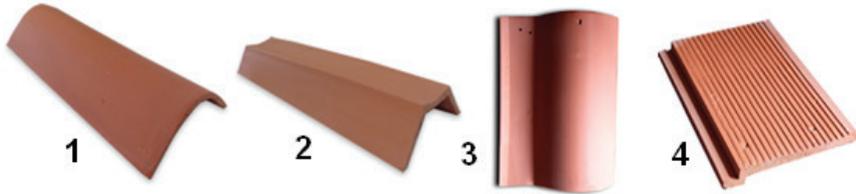


Figura 6.30. Cubiertas para techo elaboradas en la zona metropolitana de Cúcuta.

1.) Teja curva, 2).Teja canal, 3). Teja tipo S o californiana y 4). Teja plana

6.7.6 Piezas Cerámicas decorativas

En este grupo se han ubicado las piezas cerámicas utilizadas para decorar ambientes, estas son cenefas, rosetones, listelos, tapetes y mosaicos.



Figura 6.31. Piezas decorativas elaboradas en la zona metropolitana de Cúcuta.

1). Tapetes y rosetones, 2). Cenefas

6.8 Curvas de cocción en algunos hornos de la región

La mayor parte de productos elaborados en la región son productos sin esmaltar y se fabrican utilizando el horno de llama invertida o colmena para el proceso de sinterización. En la tabla 6.1 se indica el tiempo utilizado en la cocción en los hornos de la zona incluyendo la etapa de enfriamiento del horno.

Tabla 6.1. Tiempos de cocción en los hornos de la zona metropolitana de Cúcuta

Tipo de horno	Duración de la etapa de cocción
Horno colmena	Entre treinta y cinco y ochenta horas de quema de acuerdo con el tamaño del horno y al tipo de piezas cargadas, revestimientos y tejas tienen un ciclo de quema más lento. El enfriamiento dura entre cuarenta y ocho y setenta y dos horas.
Horno de fuego dormido	El tiempo de cocción está entre doce y quince días, el enfriamiento es de tres días aproximadamente.
Horno pampa	El tiempo promedio de cocción es de siete días y tres días de enfriamiento aproximadamente.
Horno Hoffman	La realización de un ciclo en este horno, es decir hasta que el fuego vuelva al punto de partida varía de acuerdo con el tipo de producto, el tamaño y nivel tecnológico del horno. En la región un ciclo tiene una duración que oscila entre cinco y siete días, siendo el más bajo para los productos de mampostería y los más altos para fachada.

Tipo de horno	Duración de la etapa de cocción
Horno túnel	Los diseños implementados en la región están ajustados para que salga y entren vagonetas al horno en un tiempo que está entre cuarenta y sesenta minutos dependiendo del tipo de producto cargado y del combustible empleado, donde el horno que utiliza carbón tiene una velocidad de trabajo más baja.
Horno de rodillos	Los tiempos de cocción para estos hornos varían de acuerdo con el tipo de pieza cargada y el diseño del horno. Se conocen curvas entre 2 y 2,5 horas y curvas de 40 a 60 minutos.

6.9 Manejo del material en el horno y consumo de combustible

A continuación en la tabla 6.2, se referencian los productos que comúnmente son cocidos en los hornos de la zona.

Tabla 6.2. Productos elaborados y consumo de combustible en los hornos del área metropolitana de Cúcuta

Tipo de horno	Productos fabricados	Consumo energético (El poder calorífico promedio del carbón es de 7200 Kcal/ kg)^[9]
Horno colmena	Bloques, ladrillos macizos y con huecos, tejas, pisos rústicos en tonalidades naturales y vitrificadas, productos rústicos de fachada, materas y decorados sin esmaltar. Las temperaturas de trabajo en este horno están entre 950 y 1080 °C.	En la región existen hornos de diámetro interno entre 7m y 13 m, el consumo energético está entre 8 y 42 t, con un valor medio de 24,6 t. El valor medio de arcilla cargado a un horno colmena es de 110 t, lo que equivale a unas 1600 Kcal/kg de arcilla.
Horno de fuego dormido	Es de uso común en la región para cocción de ladrillos macizos, en algunos casos se cargan bloques cerámicos. La temperatura de trabajo no supera los 900 °C	De acuerdo con el tamaño del horno, se tienen registros de carga entre 10 000 y 20 000 unidades de ladrillos macizos (3,2 kg de arcilla/pieza). El consumo energético está entre 15 y 20 toneladas de carbón, equivalente a 2625 Kcal/ kg de arcilla.
Horno pampa o árabe	Ladrillos macizos principalmente, bloques cerámicos, tejas hechas a mano, fatto a mano. Existe variación de temperaturas en el horno, normalmente no superan los 1000 °C.	Consumo de 18 a 20 toneladas de carbón para un nivel de carga de entre 25000 y 30000 ladrillos macizos (3,2 kg de arcilla/pieza), es decir 1550 Kcal/ kg de arcilla.

Tipo de horno	Productos fabricados	Consumo energético (El poder calorífico promedio del carbón es de 7200 Kcal/ kg)^[9]
Horno Hoffman	Es tradicionalmente utilizado en la región para la cocción del ladrillo caravista, más conocido como multiperforado, de igual manera para bloques y algunos revestimientos rústicos, fachaleta principalmente. En la región los productos obtenidos en este horno no superan los 1050 °C.	Para un ciclo de quema con una carga aproximada de 2400 toneladas de material (ladrillos y revestimientos) el consumo energético está en el orden de 170 toneladas de carbón, es decir 510 Kcal/ kg de arcilla.
Horno túnel	Este horno es muy versátil para la fabricación de productos rústicos, ladrillos, bloques, tejas, revestimientos varios son densificados en este diseño, permite alcanzar temperaturas superiores a los 1100 °C, sin embargo por encima de este nivel no se utiliza en la región actualmente.	La relación de combustible y material cargado en el horno túnel está entre 50 y 60 kg de carbón por cada tonelada de arcilla cargada al horno, es decir unas 360 Kcal/ kg de arcilla. Para el caso del horno a gas natural es consumo es aproximadamente de 58,3 kg de gas por cada tonelada de arcilla cargada.
Horno de rodillos	Este horno solo se utiliza para la cocción de baldosas cerámicas ya sean estas esmaltadas o no esmaltadas. Las temperaturas de cocción están entre 1050 °C y 1100 °C para las baldosas no esmaltadas, las piezas esmaltadas presentan temperaturas cercanas a los 1150 °C.	La relación de kilocalorías y material cargado al horno es de 300 kcal /kg arcilla aproximadamente.

Los diferentes hornos de la región poseen un modelo en particular de distribución de material dentro del horno, cada horno tiene un limitado uso para la fabricación de piezas cerámicas.



Figura 6.32. Acomodamiento del material para la cocción de pisos y enchapes en un horno colmena. Foto cortesía del CIMAC-UFPS.



Figura 6.33. Acomodamiento de ladrillo en el horno pampa y fuego dormido. Foto cortesía del CIMAC-UFPS.



Figura 6.34. Acomodamiento de material de revestimiento en un horno túnel. Cortesía Cerámica Andina

La distribución física del material para la cocción, depende del tipo de pieza cerámica a sinterizar, las figuras 6.31 a 6.34 muestran la forma en que se acomodan las piezas dentro del horno en la zona metropolitana de Cúcuta.

REFERENCIAS

- [1] PRATO CRUZ, Elcy Joanna. Planteamiento de modelos productivos para la estandarización de los procesos de producción de las mipymes del sector cerámico del área metropolitana de San José de Cúcuta. Año 2008.
- [2] SÁNCHEZ MOLINA, Jorge. Estrategias para la competitividad del cluster de la cerámica del área metropolitana de Cúcuta. Año 2010
- [3] PABÓN LATORRE, Ranses Eduardo y Patiño Lennin. Estudio de la operación de los hornos colmena, utilizando combustible líquido FuelOil en la empresa Fortres de Ureña, Estado Táchira, Venezuela. Año 2001
- [4] BUSTOS GÓMEZ, Ana Cecilia y GUEVARA LIZCANO, Elsy Yadira. Evaluación comparativa técnica, económica y ambiental de hornos colmena utilizando como combustible carbón, Fueloil, gas natural y el nuevo combustible CCTA. Año 2007
- [5] SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS "SIMAC". Diagnóstico de la situación actual de los chircales artesanales del área metropolitana de Cúcuta. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Básicas, Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica Gitec, San José de Cúcuta, año 2004.
- [6] Tomado de <http://www.flickr.com/photos/54210886@N07/5284919204/> galería de Julio Cardona. Marzo de 2011

- [7] Disponible en internet en <http://spanish.alibaba.com/product-gs/80m-hoffman-kiln-305125854.html>
- [8] Tomado de <http://www.flickr.com/photos/54210886@N07/5284919204/> galería de Julio Cardona
- [9] BETANCUR, Juan Pablo; GELVES DIAZ, John Freddy. Diagnóstico de los procesos de secado, cocción y manejo ambiental en las empresas productoras de tableta vidriada de la zona metropolitana de San José de Cúcuta. Trabajo de grado Ingeniería de Producción Industrial. Cúcuta. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingenierías. Año 2006.
- [10] Tomado de <http://www.flickr.com/photos/54210886@N07/5284919204/> galería de Julio Cardona

CAPÍTULO VII

ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DE LOS HORNOS DE LA INDUSTRIA CERÁMICA

La contaminación generada por las plantas de fabricación de artículos cerámicos es una fuente de emisiones muy importante en las zonas industriales ubicadas en los alrededores de las grandes urbes del mundo. La elaboración de productos cerámicos está estrechamente relacionada con impactos ambientales desfavorables para el entorno, teniendo como aspecto más relevante la emisión de gases a la atmósfera provenientes de la etapa de cocción, dependiendo en gran medida del combustible que sea utilizado para la combustión en los hornos.

7.1 Emisiones atmosféricas en la industria cerámica

Las principales sustancias contaminantes en las emisiones generadas en procesos de fabricación de productos cerámicos se distinguen en dos grupos:

- *Emisiones a temperatura ambiente o fría:* estas emisiones se generan fundamentalmente en los sistemas de aspiración localizados. El contaminante presente en dichas emisiones son las partículas de polvo arrastradas por los sistemas de aspiración. Por lo tanto la composición de dichas partículas será similar a la de las materiales primas utilizadas en las etapas del proceso de fabricación en las que se encuentre ubicado el sistema de aspiración.

- *Emisiones a temperatura superior a la temperatura ambiente o calientes*: las emisiones de este tipo se generan en secaderos, hornos de cocción, hornos de fusión, etc. Dentro de estas emisiones se pueden distinguir a su vez dos tipos:
 - a) *Emisiones de gases de combustión*: están constituidas por los productos de la combustión. En la actualidad los gases de combustión se utilizan directamente para intercambiar calor con el producto a procesar. Por lo tanto, la presencia de unos contaminantes u otros en estas emisiones, dependerá de dos factores: 1. Tipo de combustibles utilizados en los procesos de combustión y
2. Composición de las materias primas empleadas.
 - b) *Emisión de aire caliente*: estas emisiones proceden de procesos en los que el aire se utiliza como fluido de intercambio térmico. En estos casos, estas corrientes pueden estar totalmente libres de contaminantes, como por ejemplo el aire emitido en la zona de enfriamiento de los hornos de cocción de baldosas. La presencia de contaminantes dependerá fundamentalmente de si estas corrientes están en contacto con materiales o materias primas crudas y/o pulverulentas o si estas se mezclan con otras corrientes de gases que contienen contaminantes^[1].

Las empresas del sector cerámico ubicadas en la República de Colombia deben seguir ciertos parámetros establecidos por la Resolución N° 909 del 5 de junio de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en su Artículo 30, “Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para las industrias existentes de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla”. Los niveles máximos permisibles de contaminantes en el aire se pueden observar en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para las industrias existentes de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla, a condiciones de referencia (25°C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 18%[2].

Combustible	Estándares de emisión admisibles (mg/m ³)		
	MP	SO ₂	NO _x
Sólido	250	550	550
Líquido	250	550	550
Gaseoso	NO APLICA	NO APLICA	550

Para dar cumplimiento a la normativa se deben realizar seguimientos a las fuentes contaminantes una vez por año, esta periodicidad puede cambiar de acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis isocinéticos. La evaluación de las emisiones gaseosas generadas por este proceso, debe ser realizada a través de la contratación de laboratorios especializados en dicha medición, que se encuentran ubicados en diversas partes del país.

7.2 Métodos de medición isocinética

La isocinética se define como la relación entre el flujo de gas de una chimenea con el flujo de gas de una sonda de muestreo [3]. El análisis isocinético determina en el mismo momento el flujo de gases, la humedad y la temperatura. Tiene una gran utilidad para el control de emisiones, en las que el monitoreo de las emisiones permite realizar un diagnóstico actualizado de una situación ambiental específica, y sirve para diseñar intervenciones, si es necesario. En este sentido, se debe asegurar la obtención

de muestras representativas, seleccionando adecuadamente los puntos de muestreo, el tipo de muestras, parámetros y la frecuencia con fundamento en la unidad de contaminación atmosférica UCA.

Para determinar la emisión de contaminantes de una fuente se usan cuatro métodos de referencia. Estos métodos permiten conocer la ubicación apropiada de la muestra, la velocidad o tasa de flujo del gas, la composición del flujo de gas y el contenido de humedad del flujo de gas. Estos cuatro métodos se usan junto con otros métodos específicos diseñados para medir la concentración de contaminantes como el material particulado y el dióxido de azufre.

Las firmas consultoras y los laboratorios ambientales que realicen monitoreo para el control de emisiones deben tomar en cuenta una serie de parámetros en cada empresa a analizar: a) Objetivos, b) Actividad de la empresa, c) Etapas del proceso, d) Parámetros a medir, e) Selección de los equipos, f) Toma de muestras y su frecuencia de acuerdo con la Unidad de contaminación atmosférica industrial, g) Mediciones in situ, h) Selección de los métodos analíticos, i) Determinación del tiempo requerido, j) Ubicación de la empresa según la localidad (área fuente).

Para realizar las mediciones se siguen unos métodos desarrollados por la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos de América para el control de las emisiones de gases, los métodos utilizados para emisiones de la industria cerámica pueden observarse junto a su descripción en la tabla 7.2.

Tabla 7.2. Métodos de evaluación de ductos y chimeneas ^[4]

MÉTODO	DESCRIPCIÓN
Método 1 (US EPA)	Selección del sitio de muestreo, determinación del número de puntos y su localización.
Método 1A (US EPA)	Selección del sitio de muestreo, determinación del número de puntos y su localización para ductos o chimeneas pequeñas menor a 30 cm.
Método 2 (US EPA)	Determinación de la velocidad de las emisiones y del flujo volumétrico en chimeneas o ductos con tubo pitot estándar.
Método 2A (US EPA)	Medición directa del volumen de gas a través de tuberías o ductos pequeños menor a 30 cm.
Método 3 (US EPA)	Análisis del porcentaje de dióxido de carbono (CO ₂), Oxígeno (O ₂), monóxido de carbono (CO) y el peso molecular seco, en los gases efluentes.
Método 3A (US EPA)	Determinación de la concentración en emisiones de oxígeno (O ₂) y análisis del porcentaje de dióxido de carbono (CO ₂).
Método 3B (US EPA)	Análisis de gases para la determinación del factor de corrección de la emisión o exceso de aire.
Método 4 (US EPA)	Determinación del contenido de humedad de los gases.
Método 5 (US EPA)	Determinación de emisiones de partículas

Para la aplicación de los métodos de medición de la EPA, se utiliza el modelo M5-S el cual ha dominado el mercado de los Estados Unidos y Asia en los últimos diez años. La unidad de control y la bomba se encuentran en unidades separadas, por lo que se facilita su transporte. La unidad del filtro cuenta con dos compuertas, una en cada lado y el cordón umbilical puede colocarse en dos posiciones a conveniencia del operador. El sistema M5-S tiene tres diferentes configuraciones, todas ellas con ensambles completos incluyendo filtros y el equipo necesario para realizar de manera inmediata los análisis en chimeneas. El equipo mostrado en la figura 7.1 corresponde a la empresa Environmental Supply, la cual ha diseñado una gran variedad de equipos especializados para la US EPA, empleados para el análisis de emisiones provenientes de fuentes fijas, está ubicada en el Research Triangle Park en Carolina del Norte.

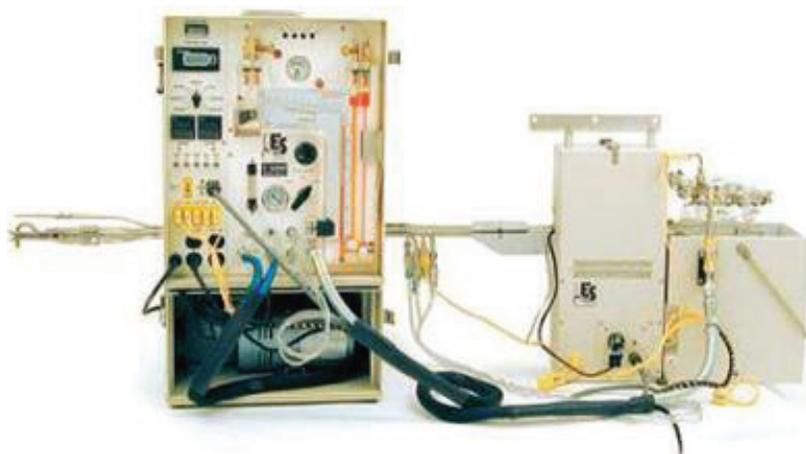


Figura 7.1. Modelo M5-S Sistema Integral de Muestras Isocinéticas de la empresa ^[5]

7.3 Eficiencia energética de la industria cerámica

Hasta fechas recientes, el factor energético no jugaba un rol importante que fuese de consideración dentro de los costes de fabricación, debido a que los intereses se centraban en otros aspectos, pero actualmente la energía pasó a tomar un papel fundamental dentro de todos los procesos productivos que requieran de un uso intensivo de energía, tanto eléctrica como de térmica.

El sector cerámico maneja dos tipos de tecnologías entre las cuales se encuentran aquellas que no forman parte de un proceso productivo específico, denominadas comúnmente tecnologías horizontales y las tecnologías verticales, que abordan aquellas actuaciones exclusivas para el sector de los materiales cerámicos tendientes a minimizar el consumo energético del proceso^[6].

Por lo tanto, el estudio de la eficiencia energética se hace más que necesario, de tal forma que se establezca una guía para los pequeños, medianos e incluso grandes empresarios, sobre las oportunidades de mejora que existen en sus procesos de fabricación de materiales cerámicos, particularmente el ahorro de energía térmica en las operaciones de secado y cocción, en donde en promedio se da un 97,4% ^[7] del consumo total estimado.

7.3.1 Eficiencia energética. La eficiencia energética es un tema y un concepto de actualidad, sobre el cual se han planteado diversas definiciones en distintos sectores, dentro de las cuales podemos encontrar:

- Capacidad para producir mayores resultados con menor cantidad de recursos ^[8].
- Capacidad de alcanzar mayores beneficios finales con menos recursos y con el menor impacto sobre el medio ambiente ^[9].
- Reducción del consumo de energía manteniendo los mismos servicios energéticos, sin disminuir nuestro confort y calidad de vida, protegiendo el medio ambiente, asegurando el abastecimiento y fomentando un comportamiento sostenible en su uso ^[10].

La eficiencia energética, en cualquier ámbito de aplicación, desde el doméstico, hasta el manufacturero, podría definirse como la adecuada utilización de la energía en cualquiera de sus formas, con el objetivo de generar un ahorro significativo de las actividades que se desarrollan, sin poner en riesgo o disminuir la calidad de los bienes que se fabrican y del ambiente.

El concepto de eficiencia energética ha tomado una gran importancia para la industria, debido al elevado precio de los combustibles que son necesarios para el desarrollo de sus procesos. En el caso del sector cerámico colombiano, este se caracteriza por las elevadas y variadas cantidades de energía que requiere en comparación con otros sectores, con un 4,1% de la energía total consumida en el país para el sector industrial (ver figura 7.2).

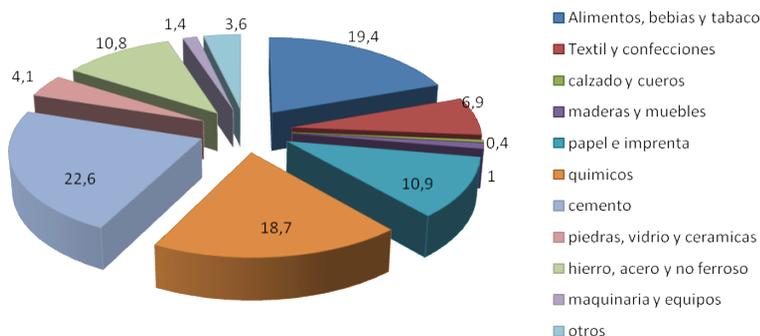


Figura 7.2. Consumo final de energía por energético - sector industrial 2006 [11]

El consumo de energía en la industria cerámica depende de la maquinaria involucrada en el proceso, y del grado de mecanización que tenga la instalación analizada (ver tabla 7.3), se destacan los procesos de secado y cocción, cuyo aporte es entre el 25 % y el 40%, según el tipo de producto y de tecnología [12].

Tabla 7.3. Valoración cualitativa del consumo de energía en el sector cerámico estructural [13]

Proceso	Energía	Nivel de consumo	Equipamiento
Molienda	Eléctrica	Moderado	Trituradora de arcilla
Amasado	Eléctrica	Moderado	Amasadora
Moldeo	Eléctrica	Moderado	Extrusora o galletera
Secado	Térmica	Moderado	Quemadores
Cocción	Térmica	Muy significativo	Hornos de cocción
Subprocesos	Eléctrica	Medio	Manipulación y transporte de producto

Un factor muy importante para el estudio de la eficiencia energética es el combustible utilizado en los procesos térmicos, debido a que cada combustible tiene sus propiedades específicas, por lo que el análisis y selección de los combustibles se convierte en otro aspecto a tomar en cuenta si se desean mejorar los procesos, para ello se deben tener en cuenta aspectos como los que se presentan a continuación:

Tabla 7.4. Características generales de los combustibles ^[14]

Combustible	Ventajas	Desventajas
Gas natural	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emisiones al aire menores que el resto de combustibles. ✓ PCI elevado. ✓ Transporte cómodo y limpio. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Precio elevado. ✓ La infraestructura necesaria no llega a todas las instalaciones.
Coque de petróleo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Precio bajo. ✓ Se puede mezclar con las arcillas. ✓ Disponibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se puede producir la emisión de partículas en el transporte y almacenamiento. ✓ Emisiones al aire moderadas. ✓ Elevado contenido de azufre (aunque las emisiones son catalizadas durante el proceso)
Fueloil	<ul style="list-style-type: none"> ✓ PCI elevado. ✓ Almacenamiento y transportesingeneración de emisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emisiones al aire significativas en la combustión. ✓ Precio elevado. ✓ Complejidad de manipulación en la precombustión. ✓ Peligrosidad en el almacenamiento en instalaciones antiguas.

Combustible	Ventajas	Desventajas
Carbón	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Precio medio. ✓ Disponibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emisiones al aire elevadas. ✓ El almacenamiento y transporte puede generar una emisión de partículas elevada.
Biomasa	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No computa a nivel de emisiones de CO₂ ✓ Su utilización es primada en muchos países. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Precio elevado. ✓ Disponibilidad intermitente. ✓ Generalmente no se utiliza en el proceso de cocción.

7.3.2 Consumo de energía y oportunidades de mejoramiento

Para determinar la eficiencia energética, se deben estimar los consumos energéticos de cada uno de los equipos que hacen parte del proceso de fabricación, así como de los aspectos en los cuales se puede mejorar dentro del sector cerámico, para ello se toma como base de ejemplo, las siguientes imágenes en las que se presenta una relación de los equipos típicamente utilizados en la industria, distribuidos porcentualmente de acuerdo con el consumo total de energía eléctrica y de energía térmica, así como las oportunidades de ahorro de energía o mejora de la eficiencia de dichos equipos.



(a)

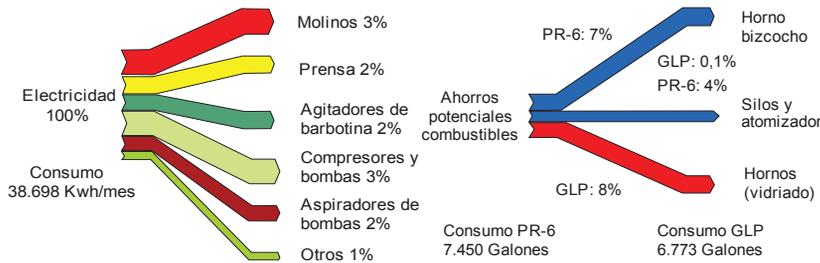


Figura 7.3. (a) Consumo de energía eléctrica y térmica por equipos. (b) Ahorros potenciales de energía eléctrica y térmica por equipos ^[15]

A partir de la figura 7.3 se puede concluir que los ahorros potenciales de energía eléctrica para una empresa cerámica común, serían de un 13% en promedio para energía eléctrica, del 11% en energía térmica para derivados de petróleo y de un 8% para el GLP comparados con los valores iniciales de consumo (ver figura 2b).

7.3.3 Buenas y malas prácticas en equipos

Existen buenas prácticas, orientadas al uso eficiente de la energía en la industria de materiales cerámicos, como también es posible que existan usos inadecuados de la energía como producto de malos hábitos, los cuales incluyen aspectos relacionados con hornos, motores, bombas, iluminación y sistema eléctrico.

Tabla 7.5. Ejemplo de buenas y malas prácticas en hornos de la industria cerámica ^[16]

Equipos	Buenas prácticas	Malas prácticas
Hornos	Controlar la temperatura de operación de los hornos de acuerdo con lo requerido por los procesos.	Se operan a temperaturas superiores a las necesarias.
	Programar la operación de los hornos a fin de minimizar la frecuencia de puesta en marcha y parada.	Se operan en forma intermitente, con lo cual se utiliza combustible durante períodos no productivos de puesta en marcha y enfriamiento.
	Regular la relación aire/combustible de los quemadores en forma periódica.	No se regula la relación aire/combustible de los quemadores, ocasionando mayor consumo de combustible del necesario.
	Repara y refuerza el aislamiento de las paredes del horno.	No se efectúan reparaciones al aislamiento ocasionando mayor cantidad de pérdidas de calor.

7.4 Tendencias en el control de la contaminación ambiental asociada a la industria cerámica

En la actualidad se están desarrollando una serie proyectos de carácter técnico con el objetivo de promover el desarrollo sostenible en el nivel local, social y ambiental. En particular se impulsa la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de una serie de estrategias entre las que podemos mencionar:

- a) Diseño de prototipos de hornos de menores emisiones contaminantes adaptados tanto al combustible predominante como al producto típico de cada región en particular.
- b) Establecer un control eficiente de los procesos de combustión que incluye el manejo del porcentaje de oxígeno durante la quema, los tiempos de quema y el aislamiento adecuado para evitar pérdidas de energía.
- c) Control de la calidad de los combustibles usados, evitando el uso de materiales no aptos para su combustión y que pueden ser destinados a otros usos más productivos, por ejemplo, los desechos de neumáticos y recipientes plásticos utilizados como iniciadores de combustión en algunos países.
- d) Optimización de las mezclas entre combustibles fósiles (carbón) y biomasa de acuerdo al país en que se efectuó la producción cerámica.
- e) Reducción de los kilogramos de combustible utilizados por kilogramo de material producido, aplicando el principio de eficiencia energética lo que permite una mayor retribución

económica para el productor cerámico, un menor consumo de combustibles fósiles y una reducción drástica en los gases de efecto invernadero.

Algunas de estas estrategias fueron discutidas en el *I Congreso de Intercambio de Experiencias Internacionales para el sector ladrillero de Latinoamérica* que se realizó los días 6 y 7 de octubre de 2011 en Bogotá, Colombia, organizado por el Programa EELA (Swisscontact - Cámara de Comercio de Bogotá, CCB). Este encuentro contó con la participación de expertos de Perú, Brasil, Bolivia, Ecuador, México, Argentina, Sudáfrica, España y Colombia, y dio a conocer las prácticas y opciones tecnológicas disponibles para la producción sostenible del ladrillo, mediante la implementación de estrategias de producción más limpia y de mitigación del cambio climático.

Dentro de los programas destinados a la reducción de los gases de efecto invernadero se destaca el programa de eficiencia energética en ladrilleras artesanales de América Latina para mitigar el cambio climático (EELA). Este programa tiene como objetivo general contribuir a mitigar el cambio climático a través de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en ladrilleras artesanales de América Latina y mejorar la calidad de vida de los ladrilleros.

En conclusión, el horno cerámico debe mejorar su funcionamiento a través de la implementación de modificaciones en su diseño básico que le permitan mejorar su eficiencia energética para poder adaptarse tanto a la tendencia mundial de desarrollo sostenible como a las nuevas legislaciones ambientales vigentes en nuestro país.

REFERENCIAS

- [1] MONFORT G., Eliseo; CELADES L., Irina y MALLOL G., Gustavo. Cuestiones sobre medio ambiente para un técnico del sector cerámico. Madrid: Instituto de Tecnología Cerámica, 1999. 291 p.
- [2] Resolución número (909) del 05 de junio de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Hoja No 17.
- [3] Curso de autoinstrucción: orientación para el control de la Contaminación del Aire, Lección 7 La medición de contaminantes, Organización Panamericana de la salud, pag. 7-1, Enero 2005, tomado de http://www.bvsde.paho.org/cursoa_orientacion/cap7c.pdf
- [4] Tomado de <http://www.epa.gov/espanol/aire.htm>
- [5] Tomado de http://comercialaralco.com/pb/wp_3abc4a21/wp_3abc4a21.html
- [6] ENTE REGIONAL DE LA ENERGÍA DE CASTILLA Y LEÓN. Plan de asistencia energética en el sector cerámico. 2 ed. Castilla y León, España.: ERE, 2006. 90 p.
- [7] ibíd. [6], p 47.
- [8] BASF. Thechemicalcompany. ¿Qué es la eficiencia energética? [video online]. Producido por BASF, Ludwigshafen: <http://www.basf.com/group/corporate/es/>, 4:38 minutos, color.

- [9] T. FARRE, Mónica. Eficiencia Energética [diapositivas]. Buenos Aires: Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, s.f. 19 diapositivas, color.
- [10] CONSTRUIBLE.es. Gestión y ahorro de energía [en línea]. s.f [Citado 10 de septiembre de 2011]. Disponible en: <http://www.construible.es/noticiasDetalle.aspx?c=22&idm=159>
- [11] Ministerio de minas y energía. Plan de acción 2010 - 2015. Participación del consumo de energía por subsector industrial - 2006. 2007. pág. 89.
- [12] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA, INSTITUTO COLOMBIANO PARA EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA. Ahorro de energía en la industria cerámica. Bogotá D.C.: COLCIENCIAS - UPME, 2008. pág. 12.
- [13] Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia. Prevención de la contaminación en el sector cerámico estructural, 2006. pág. 73.
- [14] COLCIENCIAS - UPME. Ahorro de energía en la industria cerámica, 2008. pág. 14.
- [15] Ministerio de Minas y Energía de Perú. Guía Número 12, 2008. pág. 9, 10 y 14.
- [16] Ministerio de Minas y Energía de Perú. Op Cit. Pág 15

