

**OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS DE LA
CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE UN HORNO PANELERO**

CLAUDIA ALEXANDRA CUBIDES NUÑEZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE METALURGIA
TUNJA
2005**

**OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS DE LA
CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE UN HORNO PANELERO**

CLAUDIA ALEXANDRA CUBIDES NUÑEZ

**Tesis presentada como requisito para optar el título
INGENIERO EN METALURGIA**

**Director del proyecto de tesis:
Ingeniero ERNESTO CAMARGO
Directora de CIMPA Barbosa:
Ingeniera ESPERANZA PRADA**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE METALURGIA
TUNJA
2005**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 23 de Junio de 2005

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi familia, padres y hermanos que me brindaron todo su apoyo, colaboración y paciencia durante el desarrollo para llevar a feliz término de mi carrera profesional.

A Silvino por su colaboración y ayuda incondicional en el desarrollo de mi proyecto y culminación del mismo.

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme dado la oportunidad de estudiar, por haberme dotado de las capacidades necesarias para culminar mi carrera y ser una persona útil a Dios, a la patria y a mi familia.

A mis padres y hermanos por el apoyo familiar y moral que me han brindado en el transcurso de mi vida y de mi carrera.

A mis amigos y compañeros por brindarme su colaboración y amistad incondicional.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por permitir mi desarrollo profesional y cultural aplicando su lema "Edificamos el futuro".

Al ingeniero ERNESTO CAMARGO por su valiosa colaboración y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

A CIMPA y a la Ingeniera LUZ ESPERANZA PRADA por permitirme participar en el proyecto de mejoramiento de la industria panelera de la Hoya del Río Suárez.

CONTENIDO

	Pág
RESUMEN	20
INTRODUCCIÓN	21
1. GENERALIDADES DE LA INDUSTRIA PANELERA	23
1.1 PRODUCCIÓN PANELERA	23
1.1.1 Contexto mundial de la panela	23
1.1.2 Proceso	24
2. HORNILLA PANELERA ACTUAL	26
2.1 DEFINICIÓN	26
2.2 PARTES	27
2.2.1 La cámara de combustión	28
2.2.2 Ducto de humos	30

2.2.3 Chimenea	32
2.2.3.1 Efecto del tiro	32
2.3 TIPOS DE HORNILLAS	33
2.4 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA HORNILLA ACTUAL	38
2.4.1 Materiales de construcción para la cámara de combustión	38
2.4.2 Materiales de construcción para el ducto de humos	39
2.4.3 Materiales de construcción para la chimenea	40
2.5 TIPOS DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN	41
2.6 SELECCIÓN DE CAMARAS	42
2.7 COMBUSTIÓN EN HORNILLAS PANELERAS	43
2.8 COMBUSTIBLE	45
2.9 EFICIENCIA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	52
2.10 DISEÑO DE UNA HORNILLA POR EL METODO SIMPLIFICADO ACTUAL	54
2.10.1 Cálculos de autosuficiencia energética	55
2.10.2 Diseño de la cámara de combustión actual	55

2.11 DESARROLLO DEL DISEÑO DE LA HORNILLA CIMPA DE 40 Kg/h DE PANELA	60
2.11.1 Desarrollo del diseño de la cámara de combustión	62
2.11.2 Calculo del flujo de jugos y calor requerido en la evaporación de la panela	63
3. ANALISIS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA Y ESTRUCTURAL DE LA HORNILLA PANELERA ACTUAL	66
3.1 ANALISIS DE LA TOMA DE LECTURAS DE TEMPERATURA DENTRO DE LAS CÁMARAS PLANA Y WARD	66
3.1.1 Comparación de temperatura entre los puntos de medición al interior de la cámara	69
3.1.1.1 Termocupla 1 – termocupla 2	69
3.1.1.2 Termocupla 2 – termocupla 3	69
3.1.1.3 Termocupla 3 – termocupla 4	71
3.1.1.4 Termocupla 4 – termocupla 5	71
3.1.1.5 Termocupla 5 – termocupla 6	72
3.1.1.6 Termocupla 6 – termocupla 7	72

3.1.2 Análisis de gráficas de todas las termocuplas de cámara Ward	74
3.1.3 Análisis de gráficas de todas las termocuplas de cámara plana	75
3.2 RESULTADO DEL ANALISIS ESTRUCTURAL EN SAP	76
4. PRUEBAS DE LABORATORIO	80
4.1 METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR CAMBIO POR RECALENTAMIENTO DE LADRILLOS REFRACTARIOS	80
4.1.1 Objetivo	80
4.1.2 Importancia y uso del Ensayo	80
4.1.3 Aparatos	81
4.1.4 Especímenes de ensayo	81
4.1.5 Procedimiento	81
4.1.6 Medición de temperatura	81
4.1.7 Atmósfera de ensayo	82
4.1.8 Medición de los especímenes cocidos	82

4.1.9 Desarrollo del ensayo y resultados	82
4.2 METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONO PIROMÉTRICO EQUIVALENTE (CPE)	84
4.2.1 Objetivo	84
4.2.2 Resumen del método de ensayo	84
4.2.3 Significado y uso	84
4.2.4 Procedimiento	84
4.2.4.1 Preparación de la muestra	84
4.2.4.2 Preparación de los conos de ensayo	85
4.2.4.3 Montaje	85
4.2.4.4 Calentamiento	85
4.2.4.5 Cono pirométrico equivalente	87
4.2.5 Desarrollo del ensayo	87
5. ELEMENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HORNOS	89
5.1 CIMIENTOS	90

5.2 PLATAFORMA	91
5.3 AISLAMIENTO	91
5.4 SOLERA	91
5.5 PAREDES	92
5.5.1 Espesor	93
5.5.2 Mampostería de ladrillo	94
5.5.3 Tipos de aparejo	95
5.5.4 Juntas térmicas de dilatación	98
5.5.5 Métodos de anclaje de pared	101
5.5.6 Aislamiento	103
5.6 VENTANAS DE TRABAJO	104
5.7 MARCOS O MONTAJES DE PUERTAS	104
5.8 PUERTAS	105
5.9 BÓVEDA	108
5.9.1 Planas de ladrillos de grandes dimensiones	108

5.9.2 De arco	108
5.9.3 Semicirculares o de arco de medio punto	111
5.9.4 Bóvedas suspendidas	101
5.9.5 Arranque de un arco	111
5.9.6 Vanos y espesores	116
5.10 CANALES	116
5.11 INSTALACIONES PARA LA IGNICIÓN DE LOS COMBUSTIBLES	117
5.11.1 Instalación para los sólidos	117
5.11.1.1 Hogares sencillos	117
5.11.1.2 Hogares semigasificadores	123
6. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA HORNILLA	126
6.1 CIMIENTOS Y ESTRUCTURA	126
6.2 PLATAFORMA	127
6.3 AISLAMIENTO	128

6.4 PAREDES	128
6.5 PUERTAS DE ALIMENTACIÓN	130
6.6 DISEÑO PROPUESTO DE HORNILLA	131
6.6.1 Cámara Plana	131
6.6.2 Cámara Ward	133
6.7 BOVEDAS	135
7. ANALISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN SAP DE LA HORNILLA PROPUESTA	139
8. CONCLUSIONES	141
9. RECOMENDACIONES	142
BIBLIOGRAFÍA	144
ANEXOS	146

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Temperaturas alcanzadas.	42
Tabla 2. Extracción y humedad dependiendo del % de fibra.	45
Tabla 3. Composición química del bagazo.	46
Tabla 4. Rata de calentamiento del CPE 12 a 26.	86
Tabla 5. Rata de calentamiento del CPE 26 a mayores.	86
Tabla 6. Altura de seguridad para paredes sin anclajes.	93
Tabla 7. Paredes hechas con una sola clase de ladrillos.	93
Tabla 8. Peso de los refractarios.	94
Tabla 9. Características de la mampostería	95
Tabla 10. Anchura de las juntas de dilatación en plg/pie de longitud	101
Tabla 11. Características de arcos circulares	113
Tabla 12. Cálculos de un arco típico	115
Tabla 13. Tensiones térmicas de los emparrillados y del Volumen del hogar	121
Tabla 14. Tabla de los ladrillos requeridos para formar bóveda de diferentes luces	137

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Distribución de la producción mundial de panela	23
Figura 2. Diagrama de elaboración de panela	25
Figura 3. Hornilla panelera	26
Figura 4. Hornilla panelera tipo Ward	27
Figura 5. Zonas de la hornilla	27
Figura 6. Cámara de combustión plana	28
Figura 7. Cámara de combustión Ward	28
Figura 8. Puerta de alimentación	29
Figura 9. Puerta de alimentación de la cámara Ward	29
Figura 10. Secciones de la parrilla	30
Figura 11. Ducto de humos	30
Figura 12. Cámara plana tradicional	33
Figura 13. Cámara plana CIMPA	34
Figura 14. Cámara Ward	34
Figura 15. Cámara Ward CIMPA	35
Figura 16. Hornilla en flujo paralelo	36

Figura 17. Hornilla en contra flujo	36
Figura 18. Hornilla en flujo combinado	37
Figura 19. Proceso de combustión del bagazo en cámara	43
Figura 20. Cámara de combustión Ward	58
Figura 21. Medidas cámara Ward	58
Figura 22. Cámara de combustión Ward CIMPA	59
Figura 23. Medidas cámara Ward CIMPA	59
Figura 24. Posición termocupla cámara plana	66
Figura 25. Posición termocupla cámara Ward	67
Figura 26. Temperaturas promedio en cámaras Ward y plana	68
Figura 27. Datos de la temocupla 1 y 2 cámara Ward	70
Figura 28. Datos de la termocupla 2 y 3 cámara Ward	70
Figura 29. Datos de la termocupla 3 y 4 cámara Ward	71
Figura 30. Datos de la termocupla 4 y 5 cámara Ward	72
Figura 31. Datos de la termocupla 5 y 6 cámara Ward	73
Figura 32. Datos de la termocupla 6 y 7 cámara Ward	73
Figura 33. Temperaturas en el horno de cámara Ward	74
Figura 34. Temperaturas en el horno de cámara plana	75
Figura 35. Partes de la cámara Ward en SAP	76
Figura 36. Grafica de momentos	77
Figura 37. Grafica de esfuerzos cortantes	78

Figura 38. Tipos de aparejo	96
Figura 39. Construcción de paredes utilizando ladrillos de tamaños estándar	97
Figura 40. Juntas de dilatación de las paredes de 13 ½ pulgadas con ladrillos dispuestos alternativamente a tizón y a soga	98
Figura 41. Juntas de dilatación de las paredes de 9 pulgadas de espesor a base de ladrillos de magnesia a tizón	99
Figura 42. Junta doble de expansión en una pared cerca de una esquina pared de 18"	100
Figura 43. Disposición de la junta de dilatación, en pared de ladrillo refractario aislante de 9" pulgadas de espesor	100
Figura 44. Ligazón de las paredes de ladrillo refractario aislante con anclajes de ladrillo refractario	102
Figura 45. Anclaje de una pared de ladrillo refractario aislante con pernos que atraviesan la pared	102
Figura 46. Pared de ladrillo refractario aislante seleccionado mostrando los soportes	103
Figura 47. Tipos de aberturas de puertas	104
Figura 48. Construcción de puertas	106
Figura 49. Mecanismo elevador de puertas	107
Figura 50. Bóveda de arco	109
Figura 51. Mampostería de la bóveda	110
Figura 52. Características de un arco circular	112
Figura 53. Catenaria	114
Figura 54. Hogar con emparrillado horizontal	118

Figura 55. Tipos de emparrillado	119
Figura 56. Esquema de suministro de aire para diluir los productos de la combustión	122
Figura 57. El hogar con emparrillado escalonado	122
Figura 58. Esquema de hogar semigasificador para quemar sólidos en capas gruesas	124
Figura 59. Disposición de ladrillos	129
Figura 60. Juntas de dilatación	129
Figura 61. Marco de la puerta	130
Figura 62. Cámara plana propuesta	132
Figura 63. Cámara Ward propuesta	133
Figura 64. Características de la bóveda	136
Figura 65. Momentos en cámara actual	139
Figura 66. Cortantes en cámara actual	140
Figura 67. Esfuerzos en cámara actual	140

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo 1. Plano hornilla actual plana y Ward	26
Anexo 2. Datos análisis estructural en SAP hornilla actual	76
Anexo 3. Formas de agarre y enganche de muros	79
Anexo 4. Planos cámara plana y cámara Ward propuestas	133
Anexo 5. Datos análisis estructural en SAP hornilla propuesta	139

RESUMEN

La hornilla panelera es un dispositivo en el cual se realiza la transformación física de los jugos de la caña en el producto final que es la panela, este dispositivo, está compuesto por tres partes principales que a saber son: cámara de combustión, ducto de humos y chimenea.

La cocción de los jugos de la caña para transformarlos en panela se realiza en fondos o pailas que se encuentran ubicadas por encima del ducto de humos y es la zona de transferencia de calor, los gases una vez utilizados son evacuados por la chimenea que a la vez presta sus servicios al proporcionar el tiro suficiente para arrastrar los gases desde la cámara de combustión hasta la zona de transferencia de calor.

En el presente proyecto se realiza un estudio a la hornilla actual y en base a datos de laboratorio y a consideraciones de diseño; también se propone un nuevo diseño de cámara aplicándole reformas que son resultado del análisis anteriormente ejecutado.

Dentro del análisis se busca proporcionar un diseño que permita una buena combustión y a la vez esté de acuerdo con el desarrollo socioeconómico de la región.

Dentro de la investigación realizada se encontró un vacío informativo en cuanto a hogares de combustión y forma de los mismos; por lo tanto algunas de las fórmulas utilizadas son de carácter semiempírico, y otras son dadas debido a los resultados aquí analizados.

INTRODUCCIÓN

En la industria panelera como en tantas industrias que han nacido por la tradición familiar y se ha fortalecido con los desarrollos tecnológicos, requiere de una actualización y un continuo mejoramiento que incluye una previa investigación de la forma en la que se puede sacar adelante dicha industria. Dentro de este proceso CIMPA (corporación colombiana de investigación agropecuaria estación experimental CIMPA) ha sido pionera en el acompañamiento y progreso de esta industria que busca, sin más interés, que el optimizar así las condiciones de elaboración, producción, comercialización y distribución de panela de cada productor y empresario.

Por lo tanto, se ha buscado mejorar desde un nivel investigativo y práctico a la hornilla, estudiando las diferentes formas y distribución de pailas, distancias y áreas de transferencia de calor, en el ducto, que den mayor eficiencia al proceso; y dentro de este mejoramiento también se busca dar una mejor eficiencia a la hornilla estudiando y optimizando la cámara de combustión que es la parte más importante de ésta, ya que es donde genera el calor necesario a utilizar en el proceso por medio de la combustión del bagazo.

Esta optimización se ha realizado desde el punto de vista constructivo, de la forma y diseño del reactor basados en principios básicos de los hogares para combustibles sólidos y en principios de diferentes reactores que a través del tiempo han sido estudiados y cuyo estudio ha sido estandarizado siendo en consecuencia un estudio semi-empírico.

Dentro de los resultados de este trabajo de grado se propone un diseño que se acople tanto a las necesidades socio económicas de la región, a las características del combustible a emplear y a la facilidad de construcción del mismo si causar un rompimiento con el saber tradicional el cual era requisito indispensable en el desarrollo de la tesis.

También se tienen en cuenta los materiales de la región, el conocimiento que dicta la tradición en cuanto a la construcción de las hornillas paneleras y los estudios realizados por la corporación colombiana de

investigación agropecuaria estación experimental cimpa CORPOICA-CIMPA.

En consecuencia en este trabajo de grado se encuentra gran parte de este acumulado cultural y su estudio de investigación realizado por CORPOICA-CIMPA, además de los aportes personales que surgen a partir del estudio y experimentación de la hornilla actual que dan como resultado este trabajo de grado.

1. GENERALIDADES DE LA INDUSTRIA PANELERA

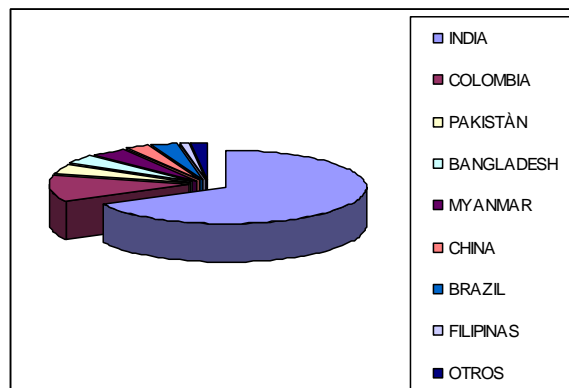
1.1 PRODUCCIÓN PANELERA

La base fundamental de la industria panelera es la caña de azúcar originaria parece ser de India o Indochina. Es una gramínea cuyo tallo alcanza una altura comprendida entre 2 a 4 metros, contienen una medula que es de donde se extrae el dulce base fundamental para la industria panelera.

La temperatura ideal para su cultivo es entre 20 a 25 °C con climas lluviosos, llanuras aluviales y deltáicas, se cultiva especialmente en: Brasil, Cuba, Estados Unidos, India, China, México y Colombia.

1.1.1 Contexto mundial de la panela. Según cifras de la FAO, 26 países producen panela, dentro de los cuales Colombia ocupa el segundo lugar después de la India, con un volumen que representa el 12,1% de la producción mundial en 2001. Sin embargo, en términos de consumo por habitante, Colombia ocupa el primer lugar con un consumo de 34,2 Kg./hab de panela al año, cifra que supera de lejos al promedio mundial de 2 Kg./hab y del mayor productor mundial, la India, cuyo consumo fue de 7,9 Kg./hab.

Figura 1. Distribución de la producción mundial de panela



Fuente: FAO informe 2001.

Así mismo, ha sido lento el crecimiento de la producción mundial de panela con una tasa de apenas 0,21% anual entre 1992 y 2001.

Colombia registró para este mismo período una tasa del 1,7%. El comercio mundial de este producto es insignificante, ya que la producción se dirige principalmente a satisfacer la demanda interna.

1.1.2 Proceso. La caña se muele en pasadas sucesivas por 3 o 4 molinos de eje horizontal para extraer el líquido de la caña de azúcar.

Los residuos o bagazo se emplea como combustible que es el elemento fundamental de producción de calor para el proceso de elaboración de la panela.

Los jugos depurados se concentran en recipientes de doble efecto obteniéndose un jarabe en que la panela se encuentra en estado de sobresaturación moderada.

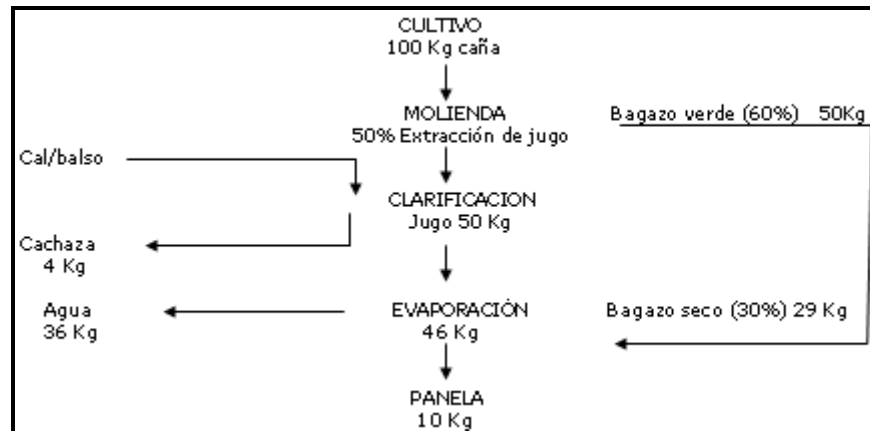
En la obtención de panela se realizan 4 etapas básicas:

- ❖ Molienda.
- ❖ Prelimpieza y limpieza de jugos.
- ❖ Evaporación y concentración.
- ❖ Moldeo y empaque de la panela.

El proceso de evaporación, concentración y limpieza de jugos se realizan en hornillas paneleras.

El siguiente diagrama muestra el balance de masa y las diferentes etapas, para las condiciones promedios del proceso de elaboración de panela:

Figura 2. Diagrama de elaboración de panela.



Fuente: Manual de hornillas paneleras, CIMPA 1991.

En la etapa de evaporación del agua presenta el jugo un brix de 18°B hasta llegar a panela con un brix de 90°B.

Se inicia con 46 Kg de jugo clarificado y se obtiene 10 Kg de panela de lo cual se deduce que por cada 100 Kg de caña se evaporan 36 Kg de agua en condiciones promedio.

Cuando el nivel de extracción es superior al 50% de jugo, el agua a evaporar es mayor.

La evaporación y la concentración se realizan a fuego directo y en forma abierta.

2. HORNILLA PANELERA ACTUAL

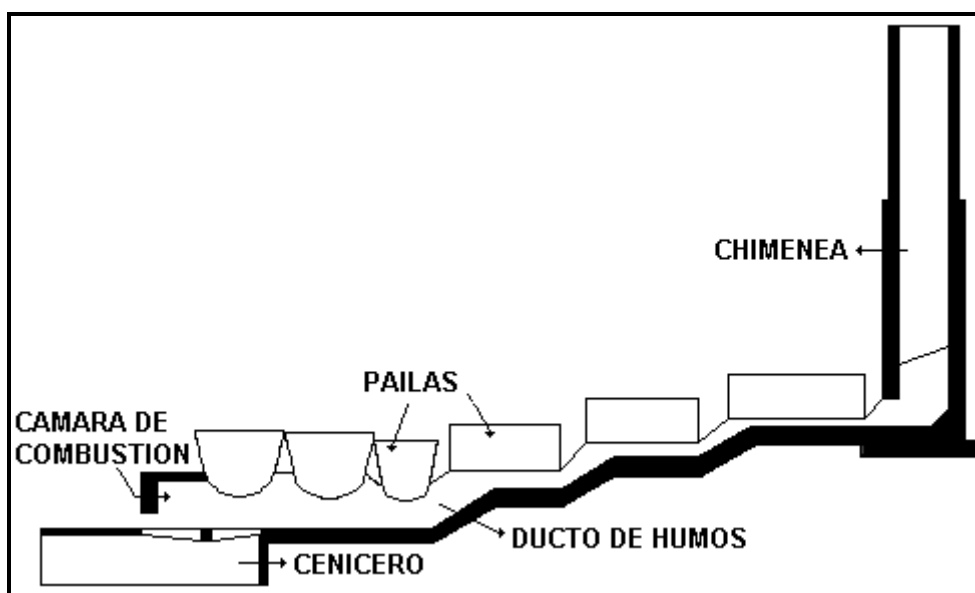
2.1 DEFINICIÓN

El dispositivo térmico (horno) que se utiliza para la elaboración de la panela, generalmente llamado hornilla panelera, es un reactor, como se muestra en las Figuras 3 y 4; cuyo plano se encuentra en el anexo 1;

Desde el punto de vista físico, transforma la energía del bagazo en energía calorífica que se utiliza en un proceso de evaporación abierta a fuego directo¹.

En el trapiche, su función es calentar, clarificar y concentrar los jugos de la caña, al evaporar el agua contenida en ellos hasta lograr el producto final que es la panela.

Figura. 3. Hornilla panelera.



Fuente: Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

¹ Manual de hornillas paneleras CIMPA Barbosa.

Figura 4. Hornilla panelera tipo Ward



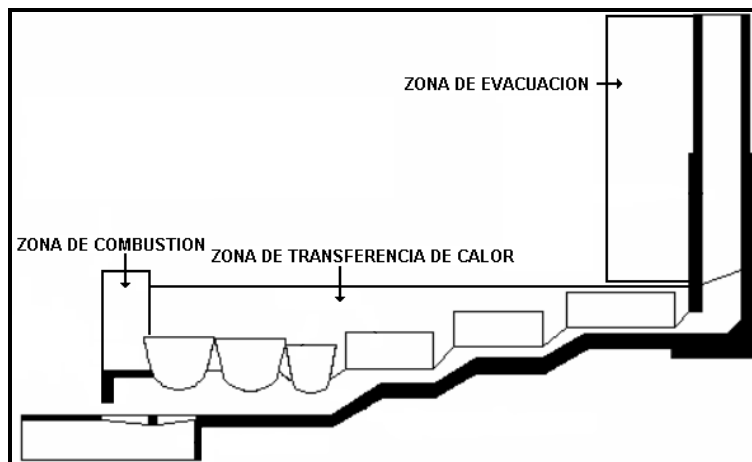
Fuente. CIMPA. Barbosa 2005

2.2 PARTES

Una hornilla está formada por tres regiones o partes bien definidas como se muestra en la Figura 5:

- ❖ La zona de combustión (representada por la cámara de combustión),
- ❖ La zona de transferencia de calor (representada por el ducto de humos y las pailas)
- ❖ La zona de evacuación y tiro (la chimenea)

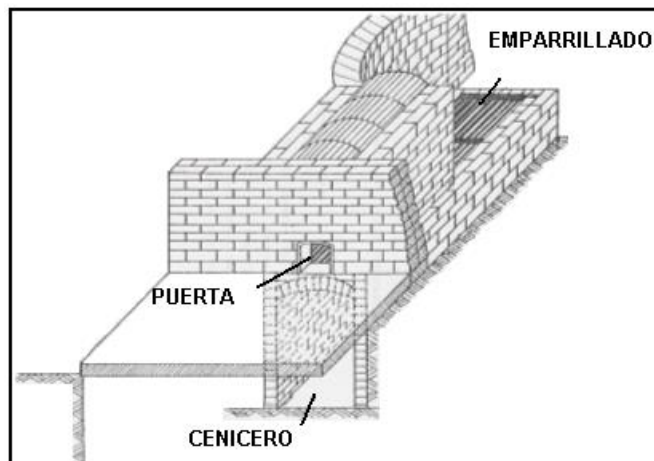
Figura 5. Zonas de la hornilla



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

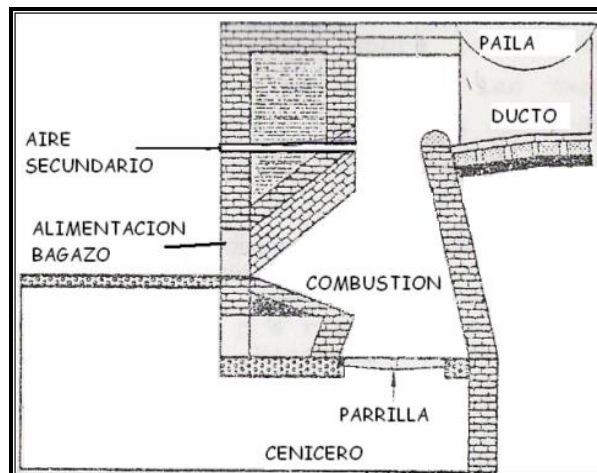
2.2.1 La cámara de combustión. Es la cavidad donde se transforma la energía del bagazo en energía calórica, es un espacio confinado que se suele ubicar en la parte anterior de la hornilla, y es donde se realiza la combustión del bagazo; su forma es variable y depende del tipo y calidad del bagazo que se va a utilizar. A continuación se muestran en las Figuras 6 y 7 los tipos de cámara que CIMPA ofrece:

Figura. 6 Cámara de combustión plana



Fuente. Manual de hornillas paneleras

Figura. 7 Cámara de combustión Ward



Fuente. Manual de hornillas paneleras

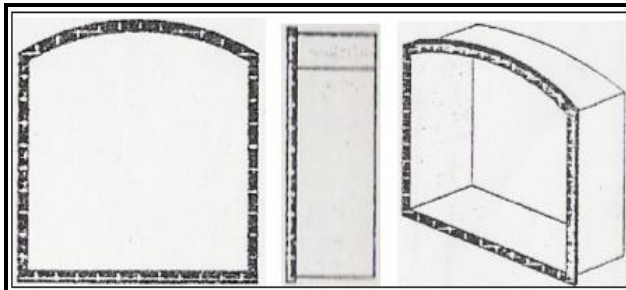
Consta de:

- ❖ Cenicero
- ❖ Puerta de alimentación
- ❖ Parrilla.

El cenicero se encuentra directamente bajo el emparrillado. Sus funciones son almacenar las cenizas que se producen al quemar el bagazo, canalizar y precalentar el aire necesario para la combustión.

La puerta de alimentación es la abertura por donde el hornero introduce el bagazo. En realidad es una boca de alimentación pues no posee, en la mayor parte de los casos, una hoja que se pueda abrir o cerrar, esta se muestra en la Figura 8 y 9.

Figura. 8 Puerta de alimentación



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

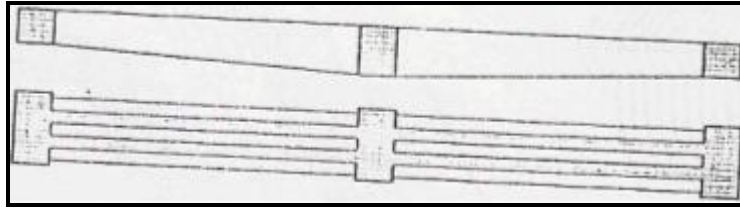
Figura 9. Puerta de alimentación de la cámara Ward.

0

Fuente. CIMPA 2005.

La parrilla o emparrillado es una especie de enrejado que sirve de lecho para el bagazo, permite la entrada del aire para la combustión y el paso de las cenizas hacia el cenicero. En la Figura 10 se muestra secciones de la parrilla diseñada por CIMPA:

Figura. 10 Secciones de la parrilla



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

2.2.2 Ducto de humos. También llamado conducto de gases, camino o buque, entre otros. En la siguiente figura 11 se muestra el ducto de humos de la cámara de combustión plana:

Figura 11. Ducto de humos.



Fuente. CIMPA 2005.

La función del ducto es guiar los gases de la combustión y ponerlos en contacto con las pailas para transferir el calor a los jugos y evaporar el agua.

Las partes que constituyen el ducto son:

- ❖ Las paredes y muros de soporte

- ❖ El piso
- ❖ Los arcos
- ❖ Las pailas

Las paredes y muros de soporte son las que como su nombre lo dice soportan las pailas y las que conducen los gases por el ducto permitiendo la transferencia de calor hacia las pailas y finalmente dirigen los gases hacia la chimenea.

Los arcos corresponden a las paredes del ducto que se realizan de esta forma con el fin de sostener las pailas semiesféricas.

Las pailas son los recipientes metálicos o fondos, en donde los jugos y mieles de la caña reciben energía para realizar las operaciones de clarificación, evaporación y concentración. La geometría, el área, la relación área de transferencia / volumen, la temperatura y velocidad de los gases de combustión, y el área transversal del ducto son algunos de los factores que inciden significativamente sobre la transferencia de calor.

En las pailas se depositan los jugos para la evaporación del agua durante el proceso de elaboración de la panela. El calor producido por la combustión del bagazo y transportado por los gases se transfiere a los jugos a través de las pailas. Éstas se fabrican generalmente de cobre, aluminio o hierro, mediante procesos de fundición o deformado en caliente.

Existen pailas planas, planas aleteadas, semiesféricas, semicilíndricas y trapezoidales. El tamaño y la forma varían de acuerdo con las costumbres regionales y con la capacidad de la hornilla.

2.2.3 Chimenea. La chimenea o buitrón es un conducto vertical ubicado al final de la hornilla y empalmado directamente con el ducto de humos. Es la estructura encargada de suministrar la diferencia de presiones (o tiro) necesaria para movilizar los gases de combustión a través del ducto y ponerlos en contacto térmico con las pailas

Su forma puede ser cilíndrica, trapezoidal o cónica; sus dimensiones

dependen de la forma y el tamaño de la hornilla. Los gases producto de la combustión progresan desde la cámara de combustión a través del ducto; como cualquier fluido, requieren para su transporte de una fuerza motriz que, en el caso de las hornillas, es generada por la chimenea que funciona a la manera de ventilador que trabaja por succión.

Esta fuerza debe ser suficiente para vencer la resistencia al paso de los gases (resistencia que se origina en las pérdidas de presión a través de toda la hornilla) y para crear una diferencia de presión, llamada tiro, que garantice el suministro del aire necesario para la combustión del bagazo y el transporte de los gases a través del ducto.

2.2.3.1 Efecto del tiro. El término tiro denota la diferencia de presión que existe entre la presión atmosférica y la de los gases de combustión dentro de la hornilla. Es causada por la diferencia entre la densidad del aire y la de los gases de combustión.

La chimenea genera un tiro (dP = diferencia de presión) debido a la diferencia entre la densidad del gas caliente contenido en su interior y la columna de aire en el exterior de la misma, es decir:

La cantidad de aire que se requiere para la combustión varía de acuerdo con la humedad del bagazo utilizado y, por lo tanto, el tiro debe ser regulado; para ello se cuenta con una válvula tipo mariposa ubicada en la base de la chimenea, que permite hacer los ajustes necesarios.

2.3 TIPOS DE HORNILLAS

Las hornillas se clasifican en dos grandes tipos de acuerdo al:

- ❖ Tipo de cámara

❖ Flujo de los gases de combustión, así:

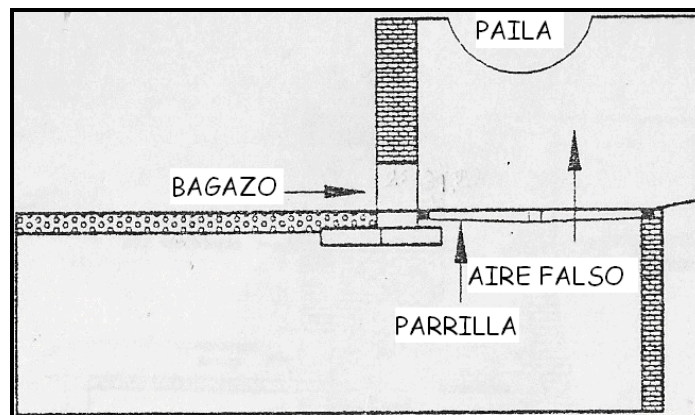
En la clasificación de acuerdo al tipo de cámara, esta se clasifica en:

- ❖ Cámara plana
- ❖ Cámara de tipo Ward

En las cámaras planas se requiere un tiempo prolongado en el secado del bagazo antes de su utilización.

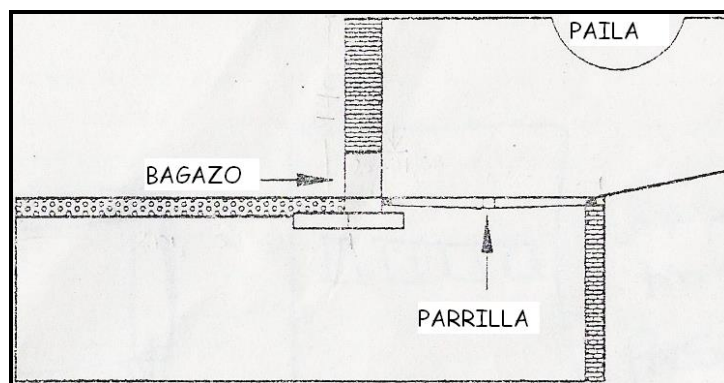
Existen hornillas de cámara plana tradicional, Figura 12 y hornilla de cámara plana CIMPA, Figura 13. La diferencia principal entre ellas es el área de la parrilla que en la tradicional es demasiado grande.

Figura. 12 Cámara plana tradicional



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

Figura. 13 Cámara plana CIMPA

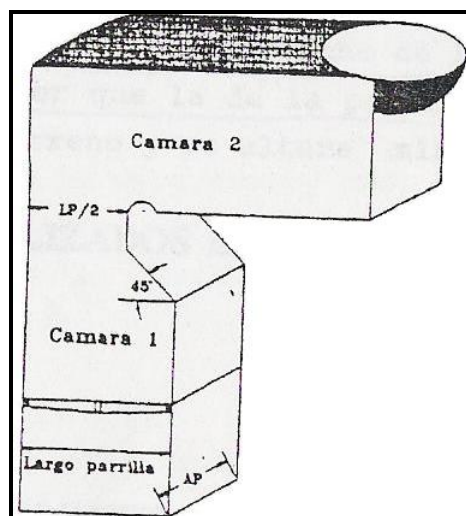


Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

En las cámaras Ward el tiempo de combustión en la cámara es menor.

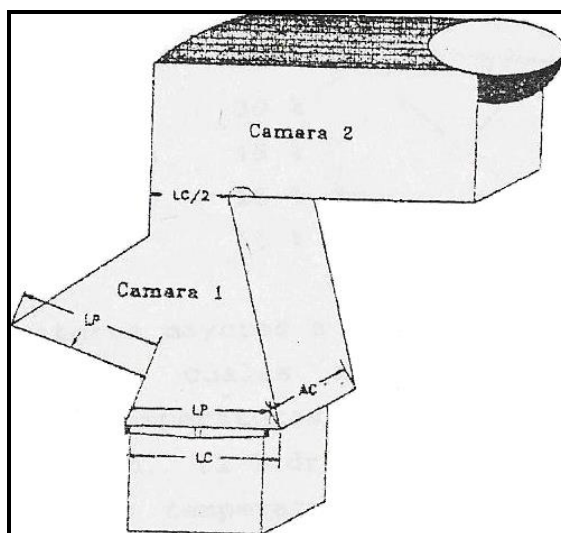
También existen cámaras Ward, Figura 14 y Ward CIMPA Figura 15, la diferencia entre ellas es que la de tipo Ward posee una rampa de precalentamiento del bagazo. Para la construcción de las cámaras tipo Ward se requiere un mayor capital pero los costos se compensan con productividad.

Figura. 14 Cámara Ward



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

Figura. 15 Cámara Ward CIMPA



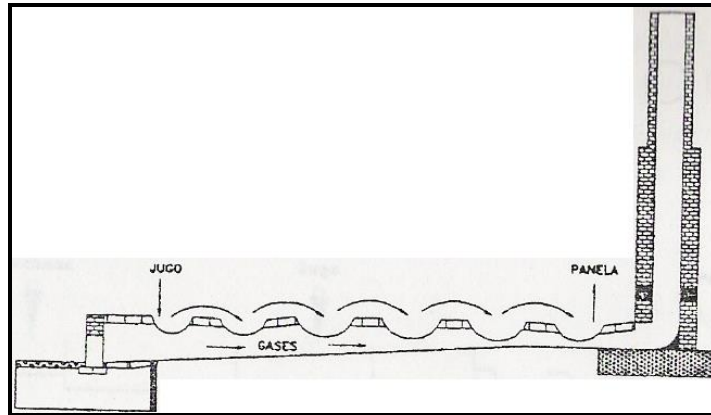
Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

En la hornilla Ward CIMPA este tipo de cámara permite emplear un bagazo más húmedo ya que utiliza una subcámara para presecar el bagazo.

Otra forma de clasificar las hornillas es de acuerdo a la dirección que siguen los jugos con relación a la dirección del flujo de los gases de la combustión. Según lo anterior, se tienen:

- ❖ Hornillas de flujo paralelo, Figura 16: en donde los jugos avanzan en el mismo sentido que el flujo de gases. Este tipo de hornillas predomina en las zonas paneleras de Nariño, Antioquia, Caldas y Risaralda.

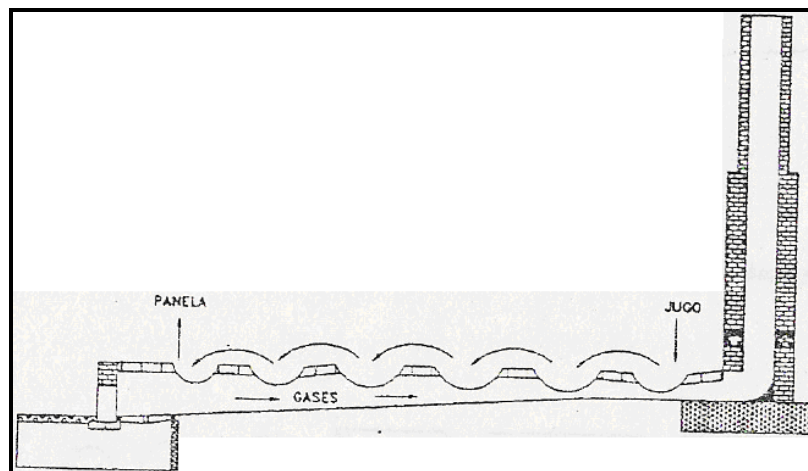
Figura. 16 Hornilla en flujo paralelo



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

- ❖ Hornillas de contra flujo, Figura 17: son las hornillas en la que los jugos llevan dirección contraria al desplazamiento de los gases. El jugo se recibe en la paila cercana a la chimenea y la panela se puntea cerca de la cámara de combustión. Existen algunas de estas hornillas en zonas de Santander y Cundinamarca

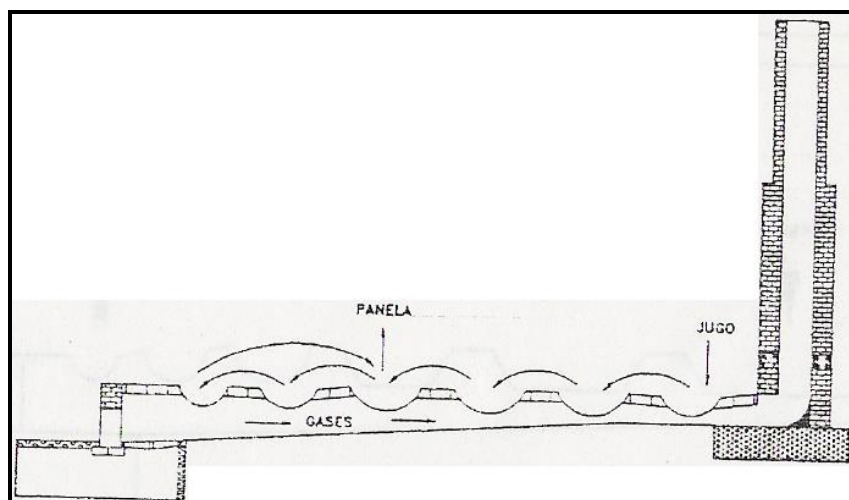
Figura. 17 Hornilla en contra flujo.



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

- ❖ Hornillas de flujo combinado, Figura 18: en la cual se combinan los dos tipos de flujos anteriores. La mayor parte de las hornillas del país funcionan bajo el sistema de flujo combinado; es decir, inicialmente los jugos siguen la dirección opuesta al flujo de los gases y luego se mueven en el mismo sentido. Estas hornillas se encuentran principalmente en la Hoya del río Suárez y Cundinamarca.

Figura. 18 Hornillas en flujo combinado



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

En las hornillas en contra flujo y en flujo combinado la clarificación se realiza en el sector de menor temperatura de la hornilla; con ello se logra un mayor tiempo para la acción de las sustancias clarificantes en el proceso de retención de impurezas. Así mismo, la evaporación del agua y la concentración de las mieles se hacen en los puntos de mayor temperatura, a fin de reducir el tiempo de residencia de las mieles en la hornilla, y evitar así la formación de azúcares reductores y una coloración oscura de la panela.

En las hornillas en paralelo, la clarificación se realiza en los puntos de mayor temperatura, y en consecuencia, pueden presentarse problemas para lograr una clarificación adecuada, pues la cachaza (espuma sobrenadante) tiende a mezclarse con el jugo clarificado, si el operario no tiene suficiente habilidad y si se maneja cantidades moderadas de

jugos. Como la concentración se hace en el sector de más baja temperatura, estas hornillas requieren un mayor número de pailas para esta parte final del proceso.

2.4 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA HORNILLA ACTUAL

Los materiales utilizados en la construcción de las hornillas actuales en sus diferentes partes son:

2.4.1 Materiales de construcción para la cámara de combustión.

- ❖ La puerta de alimentación se construye en fundición gris, material que soporta temperaturas medianamente altas sin deformarse.
- ❖ La parrilla o emparrillado Se fabrica también en fundición gris, en diferentes tamaños y formas, la forma más común de fabricación es la diseñada por CIMPA que se compone de secciones de parrilla alargada, con un área libre de parrilla del 50% (Figura 8).
- ❖ Con relación a las paredes de la cámara, el ladrillo que se usa para fabricarla debe soportar cambios de temperatura en rangos que varían entre 700 y 1.200°C, de acuerdo al tipo de cámara que se quiere construir. Por lo tanto para esta zona se usa ladrillo refractario CATALANA de referencia U38 que soporta temperaturas superiores a 1260°C. Este ladrillo es importado y no tiene carta técnica que den a conocer sus características. El material de pega usado es el recomendado por el fabricante del LADRILLO CATALANA y del cual tampoco se tienen datos técnicos. Sin embargo se aclara que el material de pega para el ladrillo CATALANA lo venden en los mismos depósitos donde se encuentra el ladrillo CATALANA.

Para hornillas con temperaturas menores de 950°C se utilizan ladrillos semirefractarios que se fabrican generalmente en las mismas zonas paneleras del país, los cuales tampoco poseen carta técnica; los ladrillos semirefractarios se pegan con un mortero hecho de una mezcla que

incluye arena, arcilla, cal y cemento en las siguientes proporciones (% en peso)²:

- ❖ arena: 30%
- ❖ Arcilla: 45%
- ❖ cemento: 15%
- ❖ cal: 10%

El espesor de las pegas de los ladrillos se debe hacer lo más pequeñas posibles nunca superior a 5mm. De acuerdo con las especificaciones de CIMPA.

2.4.2 Materiales de construcción para el ducto de humos. Los ductos varían de acuerdo con la forma y materiales con que se construyen; los más tradicionales consisten en una excavación realizada directamente en el sitio de construcción de la hornilla, donde las pailas se colocan soportadas por muros y arcos de adobe; en otros ductos más evolucionados, las paredes, pisos, arcos y muros se construyen en ladrillo refractario o semirefractario, según los criterios generales que se mencionaron en los materiales de construcción de las cámaras.

❖ **Materiales y construcción del ducto de acuerdo a las diferentes zonas de temperatura.** En una hornilla panelera, las temperaturas más altas de los gases se registran en la cámara de combustión y van disminuyendo a medida que dichos gases se acercan a la chimenea. Dependiendo de su posición con respecto a la cámara de combustión, se considera que el ducto tiene dos secciones:

En la primera, denominada "zona caliente" (temperaturas mayores a 500°C) debido a su proximidad a la cámara, la temperatura de los gases de combustión es elevada. Esta temperatura se encuentra en el ducto en el trayecto de las 4 primeras pailas (en una hornilla de 6 pailas) o desde la segunda paila cercana a la chimenea hasta la cámara de combustión.

² Manual de mejoramiento de hornillas paneleras. CIMPA Barbosa. 1991

En la segunda, la temperatura de éstos es relativamente baja y se denomina "zona fría" (temperaturas menores a 500°C). Esta se ubica en la última paila antes de la chimenea, y en toda esta.

En la zona caliente, las paredes del ducto se construyen en ladrillo refractario que soporta temperaturas hasta de 1200°C. Los morteros usados en esta zona también deben ser refractarios, debiéndose utilizar los recomendados por el fabricante que en el caso de las hornillas CIMPA el ladrillo utilizado es CATALANA.

En las hornillas paneleras de cámara plana es posible utilizar ladrillo fabricado de arcilla refractaria blanca de Arcabuco o de Oiba y arena blanca de la población Boyacense de Tasco. Para la pega se puede usar el mismo material de los ladrillos. Esta recomendación también se aplica a las zonas del horno de temperaturas de 900°C hacia abajo.

Las pegas de los ladrillos deben hacerse lo más pequeñas posible, de modo que el espesor de las mismas nunca sea superior a 5 mm, de acuerdo con las especificaciones de CIMPA.

En la zona fría, las paredes y el piso del ducto se pueden construir con ladrillo menos refractario que soporte temperaturas hasta de 800°C, utilizando pegas constituidas por cemento, arcilla, cal y arena, con las mismas proporciones que las utilizadas en las paredes externas de la cámara de combustión. De acuerdo a CIMPA.

Para disminuir las pérdidas de energía a través del piso y las paredes, el ducto debe aislarse térmicamente, utilizando una doble pared y un doble piso. Entre las dos paredes se debe dejar una cámara de aire estancado o en su defecto, en el mejor de los casos, rellenar esta cámara con cascarilla de arroz. El piso también debe llevar la cámara de aire que puede ser llenada con cascarilla de arroz, o también se recomienda lana de vidrio.

2.4.3 Materiales de construcción para la chimenea. En el caso de hornilla CIMPA la chimenea es de sección trapezoidal construida en ladrillo común ya que soporta temperaturas relativamente bajas por

debajo de 400°C.

La chimenea también se puede construir en lámina de acero de acuerdo al tipo y tamaño de la hornilla. La pega utilizada corresponde a la misma mezcla de arena, arcilla, cal y cemento utilizado en el ducto y parte exterior de la cámara.

2.5 TIPOS DE CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Las cámaras de combustión han ido mejorando con el tiempo. Cimpa ha manejado dos tipos de cámaras, la cámara plana y la cámara Ward. En base a estos primeros tipos de cámaras ha realizado estudios y mejorado las hornillas y las cámaras de combustión, las cuales son la cámara Ward cimpa y la cámara plana cimpa, es decir; han ido desde las planas tradicionales hasta las planas tipo CIMPA, (Figuras 9 y 10), y de las Ward tradicionales hasta las Ward CIMPA (Figuras 11 y 12) y han permitido el uso de bagazo húmedo de 45% de humedad o de 30% de humedad, respectivamente.

En la cámara tradicional, el área de parrilla era demasiado grande, lo cual permitía la entrada de aire falso que enfría los gases de combustión, causando temperaturas de combustión bajas (850°C, con bagazo de 30% de humedad); además, la presencia de la superficie relativamente fría de las pailas directamente sobre la cámara ocasiona una combustión incompleta, presentándose porcentajes elevados de CO (6 a 7%).

En la cámara tradicional mejorada por CIMPA el área de parrilla se diseña de tal forma que disminuye la entrada de aire falso, consiguiéndose temperaturas de combustión un poco mayores que en la cámara tradicional (950°C) y las pailas están ubicadas más lejos del lecho de bagazo, lo cual permite una combustión más completa, con porcentajes de CO del 5%, aproximadamente.

La cámara Ward tipo CIMPA es una cámara Ward a la cual se le adicionó una subcámara de presecado de bagazo. En esta subcámara se seca el bagazo de tal forma que permite quemarlo con mayor humedad que en la cámara anterior. Por lo tanto; en la cámara tipo Ward se logran

mayores temperaturas (1100°C en promedio con bagazo de 30% de humedad) y la combustión es mejor consiguiéndose porcentajes de CO menores del 4%.

2.6 SELECCIÓN DE CÁMARAS

Para seleccionar el tipo de cámara adecuado en una hornilla se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- ❖ Humedad y tamaño del bagazo.
- ❖ Temperaturas requeridas.
- ❖ Capacidad de la hornilla.
- ❖ Aspectos socioculturales regionales.
- ❖ Aspectos económicos.

La humedad del bagazo utilizado en la hornilla y el tipo de cámara presenta gran influencia sobre la temperatura de combustión. En la tabla siguiente se resumen las temperaturas alcanzadas en los diversos tipos de cámaras en función de la humedad del bagazo:

Tabla 1. Temperaturas alcanzadas

HB (%)	Tº TRADICIONAL	Tº MEJORADA	Tº Ward	Tº CIMPA
15	1000	1050	1200	1200
30	900	1000	1100	1100
40	750	800	1050	1050
45	--	--	1000	1000
50	--	--	900	950
55	--	--	--	850

Fuente: manual de hornillas paneleras.

Puede observarse que en las cámaras tipo Ward y tipo CIMPA siempre se obtienen temperaturas mayores que en las cámaras tradicionales, además, en las cámaras tipo CIMPA con humedades de bagazo mayores a 45% las temperaturas son mayores que en la cámara Ward.

Es importante anotar que para un mismo tamaño de hornilla la capacidad de producción se aumenta cuando la temperatura de combustión es mayor, pero para obtener temperaturas mayores a

1000°C en las cámaras tradicionales, se requiere de un tiempo prolongado en el secado de bagazo antes de su utilización; mientras que en las cámaras Ward y Ward tipo CIMPA, el tiempo de secado es menor.

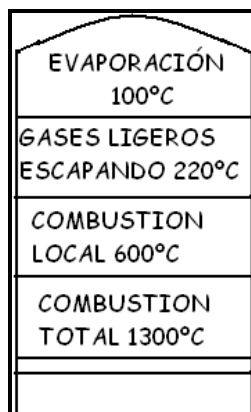
Debido a la construcción de las cámaras tipo Ward y Ward CIMPA implica un incremento en los costos de la hornilla, pero bajo las mismas condiciones, se obtiene un aumento en la capacidad de producción; por tanto, para cada caso se debe hacer un estudio económico que sirva como base para definir el tipo de cámara.

2.7 COMBUSTIÓN EN HORNILLAS PANELERAS

La combustión es el proceso mediante el cual una sustancia combustible reacciona con el oxígeno del aire para liberar su energía interna bajo la forma de calor. Este proceso se realiza en la cámara de combustión de la hornilla panelera.

El proceso de combustión del bagazo en una cámara de tipo Ward comienza con la formación de una pila de bagazo sobre la que cae bagazo fresco, donde se evapora el agua intersticial a 100°C, en la segunda etapa del proceso se escapan las partículas volátiles a 220°C y luego se inicia la combustión parcial a 600°C; por último ocurre la combustión total a 1300°C Como se muestra en la Figura 19:

Figura. 19 Proceso de combustión de bagazo en cámara



Fuente: manual de mejoramiento de hornillas paneleras CIMPA. 1991

Solamente el 70% del aire necesario para la combustión (aire primario) entra a través de la parrilla, permitiendo que ocurra una primera combustión; luego los gases de combustión, incluyendo los volátiles suben y en el punto del estrangulamiento o garganta existente en la cámara se mezclan con el aire restante o aire secundario (30%), suministrado a través de orificios dispuestos para ello por un tiro natural. En el espacio entre la garganta y la primera paila, denominado segunda cámara de combustión se completa la combustión.

Esta cámara permite utilizar bagazo con humedades de hasta el 45%, ya que por su forma, la radiación del arco hace un presecado de éste.

La temperatura de combustión depende de la humedad del bagazo utilizado. Con el bagazo del 50% se alcanzan temperaturas hasta de 950°C y con el bagazo con menor contenido de humedad se alcanzan temperaturas que pueden alcanzar los 1200°C

Para que se presente una buena combustión, es decir con altas temperaturas y bajas perdidas en combustión, se han de tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- ❖ La cantidad de bagazo suministrado y sus características deben ser las del diseño ya que de esta manera la hornilla presenta un óptimo comportamiento.
- ❖ El suministro de bagazo en pequeñas cantidades y con alta frecuencia provoca una combustión buena y estable.
- ❖ Cuando el bagazo fresco cae encima del arrume de bagazo, tiene la posibilidad de secarse antes de quemar.
- ❖ Es necesario una buena limpieza de la parrilla para garantizar una entrada regular de aire. Además hay que evitar la formación de "torta" de cenizas.
- ❖ Para garantizar una optima combustión es necesario suministrar al bagazo más aire que el estrictamente necesario; el exceso de aire ("relación" entre la cantidad de aire actual y la cantidad de aire mínimo para la combustión). En general el exceso de aire se encuentra entre 1,40 y 1,60, ya que los gases se enfrían demasiado con un exceso de aire superior.

- ❖ Hay que evitar “áreas frías” (por ejemplo pailas) sobre la cámara de combustión. Dichas áreas rompen la combustión y estimulan la formación de hollín, hidrogeno y monóxido de carbono. El proceso de transferencia de calor se debe empezar cuando se haya completado la combustión.

2.8 COMBUSTIBLE

Para realizar la evaporación del agua y la concentración de los jugos en la hornilla panelera se utiliza, tradicionalmente y buscando una autosuficiencia energética, el BAGAZO el cual es el residuo sólido de la caña, después de pasar por el equipo de molienda donde se le extrae el jugo.

La humedad del bagazo cuando sale del molino varía en proporción inversa al nivel de extracción, el cual es función del contenido de fibra de la caña para condiciones constantes de operación del molino. De acuerdo como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 2: Extracción y humedad dependiendo del porcentaje de fibra:

Fibra Caña (%)	Extracción (%)	Humedad (%)
11	50	66
	55	61
	60	56
14	50	61
	55	56
	60	51
17	50	57
	55	52
	60	48

Fuente: manual de mejoramiento de hornillas paneleras CIMPA

En la mayoría de los trapiches se usa el bagazo como combustible; para ello se requiere que sea sometido a un proceso de secado el cual generalmente se realiza en forma natural almacenándolo en cobertizos llamados "bagaceras".

En la práctica, el bagazo nunca se seca completamente y su contenido de humedad final depende, tanto del tiempo de secado, como de las condiciones ambientales de la zona. En las bagaceras se logra un porcentaje de humedad cercano al 30%, grado en el cual presenta las mejores condiciones como combustible para hornillas.

El tiempo requerido para que el bagazo esté en condiciones óptimas de humedad (menos del 30%) para su uso en hornillas tradicionales, varía entre 20 y 40 días y depende de algunos factores como son: altura del arrume, condiciones climáticas del sitio, humedad con la que sale el bagazo del molino y características de construcción de la bagacera.

El contenido de fibra en la caña, normalmente esta entre el 11% y el 17%, como se observó en la tabla anterior, la cual es principalmente celulosa ($C_6H_{10}O_5$)_x, donde el sufijo "X" significa que es una cadena polimérica. Además de la fibra, el bagazo contiene los azúcares no extraídos, azúcar (Sacarosa $C_{12}H_{22}O_{11}$) y azúcares reductores (glucosa y fructosa $C_6H_{12}O_6$). Estos son los componentes combustibles o materia seca del bagazo. La composición química elemental del bagazo seco o el análisis próximo se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3 Composición química del bagazo.

COMPONENTES	%
Carbono	47,0
Oxigeno	44,0
Hidrógeno	6,5
Cenizas	2,5

Fuente: HUGOT, E. Manual para ingenieros azucareros, México 1982.

Para conocer el calor liberado por el combustible se debe tener en cuenta que la energía obtenida de un combustible depende de la cantidad utilizada y de su poder calorífico, el cual se define como la energía interna de un material por unidad de masa, que es liberada en el momento de la combustión. En el caso de los materiales sólidos, es función de su composición química elemental y del contenido de humedad; por lo tanto, se definen dos tipos de valor calorífico: el valor calorífico superior (VCS) y el valor calorífico inferior o neto (VCN). La diferencia de los dos radica en que el valor calorífico superior corresponde a la energía teórica producida por la combustión de un kilogramo de combustible a 0°C y 760 mm Hg y donde todos los productos de la combustión se reducen a las mismas condiciones y además el agua presente en el combustible así como la que se produce se condensan por lo tanto se presentan en forma líquida. En el caso del bagazo seco este valor según HUGOT es 19,228 Kj/Kg³.

El valor calorífico inferior o neto del bagazo se determina a partir del valor calorífico superior suponiendo que el agua presente en el combustible así como la formada en la combustión permanece como vapor. Este valor calorífico neto nos dirá en forma mas precisa sobre la energía que puede obtenerse realmente de un combustible.

Para realizar los cálculos del valor calorífico neto (VCN) del bagazo se puede expresar en función de su humedad y por lo tanto es necesario definir el valor del calor latente de evaporación (τ). Así:

$$\tau = 2537 - 2,93 \cdot T$$

En donde

T = temperatura a la que se evapora el agua en °C.

Como la condensación del agua en la determinación sucede a 10°C aproximadamente, por lo tanto se tiene:

$$\tau = 2537 - 2,93 \cdot 10 = 2508 \text{ Kj/Kg}$$

³ HUGOT, E. Manual para ingenieros azucareros, México 1982.

Por lo tanto el VCN estará dado por:

$$VCN = VCS - 2508 * E$$

En donde

E = peso del agua presente en los gases producidos por la combustión

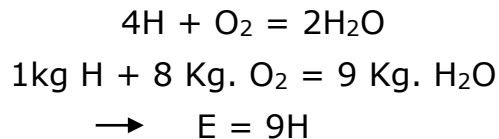
VCN = valor calorífico neto

VCS = valor calorífico superior

Como ya se había dicho que el valor calorífico superior del bagazo correspondía a 19,228 Kj/Kg. Entonces:

$$VCN = 19228 - 2508 * E$$

Por la combustión del hidrogeno presente en el bagazo seco se tiene que:



En donde:

H = masa de hidrogeno contenido en 1 Kg. de bagazo, Kg.

De acuerdo a la composición química del bagazo, el porcentaje de hidrógeno es 6,5 %, por lo tanto:

$$VCN = 19,228 - 2,508 * 9H = 19,228 - 22,572 * 0,065 = 17,765 \text{Mj/Kg.}$$

El valor calorífico neto del bagazo es afectado por la humedad del bagazo de acuerdo a la siguiente expresión:

$$VCN = 17,765 - 20,27 * (H_B/100)$$

Donde:

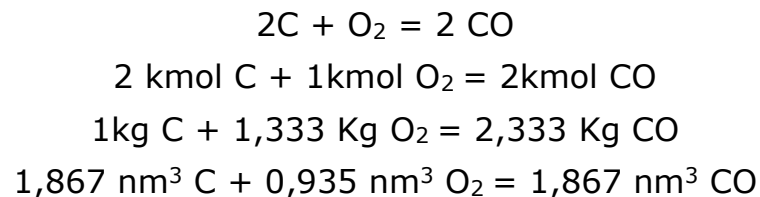
VCN = valor calorífico neto del bagazo MJ / Kg.

H_B = Humedad del bagazo % (b.h.).

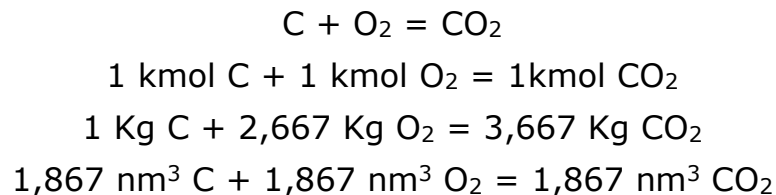
De acuerdo a todo lo anterior, el valor calórico neto del bagazo a 30% de humedad es de **11,7 MJ/Kg** o **2796,37 Kcal / Kg**.

❖ **Combustión del carbono en el bagazo.** Durante la combustión del carbono (C) contenido en el bagazo se pueden presentar dos tipos de reacción: en el primero, la combustión es incompleta y el producto final es el monóxido de carbono (CO), en el segundo, la combustión es completa y se obtiene dióxido de carbono (CO₂), también se presenta la reacción de formación de agua (H₂O). Estas reacciones se presentan de la siguiente forma, estableciendo primero el balance estequiométrico en kilomoles, luego en masa y finalmente en volumen a condiciones normales:

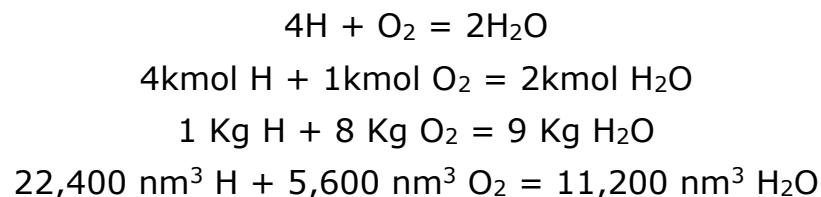
❖ Combustión incompleta:



❖ Combustión completa



❖ Combustión de hidrogeno



Uno de los factores que limita la eficiencia calórica de los combustibles

sólidos es la dificultad para lograr una mezcla adecuada entre el combustible y el aire; a fin de optimizar este proceso, es necesario agregar una mayor cantidad del aire para lograr una mejor combustión.

En la práctica, se ha calculado que las mejores condiciones para la combustión del bagazo en las hornillas se dan cuando el exceso de aire varía entre 40 y 60% del aire teórico.

Para calcular el aire necesario para la combustión o aire teórico, se utiliza la siguiente ecuación, de acuerdo con la composición másica del aire:

$$1/0,232 = 4,31 \text{ Kg Aire } \text{ ó } 4,31/1,293 = 3,33 \text{ nm}^3 \text{ aire}$$

Por lo tanto la cantidad de aire mínima necesario para que las reacciones expresadas en las ecuaciones anteriores se lleven a cabo es (L_{\min}):

$$L_{\min} = 4,31 (2,667 C + 8 H - O) \text{ Kg de aire}$$

$$L_{\min} = 3,33 (2,667 C + 8 H - O) \text{ nm}^3 \text{ de aire}$$

Para realizar el cálculo del exceso de aire se utiliza la siguiente expresión:

$$\lambda = L_{\text{entra}} / L_{\min}$$

El flujo másico total de los gases se puede determinar en función del exceso de aire y de la humedad del bagazo, como lo define Hugot¹:

$$m_G = m_B * [5,75 * (1 - (H/100)) * \lambda + 1]$$

Donde:

m_B = flujo de bagazo, Kg / h

H = humedad del bagazo, decimal base humedad (b.h.)

L_{\min} = cantidad mínima de aire para la reacción, Kg

m_G = flujo másico del gas de combustión, Kg / h

λ = exceso de aire, adimensional.

Este cálculo se realiza para efectos de saber la cantidad o el flujo de gases de combustión que se tienen, para calcular mas adelante la eficiencia del combustible.

También es posible calcular la temperatura teórica de combustión del bagazo; pero antes de esto es necesario calcular el calor de los gases de combustión, para eso utilizamos los siguientes datos de capacidades de calor de los gases de 0°C a T°C:

Calor específico de gases
(Promedio de 0°C a T°C)

N ₂ , CO	:	1,028 – 0,0000819 * T
CO ₂	:	0,832 + 0,0003428 * T
H ₂ O _g	:	1,956 + 0,0006479 * T
O ₂	:	0,895 + 0,0000752 * T

La capacidad calorífica global de los gases en combustión se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$C_P = [(M_{N_2} * C_P N_2 (T)) + (M_{CO} * C_P CO (T)) + (M_{CO_2} * C_P CO_2 (T)) + (M_{H_2O} * C_P H_2O (T)) + (M_{O_2} * C_P O_2 (T))] / m_G$$

Conocida la capacidad de calor se puede calcular la temperatura teórica de combustión o temperatura estequiométrica. Esta es la temperatura que teóricamente podrían alcanzar los gases obtenidos por la combustión del bagazo. Para ello se parte de un balance de calor en la cámara, que puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$h_{cg} = VCN - h_{CO} + h_{comb} + h_{aire}$$

En donde:

h_{cg} = Flujo de entalpía de los gases de combustión, Kw

VCN = Calor suministrado por el bagazo, Kw

h_{CO} = Calor perdido por la formación de CO en vez de CO_2 , Kw (23,3 MJ/Kg de CO)

h_{comb} = Flujo de entalpía del combustible, Kw

h_{aire} = Flujo de entalpía del aire aportado a la combustión, Kw

Para el balance de calor, se hace referencia a las entalpías a temperatura 0°C; por esta razón hay que tener en cuenta las entalpías del combustible (h_{comb}).

Debido a varios factores como tipo de cámara, tipo de material, etc. Se presenta una gran influencia en que la temperatura teórica no concuerde con la leída en práctica.

2.9 EFICIENCIA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

En toda instalación que trabaje con calor debe tener una eficiencia medida por la capacidad de aprovechar el calor generado en el proceso, evitando que haya pérdidas de este por paredes o por mala combustión.

Por lo tanto; la eficiencia de la cámara de combustión se define de acuerdo con la siguiente relación⁴.

$$\eta = \text{energía obtenida} / (\text{energía suministrada bagazo} + \text{energía aire})$$

Cada uno de estos flujos se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{Energía obtenida} = m_G * C_{P_{GT}} * T_G$$

$$\text{Energía suministrada} = VCN (\% H_B)$$

$$\text{Energía aire} = m_A * C_{P_{AT}} * T$$

En donde:

⁴ HERNANDEZ L. Determinación de los parámetros de desempeño para la combustión en las hornillas paneleras con cámaras Ward-CIMPA

$m_G =$	flujo másico de los gases de combustión Kg/s
$C_{P_{GT}} =$	capacidad calorífica de los gases a la temperatura medida Kj/Kg°C
$T_G =$	temperatura medida de los gases de combustión, °C
$VCN_{(\% HB)} =$	valor calorífico neto de los gases de combustión Corregido por la humedad del bagazo, Kj/Kg
$m_A =$	flujo másico de aire a la cámara de combustión, Kg/s
$C_{P_{AT}} =$	capacidad calorífica del aire a la temperatura ambiente Kj/Kg°C
$T =$	temperatura ambiente, °C

Existe otro método para el cálculo de la eficiencia térmica de acuerdo a un balance de calor. El cálculo de la eficiencia térmica de la hornilla se puede dar en función del balance de calor, así:

$$Q_{sum} = Q_{apr} + Q_{perd} = Q_{req} + Q_{perd}$$

En donde:

Q_{perd} = calor total perdido, kw

Q_{apr} = calor aprovechado e la producción de panela, kw

Q_{sum} = calor suministrado, kw

Q_{req} = calor requerido, kw

La relación entre el calor aprovechado para la producción de panela y el calor suministrado por el bagazo se define como **eficiencia térmica**:

$$Eff = (Q_{apr} / Q_{sum}) * 100\%$$

2.10 DISEÑO DE UNA HORNILLA POR EL MÉTODO SIMPLIFICADO ACTUAL

CIMPA ha dado a conocer un método de diseño para hornillas llamado método simplificado (el cual se esta revisando). Para ello se debe contar con la siguiente información:

- ❖ Capacidad (kg de panela/h)
- ❖ Eficiencia (%)
- ❖ Brix jugo (°B)
- ❖ Humedad bagazo seco (%)
- ❖ Exceso de aire (%)
- ❖ Extracción (%)
- ❖ Porcentaje fibra (%)
- ❖ Altura del sitio (m)

La masa de jugo es:

$$M_j = (m_p * B_p) / B_j$$

Donde: m_p = Masa panela

B_p = Brix panela.

m_j = Masa jugo.

Masa de caña:

$$M_c = m_j / \text{Extracción}$$

Masa de agua a evaporar:

$$m_{H_2O} = m_j - m_p$$

Flujo de calor aprovechado o requerido en la elaboración de panela:

$$Q_{apr} = m_j * (T_e - T_a) * C_p + m_{H_2O} * r$$

Flujo de calor suministrado:

$$Q_{\text{sum}} = \text{potencia} = Q_{\text{apr}} / \text{Eff}$$

Una vez se conozca la energía requerida se calcula el bagazo a suministrar con base en el poder calorífico de este combustible. En este caso se calcula con base en 30% de humedad, como se definió en los parámetros básicos.

$$\text{VCN} = 17.85 - 20.35 * (H_B/100)$$

Por lo tanto la masa de bagazo requerida en la horilla es:

$$m_B = Q_{\text{sum}} / \text{VCN}$$

2.10.1 Cálculos de autosuficiencia energética. El bagazo verde producido en el molino es:

$$m_{BV} = m_C - m_j$$

Si la extracción es del 60% y la fibra de la caña es 14%, como se estableció en los parámetros básicos, según la tabla 1 la humedad del bagazo verde es 51%, por lo tanto la masa de bagazo seco (30% de humedad) producido por el molino será:

$$m_{BS} = m_{BV} * ((100 - H_{BV}) / (100 - H_{BS}))$$

Teóricamente y bajo las condiciones anteriores, el trapiche será autosuficiente porque la hornilla consume 241 kg de bagazo y el molino produce 250. Sin embargo, hay que tener en cuenta las pérdidas de bagazo durante el transporte y el secado, además de las denominadas pérdidas físicas o directas, como las ocurridas por fermentación de los azúcares que alcanzan a incrementar la temperatura de las masas de bagazo en más de 30°C.

2.10.2 Diseño de la cámara de combustión actual. El primer punto a considerar en el diseño de una cámara de combustión es el tipo y las características fisicoquímicas del combustible a utilizar. Las hornillas tradicionales tienen diseños acondicionados para utilizar un bagazo con humedad variable entre el 25-35% que es la alcanzada por los métodos tradicionales de secado en periodos de tiempo que fluctúa entre los 20 y los 40 días.

Aunque un contenido de humedad menor al mencionado anteriormente, la eficiencia de la hornilla puede incrementarse. Cuando se disminuye la humedad del bagazo, se aumenta la cantidad de materia seca combustible, si se mantiene un volumen constante de alimentación del bagazo. Pero es necesario pasar más aire para la combustión, lo cual aumenta el volumen de los gases y las pérdidas de presión en toda la hornilla, aumentando el tiro y la pérdida de calor en la chimenea.

Una característica que incide notablemente en la combustión de sólidos, es el tamaño de las partículas. Cuando éstas son muy grandes es muy difícil obtener una mezcla adecuada de aire y combustible y entonces se necesita aumentar el exceso de aire, cuyo efecto fue mencionado anteriormente.

Los parámetros básicos del cálculo de la cámara de combustión tienen que ver con el área de la parrilla y con el volumen de la cámara propiamente dicha. La información recopilada en la literatura para el diseño de las parrillas es muy variable y están basadas sobre casos puntuales que dificultan su aplicación con buenos márgenes de seguridad. Además en la mayoría de los casos la información existe para otros combustibles sólidos y la que proviene del sector azucarero se ha evaluado para condiciones totalmente diferentes.

Por lo anterior, uno de los primeros trabajos de CIMPA fue establecer a nivel de trapiche, los márgenes de variación de los parámetros de diseño y luego a nivel de laboratorio determinar las mejores condiciones de trabajo de la hornilla y de la cámara de combustión⁵. De lo anterior se obtuvieron los siguientes parámetros para el diseño de la cámara:

Factor de área de parrilla = 1000 Kw/m^2

Área libre de parrilla = 50% del área de parrilla

Factor de volumen de cámara = 300 Kw/m^3

De acuerdo con esto el área de la parrilla será:

$$A_{\text{parr}} = \text{potencia de la hornilla (kw)} / 1000$$
$$V_{\text{cam}} = \text{potencia de la hornilla (kw)} / 300$$

⁵ GARCIA H., RODRIGUEZ M. Determinación de los parámetros de diseño de la cámara de combustión, pailas y ductos en las hornillas paneleras, CIMPA. Barbosa, 1989

En donde:

$A_{\text{parr}} = \text{Área de la parrilla, m}^2$

$V_{\text{cam}} = \text{Volumen de la cámara, m}^3$

Una parrilla se encuentra conformada por sectores que se integran en el momento de la construcción de la hornilla. Las dimensiones de estos sectores varían de acuerdo con la fábrica que los produzca. Sin embargo, las medidas más corrientes son: 0,125 de ancho por 0,750m o por 0,980 m de longitud. Cada sector de estos es constituido por tres barrotes de 2,5 cm, separados por igual distancia uno de otro.

El área libre es decir, relación entre el área hueca y la total de este tipo de parrilla es mayor que en las parrillas tradicionales de ladrillo o rieles de ferrocarril, pero aún es baja ya que solamente alcanza el 30%, por lo tanto, su utilización está limitada para los casos en que el bagazo está formado por tiras largas que no alcanzan a pasar por el espacio entre los barrotes.

Cuando el bagazo está formado por partículas pequeñas es necesario utilizar una parrilla con los espacios libres más pequeños. CIMPA diseñó varios tipos de parrilla de 50, 75, 100 y 125 cm de longitud y 15,5 cm de ancho, con un espacio de 1 cm entre los barrotes y un área libre del 50%. Estas parrillas además de facilitar el uso de bagazo más fino, también disminuyen la altura de la chimenea en el diseño final de la hornilla debido a que el coeficiente de pérdidas de presión al paso del aire es menor por tener un área libre mayor.

La selección de los sectores de parrilla se debe hacer teniendo en cuenta el tipo de bagazo y el área total de la parrilla de tal forma que se logre una buena proporcionalidad en el largo y el ancho para facilitar la alimentación de bagazo.

Las cámaras tradicionales se diseñan sin tener en cuenta el parámetro de volumen, sus dimensiones están determinadas por la forma de la parrilla, el tamaño de la primera paila y la altura del piso a esta paila.

En las siguientes Figuras 20, 21, 22 y 23, se puede observar que las cámaras Ward y Ward tipo CIMPA constan de dos subcámaras llamadas primaria (80% del volumen total) y secundaria (20% del volumen total).

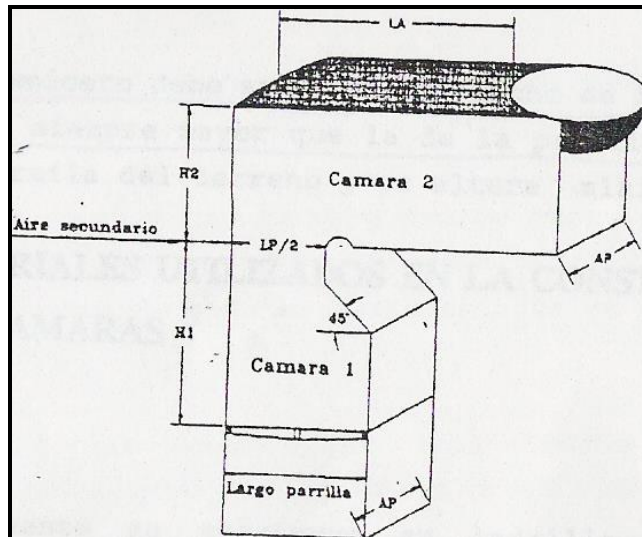
$$\begin{aligned} V_1 (\text{primaria}) &= 0,80 * V_{\text{cámara total}} \\ V_2 (\text{secundaria}) &= 0,20 * V_{\text{cámara total}} \end{aligned}$$

En donde:

V_1 = volumen de la cámara primaria, m^3

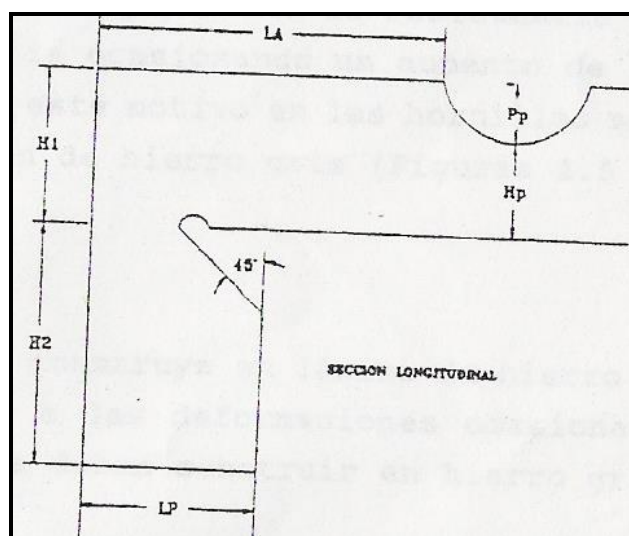
V_2 = volumen de la cámara secundaria, m^3 .

Figura. 20 Cámara de combustión Ward



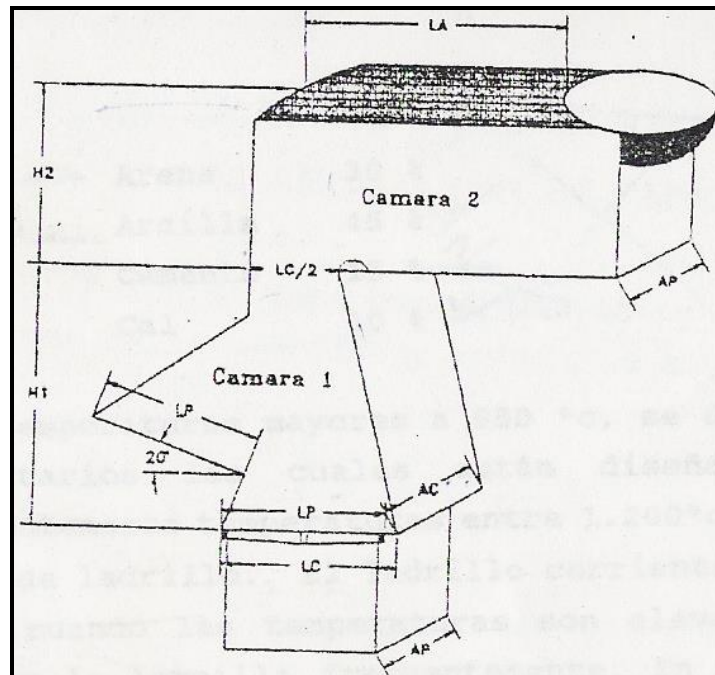
Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

Figura. 21 Medidas Cámara Ward



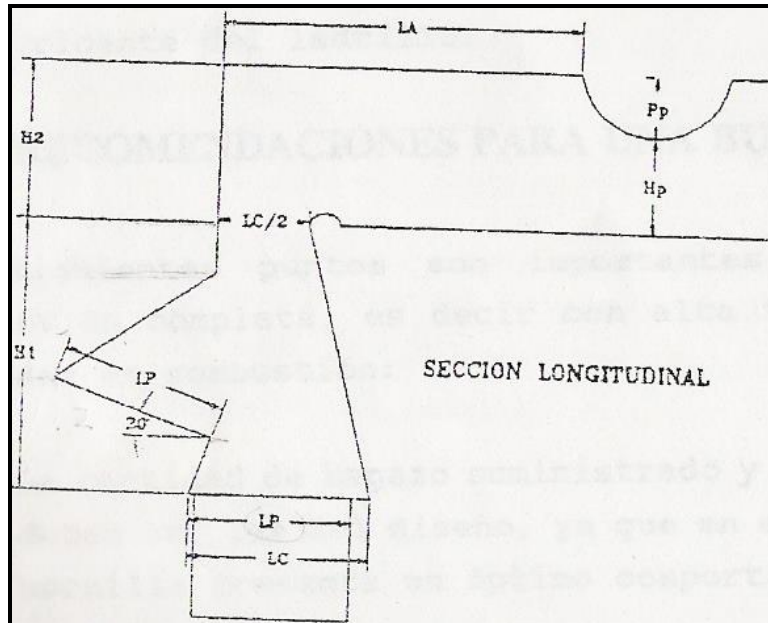
Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

Figura. 22 Cámara de combustión Ward CIMPA



Fuente. Manual de hornillas paneleras. CIMPA 1991

Figura. 23 Medidas Cámara Ward CIMPA



Fuente. Manual de hornillas paneleras

Conocidos los anteriores volúmenes y el tamaño de la parrilla se determinan todas las demás dimensiones de la cámara.

La cámara de combustión tipo CIMPA se calcula de la misma manera que la Ward, excepto la longitud y el ancho, los cuales se definen como sigue:

$$\text{Longitud cámara} = \text{longitud parrilla} + 0,10 \text{ (m)}$$

$$\text{Ancho cámara} = \text{ancho parrilla} + 0,20 \text{ (m)}$$

El tamaño del cenicero depende de la capacidad de producción de la hornilla, su diseño ha de realizarse de tal forma que permita almacenar como mínimo la ceniza producida en una semana de operación, garantizando facilidad de acceso a los operarios encargados de su limpieza. Como regla general el ancho del cenicero debe ser igual al ancho de la parrilla, su longitud es siempre mayor al de la parrilla, dependiendo de la topografía del terreno y su altura mínima ha de ser de 1 metro.

2.11 DESARROLLO DEL DISEÑO DE LA HORNILLA CIMPA DE 40 Kg/h de panela

CAPACIDAD	: 40Kg panela/ h
EFICIENCIA	: 50%
BRIX JUGO	: 17°B
BRIX PANELA	: 90°B
HUMEDAD DEL BAGAZO	: 40 %H
EXCESO DE AIRE	: 1,6%
EXTRACCIÓN	: 60%
PORCENTAJE DE FIBRA	: 14%

ALTURA DEL SITIO : 1300 m

❖ Masa de jugo:

$$\begin{aligned}m_j &= (m_p \cdot B_p) / B_j \\&= (40 \cdot 90) / 17 \\m_j &= 212 \text{ Kg/h}\end{aligned}$$

❖ Masa de caña:

$$\begin{aligned}m_c &= m_j / \text{extr} \\&= 212 / 0.60 \\m_c &= 353 \text{ Kg/h}\end{aligned}$$

❖ Masa de agua

$$\begin{aligned}m_{H_2O} &= m_j - m_p \\&= 212 - 40 \\m_{H_2O} &= 172\end{aligned}$$

❖ Flujo de calor aprovechado o requerido en la elaboración de Panela

$$\begin{aligned}Q_{\text{apr.}} &= m_j \cdot (T_e - T_a) \cdot C_p + m_{H_2O} \cdot r \\&= 212 \cdot (95 - 20) \cdot 4,18 + 172 \cdot 2208 \\&= 445645 \text{ Kj/h ó } 445,6 \text{ Mj/h ó } 124 \text{ Kw}\end{aligned}$$

❖ Flujo de calor suministrado

$$\begin{aligned}Q_{\text{sum}} &= \text{Potencia} = Q_{\text{apr.}} / \text{Eff.} \\&= 445.6 \text{ Mj} / 0,5 \\&= 8924 \text{ Mj/h} \\&\text{ó, } 125 \text{ Kw} / 0,5 = 248 \text{ Kw.}\end{aligned}$$

❖ Valor calorífico neto

$$\begin{aligned}\text{VCN.} &= 17,85 - 20,35 \cdot (H_B / 100) \\&= 17,85 - 20,35 \cdot (40 / 100) = 9,71 \text{ Mj. /Kg.}\end{aligned}$$

❖ Masa del bagazo

$$\begin{aligned}m_B &= Q_{\text{sum.}} / \text{VCN} \\&= 891 \text{ Mj./h} / 9,71 \text{ Mj./Kg.} = 92 \text{ Kg/h}\end{aligned}$$

❖ Calculo de autosuficiencia energética.

$$\begin{aligned}m_{BV} &= m_c - m_j \\&= 353 \text{ Kg/h} - 212 \text{ Kg/h} = 141 \text{ Kg/h}\end{aligned}$$

❖ Si la extracción es del 60% y la fibra 14% entonces la humedad del bagazo verde es 51%

$$\begin{aligned}m_{BS} &= m_{BV} * ((100 - H_{BV}) / (100 - H_{BS})) \\&= 141 * ((100 - 51) / (100 - 40)) = 115 \text{ Kg/h}\end{aligned}$$

2.11.1 Desarrollo del diseño de la cámara de combustión.

Área de parrilla:

$$\begin{aligned}A_{\text{parr}} &= \text{potencia de la hornilla (kw)} / 1000 \\&= 248 / 1000 \\A_{\text{parr}} &= 0,248 \text{ m}^2\end{aligned}$$

❖ Volumen de cámara:

$$\begin{aligned}V_{\text{cam}} &= \text{potencia de la hornilla (kw)} / 300 \\&= 248 / 300 \\V_{\text{cam}} &= 0,827 \text{ m}^3\end{aligned}$$

❖ Calculo volúmenes de subcamaras:

$$\begin{aligned}V_1 &= 0,80 * V_{\text{cam}} \\&= 0,80 * 0,827\end{aligned}$$

$$V_1 = 0,6616 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,20 * V_{cam}$$

$$= 0,20 * 0,827$$

$$V_2 = 0,1654 \text{ m}^3$$

❖ Cálculo de sectores

Se analizó los sectores de parrilla diseñados por CIMPA y se escogió la sección de parrilla de 75 cm de longitud por 15,5 cm de ancho, conformándose la parrilla así:

Nº sectores: 3

❖ Dimensiones parrilla:

Ancho parrilla: 0,33 m.

Longitud parrilla: 0,75 m.

❖ Dimensiones cámara

Longitud cámara = longitud parrilla + 0,10 (m)

$$= 0,75 + 0,10 = 0,85 \text{ m}$$

Ancho cámara = ancho parrilla + 0,20 (m)

$$= 0,33 + 0,20 = 0,53 \text{ m}$$

2.11.2 Cálculo del flujo de jugos y calor requerido en la elaboración de panela. El flujo másico de jugo está determinado por la capacidad de producción de la hornilla y cumple la siguiente relación:

$$m_j = (m_p * B_p) / B_j$$

Donde

m_j = Masa de jugo alimentado a la hornilla Kg/h.

m_p = Capacidad de la hornilla Kg de panela/h

B_j = Brix del jugo

B_p = brix de la panela

Los jugos al pasar por la hornilla sufren tres etapas de proceso que son: clarificación, evaporación y concentración.

❖ Clarificación: la etapa de clarificación comprende tres pasos:

❖ Prelimpieza

❖ Calentamiento

❖ Adición de auxiliares de clarificación

El calor requerido para la clarificación está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{clr} = (m_j * C_{p_j} * (T_e - T_a)) / 3600$$

$$C_{p_j} = 4,18 * (1 - 0,006*B_j)$$

Donde:

C_{p_j} = calor específico de los jugos, KJ/Kg°C

Q_{clr} = Flujo de calor requerido en la clarificación. Kw

T_e = Temperatura de ebullición del jugo, °C

T_a = Temperatura ambiente, °C

❖ Evaporación: cuando el jugo alcanza la temperatura de ebullición.

El calor latente necesario en esta etapa se calcula así:

$$Q_{evp} = (\Delta H_v * (m_{clr} - m_{evp})) / 3600$$

$$m_{evp} = (m_{clr} * B_j) / 65$$

Donde:

Q_{evp} = Flujo de calor requerido en la evaporación, Kw

ΔH_v = Calor latente de evaporación del agua. Kj/Kg

m_{clr} = Masa de jugo clarificado, Kg/h

m_{evp} = Masa de jugo a la salida de la etapa de clarificación, Kg/h

❖ Concentración: Etapa en la cual los jugos pasan a ser mieles y se sigue la evaporación hasta encontrar el punto panela (90 a 93 °Brix)

El calor requerido para la concentración se calcula así:

$$Q_{con} = (\Delta H_v * (m_{evp} - m_p)) / 3600$$

El calor requerido (Q_{req}) en el proceso de obtención de panela está dado por la suma de los calores de clarificación, evaporación y concentración:

$$Q_{req} = Q_{clr} + Q_{evp} + Q_{evp}$$

$$Q_{req} = (m_j * C_{p_j} * (T_e - T_a) + m_{H_2O} * \Delta H_v) / 3600$$

Donde:

m_{H_2O} = Masa de agua total evaporada en el proceso de obtención de panela, Kg/h

3. ANALISIS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA Y ESTRUCTURAL DE LA HORNILLA PANELERA ACTUAL

El análisis de las cámaras de combustión actual se realizó en base a simulación y al análisis de gráficos de temperaturas tomadas por termocuplas dentro de las cámaras, también en el análisis estructural dado al simular el horno en el programa SAP.

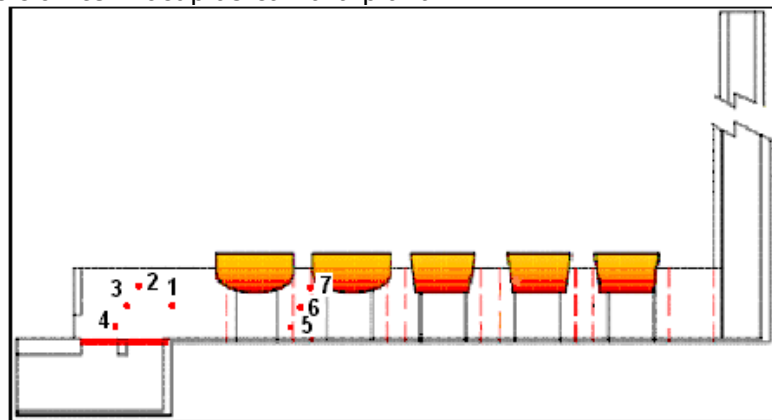
3.1 ANALISIS DE LA TOMA DE LECTURAS DE TEMPERATURA DENTRO DE LAS CÁMARAS PLANA Y WARD

La simulación y el análisis de las cámaras que se realizó para la optimización de los parámetros constructivos de la cámara de combustión de un horno panelero se dan para determinar el comportamiento de los gases dentro de la cámara y así poder realizar la optimización de éstas.

Para tal efecto, se ubicaron termocuplas en puntos estratégicos al interior de cada horno.

Para el caso de la cámara plana se instalaron 7 termocuplas, 4 en las inmediaciones de la parrilla y 3 más bajo el primer fondo. Como se muestra en la figura 24.

Figura 24. Posición termocuplas cámara plana

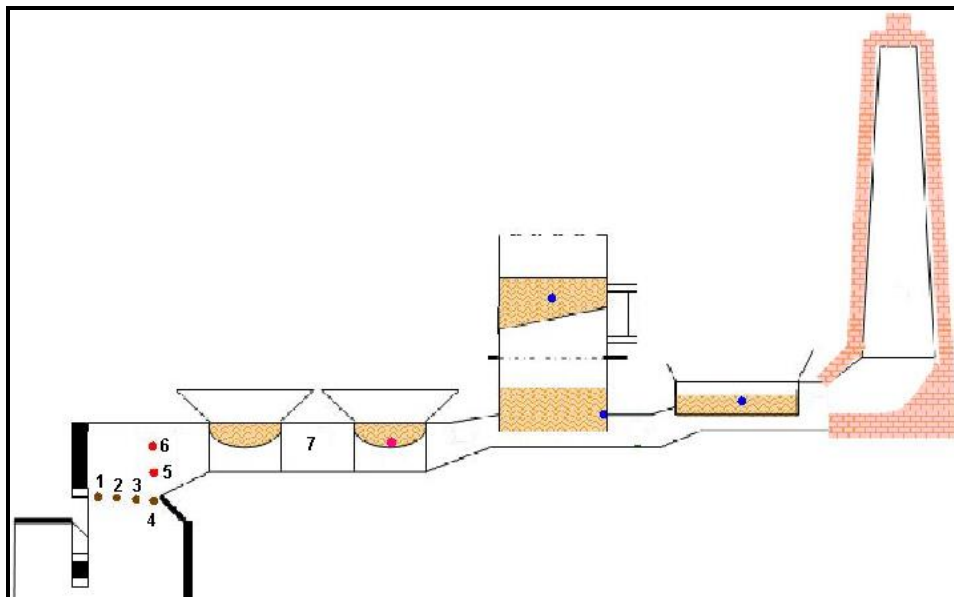


Fuente: El autor

En la cámara Ward fueron dispuestas 7 termocupas también; sin embargo se instalaron 6 termocupas en la zona intermedia entre la cámara de combustión y el ducto de gases.

La posición de las termocupas de la cámara Ward se observa en la figura 25.

Figura 25 Posición termocupas cámara Ward



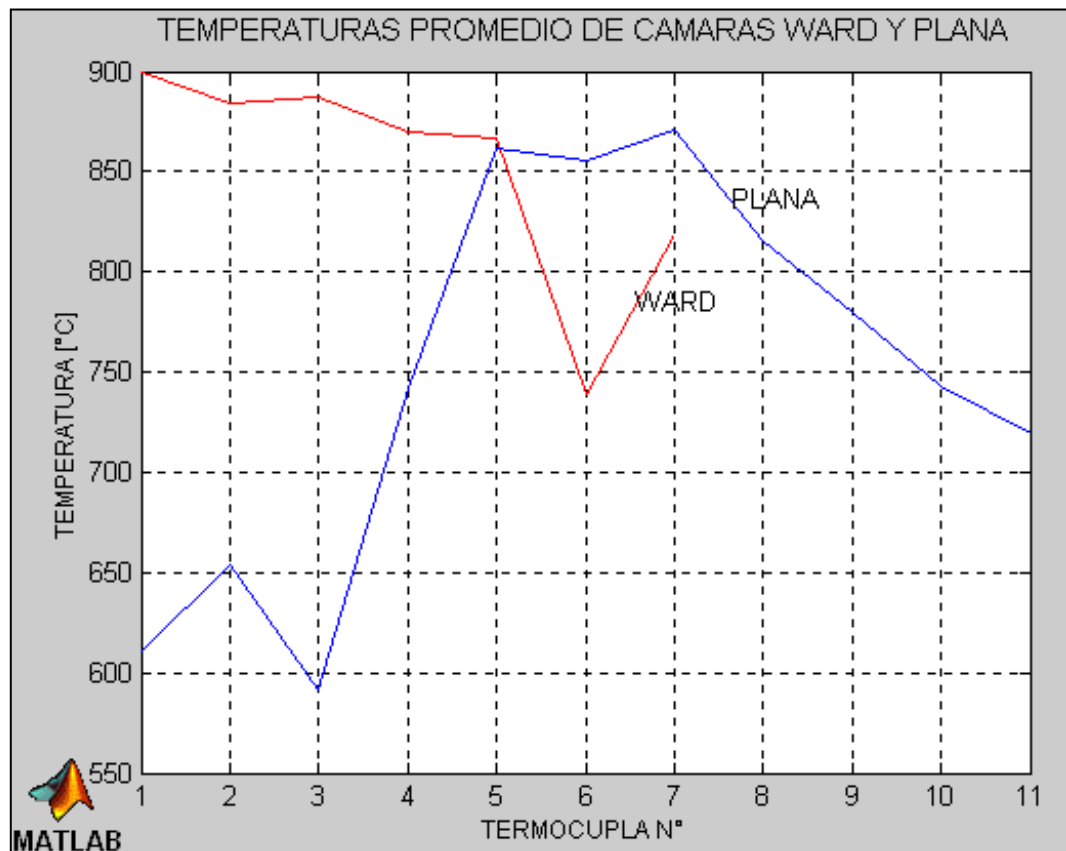
Fuente: El autor

Las mediciones se realizaron con intervalos de 2 segundos durante un periodo de 12 horas 24 minutos y 10 segundos para el caso de la cámara Ward y de 9 horas 34 minutos y 48 segundos para la cámara plana.

Con los datos obtenidos de esta manera y mediante la simulación se generaron gráficas de mediciones contra temperatura, gráficas de medias parciales contra temperatura con subconjuntos de 250 datos y por último una gráfica por cada cámara, en la cual se relaciona el valor promedio medido por cada termocupla con respecto a su posición dentro de cada horno.

Los resultados obtenidos al introducir estos datos de temperatura en el programa de computación MATLAB (laboratorio matemático) corroboraron las opiniones que favorecían la implementación de cámaras Ward en los hornos paneleros, puesto que se pudo observar un mejor comportamiento térmico de dicha cámara con respecto a la cámara plana. La grafica que compara los promedios de temperatura para las dos cámaras se encuentran en la figura 26.

Figura 26. Temperaturas promedio de cámaras Ward y plana



Fuente: el autor

En la gráfica observamos que la cámara de combustión Ward presenta mayor temperatura que la plana por lo tanto, como se ha dicho es más eficiente la cámara Ward que la cámara plana. Debido a la baja temperatura de la cámara plana vemos que la que más requiere análisis es la cámara Ward por lo tanto nos centraremos más en ella.

En cuanto al análisis de la cámara plana lo que se busca es aislar un poco la cámara de combustión del ducto de humos para mejorar el proceso de combustión en ella.

En adelante los análisis se enfocarán sobre los datos obtenidos en la cámara Ward.

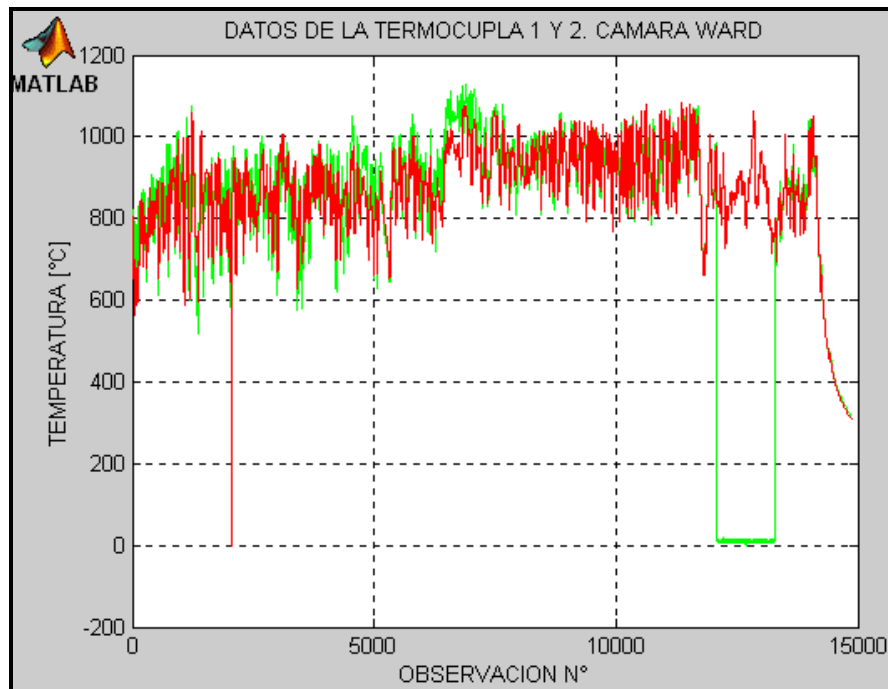
3.1.1 Comparación de temperatura entre puntos de medición al interior de la cámara Ward. Los datos fueron tomados el día 3 de junio de 2004, los cuales se utilizaron para este análisis puesto que ese día se lograron las mejores condiciones para que el horno funcionara de manera continua durante todo un día de trabajo.

Otro factor que se tuvo en cuenta fue el climático puesto que ese día se registro una temperatura promedio igual a la que históricamente se ha observado en la región durante la época de verano.

3.1.1.1 Termocupla 1 - termocupla 2. La temperatura en las inmediaciones de la termocupla 1(verde) presenta mayor fluctuación que en la termocupla 2(roja), Figura 27. Esto puede deberse a que la primera se encuentra muy cerca de la puerta de alimentación del horno, lugar donde recibe flujo de aire frío. A pesar de esto la termocupla 1 tiene una temperatura promedio de 898,58°C en tanto que la termocupla 2 registra un valor promedio de 883,52°C.

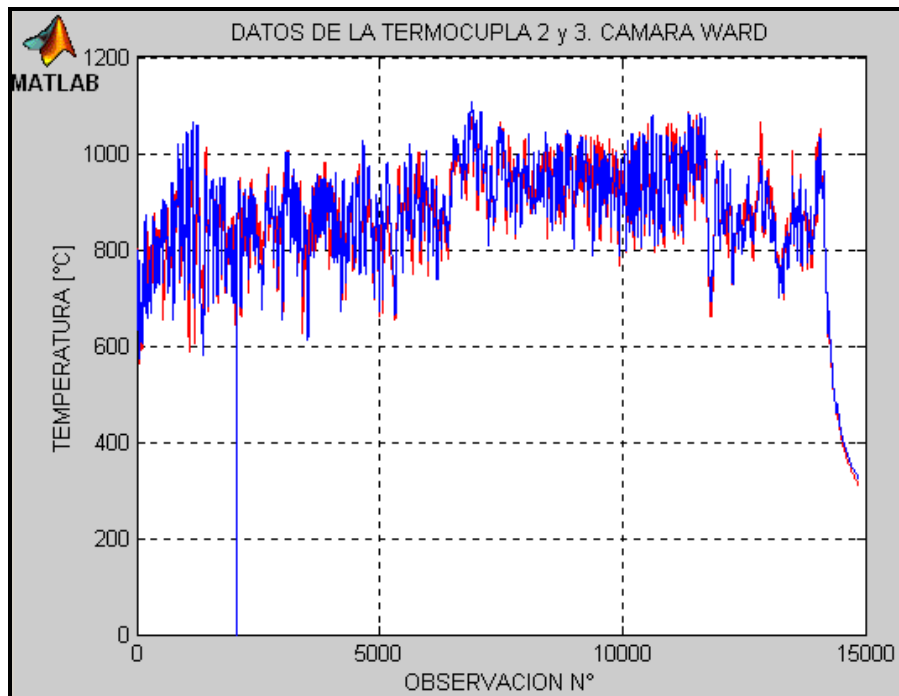
3.1.1.2 Termocupla 2 - termocupla 3. Estas dos termocuplas registran datos de temperatura muy similares, Figura 28. Los promedios de temperatura son de 883,52°C para termocupla 2 y 887,06°C para la termocupla 3 (azul).

Figura 27. Datos de la termocupla 1 y 2 cámara Ward



Fuente: El autor

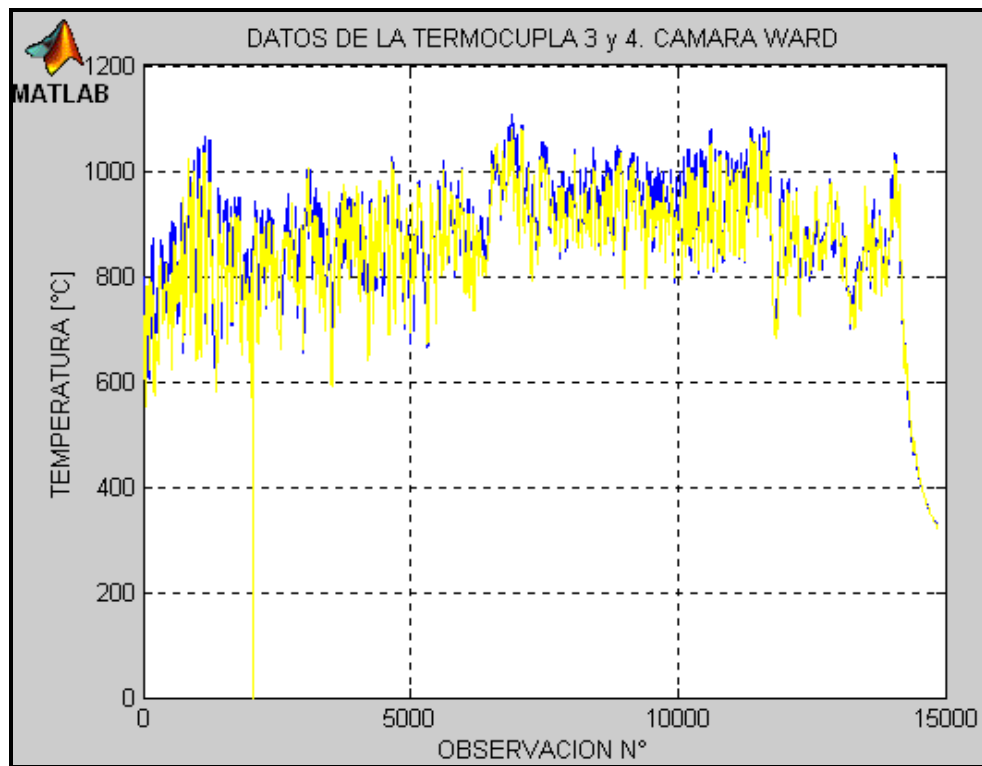
Figura 28. Datos termocupla 2 y 3 cámara Ward



Fuente: El autor

3.1.1.3 Termocupla 3 - termocupla 4. El análisis de las graficas de temperatura contra número de mediciones muestra una ligera disminución de la temperatura entre la termocupla 3 (azul) y la 4. (amarilla), Figura 29. Los promedios de temperatura son 887,06°C para la 3 y 869,61 para la 4. Esto se puede explicar dado que la termocupla 4 se encuentra junto a la pared posterior de la cámara de combustión, y en ese lugar se presenta el ascenso de aire frío proveniente del cenicero.

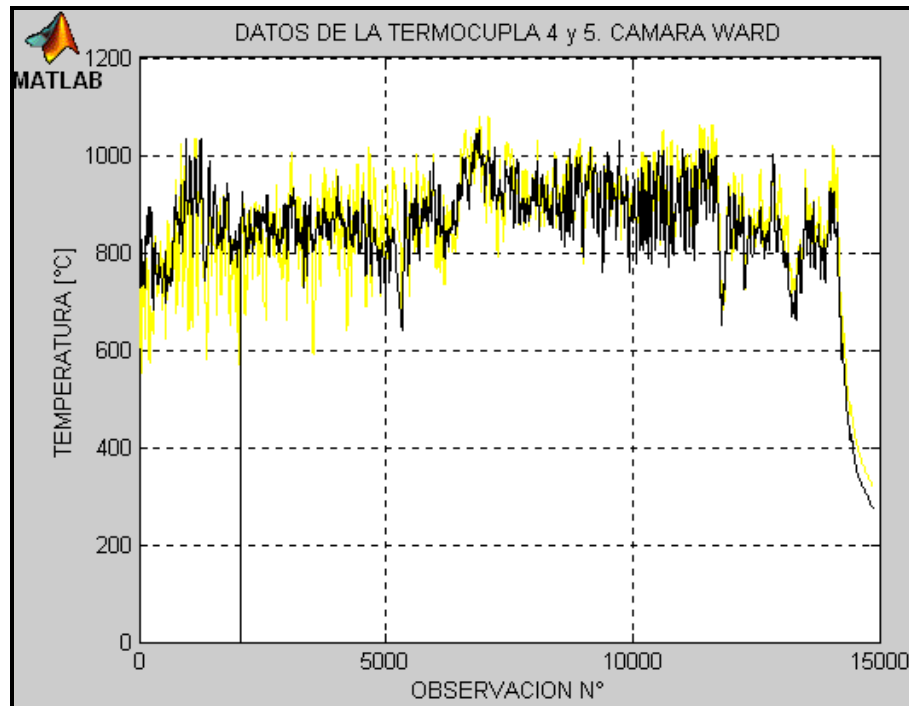
Figura 29. Datos termocupla 3 y 4 cámara Ward



Fuente: El autor

3.1.1.4 Termocupla 4 - termocupla 5. Se encuentra una mayor temperatura durante la primera hora de funcionamiento del horno en la termocupla 5 (negra), Figura 30. Habiendo transcurrido 6 horas 40 minutos de estar funcionando el horno, la termocupla 5 registró una disminución de temperatura, razón por la cual el valor promedio leído por la termocupla 4 es de 869,61°C y el valor leído por la termocupla 5 es de 867,29°C.

Figura 30. Datos termocupla 4 y 5 cámara Ward

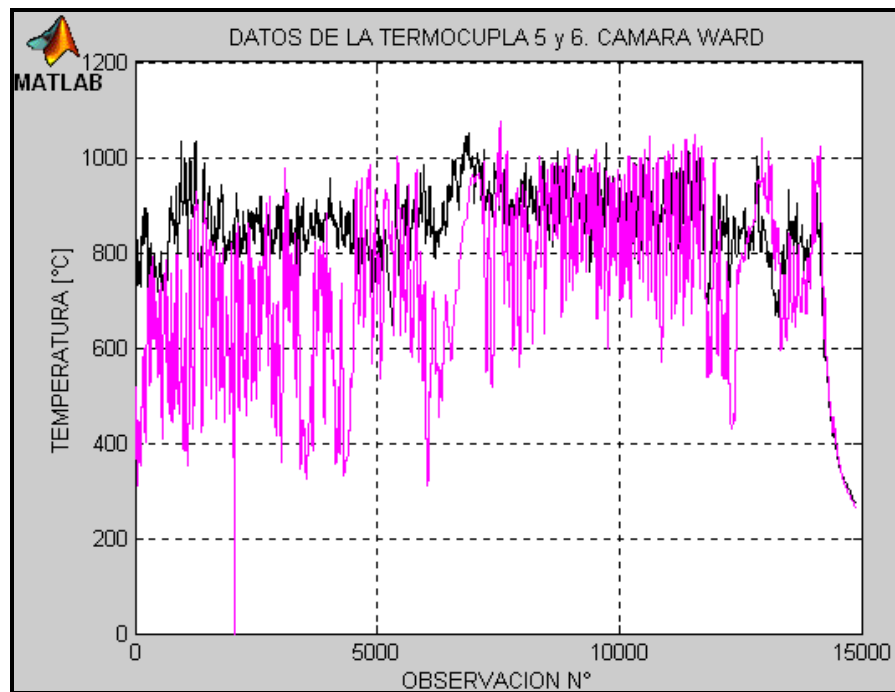


Fuente: El autor

3.1.1.5 Termocupla 5 - termocupla 6. Figura 31. La corriente de aire frío que detecta en sus lecturas la termocupla 1, asciende por encima de los gases calientes producidos durante la combustión. De esta manera la termocupla 6 (morada) registra grandes perturbaciones en las lecturas. Su temperatura es mucho más baja que la registrada por la termocupla 5. el promedio de temperatura registrada por la termocupla 6 es de 739,47°C frente a 867,29°C registrados por la termocupla 5.

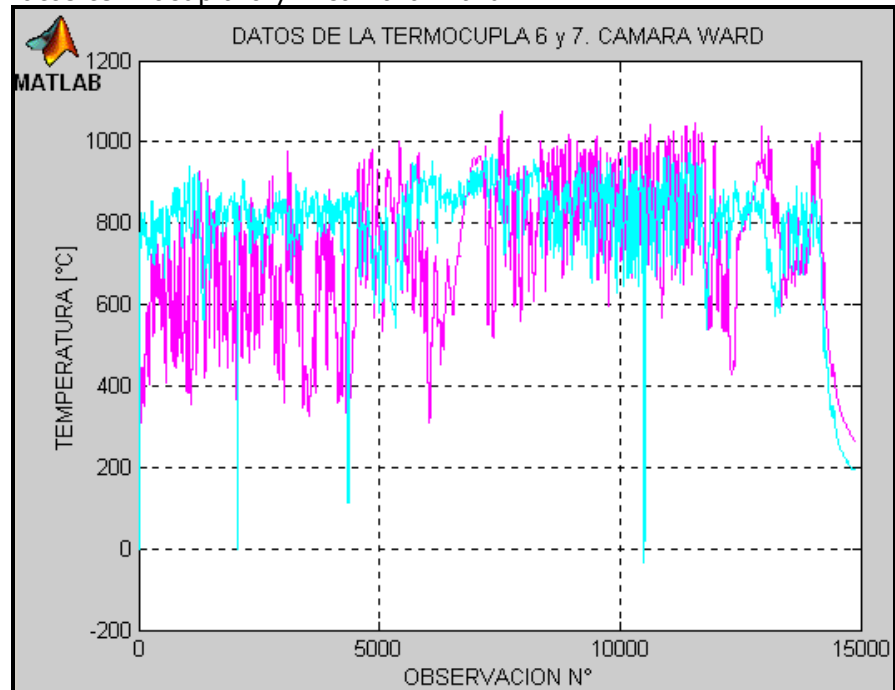
3.1.1.6 Termocupla 6 - termocupla 7. Figura 32. En el punto donde se ubicó la termocupla 7(Azul claro) el flujo de gases calientes provenientes del lugar donde se encuentra la termocupla 5 hacen que la primera tenga una temperatura promedio de 819,18°C valor que es superior al promedio registrado por la termocupla 6 (739,47°C).

Figura 31. Datos termocupla 5 y 6 cámara Ward



Fuente: El autor

Figura 32 Datos termocupla 6 y 7 cámara Ward



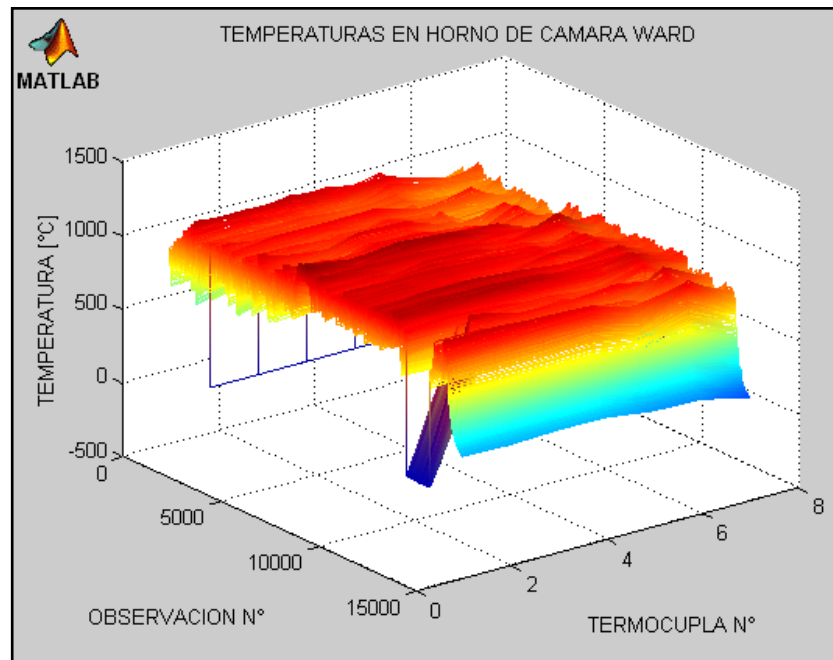
Fuente: El autor

A partir del análisis realizado se pudo deducir que el flujo de calor haciende de los puntos 2 y 3 hacia el punto 5 para luego dirigirse al punto 7.

3.1.2 Análisis de graficas de todas las termocuplas de la cámara Ward. Tanto esta grafica como la que representa todos los datos recogidos por las termocuplas en el horno de cámara plana involucran tres variables: N° de termocupla, periodo de tiempo y variación de la temperatura en el punto especifico de medición.

Al analizar los datos obtenidos en la cámara Ward se determinan diferentes zonas de temperatura las cuales se identifican así; las zonas oscuras, aquellas que aparecen en tonos de color azul, son las mas frías mientras que las zonas de colores amarillo, naranja y rojo son las mas calientes, como se ve en la figura 33

Figura 33. Temperaturas en horno de cámara Ward



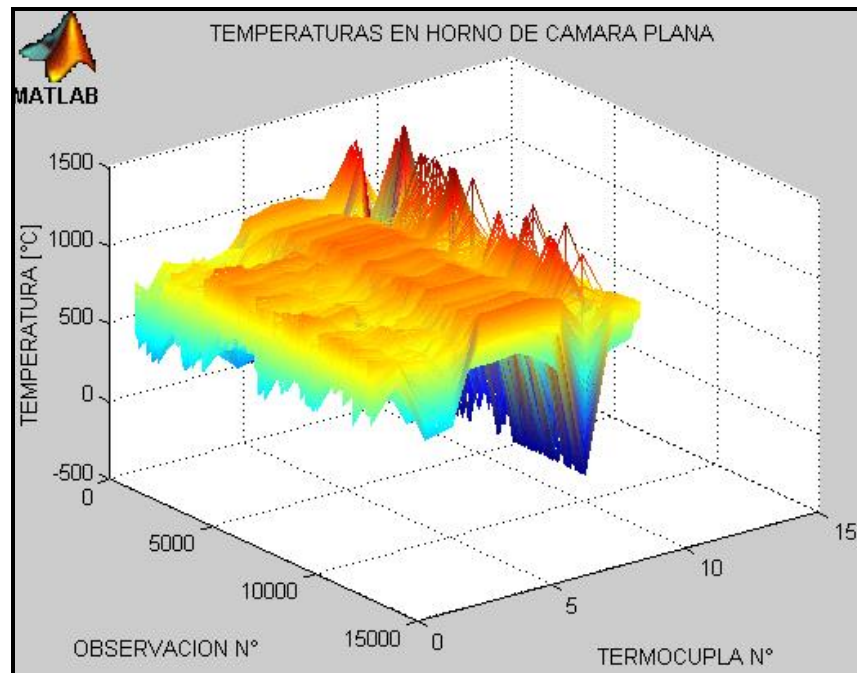
Fuente. El autor

La banda azul oscura representa un daño en la termocupla por lo tanto ese sector de datos no se tiene en cuenta.

Los primeros datos tienen una variación de temperatura debido al inicio del horno ya que con la entrada de material la temperatura en el horno baja y luego asciende.

3.1.3 Análisis de grafica de todas las termocupas de la cámara plana. Como lo visto en la gráfica anterior, se dice que las zonas oscuras, aquellas que aparecen en tonos de color azul, son las más frías de la grafica mientras que las zonas de colores amarillo, naranja y rojo son las más calientes. La región azul que se observa desde la parte posterior del grafico muestra las mediciones hechas por la termocupla 9. Esto se observa en la gráfica 34:

Figura 34. Temperaturas en horno de cámara plana



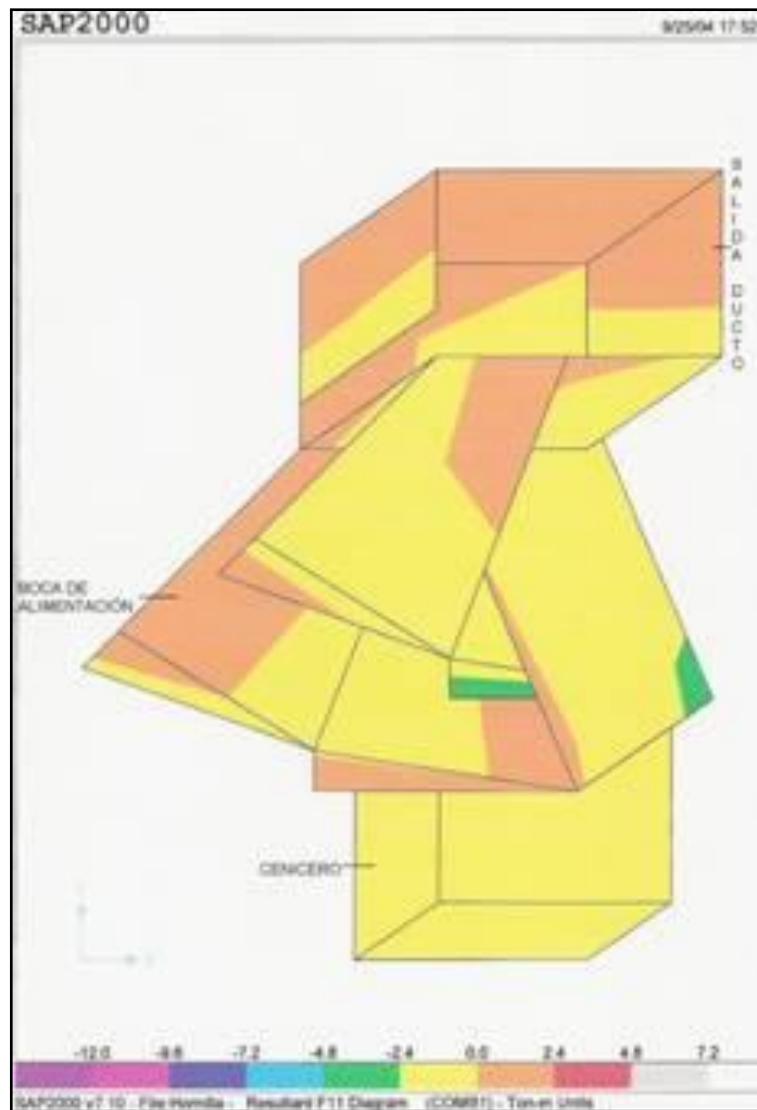
Fuente: El autor

En tanto que la zona naranja representa la temperatura de la llama debido a que en esta cámara la llama se forma y se dirige hacia el ducto chocando con el área fría de las pailas y generándose una mala combustión al formarse monóxido sobre las pailas.

3.2 RESULTADO DEL ANALISIS ESTRUCTURAL EN SAP

Se le realizó un análisis estructural de esfuerzos y momentos a la hornilla panelera considerándola como una estructura realizada en mampostería, obteniendo los datos de momentos y esfuerzos los cuales se ven en la figura 35, los datos resultantes se encuentran en el anexo 2:

Figura 35. Partes de la cámara Ward en SAP

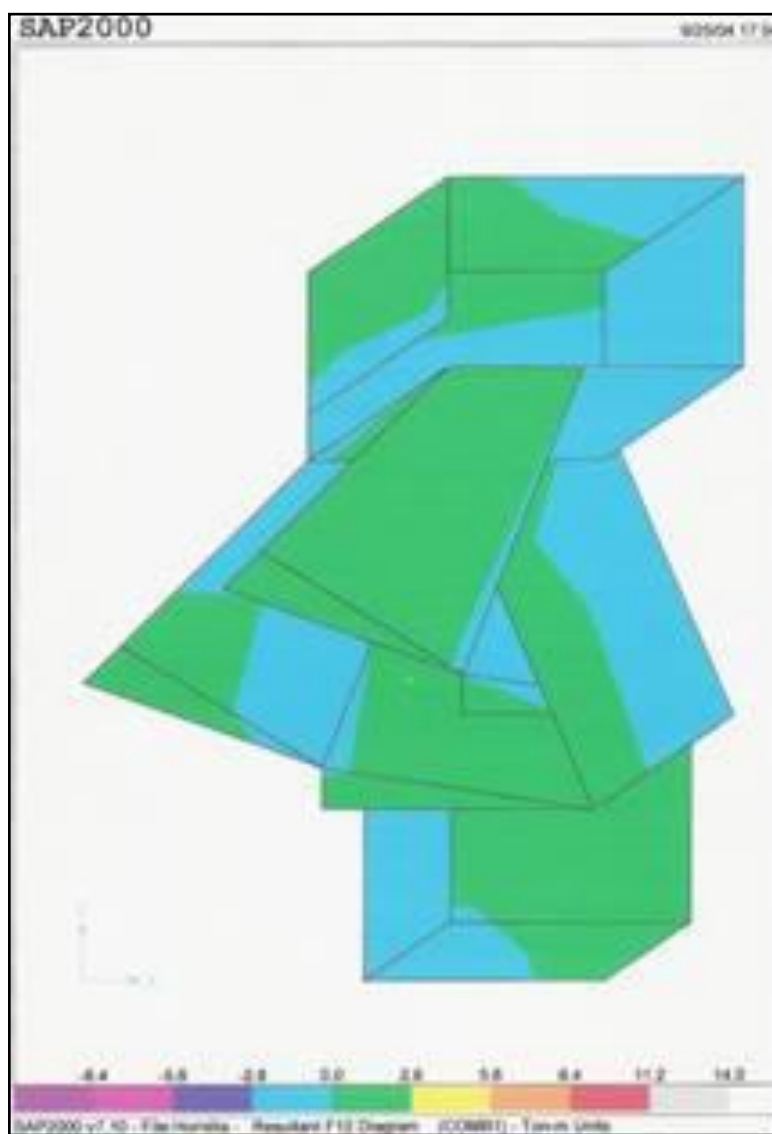


Fuente. Autor

En la gráfica observamos la distribución de los esfuerzos que se presentan al aplicarle una combinación de cargas vivas, muertas y del mismo peso de la mampostería. Los colores representan las cargas por tonelada de acuerdo a la dirección de aplicación de acuerdo a coordenadas cartesianas.

Las figuras 36 y 37 representan los momentos y cortantes que se generan en la cámara cuando se aplican combinación de cargas.

Figura 36. Grafica de momentos.



Fuente. El autor

Figura 37. Grafica de esfuerzos cortantes



Fuente. El autor

De acuerdo al análisis de las figuras se observa y propone lo siguiente:

- ❖ Al realizar muro de contención a los lados de la hornilla se mejora la acción de empuje de tierras sobre la hornilla y solo trabajaría sobre ella sus bases, las cargas muertas y las cargas vivas que se van a manejar.
- ❖ Los mayores esfuerzos se presentan en la base de la parrilla, por lo tanto, es el área de mayor atención.

- ❖ Es recomendable realizar la estructura en ladrillos y enganchar los muros con pernos especiales, o incrustarle varillas cada 70 a 80 cm. Como se observa en el anexo 3.
- ❖ La plancha de cimiento se debe realizar de 10 cm de espesor mínimo, y debe llevar un refuerzo de acero en forma de malla en el medio.
- ❖ En el trabado de los muros, se recomienda combinar formas o tipos de aparejo. Ejemplo mezclar trabazón a soga con trabazón a tizón.
- ❖ En la base de la parrilla del horno es donde se encuentran los mayores esfuerzos, por lo tanto es recomendable realizar una viga de amarre alrededor de la parrilla. Esta viga podrá construirse con cerchas en S y varilla de 3/8" y tener un recubrimiento de 6 cm en concreto.
- ❖ Es recomendable realizar una viga y columnas de amarre al muro inclinado ubicado frente a la puerta de alimentación con el fin de evitar su desplome.

4. PRUEBAS DE LABORATORIO

Dentro del proyecto de optimización de la hornilla se realizaron algunos ensayos de coeficiente de expansión térmica y de cono pirométrico equivalente al ladrillo semirefractario usado en CIMPA y a una posible mezcla de caolín y melaza para proponer para uso como material de pega a temperaturas menores de 500°C en el ducto de humos de la hornilla.

El procedimiento a seguir en cada uno de estos ensayos es el siguiente:

4.1 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR CAMBIO POR RECALENTAMIENTO DE LADRILLOS REFRACTARIOS.

El método de ensayo PARA DETERMINAR CAMBIO POR RECALENTAMIENTO DE LADRILLOS REFRACTARIOS se encuentra consignado en la Norma Técnica Colombiana NTC 688, la cual es equivalente a la norma ASTM C 113/98⁶.

4.1.1 Objetivo. El objetivo de este método de ensayo cubre la determinación del cambio dimensional permanente de ladrillos refractarios cuando se calientan bajo las condiciones prescritas.

4.1.2 Importancia y uso del ensayo.

- ❖ Los ladrillos y formas refractarias de diferentes composiciones presentan cambios lineales permanentes únicos después del calentamiento o recalentamiento. Este método de ensayo suministra un procedimiento estándar para calentar varias clases de refractarios con programas adecuados de calentamiento.
- ❖ Los cambios lineales al recalentamiento obtenidos por este método de ensayo son adecuados para su uso en investigación y desarrollo, también a menudo se utilizan para establecer especificaciones escritas entre fabricantes y consumidores.

⁶ Norma Técnica Colombiana NTC 688, Bogotá, 2003.

- ❖ Se debe tener cuidado en seleccionar muestras que sean representativas del producto a ensayar.

4.1.3 Aparatos.

- ❖ Horno: de un diseño tal que el programa especificado de calentamiento y la atmósfera puedan mantenerse en toda la zona de calentamiento.
- ❖ Aparato para medir longitudes: capaz de ser leído de 0,5 mm sobre una distancia 254 mm. Se puede utilizar una regla de gancho.

4.1.4 Especímenes de ensayo.

- ❖ Para cada ensayo se utilizan tres especímenes. Estos pueden ser ladrillos comerciales del tamaño especificado o piezas de ensayo cortadas de otras más grandes.
- ❖ Se rotula cada espécimen utilizando pintura cerámica o crayón y se hace una marca de referencia en cada extremo de la línea central de una cara ancha que indica la posición exacta donde se hace la medición. Se mide la longitud de los tres especímenes de ensayo con una aproximación de 0,5 mm.

4.1.5 Procedimiento.

- ❖ Colocación de los especímenes de ensayo en el horno: Se coloca especímenes de ensayo en el horno de tal forma que se apoyen sobre la cara mayor se coloca únicamente una hilera de altura. Se coloca cada espécimen sobre la cara correspondiente de un ladrillo de soporte que sean del mismo lote del espécimen de ensayo o al menos de igual retractariedad. Entre cada espécimen de ensayo y el ladrillo de soporte se coloca una capa de material refractario adecuado, esto es que no reaccione bajo las condiciones de ensayo y que pase la malla 1,18mm (equivalente a la malla 14 de la serie Tyler) y quede retenido en la malla de 425 μ m. Se coloca cada espécimen de tal forma que no haya menos de 38mm de separación entre ellos o desde el muro dentro del horno.

4.1.6 Medición de temperatura. Se mide la temperatura dentro del horno por medio de una termocupla adecuadamente calibrada. A temperaturas superiores, se puede retirar la termocupla y utilizar un pirómetro óptico o de radiación calibrado. Se coloca el extremo de la termocupla o se mira a través del pirómetro para registrar la

temperatura de los especímenes de ensayo. Se hacen las lecturas de temperatura a intervalos no mayores de 15 min.

Se verifica periódicamente el horno por medio de termocuplas, pirómetros o conos pirométricos para asegurarse que las temperaturas en el interior no difieren en más de 14°C o medio cono.

4.1.7 Atmósfera de ensayo. En todas las temperaturas por encima de 800°C la atmósfera del horno debe contener mínimo 0.5% de oxígeno y 0% de combustible. Se toman muestras para el análisis de gases del interior del horno.

4.1.8 Medición de los especímenes cocidos. Se vuelven a medir los especímenes de ensayo a temperatura ambiente, esto después de limpiar los extremos con un bloque abrasivo para remover las pequeñas ampollas de ser necesario.

4.1.9 Desarrollo del ensayo y resultados. Para el presente ensayo se utilizó una mufla de ensayo ubicada en el laboratorio de Metalurgia, área de prerreducidos de la UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.

Las características de la mufla son:

- ❖ Temperatura máxima: 1200°C
- ❖ Atmósfera del horno: oxidante.
- ❖ Control de temperatura: por medio de termocupla.

Los especímenes de ensayo son ladrillos elaborados con:

- ❖ Chamota de caolín: 20%
- ❖ Materia aglomerante caolín: 80%

Se tomaron tres especímenes representativos como material de ensayo; se procedió a tomar las medidas de cada espécimen y a marcarlos respectivamente. Las medidas iniciales de los especímenes de ensayo son:

❖ **m1.** 22.8 * 11.4 * 6.4

❖ **m2.** 22.7 * 11.4 * 6.5

❖ **m3.** $22.8 * 11.5 * 6.4$

Se introdujo los especímenes en el horno siguiendo el procedimiento escrito anteriormente hasta alcanzar la temperatura a la cual se irá a medir la dilatación la cual es 1100°C y una vez alcanzada la temperatura se da un tiempo de permanezca en horno de 5 horas a esta temperatura. Pasado este tiempo se deja la muestra a enfriar en horno.

Paso siguiente a este es limpiar los especímenes y retirar el polvo suelto de ellos, y posteriormente realizar la medición final de estos.

Los datos de medición final son:

❖ **m1.** $22.85 * 11.4 * 6.4$

❖ **m2.** $22.73 * 11.4 * 6.5$

❖ **m3.** $22.75 * 11.5 * 6.4$

Por lo tanto;

El cambio dimensional producido por las altas temperaturas en los ladrillos se calcula así:

$$R = (h_o - h_f) / h_o$$

❖ **Para m1** $-2.19 * 10^{-4}$

❖ **Para m2** $-1.321 * 10^{-3}$

❖ **Para m3** $2.19 * 10^{-3}$

Cambio dimensional promedio: $-4.4 * 10^{-4}$

El cambio dimensional de los ladrillos determina la dilatación a usar en la construcción de las hornillas.

4.2 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONO PIROMÉTRICO EQUIVALENTE (CPE)

4.2.1 Objetivo. Este método de ensayo cubre la determinación del cono pirométrico equivalente de arcillas, ladrillos refractarios silicoaluminosos, ladrillos refractarios de alta Alumina, morteros refractarios, etc. por comparación de los conos pirométricos estándar.

4.2.2 Resumen del método de ensayo. Este método consiste en preparar un cono de ensayo de un material refractario y comparar su punto final de deformación con el de un cono pirométrico estándar. El valor del CPE resultante es una medida de la refractariedad del material.

4.2.3 Significado y uso.

- ❖ La deformación y el punto final de un cono corresponden a cierta condición de trabajo y calor combinada debido a los efectos de tiempo, temperatura y atmósfera.
- ❖ La decisión de este método de ensayo está sujeta a muchas variables que son difíciles de controlar. Por lo tanto, es necesario un operador experimentado cuando los valores del CPE se utilizan para propósitos de especificación.
- ❖ Los valores del CPE se usan para clasificar refractarios silicoaluminosos y de alta alumina.
- ❖ Este es un método efectivo para identificar variaciones en las arcillas, para control en la minería y para desarrollar especificaciones de materias primas.
- ❖ Aunque no se recomienda, este método de ensayo a veces se utiliza a otros materiales diferentes a los silicoaluminosos y de alta alúmina. Tal práctica se debe limitar a laboratorios internos y nunca se debe usar con el fin de definir especificaciones.

4.2.4 Procedimiento.

4.2.4.1 Preparación de la muestra. Para arcilla o ladrillos: En el caso de que la cantidad sea pequeña se tritura toda la muestra de arcilla o de ladrillo silicoaluminoso, por medio de rodillos o de una trituradora de mandíbulas para producir un tamaño de partícula no mayor a 6mm. Si la cantidad es mayor, se toma una muestra representativa obtenida por métodos aprobados. Luego se mezcla l

muestra completamente y se reduce la cantidad hasta obtener cerca de 250 g por cuarteo. Luego esta porción se pulveriza en un mortero de ágata, de porcelana, o de acero endurecido y se reduce de nuevo la cantidad por cuarteo. El tamaño final de la muestra debe ser de 50 g con una finura capaz de pasar la malla N° 70. Con el fin de evitar una reducción excesiva a finos, estos se remueven frecuentemente durante el proceso de molienda pasando la muestra por la malla y continuando con la pulverización de las partículas más gruesas hasta que toda la muestra pase a través de la malla.

4.2.4.2 Preparación de los conos de ensayo.

- ❖ Después de la preparación de las arcillas no quemadas o de mezclas que contienen proporciones apreciables de arcilla cruda, se calientan en una atmósfera oxidante en un rango de temperaturas de 925°C a 980°C por un tiempo no menor a 30 minutos
- ❖ Se mezcla completamente la muestra seca y luego se adiciona agua, dextrina, goma, goma tragacanto u otro ligante orgánico libre de álcalis, que en este caso es melaza. Se forman los conos de ensayo en un molde metálico en forma de pirámide triangular trunca formando un pequeño ángulo entre la base y el eje piramidal.

4.2.4.3 Montaje. Tanto los conos de ensayo como los conos pirométricos estándar se montan sobre las plaquetas de material refractario, las cuales deben tener una composición que no afecte el punto de fusión de los conos. Ambos conos se montan incrustando la base de tal forma que la longitud de la cara inclinada sobre la plaqueta sean 24mm y la cara del cono (sobre la que ocurre el doblamiento) debe estar inclinada a un ángulo de 82° con la horizontal. Los conos de ensayo se organizan con respecto a los conos pirométricos estándar, es decir, se alternan los conos de ensayo con los conos estándar hasta donde sea práctico. La plaqueta puede ser de cualquier tamaño y forma convenientes y se puede quemar antes de usarla, si se desea.

4.2.4.4 Calentamiento. El calentamiento se realiza en hornos convenientes, operando con atmósfera oxidante y ratas que cumplan los siguientes requisitos:

- ❖ Para conos de ensayo que se espera tengan un punto final de CPE cono 12 o más, pero no mayor a cono 26, se calienta a la rata establecida en la siguiente tabla N°4:

Tabla 4. Rata de calentamiento del CPE 12 a 26

Del horno de ensayo frío hasta cono N°	Intervalo de tiempo, min	Tiempo acumulado, H:min
12	45	0:45
13	5	0:50
14	19	1:09
15	13	1:22
16	24	1:46
17	9	1:55
18	4	1:59
19	8	2:07
20	9	2:16
23	16	2:32
26	7	2:39

Fuente: Normas técnicas colombianas, NTC 706. 2003

- ❖ Para conos de ensayo que se espera tengan un punto final mayor a cono 26, se calienta a la rata establecida en la siguiente tabla:

Tabla 5. Rata de calentamiento del CPE 26 o mayores

Del horno de ensayo frío hasta cono N°	Intervalo de tiempo, [min]	Tiempo acumulado, [h:min]
20	45	0:45
23	16	1:01
26	7	1:08
27	7	1:15
28	3	1:18
29	5	1:23
30	3	1:26
31	7	1:33
31 ½	6	1:39
32	7	1:46
32 ½	3	1:49
33	7	1:56
34	9	2:05
35	9	2:14
36	7	2:21
37	7	2:28

Fuente: Normas técnicas colombianas, NTC 706. 2003

La atmósfera del horno debe contener un mínimo de 0,5% de oxígeno con 0% de combustibles, se deben tener cuidados para evitar que se ejerza cualquier fuerza externa sobre los conos o la plaqueta de conos, tales como la llama o los gases. El horno se debe inspeccionar a intervalos de 10 minutos para asegurar la distribución uniforme de calor.

4.2.4.5 Cono pirométrico equivalente. El ablandamiento del cono será indicado por su inclinación hasta que la punta toque la plaqueta.

Siempre se debe reportar el hinchamiento, encorvamiento o fusión inadecuada de pequeñas partículas constituyentes. El cono pirométrico equivalente (CPE) se reporta en términos de los conos pirométricos estándar y del cono que más cerca corresponda en tiempo de ablandamiento con el cono de ensayo. Si el cono de ensayo ablanda después de un cono pirométrico Estándar pero antes del próximo cono pirométrico estándar y aproximadamente en el intermedio, se reporta como cono 33-34.

Si el cono de ensayo empieza el ablandamiento a un primer cono pero no cae hasta un cono mas tarde se reporta este hecho.

4.2.5 Desarrollo del ensayo. Las muestras a analizar se le realizaron un tratamiento de trituración, clasificación y molienda según lo dicho anteriormente. Después de haberla clasificado y molido se pasa la muestra por malla 70. Posteriormente se preparan los conos de ensayo en el molde metálico, hecho esto, se prepara la base para los conos hecha con material refractario cocinado anteriormente a altas temperaturas.

Se montan los conos en la base alternando con los conos estándar y se introducen en el horno cuyas características son:

Las características de la mufla son:

- ❖ Temperatura máxima: 1200°C
- ❖ Atmósfera del horno: oxidante.
- ❖ Control de temperatura: por medio de termocupla.

La máxima temperatura a la cual se evaluaron los conos fue 1100°C

debido a que la mufla no podía sobrepasar esta temperatura debido a la antigüedad de esta.

El resultado de este ensayo fue el siguiente: el cono muestra sobrepasa el cono estándar N° 12 que corresponde a la temperatura de 1050°C

Como conclusión del ensayo de cono pirométrico es:

- ❖ El material usado de cono muestra supera la temperatura máxima de ensayo y requerido en el proceso de producción de panela.
- ❖ La capacidad de calentamiento del horno disponible no permitió la evaluación a mayores temperaturas de las probetas de ensayo debido a que se podía causar un daño en las resistencias de la mufla.

5. ELEMENTOS PARA LA CONSTRUCCION DE HORNOS.

Existen diferentes tipos de hornos de acuerdo al proceso a seguir en ellos, como por ejemplo para los procesos de reducción se emplean hornos de cuba, para los procesos de acería se requieren hornos eléctricos, altos hornos y convertidores, para los procesos de combustión de combustibles sólidos se usan los hornos de hogar. En nuestro caso el reactor es un hogar para la ignición de combustible sólido. Por lo tanto cada horno es diferente en su constitución, forma, resistencia de sus materiales, etc. Por eso se dice que, las condiciones en que actúan o se encuentran las diferentes partes de los hornos no son iguales. La superficie interior de la mampostería de la zona de trabajo de los hornos soporta la acción de temperaturas más altas que, por ejemplo, en los hornos de fundición de acero llega a 1700°C.

Además la superficie interior de las paredes y de la bóveda esta continuamente bañada por los gases recalentados que arrastran consigo partículas de polvo, los óxidos, etc. Que pueden provocar reacciones químicas con la mampostería.

De este modo, la superficie interior de la mampostería no solamente se calienta excesivamente, sino que también esta sometida a al acción física y química de gases, metal, óxidos y escoria. La temperatura de las paredes decae rápidamente en dirección hacia la superficie exterior, donde en general no pasan más allá de 100 a 150°C.

En la cámara de secado, los canales de llamas, en las chimeneas de humo la temperatura se mantiene entre 300 a 600°C. Los fundamentos no se calientan sino unos 70°C cuando el trabajo es normal.

Las partes metálicas exteriores, la carcasa, la cubierta, las columnas de apoyo trabajan con temperaturas relativamente bajas (hasta 100°C); los interiores, durmientes, rieles de guía, las puertas de ventanas de carga, las de hogares soportan altas temperaturas (hasta 1200°C).

Distintas condiciones de trabajo de diversas partes requieren un material adecuado para la construcción de cada una por separado. Por lo tanto, en la construcción de los hornos se emplean los materiales comunes de construcción, los materiales refractarios y termo aislantes y

los metales; y la duración del horno depende no solamente de los refractarios utilizados sino también del modo en que se instalan; Si bien los hornos tienen usos específicos, lo cual los hace diferentes, hay elementos que son comunes a todos que a saber son:

5.1 CIMIENTO

Es la parte del horno que se apoya directamente en el suelo y que sostiene las demás partes de este. Lo único que se requiere de los cimientos es su absoluta solidez toda vez que debe de soportar las diferentes cargas estáticas y eventualmente cargas dinámicas.

Los cimientos para los hornos se hacen normalmente de hormigón armado para soportar cargas normales de manejo. Estas cargas y presiones no incluyen solamente el peso propio del horno y su carga sino también el empuje de los extremos de las vigas de anclaje.

El concreto es un material incombustible por consiguiente no emite gases tóxicos cuando esta expuesto a altas temperaturas. Además cuando el concreto esta expuesto a temperaturas del orden de 800°C es capaz de mantener su resistencia por períodos de tiempo relativamente largos. Como las estructuras de concreto estructural tienen acero como elemento de refuerzo, es muy importante la dimensión del recubrimiento como medio de protección puesto que la condición del metal genera un riesgo de mayor consideración.

Existen muchos factores que controlan la respuesta del concreto al calor y al fuego. El concreto visto a través del microscopio muestra la constitución de una fase continua correspondiente a la pasta del concreto y otra fase discreta formados por los áridos de diferente tamaño. De lo anterior resulta que el comportamiento del concreto frente a altas temperaturas depende del comportamiento de las partes.

Es muy importante la composición del concreto puesto que tanto como la pasta como el cemento y el agregado contienen elementos que al calentarse se descomponen. Son importantes la permeabilidad del concreto, el tamaño de los poros y la tasa de aumento de la temperatura por que gobiernan las presiones internas de los productos de la descomposición, en consecuencia será necesario proteger los cimientos de un sobrecalentado si se desea mantener la resistencia

total.

En algunos casos, el cimientos se encofra con un hormigón de peso ligero que contiene un agregado de cuarzo libre. Generalmente se prefiere una mezcla de tejas trituradas y cemento de alto contenido en Alúmina ya que es un material que puede calentarse a altas temperaturas sin roturas o sin perder enteramente su resistencia, a pesar de que no pueda confiarse en que soporte ninguna carga concentrada.

Cuando en los cimientos sujetos a la acción de calor se utilizan refuerzos se debe tener en cuenta las características de expansión de sus partes.

5.2 PLATAFORMA

Es el plano inmediatamente superior a los cimientos del horno y el inferior del aislamiento y la mampostería. Para su construcción se emplean diversos materiales: ladrillos refractarios, termo aislante, o el asbesto etc., el tipo de construcción y el espesor de la plataforma se dicta por la estructura del horno, su fin principal es dar una superficie sobre la cual pueden ser dispuestos todas las partes inferiores del horno.

5.3 AISLAMIENTO

El suelo u hogar del horno se aísla de los cimientos de hormigón para conservar el calor y al mismo tiempo evitar un sobrecalentamiento de los cimientos. El aislamiento se lleva a cabo colocando una capa de material aislante ya sea dolomita, cascarilla de arroz, arena, carbonilla apisonada sobre el cimientos, una capa de aire estancado de 5 cm de longitud, u otro tipo de material que presente buenas características de aislamiento.

5.4 SOLERA

Es la parte del horno que soporta la carga del material, debe ser suficientemente sólida y químicamente estable frente a las escorias.

Esta se apoya encima del aislamiento y de la plataforma. Se puede realizar en varias capas de material refractario. La ultima capa que se encuentra directamente en el frente de trabajo, se hace con refractarios básico, ácido o neutral según las diferentes temperaturas del horno dado y los probables procesos químicos entre la mampostería y el material.

5.5 PAREDES

Las paredes rodean la zona de trabajo del horno, generalmente ellas mantienen la bóveda del horno. Tienen la finalidad de retener el calor en la cámara de trabajo. Sin embargo, para que su función sea satisfactoria, deben ser estables bajo las severas condiciones de trabajo que aparecen. Las paredes deben proteger la zona de la perdida de calor, no permitir el escape de los gases del hogar ni succión del aire de la atmósfera hacia el interior del horno. La cara mas importante de las paredes es la interior la cual debe ser pareja, limpia, tener juntas delgadas. Se hacen con ladrillos enteros y sanos tanto en sus caras, como de aristas y ángulos.

En los hornos con altas temperaturas la cara interior se hace de ladrillos refractarios y la cara externa con ladrillo termoaislante o de los de arcilla.

El grosor de la parte refractaria de la pared, se hace calculando que el calentamiento de la parte menos refractaria de ella no sobrepase la temperatura admisible⁷. Cuando se construyen las paredes verticales hay que tener cuidado de que los ladrillos sean colocados horizontalmente.

Un especial cuidado debe presentarse a las terminaciones y las uniones en las esquinas, donde se chocan dos planes de mampostería. Si la pared se levanta en un blindaje macizo, entre éste y la mampostería el estrecho espacio se hace de empaquetadura vencible, la que debe permitir a la mampostería su normal expansión bajo los efectos del calor. En los hornos de pequeñas dimensiones se emplea para tal fin la chapa delgada de asbesto. En los más grandes, por ejemplo en los de cuba, la empaquetadura se hace de escorias o arena, de espesor de 40

⁷ Northon. Refractarios. 1972

60 mm.

Deben tenerse en cuenta ciertos factores limitantes antes de que pueda llevarse a cabo una construcción satisfactoria de las paredes.

5.5.1 Espesor. El espesor de la pared depende mucho de las condiciones de trabajo. Desde el punto de vista de la estabilidad, cuanto más alta sean las paredes, mayor ha de ser su grosor, tal como lo indica la tabla 6 que se presenta a continuación:

Tabla 6 altura de seguridad para paredes sin anclajes

ESPESOR DE LA PARED, [PULGADAS]	ALTURA MÁXIMA DE LA PARED SIN TRABAZÓN PERO CON ARCOS DE DESCARGA EN LA PARTE SUPERIOR, [EN PIES]
4,5	3
9	7
13,5	12
18	15

Fuente. Refractarios. Northon. 1972

Por otro lado la sujeta a un ataque severo de escoria o a un desconchado, debe añadirse un espesor extra par dar duración razonable.

La tabla 7 nos muestra el número de ladrillos requeridos para diversos espesores de paredes, ya sea simple o compuesta, datos que nos sirven para estimar el trabajo de albañilería a desarrollar. Para efectos de analizar estructuralmente la hornilla se tienen en cuenta el peso del ladrillo refractario, que para nuestro caso es un ladrillo de arcilla refractaria cuyo peso por pie cúbico es 120-140 Kg según se encuentra en la tabla 8:

Tabla 7 Paredes hechas con una sola clase de ladrillos

ESPESOR DE PAREDES EN PULGADAS	NÚMERO DE LADRILLOS RECTOS POR PIE CUADRADO
2,5	3,6
4,5	6,4
9	12,8
13,5	19,2
18	25,6
22,5	32,0
27	38,4
36	51,2

Fuente. Refractarios. Northon. 1972

Tabla 8 Peso de los refractarios

MATERIAL	PESO POR PIE CÚBICO
Ladrillo de arcilla refractaria	120-140
Ladrillo de calidad superior	130-150
Ladrillo de alto contenido en Alúmina:	
50	125-135
60	130-140
70	140-150
Al ₂ O ₃ fundida	153-196
Ladrillo de caolín	130-135
Ladrillo de sílice	100-110
Ladrillo de magnesita:	
Calcinado	180-190
Aglomerado químicamente	180-195
Ladrillo de carburo de silicio	136-158
Ladrillo de forsterita	150-160
Ladrillo refractario aislante:	
1600 °F	19-30
2000 °F	28-40
2300 °F	30-45
2600 °F	39-55
2800 °F	40-60
Ladrillo aislante	20-35
Moldeable de peso ligero	55-80 (45-75) calcinados
Arcilla refractaria plástica	120-130
Cromita plástica	175-200
Mortero de alta temperatura	90-120
Mortero de cromita	25
1 pie cúbico de ladrillo refractario requiere 17 ladrillos rectos de 9 pulgadas	
1 pie cúbico de ladrillo rojo requiere 21 ladrillos Standard	
1000 ladrillos fuertemente empacados ocupan 60 pies cúbicos	

Fuente. Refractarios. Northon. 1972

5.5.2 Mampostería de ladrillo. Esta debe asegurar la estabilidad constructiva y la hermeticidad de la zona de trabajo. Debe ser prevista la dilatación de sus partes determinadas, dado que no se calientan de forma pareja, y su integridad después de varios ciclos de trabajo.

Las juntas entre los ladrillos son los lugares más débiles de la mampostería así el mortero sea el adecuado en cuanto a que sus características sean similares a la de los ladrillos, no obstante su solidez es menor debido al actuar de los gases, por esto la calidad de la mampostería depende del espesor de las juntas, el cual se determina por la exactitud de la colocación de los ladrillos, las hiladas y del correcto estado de las caras y las aristas de los ladrillos. En la tabla 9 se distinguen las mamposterías y los espesores de juntas:

Tabla 9. Características de la mampostería.

CARACTERISTICA DE MAMPOSTERIA	ESPESOR DE JUNTA
Rustica	3 – 5 mm
Común	2 – 3 mm
Fina	1 – 2 mm
Esmerada	Menos de 1 mm

Fuente. Refractarios. Northon. 1972

Para obtener las juntas finas es necesario seleccionar con sumo cuidado los ladrillos y pulirlos en bancos especiales. Cabe tener presente que la parte más resistente del ladrillo es su cara intacta, su capa superior llamada biscocho, que se ha formado durante la tostación.

Por eso la superficie interior de la mampostería del horno debe ser formada por las caras intactas del ladrillo.

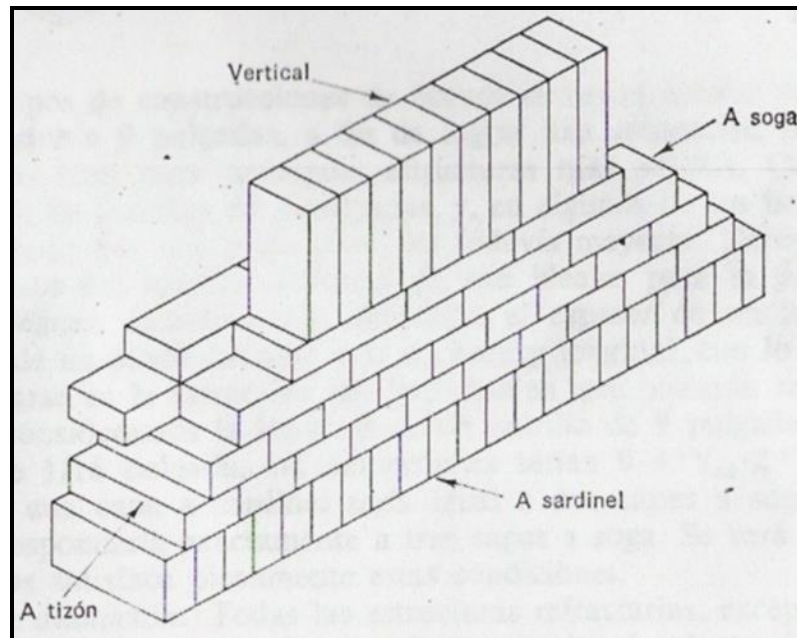
Cuando se fabrica la pared, no se permiten las juntas verticales que formen un paso ininterrumpido entre las hiladas de ladrillos, atravesando la pared. Debido a la desigualdad de asentamiento, tales juntas se abren en parte, violándose de esta manera la permeabilidad de la pared respecto a los gases. Por lo tanto, para recibir la trabazón de las juntas, las hileras se desplazan alternativamente a $\frac{1}{2}$ ó a $\frac{1}{4}$ de ladrillo una respecto a la que sigue, o ellas mismas se hacen combinadas, alternándoselas a sogá con las atizonadas.

Las juntas horizontales se hacen sin trabarse, porque su hermeticidad ya se asegura suficientemente por la cara de las hiladas superiores.

Algunas mamposterías requieren el uso de ladrillos perfilados. Cuando los modelos necesarios no se encuentran en plaza, se procede a recortarlos de otros ladrillos o se les reemplaza por piezas de hormigón refractario. Cuando hay que cortar un ladrillo por la mitad o reducir una de sus dimensiones, se traza con un lápiz una línea del futuro corte, se hace una pequeña canaleta con un cortafrío o herramienta análoga, a golpecitos suaves y secos; después de profundizarla con varias pasadas, el ladrillo se parte con uno de los golpes más recios. Luego se quitan las irregularidades con un pico o frotando contra otro ladrillo bien tostado.

5.5.3 Tipos de aparejo. Hay cuatro maneras de colocar los ladrillos estándar, tal como lo indica la Figura 38

Figura. 38 Tipos de aparejo



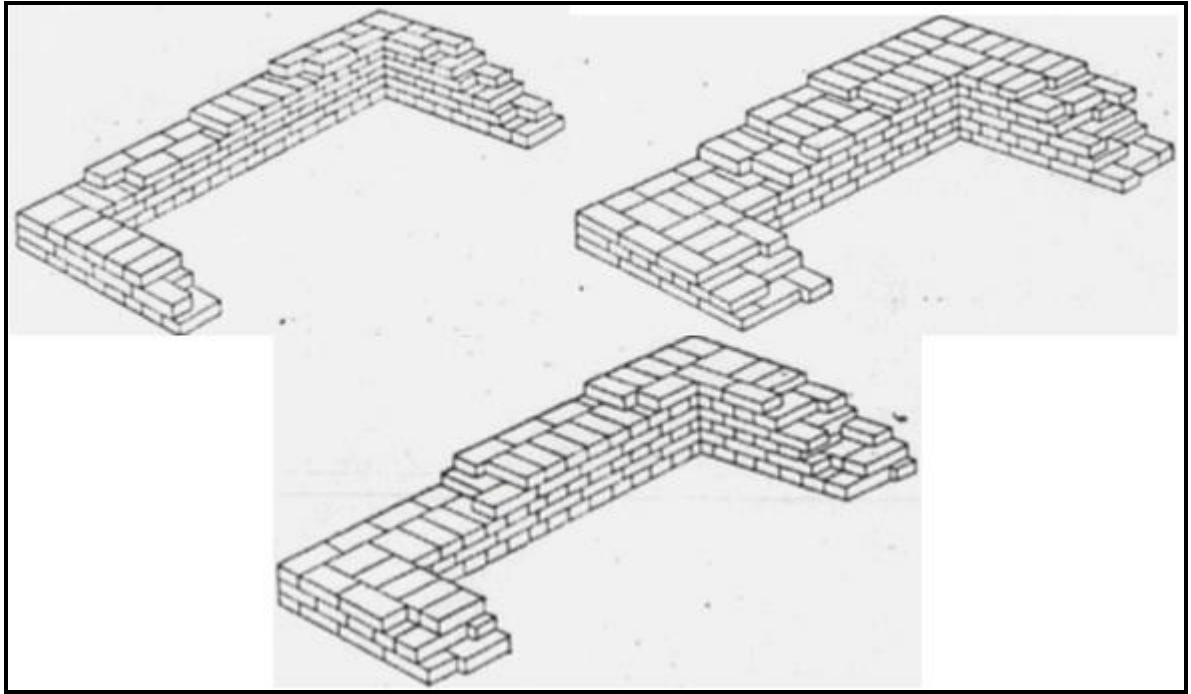
Fuente: Refractarios. Northon 1972

Las paredes de 9 pulgadas hechas con un solo material se construyen normalmente a tizón, o bien con capas alternativas a tizón y a soga. Las capas de ladrillos a sardinel se utilizan para cambiar la altura de la capa, para umbrales de puerta y para algunos suelos, pero no se usan a menudo en la construcción de paredes con refractarios.

Las capas con el ladrillo vertical no son particularmente estables, y no deberán utilizarse cuando se espere que la pared deba soportar una cierta presión o carga.

Al construir tipos más gruesos de pared, es necesario cementar las distintas capas juntas para formar un entramado fuerte. Los métodos y tipos de colocación de los ladrillos se muestran en la Figura 39 para paredes con diferentes espesores.

Figura. 39 Construcción de paredes utilizando ladrillos de tamaños estándar



Fuente: Refractarios. Northon 1972

Debería notarse que al final de la pared, es mejor rematar la junta con un ladrillo de 6 $\frac{3}{4}$ pulgadas, sustituyendo a uno de 9 pulgadas, en vez del de la sección transversal menor, ya que este tipo de construcción da mucha mayor estabilidad.

Con paredes compuestas, por ejemplo en una combinación de ladrillos densos y ladrillos refractarios aislantes, es necesario fijar una capa con la otra.

La regla generales que la unión se haga por las partes más fuertes ya que es la menos apta a la rotura. En muchos casos, la unión se establece con ladrillos de sección transversal inferior a la normal, mejor que con ladrillos rectos, sobre todo e los casos en que se utiliza un revestimiento de ladrillos refractarios aislantes, lo que reduce la conductividad térmica del conjunto.

Muchos tipos de construcciones de hornos se llevan a cabo con ladrillos de tamaño superior a 9 pulgadas, a fin de lograr una colocación más rápida del emparrillado o bien para conseguir estructuras más sólidas;

comúnmente se utiliza la serie de ladrillos de 3 pulgadas.

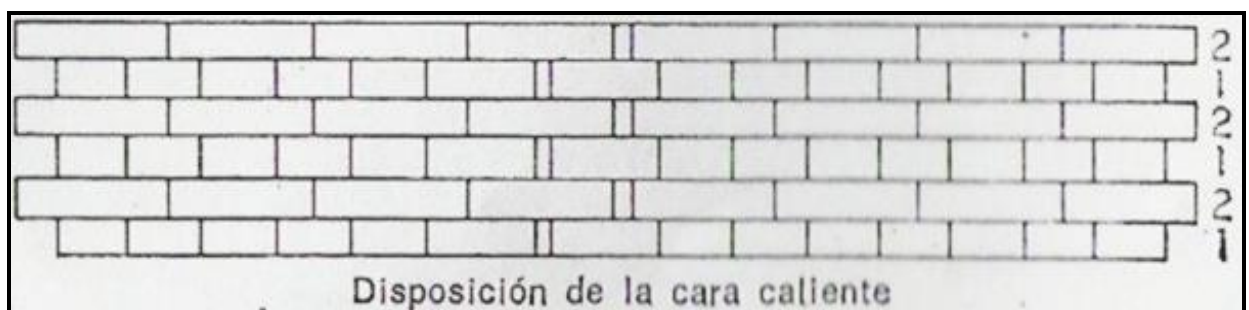
El espesor de un ladrillo debería relacionarse de un modo definido a la anchura y longitud, con lo que el ladrillo podría colocarse en la estructura sin importar en que posición se utilizará. Por ejemplo, si utilizamos un ladrillo de 9 pulgadas y utilizamos una junta de 1/16 de pulgada, las dimensiones serían $9 \times 4\frac{15}{32} \times 2\frac{15}{16}$. Con estas condiciones, una capa a sardinel será igual a dos capas soga, y una capa vertical correspondería a tres capas a soga. Se verá que el ladrillo de 3 pulgadas satisface plenamente estas condiciones.

5.5.4 Juntas térmicas de dilatación. Es tan importante tener juntas de dilatación en el hogar como en las paredes, pues si se olvidan tener en cuenta esta expansión se forzará la base del horno, se abombarán los tirantes o se causará un alabeo en el fondo. Las juntas de dilatación pueden colocarse en el hogar.

Las juntas térmicas deben compensar la dilatación volumétrica de la mampostería por el calor; el ancho y la disposición de estas juntas se determinan en concordancia con el calentamiento de una parte dada de la hornilla y de los coeficientes de dilatación de los materiales por el calor.

Una junta de dilatación en una pared debe ser una junta vertical recta, o bien puede ser una junta de separación, tal como se indica en las Figuras 40 Y 41.

Figura. 40. Juntas de dilatación en las paredes de 13 ½ pulgadas con ladrillos dispuestos alternativamente a tizón y a soga.



Fuente: Refractarios. Northon 1972

Figura. 41. Juntas de dilatación en las paredes de 9 pulgadas de espesor a base de ladrillos de magnesita a tizón.



Fuente: Refractarios. Northon 1972

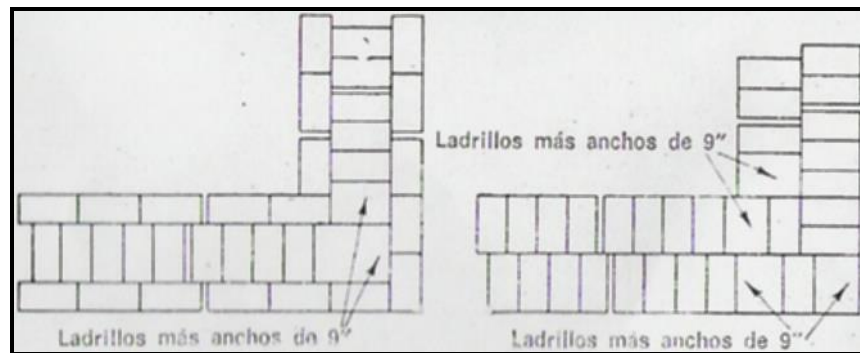
En otros tipos reconstrucción, especialmente cuando se utilizan ladrillos de sílice o magnesita, la expansión se tiene presente colocando una pieza de cartulina en cada junta vertical de la pared. Esta se quema y permite al conjunto de ladrillos el expansionarse individualmente y con libertad.

Cuando se utilizan juntas de expansión regulares, es común en hornos de funcionamiento a alta temperatura colocarlos a no más de 10 a 15 pies de separación, normalmente en las esquinas de los hornos en primer lugar y posteriormente en posiciones intermedias si es necesario.

En la Figura 42 se muestran juntas de expansión típicas cerca de la esquina. La Figura 43 indica una junta de expansión utilizada con un ladrillo refractario aislante en el interior de una funda de acero.

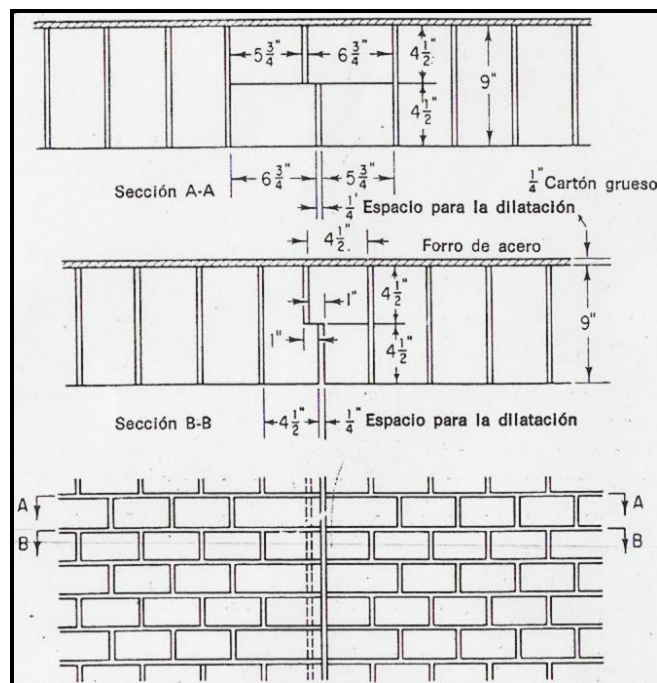
Si es necesario mantener las juntas herméticas al escape de gases, pueden utilizarse fibras de asbesto debidamente comprimidas o bien lana resistente a alta temperatura sobre la cara fría, a fin de precintarla completamente.

Figura. 42 Junta doble de expansión en una pared, cerca de una esquina. Pared de 18" mostrando capas alternadas construidas a tizón y a soga.



Fuente: F. H. Norton. Refractarios. 1972

Figura. 43. disposición de la junta de dilatación, en pared de ladrillo refractario aislante de 9 pulgadas de espesor



Fuente: F. H. Norton. Refractarios. 1972

A veces se necesitan juntas de expansión que permitan la dilatación vertical, como en las paredes apoyadas en su sección y donde la bóveda está soportada independientemente de las paredes.

En la tabla 10 se dan las anchuras de las juntas de dilatación en pulgadas por pie de la pared para varios tipos de refractarios y a varias temperaturas.

Tabla 10. Anchura de las juntas de dilatación en pulgadas por pie de longitud.

Tipo de Refractario	Temperatura máxima de la cara caliente.			
	1500	2000	2500	3000
Arcilla refractaria	3/64	1/16	5/64	3/32
Magnesita	3/32	1/8	3/16	1/4
Sílice	3/16	5/32	5/32	5/32
Cromita	1/16	5/64	5/64	5/32
Carburo de silicio	1/32	3/64	3/64	5/64
Caolín	1/32	3/64	3/64	5/64

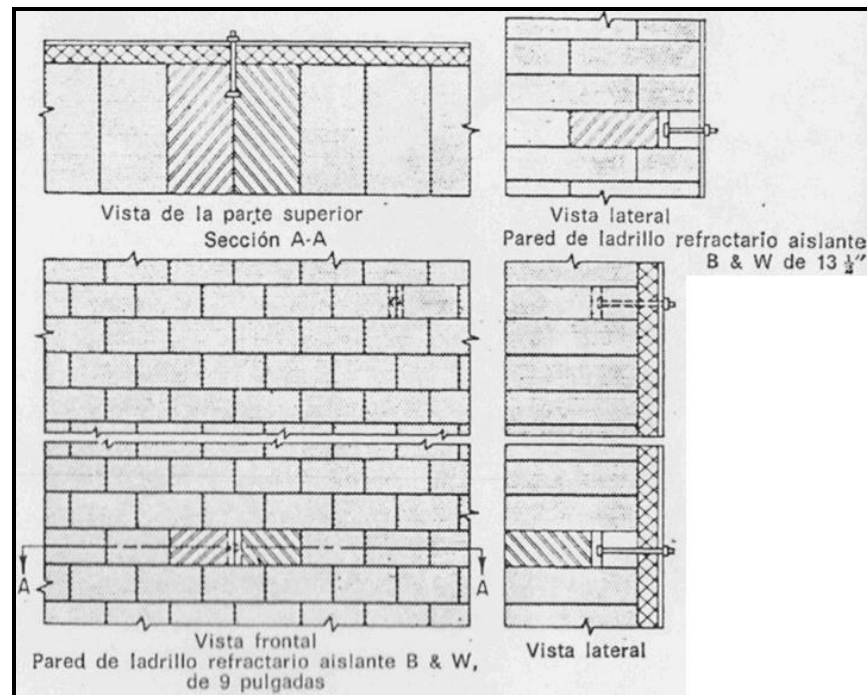
Fuente: F. H. Norton. Refractarios. 1972

5.5.5 Métodos de anclaje de la pared. Cuando se utilizan paredes muy altas o muy estrechas deben anclarse, a intervalos determinados, a la cubierta de acero para evitar el alabeo. Este anclaje se consigue normalmente con grapas que están sujetas en algún ladrillo especial.

En la Figura 44 se indica un método de anclaje de una pared de ladrillo refractario aislante con losas de ladrillo pesado, mientras que en la figura 45 se ilustra otro método en el que la ligazón a través de las grapas produce una excelente construcción para temperaturas medias y bajas.

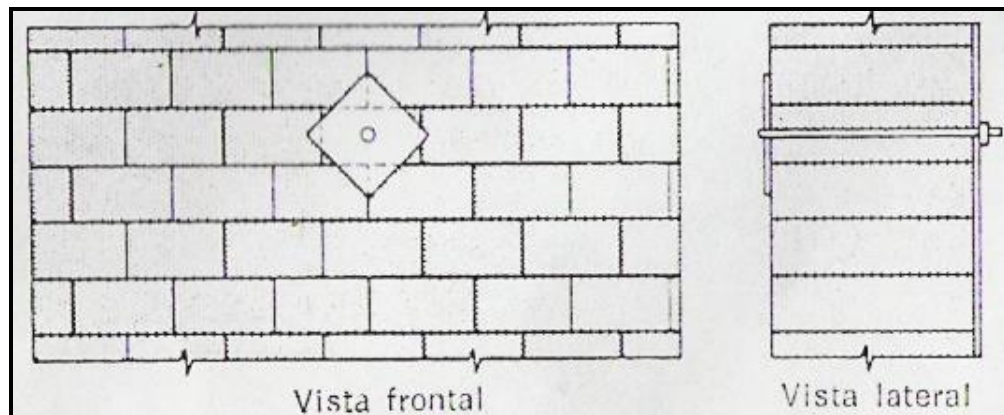
La Figura 46 muestra una pared de disposición transversal de refractario aislante.

Figura 44. Ligazón de las paredes de ladrillo refractario aislante con anclajes de ladrillo refractario. Son formas de anclaje de paredes a una carcasa metálica.



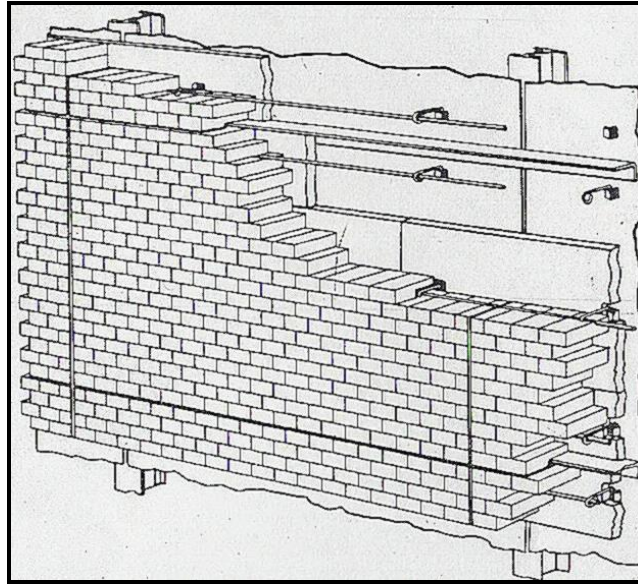
Fuente: F. H. Norton. Refractarios. 1972

Figura 45. Anclaje de una pared de ladrillo refractario aislante con pernos que atraviesan la pared.



Fuente: F. H. Norton. Refractarios. 1972

Figura 46. Pared de ladrillo refractario aislante seccionado mostrando los soportes.



Fuente: F. H. Norton. Refractarios. 1972

Las paredes altas, tales como se utilizan en los hervidores, incluso los de 18 a 22½ pulgadas de espesor, deben arriostrarse. Esto puede llevarse a cabo utilizando diversas piezas cerámicas en forma de gancho que son suministradas por diversos fabricantes.

5.5.6 Aislamiento en muros. Cuando se aplica el aislamiento al exterior de la pared, puede fijarse dentro o colocarse entre el refractario y la cubierta de acero en forma de un bloque. En algunos tipos de construcción, la cara exterior de la pared se hace de ladrillo rojo para proteger el material aislante.

Esta construcción es estable, pero aumenta el almacenamiento de calor en la pared, lo que es una desventaja para un funcionamiento intermitente, y también exige un espacio adicional en el suelo. Muchos hornos aislados tienen simplemente los bordes protegidos por un ángulo de hierro y la cara del revestimiento está recubierta con un cemento de consistencia dura y, posiblemente, con un recubrimiento de asfalto para evitar la acción del agua. Otro método de proteger el aislamiento se utiliza un forro de plancha de aluminio o acero aproximadamente de 10 longitudes de referencia (calibres).

5.6 VENTANAS DE TRABAJO

Para cargar el material combustible se practica una abertura en las paredes del horno llamada ventana de trabajo.

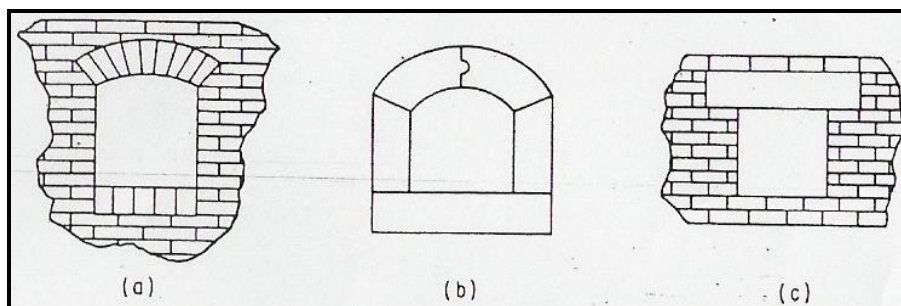
Una ventana tiene la bóveda en su techo que soporta el peso de una parte de la pared que se encuentra encima y es revestida de los costados por los marcos de fundición o con placas metálicas. Las ventanas se pueden cerrar con puertas a bisagras o a guillotina.

5.7 MARCOS O MONTAJES DE PUERTAS

La mayoría de puertas en los hornos constituyen uno de los lugares que mas problemas entrañan a la hora de diseñar la estructura, puesto que debilitan mecánicamente a la pared y porque el marco debe sufrir un desgaste considerable por la acción de la carga y de los gases calientes. Una de las primeras reglas en la construcción de puertas es el mantener una anchura lo más pequeña posible y a la vez que sea compatible con el acceso en el horno. Una estructura típica de puerta se indica en la Figura 47a, donde un arco de 4,5 pulgadas corona la cima de la abertura y se integra a la pared. Ya que los ladrillos frontales de 9 pulgadas son aptos para resistir golpes de ligera magnitud, el umbral de la puerta deberá hacerse de sólida construcción.

Esto puede conseguirse utilizando una capa de ladrillos a sardinel unidos con un mortero de fraguado al aire, o utilizando piezas mayores que el ladrillo de 9 pulgadas.

Figura 47. Tipos de aberturas de puertas



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

La Figura 47 b muestra una abertura de puerta, o marco, de un tamaño algo menor hecho con piezas especiales y es una construcción que generalmente da un buen servicio. En la Figura 47 c se muestra una abertura en la pared con una pesada teja cruzando por arriba. Esta construcción además de que es satisfactoria para trabajo a baja temperatura, debe evitarse para hornos de alta temperatura, ya que la pieza cerámica usualmente se rompe por el centro y los extremos rotos se escorifican.

En las estructuras que funcionan a baja temperatura, se coloca un montaje de puerta de acero en la parte exterior de la pared para proteger la obra de fábrica. Se suelda todo junto con un ángulo de hierro estándar y se convierte en una estructura sólida, tal como se indica en la Figura 48a. Para hornos a temperaturas superiores, tales como el horno de hogar abierto, se utiliza un montaje de puerta enfriado generalmente por agua. Mantiene el emparrillado en su forma original y resiste con gran extensión el desgaste a que está sujeto por parte de la maquina de carga.

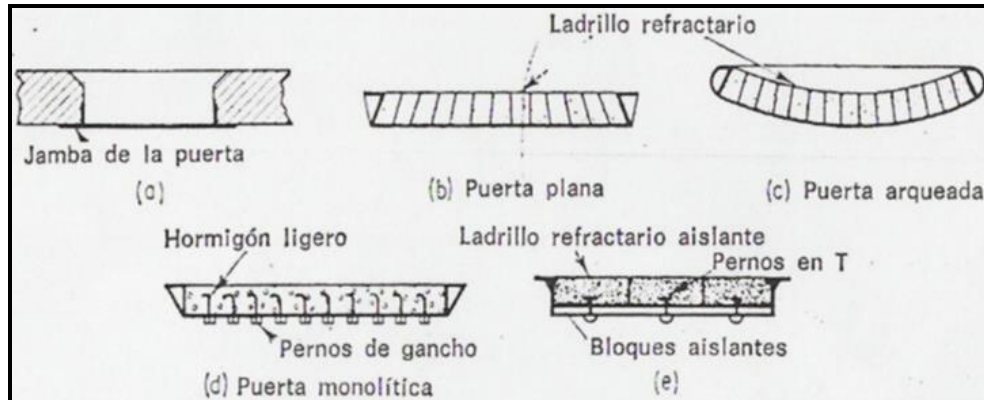
5.8 PUERTAS

Las puertas de los hornos casi siempre se deslizan en sentido vertical, con un contrapeso para balancearlas. El peso de la puerta debería mantenerse lo más bajo posible a fin de reducir el coste de los soportes y hacer más rápida la operación de abrir y cerrar.

Existen dos tipos generales de puertas son: la puerta plana y la puerta arqueada, tal como se ve en las Figuras 48b y c, donde estos modelos están encerrados en el marco de la puerta para evitar que redoblen hacia dentro. Una puerta de este tipo soportará un desgaste mecánico considerable, pero es más bien pesada y conduce mucho calor fuera del horno.

Recientemente las puertas de los hornos ha comenzado a revestirse con hormigón de peso ligero fijado rígidamente en el lugar correspondiente por medio de clavijas en forma de gancho, tal como se ve en la Figura 48d.

Figura 48. Construcción de puertas



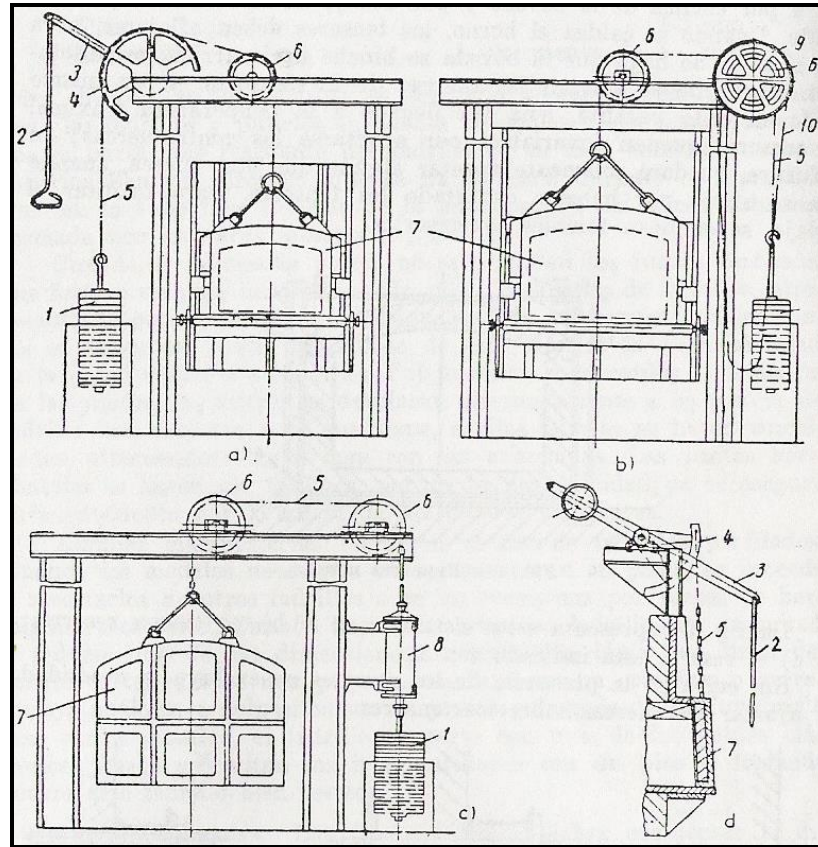
Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

Esta construcción es muy simple de revestir, da una puerta de peso ligero y tiene una conductividad calorífica relativamente baja. Otra construcción que puede funcionar a temperaturas más altas se muestra en la Figura 36e, donde la puerta está revestida con ladrillos refractarios aislantes fijados en el marco de la puerta. Esto da una construcción de peso ligero y además es un aislante excelente; esto último es un factor de gran importancia para la comodidad de los obreros que trabajan alrededor del horno.

Las puertas generalmente se abren sobre sistemas de bisagras ó sobre guillotinas. Las puertas que se abren sobre las bisagras requieren mas espacio libre frente a la pared del horno ya que la superficie interna de ellas irradia mucho calor contra el hombre que atiende la ventana; por eso se emplean poco, solamente en algunas estructuras de las cámaras de secado.

Las puertas a guillotina penden de cables o cadenas que llegan en los mecanismos elevadores, como muestra la Figura 49, donde a) mecanismo elevador es manual a palanca, b) también manual, pero con cadena sinfín, c) semimecánico con neuma o hidrocíclico, d) manual a cadenas o cables, los demás detalles son: 1- contrapeso, 2. vara de tiro, 3. palanca, 4. rueda directriz, 5. cable o cadena, 6. rodillo director, 7. puerta, 8. neumocilindro, 9. polea para cadena, 10. Cadena sin fin.

Figura 49. Mecanismo elevador de puertas.



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

Como se ve, la puerta puede ponerse en movimiento mediante el cambio manual de la palanca, cuando se trata de pequeña altura de recorrido, o el sistema de cadenas o cables y poleas con sus ruedas directrices, cuando se trata de elevar la puerta a un nivel apreciable.

El mecanismo manual puede ser reemplazado por semimecánico por aplicación de electromotores o fuerza hidroneumática.

El mecanismo elevador de las puertas en los hornos grandes está montado en las columnas levantadas sobre las fundaciones especiales; los mecanismos para las puertas pequeñas, se fijan directamente a algunas partes reforzadas del esqueleto. En los hornos con los mecanismos la elevación y la bajada de la puerta se combinan con las instalaciones tales como las topadoras, los expulsadotes.

Para disminuir la pérdida de calor por las aberturas, las puertas se hacen más grandes que éstas en 50-100mm por lado; además se revisten con materiales refractarios o termo aislantes. Para que se apoyen mejor, con frecuencia se arman en forma algo inclinada en posición de cierre; también van provistas de pasadores. En los hornos de solera extraíble, en los verticales térmicos, la hermeticidad se consigue a veces con la introducción en la estructura del horno de cierres de arena.

Actualmente la hornilla panelera cuenta con una puerta que consiste en una lamina metálica únicamente, y en la boca de entrada un marco en fundición gris.

5.9 BÓVEDA

La bóveda es una de las partes más responsables del horno generalmente soporta temperaturas muy altas. Como los gases calientes en la parte superior de la zona de trabajo se concentran con una presión superior a la normal, la bóveda debe ser impermeable.

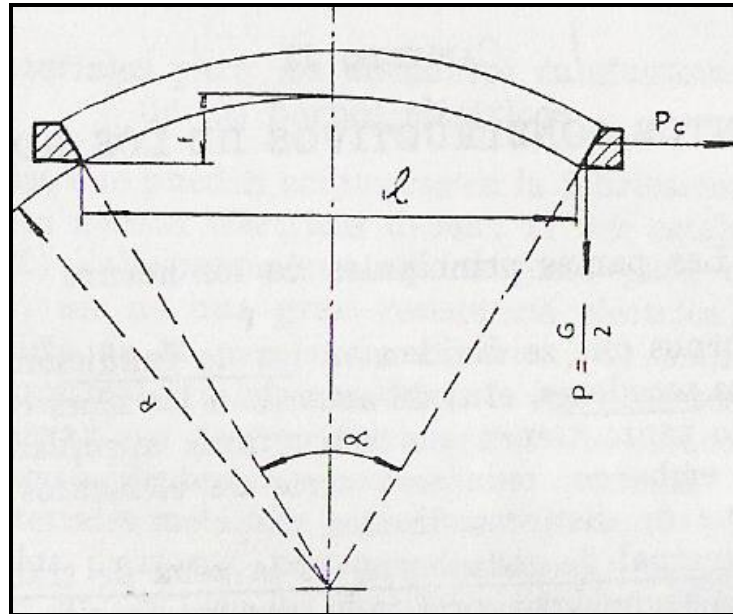
Existen cuatro tipos de bóvedas:

5.9.1 Planas de ladrillos de grandes dimensiones. Son bóvedas raras en cuanto al tipo de ladrillo ya que estas no son estándares, se emplean en los hornos térmicos y eléctricos de fundición que trabajan con temperaturas de la zona de trabajo próximas a 900°C

5.9.2 De arco: Las bóvedas de arco son las más frecuentes. El corte transversal de una bóveda de arco se puede representar en la Figura 50 del radio constante (R), la imposta (x), el ángulo al centro (α), la flecha de la bóveda (f).

El valor de α oscila entre 60 y 90°. La flecha por regla general, es 12-15%, de la cuerda.

Figura 50. Bóveda de arco



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

La reacción provocada por la carga del arco en la imposta puede ser calculada por la fórmula:

$$P = [(G \cdot L) / (8 \cdot f)] \cdot k$$

Donde:

P= La componente horizontal de la reacción;

G= Peso del sector de la bóveda en Kg, por un metro lineal del largo;

L= Cuerda, m;

F= flecha, m;

K= coeficiente, que comprende la dilatación del ladrillo por el calor y que depende de la temperatura del horno.

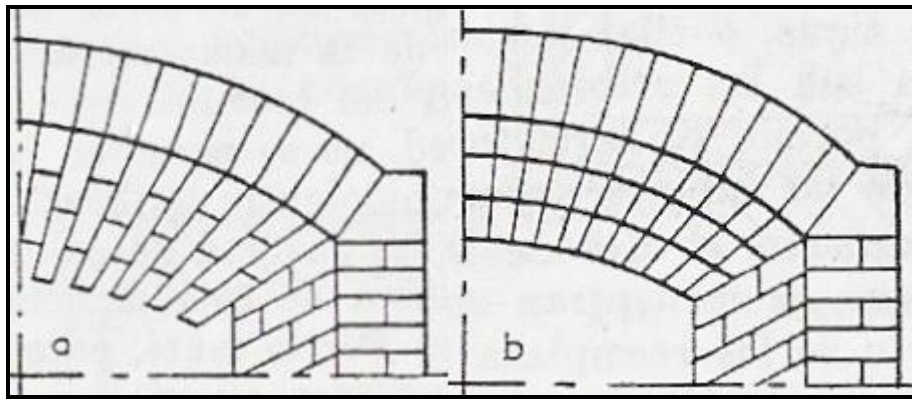
Sus valores son:

Temperatura del horno °C	900	1000	1300	1500	1750
Coeficiente k	2	2,5	3	3,5	4

Las bóvedas se hacen con ladrillos acunados o combinación de estos con los derechos; hay dos modos de construirlo: la mampostería con trabazón (Figura 51 a), (cuya ventaja esta en la mayor densidad de la

obra pero se dificulta la expansión de los ladrillos porque se encuentran finamente ligados entre si) y la anular (Figura 51 b), (proporciona una bóveda de menor densidad por lo tanto entre los anillos se forman grietas a través de los cuales los gases se abren camino y se facilita la reparación porque, generalmente caen los ladrillos enteros y los huecos formados tienen la forma rectangular)

Figura 51. Mampostería de la bóveda a) con trabazón; b) anular.



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

Para la construcción misma de la bóveda se necesita un encofrado. La colocación de ladrillos se hace desde la imposta hasta la clave de la bóveda y se lleva simultáneamente de ambos extremos. El último ladrillo, la clave, se introduce en el centro del arco con fuerza, a golpes.

En las bóvedas de mucha luz, se hacen a veces tres claves, dispuestas simétricamente. Si la bóveda se construye de varias hileras de ladrillo, no se emplea la mezcla entre las hileras, sino que cada una se construye con un mortero que absorbe las tensiones originadas por el calentamiento desparejo en el sentido del espesor.

Para disminuir las pérdidas de calor en los hornos de bajas temperaturas, sobre la bóveda se vierte una capa de material aislante: polvo de "trepel", escorias, etc.

5.9.3 Semicirculares o arco de medio punto. No son frecuentes, se caracterizan por los esfuerzos mínimos en las impostas. Pero debido a su estructura resulta excesivamente grande el espacio por debajo de la bóveda.

5.9.4 Bóvedas suspendidas. Estas bóvedas se construyen con ladrillos perfilados que se fijan en la estructura metálica suspendida en estribos especiales. El uso de este tipo de bóvedas permite disminuir el consumo de calor para calentar la mampostería en virtud a: 1. que el volumen de la misma es menor y 2. Es posible el empleo de materiales refractarios más livianos; las bóvedas de este tipo resulta ser fáciles para reparar más sin embargo su construcción es más complicada que la de otras.

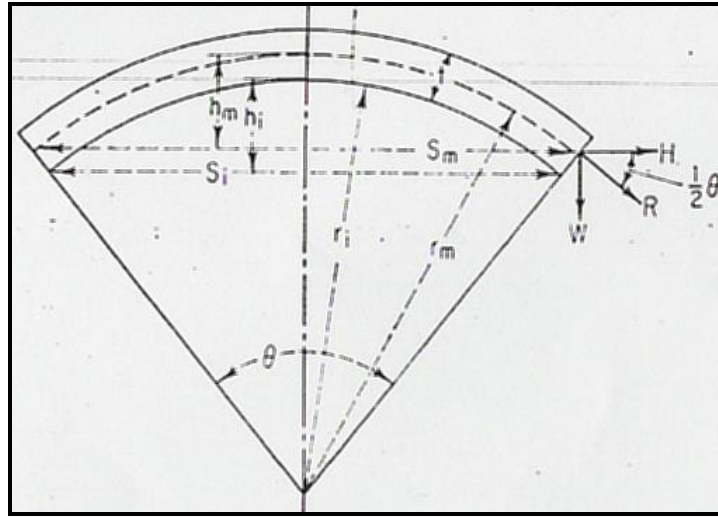
A veces se usa un tipo combinado de arco y de suspensión simultáneamente.

5.9.5 Arranque de un arco.

❖ **Modelos y tensiones:** el arco circular, que es el empleado generalmente, subtiende un ángulo de 60° , con lo cual el radio de curvatura es igual a su recorrido o vano. Sin embargo, no hay estandarización entre la abertura, o vano, y su elevación, ya que en algunos casos necesita un arco de gran altura para el espacio o zona de combustión y en otros se requiere un arco plano para forzar a que la llama se dirija hacia abajo, sobre las piezas. Debe notarse que el arco circular en sus formas más altas se vuelve relativamente inestable debido al hecho de que la dirección del empuje del arco toma la forma de una catenaria invertida que se separa cada vez más de la forma circular a medida que la altura del arco aumenta. Por lo tanto, se ha comprobado que era preferible siempre emplear la forma de catenaria cuando la relación entre la flecha y el vano es grande.

La curvatura de un arco circular se expresa normalmente en pulgadas de flecha por pie de vano o abertura.

Figura 52. Características de un arco circular.



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

En la Figura 52 se muestra un arco circular típico, con sus dimensiones principales. De este diagrama es fácil calcular los diversos factores y tensiones que se dan en las fórmulas que siguen. Debe notarse que para el cálculo de tensiones, debe utilizarse el radio medio, r_m , mientras que para estimaciones de la obra de fábrica es más conveniente el radio interior r_i . Sin embargo, la flecha en ambos casos será la misma, o sea $h_m/S_m = h_i/S_i$.

$$r_m = (S_m^2/8h_m) + (h_m/2)$$

$$h = r_m - \sqrt{(r_m^2 - (S_m/2)^2)}$$

$$\text{sen } \frac{1}{2} \theta = S_m/2r_m$$

$$W = \frac{1}{2} * l * t * d$$

$$R = W * \text{cosec } \frac{1}{2} \theta$$

$$H = W * \cot \frac{1}{2} \theta$$

$$L = 2 * \pi * r_m \theta / 360$$

Donde:

θ = El ángulo central

r_m = El radio hasta el centro del anillo del arco, en pies

r_i = El radio interior del anillo del arco

S = La abertura o vano, expresada en pies

h = la flecha en pies

t = el espesor, expresado en pies

W = La mitad del peso por cada pie de longitud del arco, en libras

H = El empuje horizontal en el arranque por pie de longitud, expresado en libras

R = El empuje resultante en el arranque por pie de longitud, expresado en libras

L = La longitud del arco medio

$\pi = 3,1416$

d = densidad del ladrillo por pie cúbico

En la tabla 11 se dan las características más importantes que deben tenerse en cuenta en los arcos circulares de varias alturas. Esta tabla se verá que es útil para cálculos rápidos sobre características de los arcos.

Tabla 11. Características de arcos circulares

Elevación en pulgadas por pie de distancia	Ángulo central	Fracción de círculo completo	Factor de peso, W_1	Factor de empuje horizontal, H_1	Factor de empuje resultante, R_1
1,000	37° 51'	0,1051	1,02	2,90	3,07
1,250	47° 04'	0,1307	1,03	2,30	2,51
1,500	56° 08'	0,1560	1,04	1,87	2,13
1,608	60° 00'	0,1667	1,05	1,73	2,00
1,750	65° 02'	0,1807	1,06	1,57	1,86
2,000	73° 44'	0,2048	1,07	1,30	1,64
2,250	82° 13'	0,2284	1,09	1,15	1,52
2,500	90° 29'	0,2513	1,12	1,00	1,44
3,000	106° 15'	0,2952	1,16	0,76	1,25
*6,000	180° 00'	0,5000	1,57	0,00	1,00
* Inestable. Para encontrar el peso del techo deben multiplicarse el valor medio del vano, l longitud, el espesor (en pies), el peso por pie cúbico y el factor W_1 . Para encontrar el empuje horizontal de una piedra de arranque debe multiplicarse el factor H_1 por la mitad del peso total. Para encontrar el empuje resultante de una piedra de arranque debe multiplicarse en factor R_1 por a mitad del peso total.					

Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

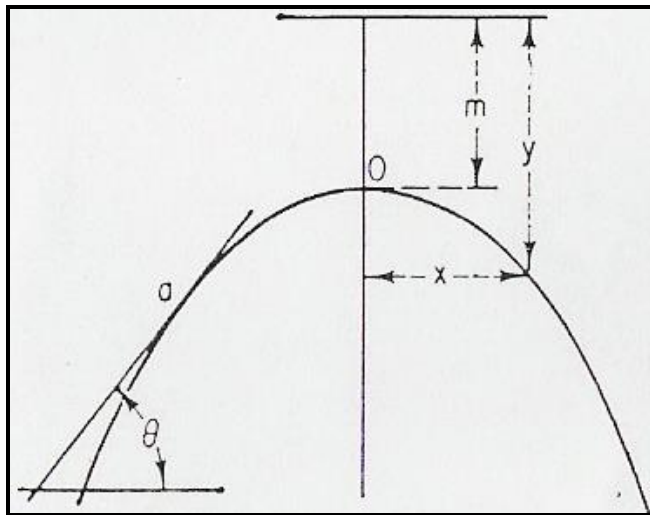
Las tensiones debidas a temperatura en un arco son difíciles de calcular, pero puede decirse que son mayores en los arcos más planos porque

para una expansión dada del arco se producirá una flecha mayor y también una mayor compresión en los extremos de los ladrillos. Para minimizar esta dificultad, especialmente con el ladrillo de sílice, a menudo se colocan tirantes e una disposición predeterminada a medida que el arco se calienta, a fin de mantener la curvatura constante. Hay también otra tensión de temperatura, debido al gradiente de temperatura existente en el mismo arco, obligando así a los extremos de los ladrillos a expandirse más que por la cara exterior, lo que constituye una fuerza de compresión adicional en la superficie interior.

Este último efecto puede minimizarse utilizando un aislante por la parte externa del arco.

La forma de la catenaria se ha encontrado que es particularmente satisfactoria para algunos de los arcos más altos, permitiendo así a las paredes laterales y a la bóveda el ser una curvatura continua con la eliminación casi completa de la estructura de hierro. El cálculo de la catenaria puede llevarse a cabo como sigue.

Figura. 53. Catenaria



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

La ecuación de la catenaria, ilustrada con la Figura 53, es:

$$Y = (m/2) * (e^{x/m} + e^{-x/m})$$

O bien en funciones hiperbólicas

$$Y = m * \cos (x/m)$$

Esta última forma será la más conveniente para trabajar.

El ángulo dependiente en cualquier punto de la curva viene dado por:

$$\theta = \text{tg}^{-1} (\text{sen}(x/m))$$

La longitud de la curva entre el vértice y un punto cualquiera es:

$$L = m * \text{sen}(x/m)$$

El radio de curvatura en cualquier punto es:

$$R = (y^2/m)$$

La compresión (o fuerza de tensión) que aparece en el vértice es:

$$H = w * m$$

Donde w = es el peso por unidad de longitud de la curva.

La tabla 12 muestra los cálculos de un arco típico en forma de catenaria.

Tabla 12. Cálculos de un arco típico

<i>X</i>	<i>x/m</i>	<i>Cosh(x/m)</i>	<i>y</i>	<i>y-m</i>
0	0	1,000	19,0	0
5	0,263	1,035	19,7	7
10	0,527	1,142	21,7	2,6
15	0,789	1,328	25,2	6,2
20	1,054	1,609	30,6	11,6
25	1,317	2,000	38,0	19,0
30	1,579	2,528	48,1	29,1
35	1,841	3,231	61,4	42,4
40	2,108	4,177	79,5	60,5
42	2,210	4,613	88,0	69,0

Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

En general se encontrará que es más conveniente construir la catenaria colgando una cadena en contrapeso a lo largo de una superficie vertical, de tal manera que pase por tres puntos representativos de los puntos de arranque y el vértice. La cadena que cuelga de este modo formará una catenaria perfecta y la forma puede trazarse directamente sobre la superficie.

5.9.6 Vanos y espesores de los arcos. El espesor y abertura de los arcos, depende mucho del tipo de refractario, de la temperatura del horno y de las condiciones de funcionamiento. En general, para una construcción de ladrillos de envergadura, los ladrillos de 4,5 pulgadas de espesor no deberán usarse para vanos de mas de 5 pies, los de 9 pulgadas se utilizarán hasta los 12 pies de abertura, el de 13,5 pulgadas para arcos hasta de 16 pies, y el de 18 pulgadas para arcos hasta de 20 pies. Sin embargo, se ha construido una serie de arcos más anchos que éstos que han funcionado con éxito a temperaturas moderadas. Por ejemplo, un arco de ladrillo de 18 pies devano y 9 pulgadas de espesor ha dado una duración excelente.

En el caso de la construcción con ladrillos refractarios aislantes, el espesor raramente sobrepasa las 9 pulgadas, pero en la construcción de equipo para funcionar a temperaturas moderadas, el vano a menudo es del orden de 15 pies, y, en un caso, un arco de 22 pies ha dado un resultado excelente.

5.10 CANALES

Los canales para conducir los gases de humo hasta la chimenea son de sección rectangular y de techo plano o abovedado.

El área de la sección se calcula a partir de velocidad media admisible del movimiento de los gases que ingresan en el canal que se toma de 1-2 m/s y de la cantidad de gases que entran por segundo, siendo la dimensión mínima aquella que permita un adecuada limpieza periódica de este.

Si los canales se encuentran cerca de los cimientos o columnas u otras partes, deben llevar el aislamiento de ladrillo de diatomita para evitar recalentamientos en aquellos. Cuando las aguas freáticas están muy

altas o los canales se encuentran a gran profundidad, deben ser protegidos por un aislamiento contra la humedad.

5.11 INSTALACIONES PARA IGNICIÓN DE LOS COMBUSTIBLES

La instalación para la ignición del combustible debe asegurar el suministro a la zona de trabajo de la cantidad necesaria de combustible y de la temperatura requerida. La estructura de tales instalaciones debe ser la más sencilla posible para permitir su fácil atención y renovar sus partes deterioradas por los repuestos.

Debe permitir también la posibilidad de regular la cantidad de combustible que se consume en una unidad de tiempo. De su estructura depende también la composición química de los gases que ingresan en la zona de trabajo; según los requerimientos del proceso, además de crear el ambiente adecuado en la zona de trabajo (ácido, neutral o reductor).

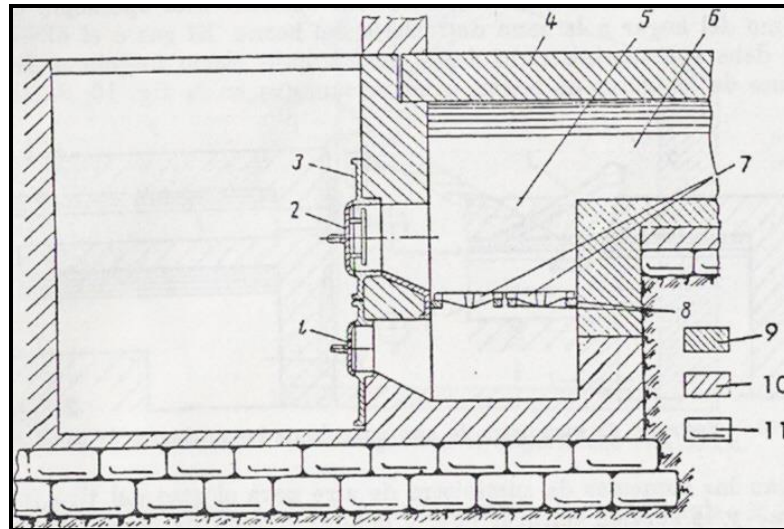
La clasificación más corriente para la ignición de los combustibles se hace en base a estos últimos: para los sólidos; para los pulviformes; para los líquidos y para los gaseosos.

En nuestro caso, como trabajamos con combustible sólido estas instalaciones se denominan simplemente hogares sencillos, ya que existen otras clases de hogares tales como los industriales, los mecanizados y los semi gasificadores.

5.11.1 Instalación para los sólidos. Estas instalaciones se llaman simplemente hogares, dividiéndose los hornos industriales en: sencillos, semigasificadores y mecanizados.

5.11.1.1 Hogares Sencillos: La mayoría de los hornos y secadores tienen hogares sencillos, con emparrillado horizontal, como se muestra en la Figura 54, donde: 1, puerta del cenicero; 2, puerta del hogar; 3, marco del hogar; 4, bóveda del hogar; 5, zona de trabajo del hogar; 6, conducto para el paso de los gases de hogar a la zona de trabajo del horno; 7, emparrillado; 8. Viguetas de apoyo del emparrillado; 9, de Chamota; 10, de ladrillo de arcilla; 11, de piedra.

Figura 54. Hogar con el emparrillado horizontal



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

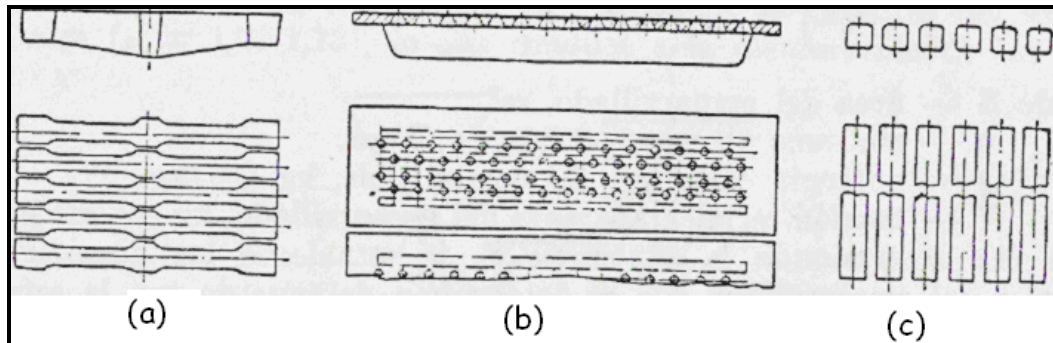
Generalmente el combustible se carga en el hogar en la capa de 150–250 mm, distribuyéndose sobre el emparrillado. La parte situada por debajo del emparrillado se llama cenicero; la situada por encima, zona de trabajo del hogar. El aire penetra en el cenicero, de donde, debido a la diferencia de presiones, pasa a través del emparrillado y el combustible.

El emparrillado es generalmente de hierro fundido, así como lo son también las viguetas sobre las cuales se apoya. Se compone de varas sueltas colocadas juntas Figura 55a; este tipo sirve casi para toda clase de sólidos.

En la Figura 55b, se presenta el emparrillado en forma de plancha agujereada, tipo que sirve para el carbón muy menudo y para la combustión de antracita.

A veces se encuentran también emparrillados formados por varas de acero laminado, como se ve en la Figura 55c.

Figura 55. Tipos de emparrillado.



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

Las puertas de hogar se hacen de hierro fundido; llevan desde el lado interior el biombo metálico para disminuir la irradiación de calor. En las puertas de hogares grandes se practica una pequeña abertura circular, mirilla, provista a su vez de una tapita. La estructura de las puertas de hogar debe asegurar la hermeticidad y, a la vez, permitir su rápido retiro. Las puertas de los ceniceros se hacen también de hierro fundido; cuando el tiro es natural, la puerta debe prever la posibilidad de modificar la cantidad de aire que ingresa en el cenicero; cuando funcione el tiro artificial; la puerta debe cerrarse herméticamente, para evitar que el aire inyectado salga afuera por el cenicero.

En los hogares sencillos con los emparrillados horizontales durante la combustión tiene lugar los mismos procesos que durante la gasificación.

Se exceptúa solamente el proceso de la reducción de ácido carbónico, cuyo desarrollo está limitado en los hogares a causa de poca altura de la capa de combustible. La diferencia entre el proceso de hogar y el de gasogenerador está en el precaldeo, el secado, la salida de los volátiles y la combustión del coque; bien que son simultáneos, sus desarrollos o son iguales al lapso entre dos cargas sucesivas. Después de una nueva carga del combustible prevalecen los volátiles y su combustión en la cámara de hogar junto con la ignición del coque en la capa. En este momento, en el hogar se establecen las temperaturas más altas. Por fin, antes de una nueva carga ocurre la combustión complementaria del sólido, lo que va acompañada por la disminución de la temperatura en el hogar.

Los principales defectos de los hogares con el emparrillado horizontal son: Variación del régimen técnico en un lapso dado, alto coeficiente del exceso de aire por ser incompleta la combustión del sólido, posibilidades limitadas de precalentar el aire por el peligro de escoriar el hogar y destruir el emparrillado, engorro de atención del hogar.

Los parámetros que debe ser tomados al proyectarse un horno ante todo son: la superficie de emparrillado y el volumen de la zona de hogar. El trabajo del emparrillado se caracteriza por el valor de la tensión térmica aparente, igual a la cantidad de Kg-caloría obtenidos desde 1 m² del emparrillado en una hora. Esa tensión térmica aparente, la superficie buscada se encuentra por la formula:

$$S = (Q * q) / f, \quad \text{unidades [m}^2\text{]}$$

Donde:

S = área del emparrillado, m²,

q = consumo de combustible, Kg/ hora,

Q = potencia calórica del combustible, Kcal / Kg,

f = tensión térmica aparente del emparrillado, Kcal / m².

Una vez determinada la superficie S, se establecen las dimensiones lineales del emparrillado que se determinan de acuerdo con la estructura del horno. Para que la atención del hogar no sea difícil, el largo del emparrillado no debe pasar de 2400 mm, ni su ancho en el frente del hogar, 1200 mm por una puerta.

El volumen del hogar se determina partiendo de la tensión térmica aparente del volumen del hogar, la cual, igual que Q/S, depende del aspecto y la calidad del combustible.

Dada la potencia térmica, el volumen se hallará por la formula:

$$V_h = (Q * q) / f_1$$

Donde:

V_h = volumen de la cámara de hogar, m³;

f₁ = tensión térmica aparente del volumen de hogar Kcal / m³ hora.

Los valores de las tensiones térmicas aparentes de los emparrillados y de los volúmenes de hogares para las calderas se dan en la tabla 13.

Cuando se proyectan los hogares de los hornos, se recomienda tomar la tensión igual a 70 – 80% de las normas para los hogares de calderas.

Tabla 13. Tensiones térmicas de los emparrillados y del volumen del hogar.

COMBUSTIBLE	TENSIÓN TÉRMICA APARENTE		Coefficiente del exceso de aire
	Del emparrillado Q/q Kcal/m²horas	Del volumen del hogar Q/V_1 kcal/m³ hora	
Carbones de piedra	$(700 / 800) * 10^3$	$(250 / 300) * 10^3$	1,4
Antracitas clasificadas	$900 * 10^3$	$(250 / 300) * 10^3$	1,3
Antracitas sin clasificar	$800 * 10^3$	$(250 / 300) * 10^3$	1,5
Lignitos	$(700 / 900) * 10^3$	$(250 / 300) * 10^3$	1,4

Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

Obtenidos el volumen y el área del emparrillado, se determina la altura del hogar.

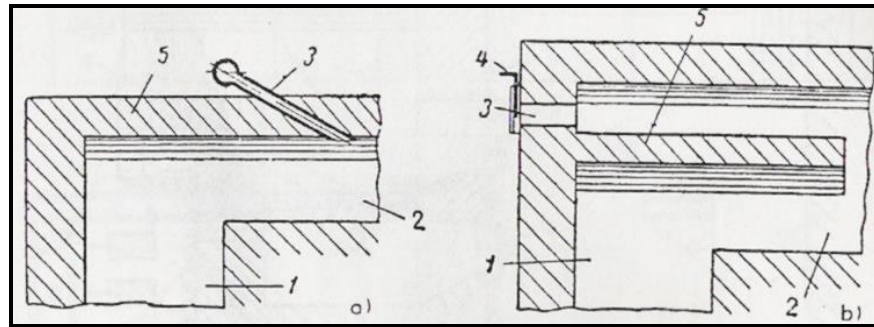
La presión de la inyección del aire que se manda por debajo del emparrillado y de la capa de combustible que ésta encima del mismo.

Por eso la forma con que los gases entran a través de los conductos de humos en la zona de trabajo del horno, se determina en general por la altura del hogar.

Si se considera necesario diluir los gases de hogar con el aire para rebajar la temperatura, es mejor efectuar esta operación en el camino del hogar a la zona de trabajo del horno.

El gas o el aire más frío debe ser suministrado desde arriba bajo cierto ángulo a la corriente de los gases de hogar, como se muestra en la Figura 56.

Figura 56. Esquema de suministro de aire para diluir los productos de combustión.

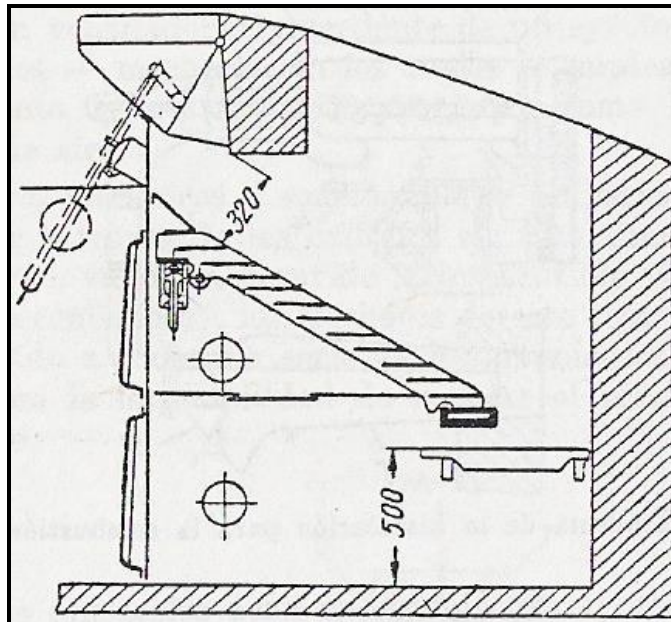


Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

donde se indican los esquemas de suministro de aire para el caso del tiro forzado (a) y la succión natural (b), y donde: 1. zona de hogar; canal de comunicación con la zona de trabajo del horno; 3, cana de suministro de aire; 4, puerta; 5, bóveda de a zona de hogar.

La combustión transcurre más pareja en el hogar cuyo emparrillado está construido en escalones (Figura. 57).

Figura 57. Hogar con el emparrillado escalonado.



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

El ángulo de inclinación de las varas es algo menor que la del talud natural del combustible (30-35°). En la parte superior inclinada de emparrillado el combustible se seca y pierde una parte de los volátiles.

La parte horizontal del emparrillado abajo sirve para la ignición complementaria del combustible que no se había consumido totalmente en la parte superior. A medida que el combustible se extingue en la parte baja, su parte hecha coque se la hace pasar, empujando, a través de las hendiduras entre los escalones. De este modo, en distintas partes del emparrillado tienen lugar simultáneamente distintas etapas de combustión. Con ello se consigue el trabajo más parejo del hogar. El emparrillado de este tipo resulta más conveniente para la combustión de carbón menudo.

5.11.1.2 Hogares semigasificadores. En los hogares con emparrillados horizontales o escalonados todos los procesos de combustión terminan en el mismo hogar. En ciertos casos, para intensificar los procesos de la transmisión del calor conviene transportar el proceso de combustión a la misma zona de trabajo del horno. Cuando se emplean sólidos, este problema puede ser parcialmente solucionado mediante el uso de hogares semigasificadores, en los cuales, a la par con la estabilidad del proceso de combustión, se consigue también la constancia del régimen térmico.

El combustible se carga en capa gruesa (200-400 mm, para el carbón).

La principal condición del trabajo de tal hogar es el doble de suministro de aire, como lo demuestra la Figura 58, donde: 1, suministro del aire primario; 2, emparrillado; 3, zona de formación de escorias; 4, zona de combustión; 5, zona de trabajo; 8, suministro del aire secundario; 9, alimentador; 10, volcador del combustible; 11, mecanismo para revolver las barras del emparrillado; I, tolva con el combustible; II, zona del semigás; III, depósitos de escorias.

Por debajo del emparrillado se suministra un 60-70% de la totalidad del aire necesario para la combustión. Este aire se llama primario.

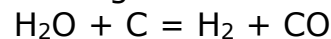
La parte restante, llamada aire secundario, entra en la zona de trabajo por las toberas a una velocidad del orden de 20-40 m/seg.

Por sobre el emparrillado se forma el gas que contiene el óxido de

carbono y los volátiles, los cuales son inyectados luego por el aire secundario en la zona de trabajo del horno, donde el gas al mezclarse con el aire, se quema. Como generalmente el aire secundario entra algo precalentado, en la zona de trabajo se obtienen temperaturas más altas y parejas.

En cambio, el trabajo del hogar mismo transcurre en temperaturas más bajas, lo que alarga su vida.

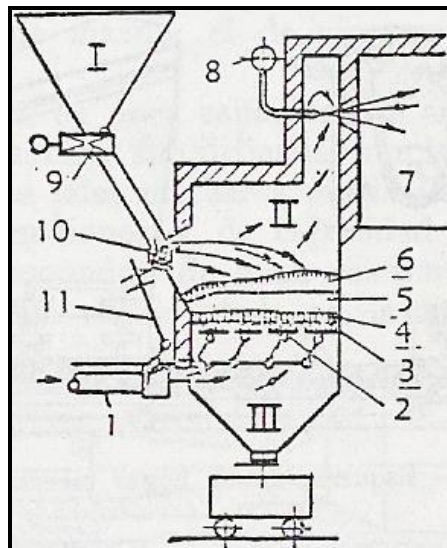
El aire que se suministra en los hogares semigasificadores muchas veces se humedece. Los vapores de agua, al pasar por el combustible recalentado, se descomponen según la reacción:



Y enriquecen el gas con los componentes combustibles. Además ellos disminuyen a temperatura en el hogar y facilitan la descompactación de las escorias.

El buen intercambio entre el gas y el aire, el trabajo mas estable del hogar semigasificador en comparación con el sencillo, permiten llevar el proceso de combustión con pequeños coeficientes del exceso de aire ($\alpha = 1,05 - 1,15$), lo que conduce a la disminución de las pérdidas de calor con los gases de escape y disminución de la oxidación del metal que se caldea.

Figura 58. Esquemas del hogar semigasificador para quemar los sólidos en capas gruesas.



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

Las dimensiones de estos hogares se calculan igual como para los sencillos, de acuerdo con las tensiones térmicas admisibles. El espacio del hogar que hace las veces de colector de semitas, se elige en conveniencia con la estructura del horno. Estos hogares se emplean para lignitos y carbón de gas.

6. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA HORNILLA

6.1 CIMIENTOS Y ESTRUCTURA

Para la realización de cimientos de una hornilla se debe retirar la capa vegetal del terreno y el material que no posea buenas características de estabilidad, o que sean arcillas expansivas, etc, y debe ser reemplazado por material de buenas características como el recebo, el cual se compactará y sobre el cual se realizarán los cimientos.

Para los cimientos del ducto de humos, se debe realizar una viga de amarre, siguiendo la silueta de la hornilla. Esta viga se realizará de 15 * 15 cm, en varilla corrugada de ½ pulgada o N°4, con flejes de 1/4 de pulgada y realizar columnas en la mitad del trayecto entre paila y paila.

Estas columnas irán encofradas dentro del muro y cubiertas por el ladrillo. Posteriormente se realiza una placa en concreto de 10 cm reforzada con una malla electro soldada; y encima de esta placa irá la estructura del horno.

Para la chimenea se debe realizar una viga alrededor de la base de la chimenea de tal forma que la construcción de la misma se realice encima de esta viga y debe realizarse una placa de concreto reforzado con varilla corrugada N°3 con espacios de 20 cm en los orificios. Esta placa debe tener un espesor no menor a 15 cm, buscando que el concreto recubra 5 cm como mínimo al acero.

Para la cámara de combustión Ward se recomienda realizar una vigueta siguiendo la silueta del horno con un espesor 10 * 15 cm, y con varillas de acero corrugado N°3, debe iniciar desde el nivel del suelo y de ella suben dos columnetas de varilla corrugada N°3, las cuales dividirán el largo de la vigueta a la mitad. A la altura de 1 metro se realizará otra vigueta de amarre y una viga central realizada con concreto refractario, sobre la que descansará la parrilla, dicha viga ira de columna a columna sobre la cual saldrán 4 pelos (varillas libres) para el amarre de la sección de parrilla horizontal, y a la altura que proporcionen 25 grados de inclinación desde 30 cm por encima del nivel de la parrilla horizontal hacia la puerta de alimentación, se dejarán pelos de 3/8 de pulgada

para amarrar por medio de soldadura la parrilla inclinada de la hornilla y en la puerta de alimentación la parrilla deberá iniciar su colocación empotrada entre el muro.

Finalmente la columna rematará en el final del troncocono siguiendo la silueta del mismo y servirá como apoyo para recibir las cargas de la cuña esférica y la bóveda. Los flejes de las vigas y columnas deberán seguir la misma distribución básica según las normas NSR 98.

Se debe realizar un refuerzo de acero con varilla de $\frac{1}{4}$ " siguiendo la silueta de la cámara, este refuerzo irá cada 4 hileras de ladrillo

Para la cámara plana de menos de 80 Kg/h de panela no es necesario realizar estructura en concreto como las que se han descrito anteriormente ya que el ancho mínimo del muro que es de 23 cm le da la estabilidad necesaria a la estructura pero para hornillas de mayor capacidad se recomienda la construcción de una viga de 15 * 10 cm, con acero de $\frac{1}{2}$ pulgada, además de lo anterior debe hacerse, para todo tipo de cámara plana, se hace una placa de concreto reforzado mínimo de 10 cm de espesor con una malla realizada de acero de mínimo $\frac{3}{8}$ " de diámetro, espaciada cada 20 cm.

También se debe tener en cuenta la expansión de los materiales, sobre todo de la varilla de acero aislándola por medio de grasa para permitirle una expansión y evitar que se agriete la placa.

Se deben realizar muros de contención para la estructura de la cámara, es decir para aislar el horno del terreno para evitar así el empuje de tierras hacia las paredes que provocaría la caída de estas. En la cámara Ward propuesta se puede amarrar la estructura utilizando cuatro correas horizontales de acero hechas con láminas de $\frac{1}{8}$ " y de 12 cm de ancho, estas se ubicarían cada 60 ó 80 cm.

6.2 PLATAFORMA

En caso que se requiera amarrar las partes inferiores de un horno, aislar o ubicar la totalidad del horno en una superficie por encima de los cimientos se usaría la plataforma; en el caso de la hornilla no es necesario usarla debido a que esta se va a construir directamente sobre el cimiento y el aislamiento.

6.3 AISLAMIENTO

Para aislar el hogar se usa una capa de ladrillo común para el piso y las paredes y luego una capa de material aislante que puede ser: ladrillo semi refractario, diatomita, aire estancado, arena... esta capa debe tener como mínimo de 10cm de espesor; con el fin de aislar el hogar de los cimientos, conservar el calor y evitar el sobrecalentamiento de este.

Posteriormente se ubica una capa de ladrillo refractario que corresponde al frente directo de trabajo.

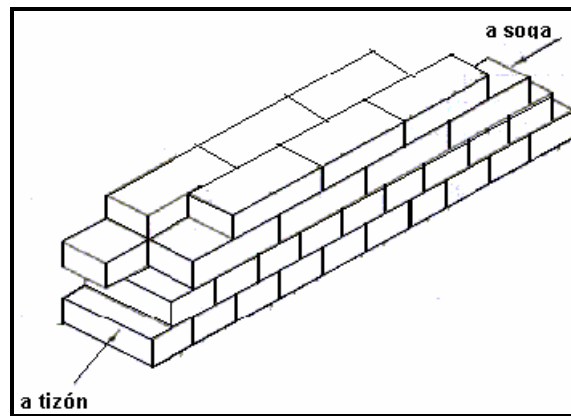
6.4 PAREDES

Las paredes de la cámara son importantes debido a que deben ser impermeables para evitar la salida de los gases a través de ellas con el fin de evitar el escape de estos, la pérdida de calor y la succión del aire de la atmósfera al interior del hogar, etc. Por lo tanto, dentro de la optimización del diseño se tuvo en cuenta consideraciones hechas en páginas anteriores y con lo cual se determina lo que a continuación se describe, aplicable a la construcción de los dos tipos de cámaras.

El espesor de la pared debe permitir la estabilidad de la estructura por lo tanto entre más alto el muro mayor debe ser su espesor. Partiendo de esta consideración, se dice que:

Para muros que posean una altura máxima de 2.10 mt. (7 pies), el espesor debe ser de 23 cm (9 pulgadas), y se utilizan para ello 12,8 ladrillos rectos en cámara plana por cada 30 cm² (pie cuadrado), teniendo un peso por cada 30 cm³ (pie cúbico) entre 60 y 70 Kg (120 y 140 libras). Los muros que posean este ancho (23 cm) se pueden construir a tizón y/o sogá, según se muestra en la Figura 59. Para la cámara plana se puede utilizar ladrillos a sogá y para la cámara Ward es más recomendable usarlos a tizón. Y para ambos casos cuando el ancho del muro aumente debido a la altura se usa una combinación entre tizón y sogá.

Figura 59. Disposición de ladrillos para el horno

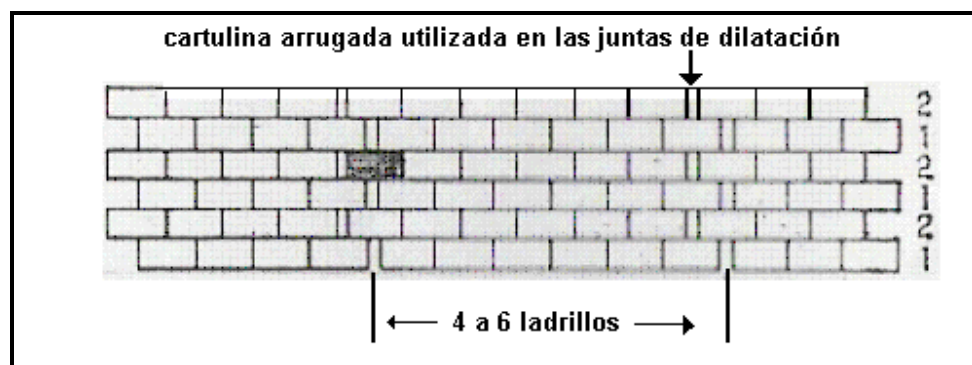


Fuente: Análisis del estudio

Las juntas de mampostería deben tener un espesor de 1 a 2 mm para mantener una hermeticidad de la estructura y evitar el agrietamiento de las paredes, para minimizar el efecto de la expansión de la sílice cuando alcanza los 800°C, con la consecuente pérdida en el rendimiento del hogar y agrietamiento del mismo.

Debe tenerse en cuenta la dilatación a que se someten las paredes y en consecuencia la construcción de las juntas térmicas de dilatación. Esta no debe ser totalmente vertical porque permitiría el seccionamiento en 2 partes de todo el conjunto por lo que las juntas de dilatación debe hacerse en zic-zac como se muestra en la Figura 60.

Figura 60. Juntas de dilatación



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

Esta junta de dilatación, de acuerdo al tipo de ladrillo y a la temperatura a que estará sometido el horno será:

Al emplear ladrillo de arcilla refractaria, la junta de dilatación será de 0.119 cm (3/64 de pulgada) por 30 cm (1 pie) de longitud y cuando se emplee caolín como refractario, la junta de dilatación será de 0.238 cm (1/32 de pulgada).

La junta debe llenarse con un material fácilmente combustible como cartulina arrugada en cada junta de dilatación y debe hacerse cada 4 a 6 ladrillos.

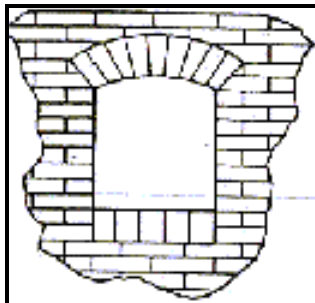
Los ladrillos usados en el horno se fabrican de acuerdo al análisis de laboratorio con una mezcla de 80% de caolín (arcilla refractaria) y 20% de chamota de este mismo material. La pega se realiza con material de las mismas características.

Las recomendaciones aquí escritas sobre juntas de dilatación se deben aplicar en la construcción de los dos tipos de cámaras.

6.5 PUERTA DE ALIMENTACIÓN

Para la realización de las puertas dentro del horno hay que tener en cuenta los marcos o montajes donde irán las mismas. El montaje más recomendado es en el cual se construye un arco que corona la cima de la abertura de la puerta, de acuerdo a la Figura 61, y esta irá rodeada con un marco metálico de fundición de hierro al cual se recomienda que vaya la puerta ajustada con rieles.

Figura 61. Marco de la puerta de alimentación



Fuente: M. H. Mawhinney. Hornos industriales. 1961

Esta puerta consiste en una puerta liviana hecha con una lámina gruesa de acero de N°18 ajustada en forma de puerta corrediza que permita la entrada del bagazo, sea fácil de manipular y no permita una pérdida excesiva de calor por esta durante el proceso de carga.

6.6 DISEÑO PROPUESTO DE HORNILLA

De acuerdo a algunas consideraciones básicas de diseño, a los datos tomados, al comportamiento de los gases en la cámara de combustión como resultado del análisis realizado, y a la forma más conveniente para la construcción de una cámara de combustión (ya sea Ward o plana) funcional y eficiente partiendo de la premisa de que el proceso panelero es por si mismo artesanal y se encuentra poca bibliografía al respecto, se realiza una propuesta de diseño y se presentan planteamientos matemáticos y formas que poseen un carácter semi empírico ya que se presentan algunas deficiencias en información al respecto. En virtud de lo anterior se propone lo siguiente:

6.6.1 Cámara Plana. Para el diseño y construcción de la cámara de combustión plana; después de obtener el área de parrilla y el volumen de cámara, se debe observar el dimensionamiento de éste y la forma que irá a tener, esto en relación a cámaras de combustión u otros reactores similares.

Para el dimensionamiento de este, debe tener como base:

Área de parrilla: **Ancho * Profundo** (para dar una parrilla rectangular)

La **profundidad** debe ser **2.5** veces el **ancho**, para un mejor almacenamiento y distribución del bagazo dentro del hogar, y para evitar que el bagazo se queme en el ducto sino en la cámara de combustión.

La altura de la pila de combustible es de 25 cm en promedio, por lo tanto, se recomienda que la parrilla vaya a 30 cm por debajo del nivel del ducto de humos.

Al finalizar los 30 cm se le dará al piso una inclinación de 30° reduciéndose la entrada al ducto de humos. Esta reducción pretende

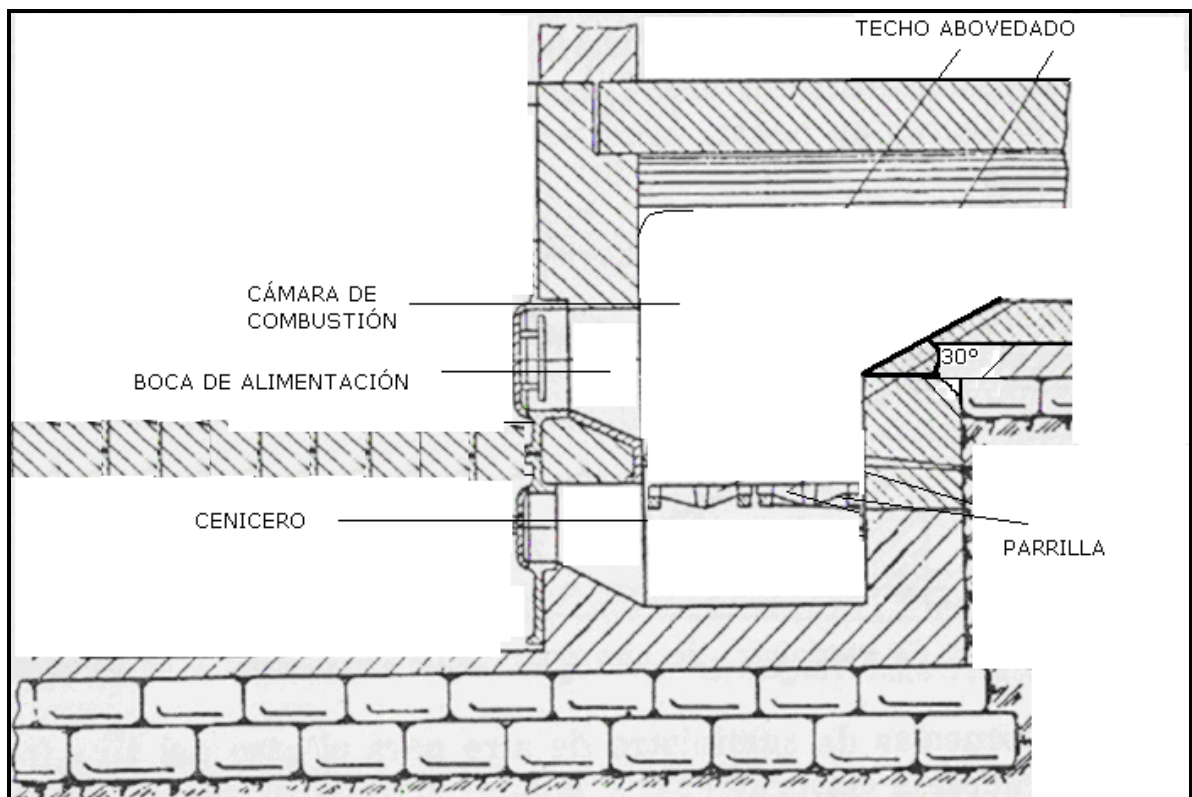
darle una mayor presión a los gases y por lo tanto una mayor velocidad. También disminuye la salida de hollín o in quemados.

La altura del hogar debe tener una relación con respecto al ancho de la cámara de 2.5; es decir: $\text{Altura} = 2/3$ del ancho, desde la parrilla hasta la base de la bóveda.

La altura del cenicero tanto en la cámara Ward como en la cámara plana corresponde a un metro de altura, que permite al operario retirar las cenizas de allí y permite la entrada de aire necesario para la combustión.

La cámara plana propuesta se muestra en la Figura 62 los planos correspondientes a las dos cámaras, están en el anexo 5:

Figura 62. Cámara Plana Propuesta



Fuente: El autor

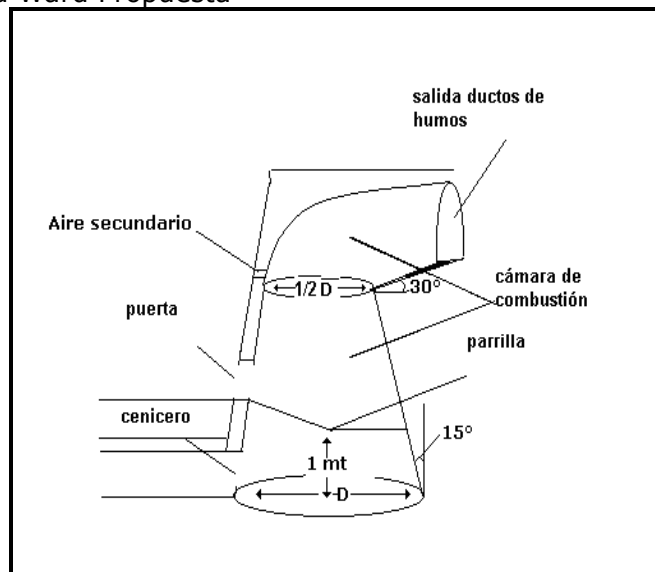
6.6.2 Cámara Ward. Para el diseño de la cámara de combustión Ward hay que tener en cuenta el hecho de la forma de la misma. Dentro de los principios básicos de diseño de hornos se encuentra la redondez de los mismos permitiendo obtener una presión de los gases uniforme dentro del horno, por que un horno cuadrado genera ángulos vivos en los que el calor se estaciona y que además generan turbulencia a los gases debido al choque de éstos directamente con los ángulos rectos.

Este análisis resulta del estudio y evaluación de datos de temperaturas tomadas en campo, de la experiencia y de los conocimientos adquiridos a través de la carrera.

Además, se debe buscar que dentro de la cámara se realice una combustión completa y que al salir de esta los gases solo transmitan el calor, por conducción, a las pailas para el proceso de evaporación de los jugos.

Para lograr esto se analizó y se concluyó en realizar la cámara de combustión en forma de cono truncado, con una salida o boca superior que equivale a la mitad del diámetro inferior o de la base, esta boca comunica a una segunda cámara cuya forma es de cuña esférica la cual a la entrada de ésta recibirán el aire secundario necesario para finalizar el proceso de combustión. La cámara Ward propuesta se muestra en la Figura 63, y en los planos del anexo 4:

Figura 63. Cámara Ward Propuesta



Fuente: el autor.

$$\text{Area} = \pi * (r+R) * g + \pi * r^2 + \pi * R^2$$

$$\text{Volumen} = 1/3 * (\pi * r^2 + \pi * R^2 + (\pi * r^2 * \pi * R^2) * h$$

Donde: r = Radio de la boca de salida de gases a la segunda cámara.

R = Radio de la base del hogar.

g = Longitud del tronco cono

h = Altura Del Hogar (1° cámara)

π = N° pi: 3.1416 aproximado.

La altura del hogar tiene una medida desde la base de la parrilla hasta el inicio de la segunda cámara de 1.5 veces el diámetro inferior o de la base: $h = 1.5 * D$

Cálculos segunda cámara:

$$\text{Volumen} = ((\pi * r^3) / 270) * n$$

Donde:

$$n = 90^\circ$$

r = Radio de la boca de salida de gases a la segunda cámara.

Los orificios del aire secundario deberán tener un ángulo de inclinación positivo de 15° a 20° y su diámetro interior debe ser levemente inferior al diámetro exterior, (por lo menos una tercera parte) para aumentar la presión del aire de entrada necesario para la segunda combustión y evitar la salida de los gases calientes por allí. Ya que en el análisis de la cámara Ward se determinó que los orificios del aire secundario no están cumpliendo su función y si están permitiendo la salida de los gases calientes.

Para guiar los gases al ducto, y para buscar un aumento en la presión de estos se realiza una reducción de un ángulo de 30° y no inferior a 20°, desde el final de la boca de la cámara. Está tendrá una longitud de 50 cm hasta empalmar con el ducto de humos; de tal forma que la altura en este punto del piso del ducto sea la mitad de la altura que se tiene al inicio de la rampa.

La altura del cenicero debe ser de 1 metro. El ángulo de inclinación de la parrilla es algo menor que el talud para alimentación del combustible (30-35°). La longitud de la parrilla inclinada debe ser de un radio y medio de distancia, y el resto corresponde a la parrilla plana sobre la

cual terminará su combustión, la puerta de alimentación debe tener una abertura mínima de 40 cm. de ancho por 40 cm. de alto siendo recomendable que la abertura de la puerta sea el doble de ancho que de alto, para la formación de una pila homogénea de bagazo dentro del horno.

En la parte superior inclinada de emparrillado el combustible se seca y pierde una parte de los volátiles. La parte horizontal del emparrillado abajo sirve para la ignición complementaria del combustible que no se había consumido totalmente en la parte superior. A medida que el combustible se extingue en la parte baja, se le adiciona bagazo el cual se hace pasar, empujando, a través de las hendidias entre los escalones. De este modo, en distintas partes del emparrillado tienen lugar simultáneamente las diferentes etapas de combustión. Con ello se consigue el trabajo más parejo del horno.

La parrilla de la cámara WARD varía en la forma de sus bordes en cuanto se tiene que ajustar a la forma del hogar, es decir debe poseer bordes circulares. Esta irá empotrada dentro del muro, ajustada con varillas (pelos) que salen de la viga de amarre.

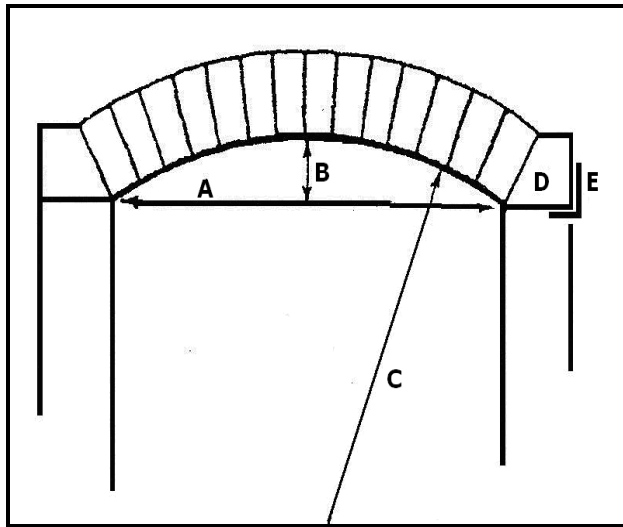
Tanto la parrilla inclinada como la horizontal en su punto de unión van soportadas sobre una viga de columna a columna y que tendrá unas dimensiones de 10 x 15 cm. El material para la realización de esta deberá ser concreto refractario o concrax para que soporte las altas temperaturas.

La parrilla tendrá un área libre del 50% en la medida de que las varillas serán de 2.5 cm. de ancho, al igual que los espacios entre estas

6.7 BÓVEDAS

La bóveda más estable es la de altura pequeña cuyas características son: A, es la luz; B, el la flecha; C, es el radio; D, el estribo y E, es el tope. Figura 64.

Figura 64. Características de la bóveda



Fuente: El autor.

Aunque la bóveda es auto soportable ejerce un empuje contra el estribo que debe ser contrarestado por un tope o un contrafuerte.

Generalmente se usan bóvedas que tienen una luz que abarca 60° de circunferencia. La flecha puede variar de aproximadamente 12 cm/m, hasta alrededor de 22 cm/m de luz. La siguiente formula aplicable a ambos tipos de cámara.

Siendo la flecha = $0.3 * A$

Donde:

A = ancho de la cámara.

Siendo la luz = $\frac{1}{2}$ de D,

Donde:

D = diámetro de la base del tronco de cono.

Con la flecha y la luz determinadas, puede determinarse desde una forma practícale radio con un compás hecho con un lápiz, un cordel y un clavo. Las prolongaciones de las líneas de los radios extremos determinarán la inclinación de los estribos de acuerdo a estos parámetros, se determina el número y forma de los ladrillos.

Para desarrollar el arco de la bóveda, se recortan plantillas de madera

del tamaño y forma de los distintos ladrillos para bóvedas número 1, número 2 etc. De acuerdo a la tabla número 14.

Tabla 14. Tabla de los ladrillos requeridos para formar bóvedas de diferentes luces.

BÓVEDA DE 11.5 CM. DE GRUESO Y 12.5 CM DE FLECHA POR METRO DE LUZ						
			NÚMERO DE LADRILLOS NECESARIOS POR HILADA			
LUZ cm.	FLECHA cm.	RADIO INTERIOR cm.	ARCO N°1	ARCO N°2	RECTOS	TOTAL.
30.5	3.8	32.3	5	2	-	7
45.5	5.7	48.5	3	7	-	10
62	7.7	64.6	-	12	-	12
76	9.5	81	-	12	3	15
91	11.5	97	-	12	5	17
106.5	13.5	113	-	12	8	20
121.5	15	129	-	12	10	22
137	17	145.5	-	12	13	25
152	19	161.5	-	12	15	27
167	21	178	-	12	18	30
182.5	23	194	-	12	20	32
BÓVEDA DE 23 CM. DE GRUESO Y 21 CM DE FLECHA POR METRO DE LUZ						
			NÚMERO DE LADRILLOS NECESARIOS POR HILADA			
LUZ cm.	FLECHA cm.	RADIO INTERIOR cm.	CUÑA N°1	CUÑA N°2	CUÑA N°1-X*	TOTAL.
45.5	8.8	34.1	14	-	-	14
62	11.7	45.6	9	7	-	16
76	14.6	57	5	14	-	19
91	17.5	68	-	21	-	21
106.5	20.5	79.5	-	20	4	24
121.5	23.5	91	-	18	9	27
137	26.4	102	-	16	13	29
152	29.2	119	-	14	18	32
167	32	125	-	13	22	35
182.5	35	136.5	-	11	26	37

* El ladrillo de cuña N° 1-x mide 23 * 11.5 * (6.5-5.7) cm.

Fuente: Rhodes Daniel. Hornos para ceramistas. 1987.

Después se van probando estas plantillas de madera sobre un dibujo de tamaño natural del arco de la bóveda hasta encontrar una combinación de las distintas formas de ladrillo, incluyendo planos que forme el arco

deseado. Puede no ser posible encontrar un acoplamiento exacto pero esto se compensa con el mortero entre los ladrillos. Los ladrillos planos y las rasillas deben utilizarse lo menos posible por que no estando acuñados y en consecuencia tienden a caerse con repetidas jornadas de trabajo.

Las bóvedas pueden ser de 11.5 cm. De grueso en cuyo caso se utilizan ladrillo de arco, o pueden ser de 23 cm. De grueso, en cuyo caso se utilizan ladrillos de cuña. El ancho lo determina la cantidad de calor que se requiera evitar en las paredes; pues entre más espesor tengan las paredes menor transmisión de calor habrá en ellas.

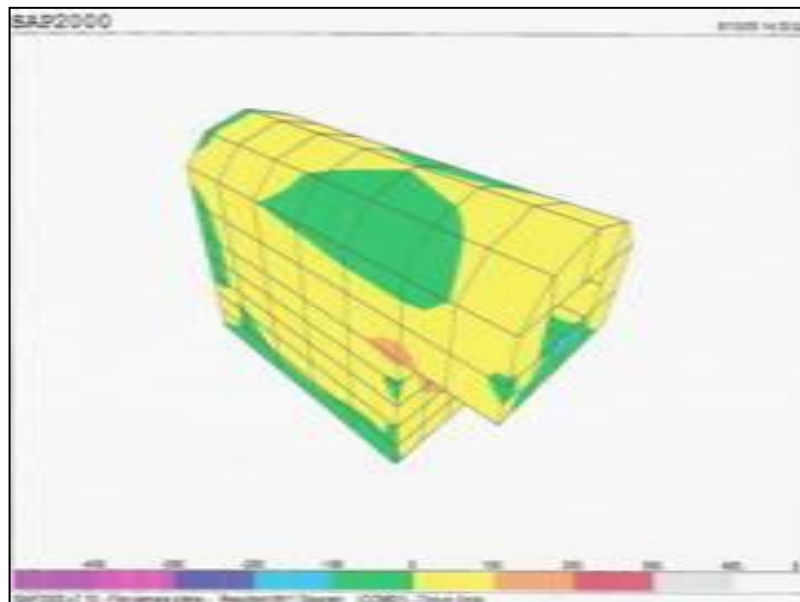
Para hornillas con una producción de 80 Kg/h de panela se puede utilizar ladrillo de arco y para hornillas de mayor producción ladrillos de cuña. Las diferencias entre estos dos tipos de ladrillos lo determina el espesor de la bóveda.

7. ANALISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN SAP DE LA HORNILLA PROPUESTA

Para analizar la arquitectura de la hornilla se realizó un análisis en el programa SAP, en el cual se observó el comportamiento de la hornilla al aplicarle fuerzas y también como fue el comportamiento de su arquitectura al presentarse estas cargas.

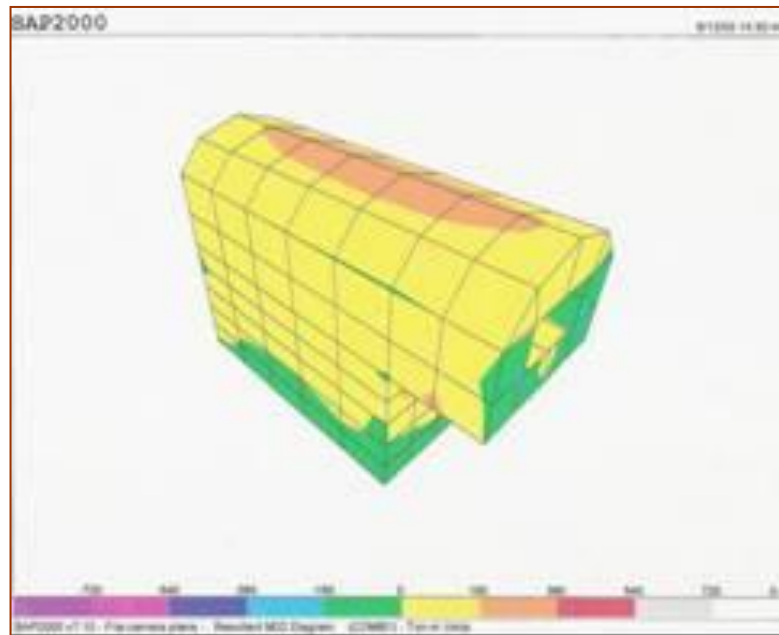
En la figura 65 observamos la grafica de cortantes que se presentan en la estructura con la aplicación de las cargas, los colores amarillo y verde representan las cargas localizadas que soporta de acuerdo a la dirección del plano cartesiano. En general la cámara presenta una buena consistencia estructural y requiere de mayor atención en las zonas de color naranja más oscuro, para lo cual se propuso la realización de una viga que soporte la estructura de la bóveda, además de la utilización de un estribo en la base de la bóveda. Los datos de resultados correspondientes a las gráficas se presentan en el anexo 5.

Figura 65. Momentos en cámara actual



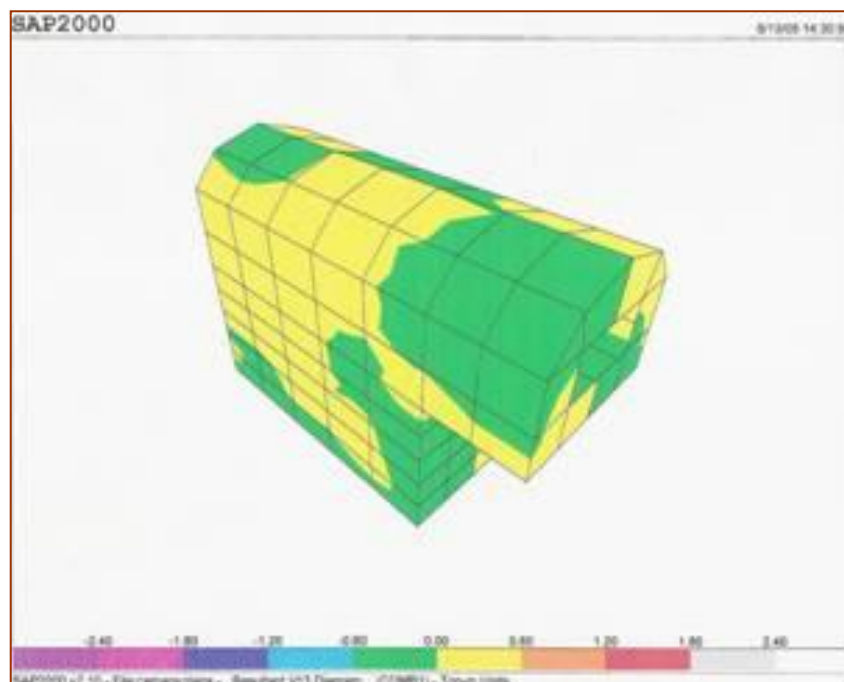
Fuente: Autor

Figura 66. Cortantes en cámara actual



Fuente. El autor

Figura 67. Esfuerzos en cámara actual



8. CONCLUSIONES

- ❖ La forma de la hornilla actual presenta bastantes ángulos vivos o rectos los cuales son perjudiciales a la hora de presentarse una buena eficiencia dentro del horno ya que generan turbulencia a los gases y pérdida de temperatura.
- ❖ Las juntas de dilatación dentro del horno son muy importantes debido a que no permiten que el horno se agriete y se presenten perdidas de calor, en la hornilla actual existe falta de estas juntas de dilatación.
- ❖ El mortero de pega de los ladrillos debe ser lo mas pequeño posible para asegurar la hermeticidad dentro de éste, debe ser máximo de 2 mm de espesor.
- ❖ En la cámara de combustión Ward se presenta el choque de los gases calientes contra el techo abovedado de la segunda cámara, presentándose un calentamiento excesivo de la zona lo cual genera una pérdida de temperatura en los gases que se van a utilizar en el proceso.
- ❖ Los orificios del aire secundario no están cumpliendo su función ya que el aire que entra se queda en la esquina superior de la hornilla por la acción de los gases calientes y no se mezcla con los de combustión; además estos orificios permiten la salida de los gases calientes del horno cuando éste se satura perjudicando al hornero.
- ❖ Debido al nivel sociocultural que se presenta dentro de los productores paneleros, se buscó un diseño de cámara que permitiera una buena combustión y que además no presentara complicaciones para su construcción.

9. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda redondear los ángulos vivos de las cámaras actuales para mejorar el direccionamiento de los gases y el aprovechamiento del calor, especialmente el ángulo frontal de la segunda cámara en la Ward.
- ❖ Realizar a la entrada del cenicero una puerta de bisagras corredizas con el fin de direccionar el aire a la cámara y de aumentar la presión al flujo de entrada.
- ❖ Utilizar ladrillos los cuales posean superficies libres de polvo u otros materiales, con el fin que en el proceso no se presenten capas de escoria debido a la fusión de estos residuos.
- ❖ Realizar una limpieza periódica de la parrilla con el fin de evitar la formación de escorias o monoestratos que no permiten la entrada del aire primario para la combustión.
- ❖ Procurar la utilización de bagazo seco en el proceso para aprovechar el calor generado para el calentamiento y cocción de los jugos
- ❖ Mantener una alimentación constante de bagazo en la cámara.
- ❖ Realizar un cenicero en el piso de la chimenea con el fin de recolectar las cenizas que se decanten en la salida de los gases.
- ❖ Ubicar ventanas de control a la salida de la cámara, y en el ducto de humos para revisar y realizar limpieza periódica de las cenizas acumuladas.
- ❖ Respecto a la cámara de combustión plana se recomienda bajar el nivel de la parrilla para evitar el arrastre de sólidos por los gases hacia el ducto de humos.
- ❖ Para el muro frontal de la cámara Ward actual, es decir el muro frente a la puerta de alimentación se recomienda la construcción de una viga de amarre base y dos columnas con el fin de evitar el desplome de dicho muro por la acción del empuje de tierras y de la

presión de los gases calientes.

- ❖ Sobre la puerta de alimentación se debe construir una placa de ladrillo refractario y sobre ella una placa de concreto reforzado en acero aislado del calor directo para evitar la dilatación de este y así proporcionar una placa compacta que de refuerzo a la estructura de entrada.
- ❖ A través de todo el ducto de humos debe usarse un aislamiento de aire estancado para evitar pérdidas de calor en las paredes.
- ❖ Para introducir el bagazo dentro del horno se recomienda usar un sistema de alimentación por medio de un tornillo sin fin con alimentación constante para evitar radiaciones de calor en los operarios.

BIBLIOGRAFÍA

F. H. NORTHON. Refractarios. Editorial Mc Graw Hill, New York 1972

FRAID CHEJNE JANNA. Termodinámica básica. Editorial universidad javeriana. Medellín. 2000

GARCIA H., RODRIGUEZ M. Determinación de los parámetros de diseño de la cámara de combustión, pailas y ductos en las hornillas paneleras, CIMPA. Barbosa, 1989.

GARCIA H., GORDILLO G. Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras. Barbosa. 1992

GILCHRIST JAMES DUNCAN. Combustibles y refractarios. Ed alambra s.a Madrid, 1969.

HERNANDEZ L. Determinación de los parámetros de desempeño para la combustión en las hornillas paneleras con cámaras Ward-CIMPA.

HOLMAN, J. Transferencia de Calor. Compañía Editorial Continental México, 1995.

ICONTEC. Normas Técnicas Colombianas NTC 706. Ed icontec, Bogotá, 2003.

ICONTEC. Normas Técnicas Colombianas NTC 688. Ed icontec, Bogotá, 2003.

J. D. GILCHRIST. Hornos. Editorial alambra s.a, Madrid. 1969

PERRY, Manual del ingeniero químico, sexta edición, tomo III, McGraw Hill, México, 1996.

RHODES. DANIEL. Hornos para ceramistas. Ediciones CEAC, Perú. 1987.

W TRINKS; M H MAWHINNEY. Hornos industriales. Bilbao. Ediciones URMO, volumen 1 y 2, 1961

www.ecuarural.gov.ec

www.agro.uba.ar/editorial/tomo24_2/svartz.pdf

www.windpower.org/es/tour/wres/enerwind.htm

www.sugartech.co.za/

[www. cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo03.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo03.htm)

ANEXOS