

**ESCUELA SUPERIOR  
POLITECNICA DEL LITORAL**

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

REFRACTARIO PLASTICO PARA HORNOS DE CUBILOTE

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de  
INGENIERO MECANICO

PRESENTADA POR

**Leonardo Pérez Vásconez**

**Guayaquil - Ecuador**

**1982**

## AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral

Al Taller Metalúrgico WYZ

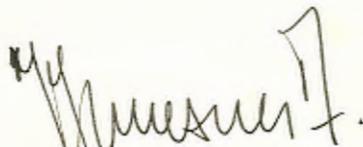
Al Ing. IGNACIO WIESNER FALCONI,  
DIRECTOR DE TESIS, por su ayuda  
y colaboración para la realiza-  
ción de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres

A mis hermanas

A mi novia

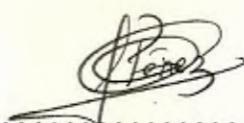


.....  
Ing. Ignacio Wiesner Falconi  
DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas  
expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamen-  
te; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la  
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la  
ESPOL).

  
.....  
Leonardo Pérez Váscñez

RESUMEN

Este trabajo está destinado a las empresas dedicadas a la fabricación de piezas de hierro fundido que usen horno de cubilote de revestimiento ácido.

El refractario elaborado es del tipo plástico apisonable; la materia prima utilizada es de procedencia Nacional consistente en arena de sílice y piedra natural procedente de los yacimientos de Río Verde y Limón-Indanza.

El refractario plástico (revestimiento monolítico) es una mezcla de arcilla refractaria y arena silícea, que puede moldearse fácilmente hasta cualquier forma, por lo que su uso reduce la necesidad de almacenar una gran variedad de formas especiales de ladrillos. La fabricación del refractario monolítico no necesita el moldeado, secado y cocido de los ladrillos.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	III
INDICE DE FIGURAS.....	IV
INDICE DE TABLAS.....	VI
<u>CAP.</u>	
I INTRODUCCION.....	1
1.1 Situación actual.....	1
1.2 Uso de refractarios para producción ferrosa.....	3
1.2.1 Fundición de Acero.....	5
1.2.2 Fundición de Hierro.....	7
II ESTUDIO DE MATERIALES REFRACTARIOS ACIDOS.....	15
2.1 Características Principales y Propiedades de los Refractarios.....	16
2.2 Elementos Básicos para Fabricación.....	20
2.2.1 Arena de Sílice.....	21
2.2.2 Arcillas.....	26
2.2.3 Ladrillo molido.....	34
2.3 Métodos de fabricación.....	35
2.4 Procesos de estabilización de mezclas moldeadas.....	38

<u>CAP.</u>	<u>Pág.</u>
III METODO EXPERIMENTAL.....	43
3.1 Plan General de Trabajo.....	43
3.2 Estudio de Laboratorio.....	45
3.2.1 Control de las materias primas.....	46
a) Arena de Sílice.....	46
b) Arcilla.....	56
3.2.2 Preparación de las mezclas Refractarias.....	65
3.2.3 Verificación de las Propiedades de las Mezclas	
a) Porosidad              c) Resistencia a la Compresión	
b) Refractoriedad      d) Densidad Relativa	
y e) Permeabilidad.....	68
3.2.4 Selección de la mezcla óptima.....	82
3.3 Estudio en Hornos de Cubilote y Accesorios.....	83
3.3.1 Cucharas de Colado y Transporte.....	84
3.3.2 Antecrisol de Cubilote.....	84
3.3.3 Cubilote.....	86
IV RESULTADOS OBTENIDOS.....	93
4.1 Resultados de Laboratorio.....	93
4.2 Resultados en Planta.....	96
V DISCUSION DE RESULTADOS.....	111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	121
BIBLIOGRAFIA.....	128

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
1 Horno Eléctrico de Arco.....	7
2 Horno de Cubilote.....	8
3 Arreglo de Conos Pirométricos Standar.....	16
4 Sistema SiO <sub>2</sub> según Fenner.....	23
5 Variaciones de longitud del Cuarzo, la Tridimita y la Cristobalita en el calentamiento según Travers y Golou Binoff y según Swetsch y Stumpen.....	27
6 Sección alargada de arcilla en varias etapas de secado.....	41
7 Curva típica de razón de secado para una arcilla.....	42
8 Arena de Sílice procedente de Limón-Indanza.....	49
9 Piedra natural de cuarzo procedente de Río Verde.....	50
10 Esferas de igual diámetro en estibación floja (a) y compacta (b).....	51
11 Esquema aclaratorio de los conceptos Porosidad e Índice de Poros.....	53
12 Análisis granulométrico de arena de AFS 21.....	60
13 Análisis granulométrico de arena de AFS 72.....	61
14 Variación de la densidad relativa según el grado de atacado....	64
15 Variación de la densidad relativa según el grado de atacado (mezclas).....	74

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
16 Variación de la permeabilidad según el grado de atacado.....	79
17 Variación de la resistencia a la compresión según el grado de atacado.....	80
18 Cucharas de colado y transporte revestidas con refractario monolítico.....	85
19 Esquema demostrativo de la parte del cubilote revestida con el refractario plástico.....	89
20 Horno Experimental.....	93
21 Zona de Fusión de Cubilote, Prueba Nº 2.....	99
22 Zona de Fusión de Cubilote, Prueba Nº 3.....	101
23 Revestimiento de Cubilote con piedra natural de cuarzo.....	105
24 Desmontaje de cubilote.....	106
25 Zona de fusión de cubilote sin revestir.....	107
26 Zona de fusión parcialmente revestida.....	108
27 Atacado con pisón neumático.....	108
28 Zona de fusión revestida.....	109
29 Zona de fusión de Cubilote después de una jornada de trabajo...	115
30 Desgaste de Refractario, Prueba Nº 5 22 cargas.....	116
31 Refractario Sinterizado, Prueba Nº 6 (40 cargas).....	118
32 Desgaste de Refractario, Prueba Nº 6 (80 cargas).....	118
33 Refractario Sinterizado, Prueba Nº 6 (80 cargas).....	119

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
I	Clasificación de las Arcillas.(Nortón).....	30
II	Yacimientos de Arenas Silíceas existentes en el País.....	47
III	Denominación de la Arena según la Compacidad.....	56
IV	Número de finura de arena procedente de Limón-Indanza (Moro- na-Santiago)(AFS = 21).....	58
V	Número de finura de arena procedente de Limón-Indanza (Mo- rona Santiago)(AFS = 72).....	59
VI	Densidad Relativa de Arena Procedente de Limón-Indanza de AFS = 21.....	62
VII	Densidad Relativa de Arena Procedente de Limón Indanza de AFS = 72.....	63
VIII	Densidad Relativa de Mezcla de Arena Silícea en las propo- ciones indicadas: AFS 21 = 85% y AFS 72 = 15%.....	72
IX	Densidad Relativa de la Mezcla de Arena Silícea en las pro- porciones indicadas: AFS 21 = 88%; AFS 72 = 12%.....	73
X	Variación de la Permeabilidad y resistencia a la Compresión según el grado de atacado.....	75
XI	Variación de la Densidad Relativa, Permeabilidad y Resisten- cia a la Compresión, según el grado de atacado.....	76

Nº

Pág.

XII	Variación de la Densidad Relativa, Permeabilidad y Resistencia a la Compresión, según el grado de atacado.....	77
XIII	Variación de la Densidad Relativa, Permeabilidad y Resistencia a la Compresión según el grado de atacado.....	78

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

En este capítulo se presenta primero un análisis de la situación actual en el País, en cuanto al uso y producción de refractarios plásticos en hornos para la elaboración de hierro y acero.

A continuación se estudia qué tipo de hornos utilizados en la fabricación de hierro y acero, usan refractarios monolíticos, cuáles son dichos refractarios, y sus propiedades mecánicas y térmicas.

En la parte final del capítulo se da a conocer las materias primas nacionales que pueden ser utilizadas para fabricar un refractario plástico. Además se explica en forma clara y precisa cuál es el propósito de esta investigación.

Cabe indicar que el revestimiento plástico motivo del presente estudio es de naturaleza ácida.

#### 1.1 Situación Actual

La manufactura de piezas en hierro o acero moldeado por proceso

de fundición deberá incrementarse con un ritmo inusitado en los próximos años, por lo que, habiendo una relación directa entre la tonelada del metal producido y el consumo de refractario, debe preverse que este rubro de importación será importantísimo, razón por la cual, el Ingeniero ecuatoriano deberá incidir sobre estos parámetros económicos.

A fin de llegar a conocer las circunstancias o realidades de las fundiciones en cuanto al uso de refractario para hornos de cubilote, hemos visitado varias empresas a las cuales se las sometió a una encuesta cuyo formato se encuentra en el apéndice A.

De esta manera se puede deducir las siguientes observaciones:

- Todas las empresas entrevistadas utilizan hornos de cubilote para la fusión de hierro.
- La naturaleza de la escoria es ácida.
- El tipo de refractario utilizado es: ladrillo sílico aluminoso.
- Procedencia del ladrillo: Perú, Colombia, EE UU.
- El costo es muy elevado.

- El material usado para parcheo diario es también de importación y es de más valor que el ladrillo.
- El máximo tiempo de trabajo del cubilote durante el día es de cuatro horas.
- El modo de aplicar refractario en reparación es manual.

### 1.2 Uso de Refractarios para Producción Ferrosa

En esta parte se hará una revisión de los materiales refractarios plásticos usados en la producción de hierro y acero. Se pondrá mayor énfasis en el estudio de refractario monolíticos usados para la fabricación de hierro, ya que todavía no existe en el país hornos de inducción de crisol para producir acero, que son hornos que utilizan también refractario ácido apisonado.

Se define al refractario plástico de naturaleza ácida como aquel que está formado por una mezcla de arena silícea, arcilla refractaria y agua.

Se concretará el estudio de refractarios ácidos que son factibles de hacer con las materias primas existentes en el país.

La materia prima utilizada en la fabricación de refractarios arci-

llosos, también llamados silicoaluminosos es el caolín o caolinita. La sílice en el momento de la reacción puede quedar como gel o solución coloidal. Las arcillas refractarias sometidas al calor tienen una fuerte contracción en primer lugar por desecación y en segundo lugar por calcinación. El conjunto de estas dos contracciones alcanza valores de hasta un 20%. Este inconveniente se salva mediante el empleo de desgrasantes que son materias inertes, no plásticas.

Los productos refractarios arcillosos que contienen sílice libre, actúan en caliente como si fuesen ácidos, tanto más ácido cuanto más sílice libre contengan.

La materia prima más importante en la fabricación de refractarios siliciosos es la cuarcita.

Las cuarcitas son rocas silíceas de grano fino. Estos granos se han depositado por sedimentación y han quedado consolidados en forma de roca por la coagulación de la sílice coloidal arrastradas por las aguas.

Otro tipo de cuarcita llamada ganister por los ingleses, es la que tiene el cemento en forma cristalina, es decir, que ha cristalizado sobre los granos de sílice ya existente haciendo que queden entrelazados unos con otros.

Por la acción del calor el cuarzo se transforma en otras dos especies cristalinas: la tridimita y la cristobalita; estas transformaciones se estudian detalladamente en el Capítulo II.

### 1.2.1 Fundición de Acero

A continuación se realizará un estudio de los diferentes tipos de refractarios monolíticos utilizados en los hornos para la fabricación de acero.

#### Revestimientos en Hornos de Inducción.-

El horno de revestimiento ácido es el de mayor aceptación debido a su resistencia al choque térmico, buena refractariedad, baja porosidad y permeabilidad, facilidad de apisonado y sinterizado que permite rehacer en horas un revestimiento nuevo.

Para conseguir una capa sinterizada apropiada es preciso un agente ligante, tal como el ácido bórico. Normalmente los revestimientos monolíticos de cuarcita presentan una capa sinterizada resistente a la abrasión junto al metal fundido y otra de arena suelta entre ésta y la bobina, que sirve a modo de colchón para las contracciones y dilataciones de la capa sinterizada y también para detener las posibles

filtraciones de metal que se producen a través de las grietas.

A medida que envejece el revestimiento avanza la capa sintetizada reduciéndose la de arena suelta, debiendo considerarse agotado el revestimiento cuando el espesor de la capa de arena sea inferior a una cota mínima.

Otro factor importante es la granulometría de la arena, que debe estar en consonancia con el metal a fundir, su temperatura de colado y el tamaño del horno.

Revestimiento en Hornos de Arco.-

Otras de las aplicaciones del refractario monolítico es en el horno de arco. Se deja en claro que se realiza el análisis del revestimiento del horno eléctrico sólo en las partes donde se utilice refractario apisonable.

El Horno de Arco, como se puede apreciar en la Fig. N° 1 está revestido con distinto tipo de refractario dependiendo la posición en que se encuentra en el horno. La parte del horno que está revestida con refractario plástico apisonable de carácter ácido, es la sección en delta del techo (bóveda) y el revestimiento de trabajo de la solera.

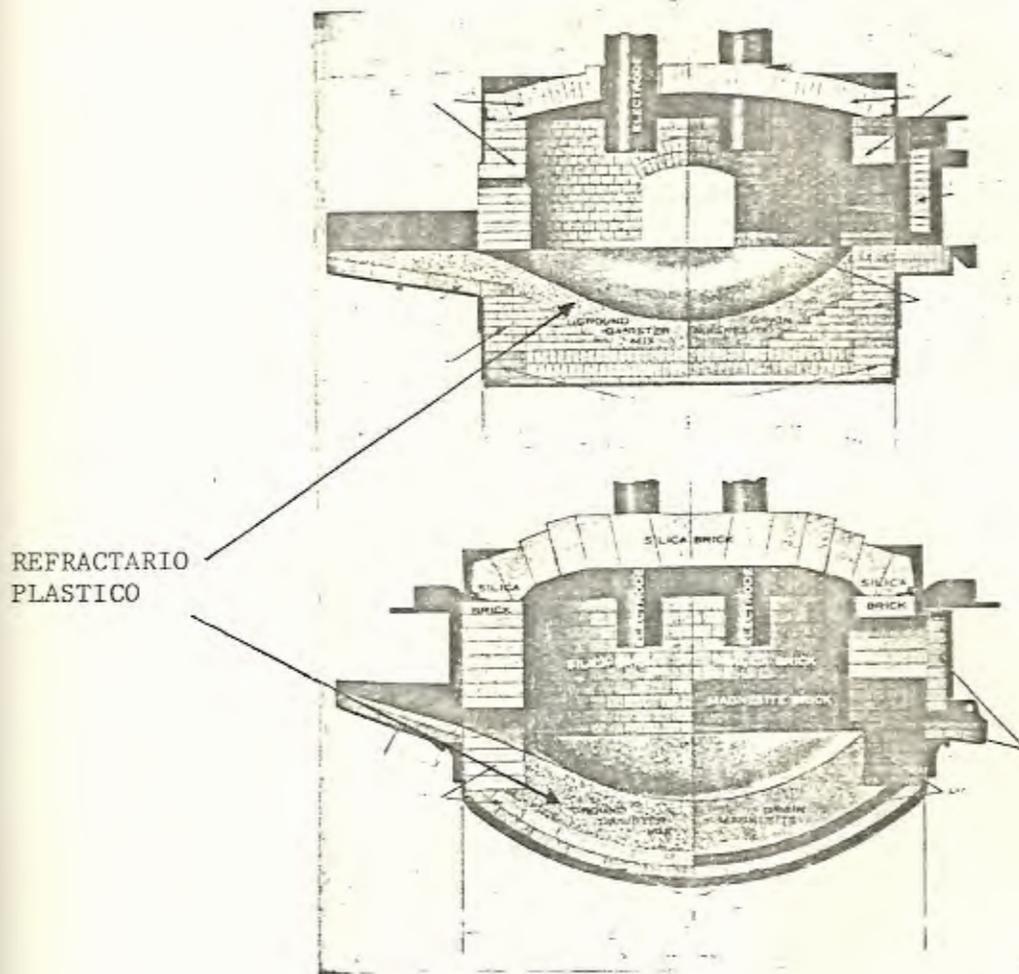


FIG. N° 1.- Horno Eléctrico de Arco  
(Norton)

La arcilla utilizada en la elaboración de este revestimiento es el caolín o caolinita. La sílice es el otro elemento que forma parte del refractario, la misma que al reaccionar puede quedar como gel o solución coloidal.

### 1.2.2 Fundición de Hierro

Un horno típico usado en la fusión de hierro es el que se

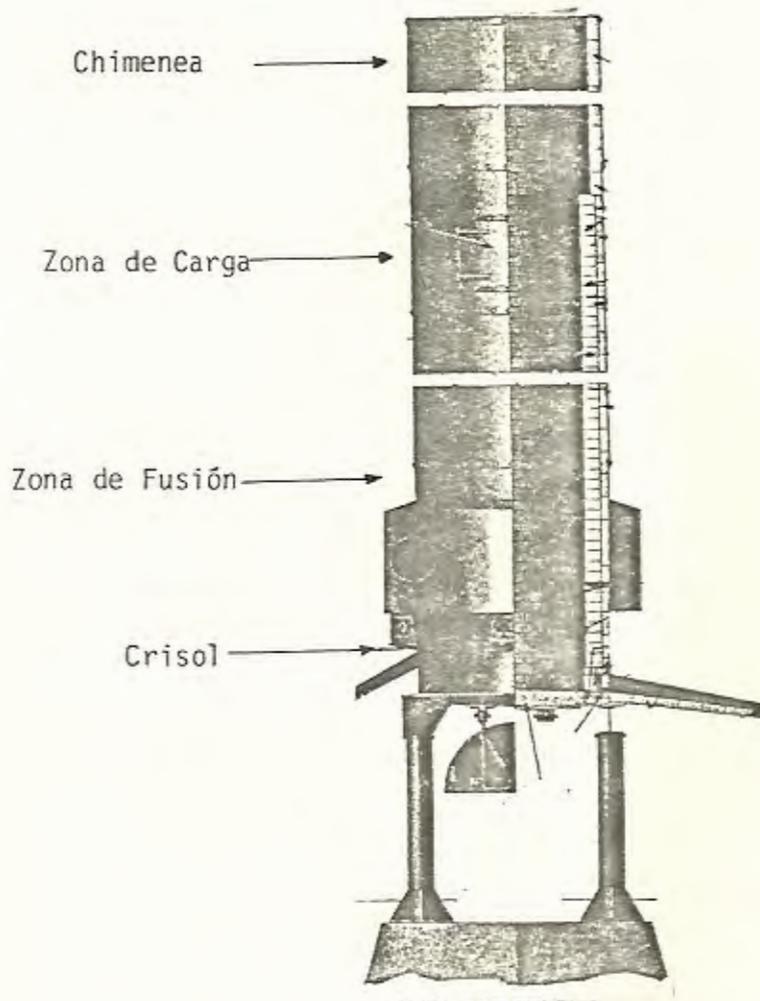


FIG. N<sup>o</sup> 2.- Horno de Cubilote (Norton)

indica en la Fig. N<sup>o</sup> 2.

Los refractarios deben resistir la agresión a las paredes del horno; deben resistir además a la abrasión, presión, ataque químico y choque térmico.

Los estudiaremos en cuatro zonas:

- a) Zona de Fusión que es la zona sobre toberas, delimitado su nivel por el lecho de coke, caudal de soplado, tipo de carga y otras variables; en esta zona hay temperaturas superiores a las del resto del cubilote.
- b) Crisol.- Aquí la temperatura es menor que en la zona de fusión y el revestimiento sólo está en contacto con el metal fundido, escoria, y el choque relativamente estático. La única acción química es la de la escoria en el área expuesta a ella.
- c) Zona de Carga.- El revestimiento en la zona de carga no está expuesto a temperaturas muy altas, ni al ataque de la escoria, pero la abrasión es muy severa por los impactos de carga.
- d) Zona sobre puerta de carga.- Las condiciones no son tan severas y el refractario está para proteger a la chapa de los gases efluyentes.

La vida en servicio de los refractarios varía según las condiciones de trabajo y la zona del cubilote que se trate, es la zona de fusión la que necesita reparación diaria. El

revestimiento plástico a elaborarse con materia prima nacional se instalará en la zona de fusión por ser la zona más crítica y la que necesita reparación diaria. La duración de un revestimiento depende no sólo de su calidad y la forma como se coloque y seque, sino de las condiciones de operación del cubilote. La zona más castigada es la de fusión sobre toberas y su desgaste es proporcional a la temperatura y duración de la colada, habiendo varias causas:

La principal es un soplado excesivo, el aire a alta presión tiene efecto erosivo, por otra parte el hierro se oxida a óxido de hierro ( $FeO$ ) y éste hace muy corrosiva a la escoria.

Otra causa es el tamaño del coke, altura de la cama, presencia de oxidación, etc. La fusión de altos porcentajes de chatarra de acero, que da lugar a mayor temperatura y oxidación produce un fuerte desgaste. La chatarra sucia, con elementos extraños ataca al revestimiento y necesita mayor porcentaje de fundentes, aumentándose el ataque por la escoria.

#### Refractarios Monolíticos.-

Se tiende a este sistema, con tres variantes: fabricación

de ladrillos que se colocan en estado húmedo o plástico, utilización de atacado a mano o con pisón manual, o atacado con pisón neumático; las dos primeras prácticas para cubilotes pequeños, la tercera para los mayores. El revestimiento es una mezcla de arcilla refractaria y sílice. Generalmente son de instalación más rápida, parcheo más fácil y mejores aislantes que el ladrillo cocido.

Durante un período de 20 años, la proporción del tonelaje total de refractario derivado hacia el tipo monolítico se ha duplicado, aumentando desde el 12 al 23% del total. Estos productos monolíticos tan rápidamente desarrollados se aplican como refractarios plásticos.

#### Propósito del Trabajo

Después de haber hecho un análisis de los tipos de hornos y de refractarios usados para la fabricación de hierro y acero, se puede concluir que para la fusión de hierro se utiliza exclusivamente el horno de cubilote y el refractario de naturaleza ácida.

Para la fabricación de acero se utiliza el horno eléctrico de arco que, como se mencionó anteriormente, está revestido con distintos tipos de refractarios dependiendo del lu-

gar en que se encuentran los mismos.

Como contraparte a las observaciones descritas en el punto 1.1 basadas en la encuesta realizada a las distintas fábricas que producen piezas de hierro o acero, se tienen los siguientes datos de interés para el País:

- Existen yacimientos de arena silícea de excelente calidad en la región oriental y en la provincia de El Oro.
- En la costa (Península de Sta. Elena) existe material que se puede utilizar para la elaboración de refractario. Además, hay piedra natural de cuarzo.
- También existen en el País yacimientos de arcillas refractarias.
- Hay información que manifiesta que es posible el uso de estos materiales para fabricar refractarios plásticos de carácter ácido.
- No hay material refractario de fabricación nacional.

Todas estas conclusiones fueron las que impulsaron al estudio de un material refractario ácido, que pueda fabricarse

con materia prima nacional, de fácil aplicación y que cumpla con las propiedades un refractario de este tipo.

Se aclara que la investigación realizada no ha sido netamente científica, es decir, que no se pudo controlar todos los parámetros que intervienen en la fabricación del revestimiento debido a las limitaciones de equipos de laboratorio.

El material refractario se probó directamente en planta, utilizando métodos que se explican detalladamente en el Capítulo III. Por último se debe mencionar que una de las empresas visitadas elabora su propio refractario plástico y ocasionalmente vende a las demás fundiciones. La materia prima utilizada en la preparación de dicho refractario es la chamota (ladrillo usado molido) y bentonita. Este refractario presenta la desventaja de que hay que seleccionar el ladrillo usado; ya que no se puede elaborar un refractario con distintas calidades de ladrillo. Además, el punto de fusión del revestimiento de chamota anteriormente mencionado es más bajo que el refractario preparado directamente con arena de sílice, debido a que además de la arcilla que contiene la chamota hay que sumar la bentonita que se agrega para elaborar la mezcla. La bentonita como se explica en el Capítulo II es el elemento aglutinante que tiene un punto de fusión, mucho más bajo que el de la sílice ;

por lo que mientras mayor sea el porcentaje de ésta, más bajo será el punto de fusión de la mezcla, lo cual, no es conveniente para un refractario.

## C A P I T U L O   I I

### ESTUDIOS DE MATERIALES REFRACTARIOS ACIDOS

En este capítulo se estudiarán las materias primas que se utilizan en la fabricación de los refractarios apisonables monolíticos de reacción ácida. Además, se estudiarán las características y propiedades que deben cumplir estos refractarios para el buen funcionamiento del horno de cubilote.

Como se dijo en el Capítulo I, la presente investigación estará centrada en la fabricación de refractario plástico para la producción de hierro.

Los materiales resistentes al calor se denominan materiales refractarios cuando su temperatura de reblandecimiento es igual o superior a los 1500°C.

Un refractario ácido, es aquel que conteniendo ciertos elementos producen a elevada temperatura una reacción ácida.

También se revisará en el presente capítulo los métodos de fabricación y los procesos de estabilización de las mezclas moldeadas.

## 2.1 Características principales y propiedades de los refractarios

La forma de llegar a establecer un control del refractario plástico depende de sus propiedades físicas, de las cuales podemos mencionar: Refractariedad, Dilatación Térmica, Resistencia bajo carga a temperatura.

El punto de sinterización de un refractario se lo puede determinar por cualquiera de los siguientes medios: utilizando una termocupla, un pirómetro óptico o por medio del cono seger.

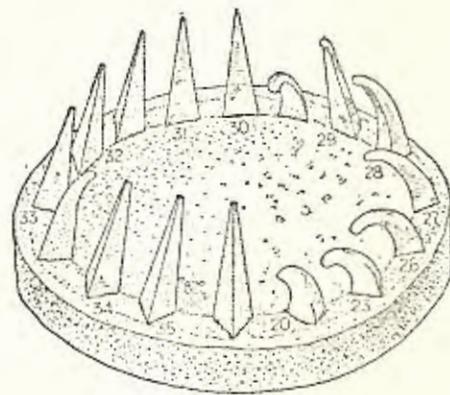


FIG. N° 3.- Arreglo de Conos Pirométricos Standard  
(Norton)

El ensayo de cono Seger consiste en la determinación de punto de fusión por comparación con una serie de conos pirométricos estándar colocados en un mismo horno.

Para la elaboración de cono, la muestra seca debe ser mezclada cuidadosamente, después de añadir suficiente dextrina, goma o cualquier otro alcalí libre orgánico y agua.

Será en forma de pirámide trigonal truncada.

Los conos de prueba serán montados en placas de material refractario de tal composición que no afecte la fusibilidad de los conos. El arreglo de los conos pirométricos estándar será como se muestra en la Fig. N<sup>o</sup> 3. alternando los conos de prueba con los conos pirométricos estándar.

Una determinación más precisa del punto de fusión puede ser hecha con el pirómetro óptico, el cual consiste en el calentamiento del espécimen de prueba en un horno, bajo las condiciones de un cuerpo negro. Se puede obtener con una precisión de 7°C y con un cuidado especial en la calibración de 4°C.

Refiriéndonos a la dilatación térmica podemos mencionar que los refractarios siguen la ley general de la expansión, es decir, que si no se llega a temperaturas que den cambios permanentes, el

refractario volverá, al enfriar, a sus dimensiones originales. La expansión a la que está sometido el refractario no solamente es de orden normal sino que además posee ciertos estados alotrópicos que producen dilatación por efectos de cambios cristalográficos, lo cual en el trabajo puede afectar o no su condición dentro del equipo.

La dilatación térmica es un factor que comparado con otros materiales, por ejemplo los metálicos es mucho menor, pero en muchos casos es mayor que los metálicos; ésto al construir un horno se debe tener muy en cuenta.

La dilatación térmica es un parámetro que se identifica con el refractario porque es de mucha importancia pra diseño.

Refiriéndonos a los refractarios monolíticos, cabe señalar que éstos generalmente pueden instalarse con mayor rapidez y menos necesidad de personal que los ladrillos de forma. Por ello hay menos tiempo de paradas del horno y taller. Los refractarios monolíticos reducen también las pérdidas térmicas.

La conductividad térmica de un material es función directa de su densidad aparente. La conductividad térmica de los monolíticos puede llegar a ser la mitad que la de un ladrillo de la misma composición. Los cementos refractarios varían desde los llamados

muy densos hasta los ligeros y aislantes. Por otra parte, las pérdidas térmicas originadas por fuerzas de gases a través de las juntas entre ladrillos se eliminan con los monolíticos. De todo esto se concluye que las pérdidas térmicas son menores, lo que permite el uso de revestimientos más delgados, sin pérdida de eficiencia de los hornos.

Los refractarios monolíticos tienen buena resistencia a las grietas. Esto se debe a que la variación del grado y tipo de aglutinante se dá en toda la estructura como resultado de ser secados in situ. Esta relativa flexibilidad de la estructura contrasta con la rigidez de la mayoría de los ladrillos.

Otra ventaja derivada de esta flexibilidad es que el choque térmico se absorbe mejor, con lo cual el ataque se localiza y el choque no se transmite a la estructura de chapa de acero. Por tanto, las reparaciones pueden limitarse a parchear zonas locales, mientras que una estructura de ladrillos puede obligar a reparaciones de acero y extensas sustituciones de ladrillos.

Como los refractarios monolíticos se secan in situ, ciertos materiales que se expanden al calentar pueden añadirse al producto, de forma que contrarresten la tendencia del producto a agrietarse al calcinar. Por ello los refractarios monolíticos son muy estables, en cuanto a volumen a temperaturas altas.

Los refractarios monolíticos se moldean en el lugar en el que se han de trabajar, por lo que son muy apropiados para sistemas de autosportes.

Los refractarios monolíticos pueden moldearse fácilmente hasta cualquier forma, por lo que su uso reduce la necesidad de almacenar una gran variedad de formas especiales de ladrillos, por lo que su plazo de entrega es más corto.

Para reducir el trabajo y manejo de estos materiales, los monolíticos pueden suministrarse en bloques moldeados y atacados previamente.

## 2.2 Elementos Básicos para Fabricación

La materia prima necesaria para la elaboración de los refractarios plásticos de carácter ácido constan principalmente de arena silícea, arcilla y agua.

A continuación se estudiará la arena silícea que es el elemento principal en el refractario analizado, los cambios alotrópicos ocasionados por la elevada temperatura y también se estudiará en esta sección el elemento aglutinante del revestimiento: Las arcillas.

### 2.2.1 Arena de Sílice

La arena de sílice es la materia prima fundamental para la elaboración del refractario monolítico de naturaleza ácida, es por esta razón que en esta sección se estudia detalladamente los cambios microestructurales producidos en la misma.

Después del oxígeno, el silicio es el elemento más abundante de la corteza terrestre. Aparece en forma de su óxido, bien libre o combinado con óxidos metálicos formando silicatos. La sílice libre es abundante y se encuentra entre los más puros de los minerales que existen en estado natural. La sílice cristaliza en formas diferentes a distintas temperaturas pero como los cambios son lentos las formas inestables existen naturalmente junto con la forma estable, mucho más común, que es el cuarzo.

Desde hace algunos decenios, no obstante, sabemos que existen además otras dos formas cristalinas de la sílice: la tridimita y la cristobalita.

Estas tres formas cristalinas presentan además distintos estados en cada forma, que en todos los casos son estables en zonas diferentes de temperatura exactamente delimitada.

Los estados polimórficos de la misma forma cristalina, por

ejemplo del cuarzo, al variar la temperatura se transforma rápidamente de uno en otro en cuanto se rebasa el punto de transición; por ejemplo el cuarzo  $\beta$  a unos  $573^{\circ}\text{C}$ , se transforma rápidamente en cuarzo  $\alpha$ . En cambio la transformación, del cuarzo en tridimita o cristobalita, o viceversa, presentan ciertas dificultades, a pesar de que cada una de estas formas cristalinas poseen una zona de estabilidad exactamente delimitada. La reordenación de los átomos en una estructura particular requiere por lo tanto en este último caso, un notable consumo de energía. En la sílice no se conocen transformaciones verdaderamente monotropas; ahora bien, la difícil transformación de cuarzo en tridimita que se realiza a  $870^{\circ}\text{C}$ , puede considerarse como pseudomonotropa. Sólo son transformaciones verdaderamente enantiotropas las que realizan entre sí las formas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , de la misma forma cristalina.

Junto a tres formas cristalinas fundamentales y sus estados polimórficos, deben citarse, además, la sílice amorfa y la sílice vítrea, llamada erróneamente vidrio de cuarzo. El diagrama de estado de la sílice, que permite seguir estos complicados fenómenos ha sido establecido por Fenner.

La Fig. N<sup>o</sup> 4 indica la estabilidad de los distintos estados polimórficos en función de la temperatura, como medida de

la estabilidad se utiliza la presión de vapor, que es mínima para las formas más estables a cada temperatura.

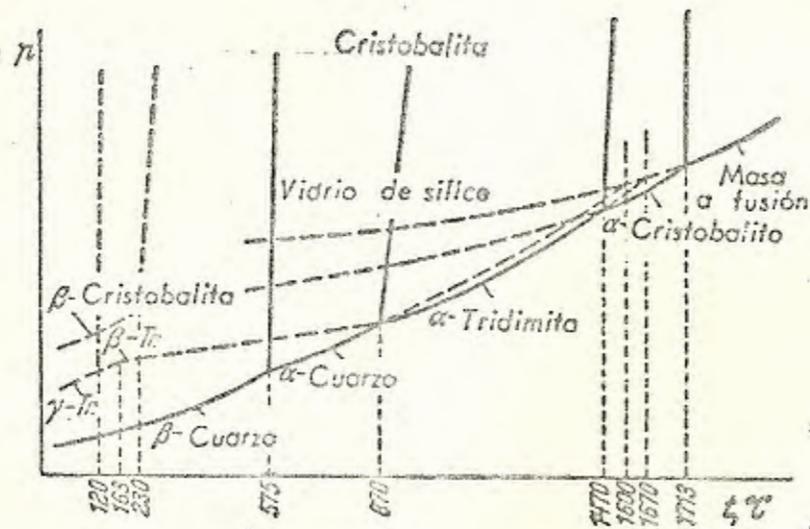


FIG. Nº 4.- Sistema SiO<sub>2</sub> según Fenner (Salmang)

La figura contiene cuatro curvas, parcialmente de trazo continuo, correspondiente a cuarzo, tridimita, cristobalita y sílice vítrea. La curva del cuarzo es la línea continua que llega hasta la temperatura de 870 °C, donde es cortada por la curva de la tridimita; por lo tanto el cuarzo sólo es estable hasta los 870 °C. Dentro de esta zona,

a los 573°C sufre una transformación enantiotropa del cuarzo ( $\beta$  al  $\alpha$ ). La curva del trazo del cuarzo prosigue por encima de los 870°C, hasta llegar al punto de fusión 1600°C. De acuerdo con este diagrama, la tridimita, la cristobalita y la sílice vítrea son inestables hasta los 870°C, pues los tiempos finitos no son suficientes para abarcar su transformación en cuarzo.

A 117°C, más exactamente de 100 a 118°C la tridimita  $\gamma$  se transforma en tridimita  $\beta$  y a 163°C, en tridimita  $\alpha$ . Sin embargo esta última solo es estable hasta los 1470°C, en que se transforma en cristobalita. La tridimita funde a una temperatura más elevada que el cuarzo, ésto es, a los 1670°C, la cristobalita, a los 230°C presenta un punto de transición por lo que es estable a partir de los 1470°C y muestra el punto de fusión más elevado de todas las formas cristalinas de la sílice (1713°C). Por encima de este punto, por lo tanto, sólo es estable la masa a fusión. Con un sobreenfriamiento por debajo del punto de fusión de la cristobalita, conserva su estado amorfo, formando la sílice vítrea. De todos los estados polimórficos de la sílice esta última es la que posee la mayor presión de vapor y el mayor contenido energético.

De este diagrama se deducen muchos hechos de importancia

industrial. En primer lugar, resalta la amplia diferencia entre las temperaturas de fusión de las tres formas cristalinas. Si la sílice vitralizada se la quiere usar como material muy refractario ha de utilizarse cristobalita. Otro hecho importante que se deduce del diagrama de estado es el de que, al calentar el cuarzo durante algún tiempo a elevada temperatura, se transforma forzosamente en las otras dos formas cristalinas. Es curioso señalar que esta transformación no viene indicada en el diagrama reproducido, así por ejemplo por encima de los  $870^{\circ}\text{C}$  el cuarzo no se transforma directamente en tridimita, sino que primero se descompone por completo su estructura reticular, formándose probablemente vidrio silíceo amorfo. A partir de éste, se construye inicialmente la forma menos estable, es decir, la cristobalita, que por último se transforma en tridimita. Estas raras series de transformaciones se denominan "ley de las fases intermedias" de Ostwald. Esta ley dice que la transformación de una fase estable en las condiciones del ensayo, no se realiza directamente, sino que se forma primero la fase más inestable, a continuación la menos estable, y por último la fase estable.

A las temperaturas normales, las diferentes modificaciones presentan las siguientes características:

Hace cincuenta años el ladrillo de chamota constituía más del 95% de todos los productos refractarios, y se fabricaba en general según métodos tomados de la industria ladrillera. Ante todo, los métodos usuales eran los del moldeado a mano y en la galletera de pastas muy plásticas, y en algunos casos todavía se emplean actualmente. Posteriormente para reducir la contracción de desecación se disminuyó el contenido de arcilla aglomerante, y además, reduciendo el contenido de agua, se aumentó la presión a la que se moldeaba la materia cruda, y por último, para reducir la porosidad se reguló cuidadosamente la distribución de tamaños de granos de la chamota. Además, se introdujeron también el procedimiento de colada de la chamota, el prensado, el apisonado y el vibrado.

Los distintos procedimientos de moldeado dan lugar a diferencias tan profundas en las cualidades del ladrillo de chamota, que la composición química, factor clásico para la valoración del ladrillo refractario, ha pasado a un lugar secundario.

### 2.3 MÉTODOS DE FABRICACION

Para la elaboración del refractario plástico partiendo de los materiales anteriormente mencionados se efectúa una mezcla de los

mismos en proporciones definidas, en la cual, juega un papel muy importante de granulometría de la arena, ya que de ella depende el mejor acomodo de los granos y con ello la menor o mayor densidad del refractario.

A continuación se presenta el método de fabricación utilizado por el CENIM de un refractario monolítico de características similares al que se fabricará con materia prima nacional.

La preparación de refractario consistió simplemente en tenderlo en el suelo para efectuar un secado al aire de forma que el refractario perdiera mucho de la humedad adquirida en el proceso de clasificación granulométrica por vía húmeda. Este descenso de humedad hizo que quedara con el 5% de agua.

El malaxado de pisé se hizo en un molino TAF M 1250, con objeto de realizar una homogenización perfecta así como un ajuste preciso de la humedad.

Este molino es normalmente utilizado en el CENIM para la preparación de arenas de moldeo.

El refractario con el 5% de humedad, se pasó por el molino y en él se ajustó la humedad al 8%, con la cual se habían hecho los ensayos de laboratorio.

Para estudiar la pérdida en peso del refractario durante la colada, debida a la erosión y agresión química y térmica de las escorias y metal fundido, se determina la humedad del refractario plástico en el momento de colocarlo en el horno. Esta humedad se resta al peso total para referir siempre a muestra seca, que es como estará lógicamente al cabo de varias coladas en el momento en que se desmonte el refractario para su sustitución.

Refiriéndonos a la fabricación de ladrillos de chamota podemos notar que hay varios procedimientos de los cuales mencionamos los siguientes: ladrillos moldeados a mano y ladrillos moldeados con martillo neumático.

La elaboración del refractario con martillo neumático produce además de un ataque vertical, movimientos vibratorios por efecto de los cuales los granos no se desplazan solamente en sentido vertical, sino también lateral, para así lograr un relleno más completo del molde.

De acuerdo al tamaño del grano varían las propiedades en los ladrillos de chamota. Las mezclas de grano grueso resisten más los enfriamientos bruscos que los de grano fino. Para lograr una resistencia en seco lo más elevada posible, es necesario que los granos no sean demasiado grandes, pues en estas condiciones la arcilla aglomerante une en forma defectuosa los distintos granos.

El relleno de los poros mediante granos de tamaño medio y pequeño eleva notablemente la resistencia.

La variación del tamaño del grano de mayor a menor disminuye la porosidad, pero aumenta la resistencia mecánica, pero como lo demuestra la práctica, mejores propiedades mecánicas exigen por desgracia propiedades técnicas peores.

#### 2.4 PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN DE LAS MEZCLAS MOLDEADAS

Dentro del proceso de estabilización de las mezclas se debe considerar no sólo el proceso de secado sino también a la plasticidad de la arcilla que permitirá a la mezcla formar un solo cuerpo, es decir un refractario monolítico.

En el proceso de secado podemos considerarlo en dos períodos: el de velocidad constante y el período a razón descendente.

Período a razón constante.- En el inicio del proceso de secado, cuando la arcilla tiene suficiente agua al menos para llenar los poros, se encontrará una fina película de agua sobre la superficie de las partículas, esto se notará observando el color oscuro de la arcilla húmeda. Como el secado se realiza a razón constante, es obvio que el agua viaje a través de los poros hacia la superficie y se elimine por evaporación. En los casos

donde la razón de secado es muy alta y los granos de arcilla muy finos, el agua viajará por fuerzas capilares.

En el caso de la arcilla, la pieza disminuirá un volumen equivalente al volumen de agua perdido hasta que las partículas se toquen, a continuación el aire entrará en los poros para tomar el lugar del agua. Cuando esto hay sucedido se encontrará que el agua no puede viajar lo suficiente para llegar a la superficie para mantener la película, eso indica que la razón de secado ha disminuido. Este punto se conoce como punto crítico.

Período a razón descendente.- Más allá del punto crítico, la razón de secado es gobernado por la transferencia de agua del interior de la superficie. El secado continúa más y más hasta que el agua en el interior se convierte en vapor, pudiendo ser necesario para viajar hacia afuera el uso de fuerzas capilares cercanas a la superficie.

Para incrementar la plasticidad de la arcilla uno o más de los siguiente métodos deben ser usados:

- La arcilla puede estar humedecida y expuesta a la atmósfera; agua caliente es a menudo más efectiva que agua fría, pero es poco usual en la fabricación de ladrillos.

Cuando se dificulta mantener suficiente agua dentro de la arcilla y la adición de sodio o mineral ácido no es deseable, el uso de un agente humectante es beneficioso. Los agentes humectantes están usualmente bajo nombres registrados. Estos actúan por reducción de la tensión superficial entre la arcilla o pizarra y el agua. Pequeñas proporciones es suficiente (0.3%).

- La pasta de arcilla preparada puede permanecer en un lugar frío por tiempo prudencial, el cual, puede ser varios días o meses de acuerdo a la naturaleza del material.
- Adicionando pequeñas proporciones de sodio o silicato de sodio (o ambos) y mezclando cuidadosamente con la arcilla un exceso de alcalinidad es perjudicial. Pocas arcillas mejoran su plasticidad adicionándole un poco de ácido, ésto depende de la porción de cambio de base en la arcilla. Varias arcillas responden mejor a la adición de cal viva (cerca 15% por tonelada) seguida por una solución de sulfato de aluminio.
- Adicionando goma o cualquier otra materia coloidal. La adición de bentonita ha comenzado a usarse progresivamente para este propósito.
- La adición de pequeñas cantidades de clorato de bario, previamente disueltos en agua, para las mismas arcillas incrementará

la plasticidad haciendo solubles los sulfatos insolubles.

En la Fig. N<sup>o</sup> 6 se indican los pasos de la arcilla en el proceso de secado. En A las partículas húmedas de arcilla están separadas por una película de agua, la cual es continua sobre la superficie.

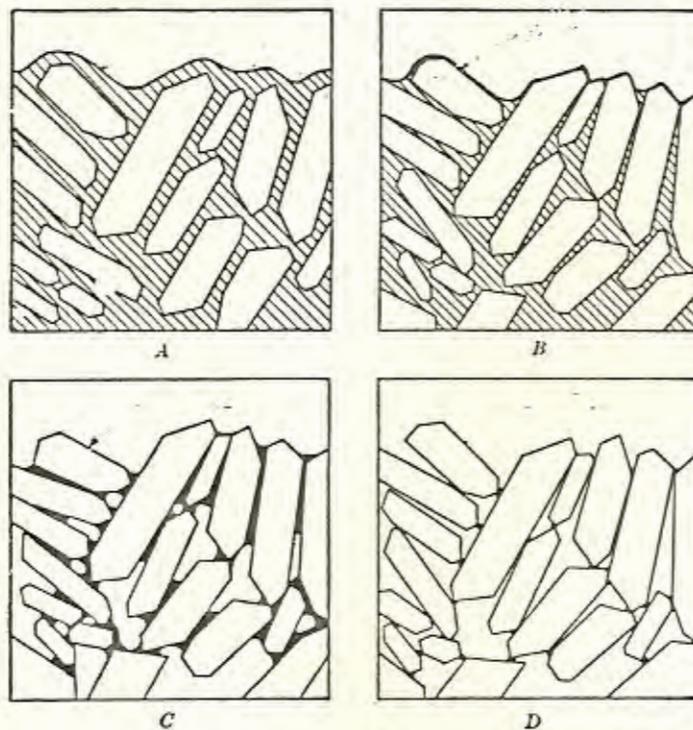


FIG. N<sup>o</sup> 6.- Sección alargada de arcilla en varias etapas de secado. (A.B.Searle).

En B la cantidad de agua ha disminuido hasta que las partículas se tocan unas con otras, pero hay todavía una película continua sobre la superficie.

En C el agua ha disminuido hasta que la superficie de la película es irregular y el nivel se inclina en los capilares con aire en la estructura.

En D el agua ha disminuido hasta que sólo quedan en pocos lugares donde las partículas están muy juntas o cerradas.

Estas cuatro condiciones son mostradas en una curva típica para arcillas de razón de secado versus porcentaje de humedad. Fig. N° 7.

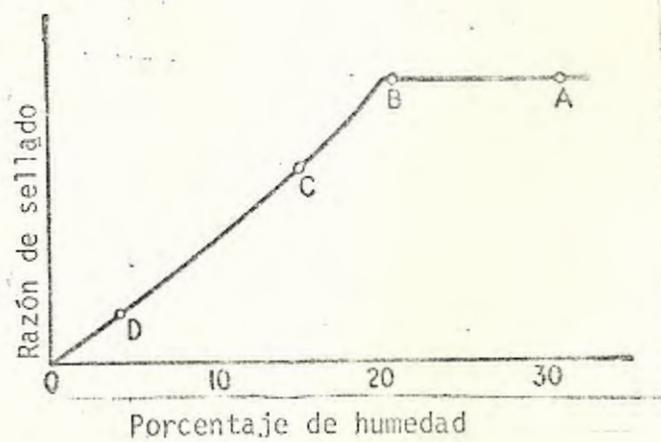


FIG.N° 7.- Curva Típica de Razón de Secado para una arcilla. (A.B.Searle)

## C A P I T U L O    I I I

### M E T O D O   E X P E R I M E N T A L

#### 3.1 PLAN GENERAL DE TRABAJO

En el presente capítulo se realizará un estudio de las materias primas que se utilizarán en la elaboración del refractario plástico ácido.

Dicho estudio se llevará a cabo en dos etapas, a saber:

- Estudio en Laboratorio
- Control en Planta

Las pruebas de laboratorio fueron efectuadas en el laboratorio del Taller de Fundición de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Las pruebas de planta se realizaron en el Taller Metalúrgico WYZ.

Para lograr el objetivo del presente trabajo, es decir, la elaboración de un refractario plástico con materia prima nacional, el primer paso de la investigación conlleva a la búsqueda de una

arena y una arcilla que combinadas cumplan con los requerimientos de un refractario plástico de carácter ácido que iguale o supere al importado.

Se realizarán mezclas variando los parámetros que intervienen en ellas, a saber: porcentajes de arena (dependiendo su granulometría) porcentajes de arcilla y de agua; verificando las siguientes propiedades: refractariedad, porosidad, densidad relativa, permeabilidad y resistencia a la compresión. A continuación se hace la selección de la mezcla óptima.

El estudio de laboratorio trata del análisis, primero de la arena de sílice y luego de la mezcla preparada con arena, arcilla, agua y de ser necesario un agente ligante para hacer más plástica la arcilla.

El segundo paso de la investigación es el estudio en planta. Esto se lleva a cabo de la siguiente manera: con la mezcla óptima se revestirá una cuchara de colado y se observará cuáles son los resultados después de utilizarla, evaluando desgaste, resistencia al manejo, durabilidad, etc.

Si se obtiene resultados favorables, entonces se revestirá una parte del cubilote; siguiendo un registro de funcionamiento del mismo.

El revestimiento que se coloque en el cubilote se irá aumentando paulatinamente dependiendo de los resultados obtenidos en cada fundida.

La prueba final consistirá en revestir íntegramente la zona de fusión del cubilote.

La evaluación del refractario plástico se hará midiendo el diámetro interior del revestimiento del cubilote antes y después de fundir. También se tomará en cuenta el número de cargas que resiste.

A continuación se estudiará más en detalle cada uno de los pasos expuestos anteriormente.

### 3.2 ESTUDIO DE LABORATORIO

En esta parte se indicará el tipo de prueba a efectuarse, los equipos utilizados y el método seguido para realizar cada una de dichas pruebas.

A continuación se indica en forma general cuáles son los estudios que se efectuarán en laboratorio.

En el Laboratorio de la ESPOL se realizará un control de la arena

silícea verificando la granulometría y densidad de las mismas, luego se prepararán mezclas de arena de distinta granulometría con el propósito de obtener el mejor arreglo posible entre las partículas de arena. También se analizará las propiedades de las mezclas formadas con la arena silícea y la arcilla.

El último paso en el laboratorio es seleccionar la mezcla óptima que cumpla con los requerimientos de un refractario plástico de carácter ácido.

### 3.2.1 Control de Materias Primas

Las materias primas a estudiarse son: La arena silícea procedente de la Región Oriental, la piedra de cuarzo procedente de la Costa Ecuatoriana, específicamente de la Península de Santa Elena; y la arcilla procedente de Azogues (Caolín). Además del caolín se utilizará la bentonita cálcica de Charazol.

a) Arena Silícea.- En el País hay sitios donde se ha encontrado arena silícea de excelente calidad, éstos, se presentan en la Tabla II\*, en la cual se indica el nombre del yacimiento, el mineral, el nombre del lugar, la fase y reservas.

---

\* Tabla obtenida de la tesis de grado del Ing. Marcos Tapia, cuyo título es "Arenas Nacionales para la elaboración de Corazones (Cores) por Proceso de Caja Caliente para la Industria de la Fundición".

y  $e_{max}$  pueden adquirir valores diferentes.

En el caso de esferas de igual tamaño se obtienen los siguientes valores

$$e_{min} = 0.35$$

$$n_{min} = 26\%$$

$$e_{max} = 0.91$$

$$n_{max} = 48\%$$

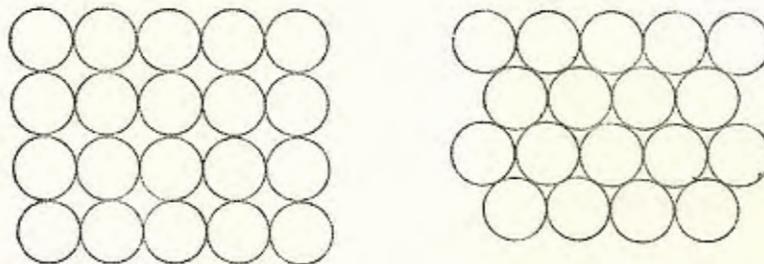


FIG N° 10.- Esferas de igual diámetro en estibación floja (a) y compacta (b) (Terzaghi-Peck).

Cuanto más uniforme es una arena más se aproxima su  $e_{max}$  y  $e_{min}$  a los anteriores valores (Fig. N° 10), para esferas iguales, cuanto menos uniforme sea, es decir, arenas mejor graduadas menores son  $e_{max}$  y  $e_{min}$ .

El ensayo que se realizar en laboratorio es el granulo-

métrico o ensayo de finura de las arenas. El dispositivo a utilizarse es la máquina Ro-Tap (agitador de Tamices). Se coloca la muestra de arena seca (50 gramos) en el tamiz superior, a continuación se pone la cubierta sobre el conjunto de tamices y se las agita durante 15 minutos.

Una vez establecido el número AFS de cada una de las arenas, se procede a combinarlas para determinar el mejor acomodo de granos de arena que proporcionen mayor densidad. La densidad relativa de una arena se define por una relación entre los índices de poros correspondientes a las compacidades máxima y mínima posibles de la arena y la particular de la muestra que se estudia.

$$D_R = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

$D_R$  = densidad relativa

$e_{\max}$  = máximo índice de poros (mínima compacidad)

$e_{\min}$  = mínimo índice de poros (máxima compacidad)

$e$  = índice de poros del suelo que se estudia

Como se ve, la densidad relativa expresa el grado de compacidad de una arena en un estado determinado por la relación del máximo incremento posible de su índice de poros a la amplitud total de variación de dicho índice.

La porosidad ( $n$ ) es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total del suelo, entendiéndose como volumen de vacíos aquella parte del volumen total no ocupada por los granos. Si la porosidad se expresa en porcentaje, se denomina porcentaje de vacíos.

La relación de vacíos ( $e$ ) es la relación entre el volumen de los vacíos y el volumen de los sólidos Fig. N° 11.

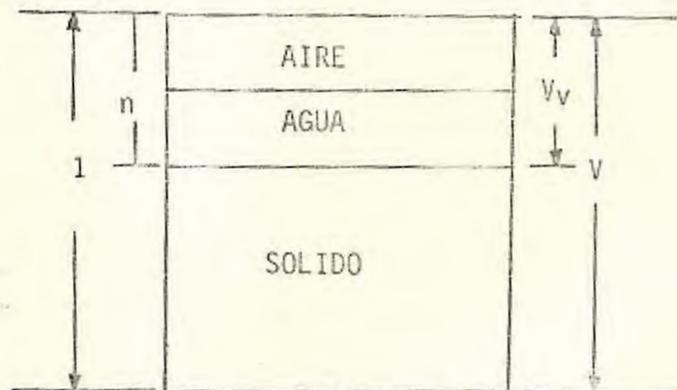


Fig. N° 11.- Esquema aclaratorio de los conceptos porosidad ( $n$ ) e índice de poros ( $e$ ). (Terzaghi-Peck).

La relación de vacíos y la porosidad están relacionadas por las fórmulas:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

- $V_v$  = Volumen de vacíos  
 $V$  = Volumen total  
 $V_s$  = Volumen de sólidos  
 $n$  = porosidad  
 $e$  = índice de poros

En la determinación de la granulación de las arenas se utilizó el siguiente equipo de laboratorio:

- Balanza eléctrica (0.01 gr)
- Vibrador de Tamices Ro-Tap.
- Tamices (20-40-50-70-100-140-200-Charola)

Para realizar el ensayo se pesa 50 gr. de la muestra (seca), se coloca en el tamiz superior y se acciona el Ro-Tap durante 15 minutos, luego se obtiene los pesos acumulativos de la muestra y se procede a calcular el índice de finura AFS mediante la siguiente relación

$$\text{Número de Finura de grano AFS} = \frac{\text{Producto total}}{\text{Porcentaje total de grano retenido}}$$

El número de finura de grano (AFS) es un método rápido para establecer el tamaño promedio de una arena dada. Desgraciadamente, el número de finura de grano no proporciona mayor información en cuanto a la distribución de

los tamaños del grano. Por lo tanto, dos arenas pueden tener el mismo número de finura pero diferir ampliamente en su distribución y permeabilidad base.

Para determinar la densidad relativa de arenas se utilizan los siguientes equipos:

- Balanza eléctrica (0.01 gr)
- Instrumento compactador de probetas normalizadas.
- Recipiente tubular para comprimir la probeta de norma AFS.
- Embudo plástico.

La compacidad mínima o estado más flujo de la arena en estudio se encuentra de la siguiente manera:

Se coloca el embudo plástico sobre la probeta cilíndrica, a continuación se echa arena sobre el embudo hasta llegar a una altura de dos pulgadas, luego se pesa la cantidad de arena que se encuentra en el interior del recipiente con el propósito de observar el comportamiento de la densidad relativa de la arena de acuerdo al grado de atacado, para ello se utilizó el instrumento compactador norma. Con igual cantidad de arena, es decir, manteniendo constante el peso de la muestra se realizan las pruebas, variando

el grado de atacado (número de golpes).

A medida que aumenta el grado de atacado disminuye la altura de la muestra.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de la densidad relativa se indican en el apéndice B, y también se incluyen los valores de  $e$  y  $\gamma_s$ .

En la Tabla III\* se presenta la denominación de la arena según la compacidad.

T A B L A III

$D_R$ (%)	D E N O M I N A C I O N
0 - 15	Muy suelta
15 - 35	Suelta
35 - 65	Media
65 - 85	Compacta
85 - 100	Muy compacta

b) Arcilla .- Como se manifestó anteriormente la arcilla es

\*Tabla obtenida del Libro Mecánica de Suelos por Terzaghi-Peck.

el material aglutinante del refractario, cuyo propósito es de mantener una buena consistencia de la mezcla.

Los materiales aglutinantes usados en la fabricación del refractario plástico fueron: Bentonita Sódica y Caolín.

El caolín se obtuvo del yacimiento que se encuentra en Pindilig-Azogues.

A continuación se presentan los resultados de la arena silícea ensayada:

Nº de TAMIZ	PESO RETENIDO (gramos)	PORCENTAJE RETENIDO	FACTOR	PRODUCTO
20	13.27	26.54	10	265.4
40	28.39	56.78	20	1135.6
50	6.45	12.90	40	516.0
70	1.31	2.61	50	131.0
100	0.18	0.36	70	25.2
140	0.08	0.16	100	16.0
FONDO	0.10	0.20	140	28.0
TOTAL	49.78	99.56		2117.2

$$AFS = \frac{2117.2}{99.56} = 21$$

TABLA IV.- NUMERO DE FINURA DE ARENA PROCEDENTE DE LIMON INDANZA  
(MORONA SANTIAGO).-

Nº DE TAMIZ	PESO RETENIDO (gramos)	PORCENTAJE RETENIDO	F A C T O R	P R O D U C T O
40	4.00	8.00	30	240
50	6.00	12.00	40	480
70	10.23	20.46	50	1023
100	18.00	36.00	70	2520
140	5.77	11.54	100	1154
200	5.00	10.00	140	1400
FONDO	0.79	1.58	200	316
TOTAL	49.79	99.58		7133

$$AFS = \frac{.7133}{99.58} = 72$$

TABLA V.- NUMERO FINURA DE ARENA PROCEDENTE DE LIMON INDANZA (MORONA SANTIAGO)

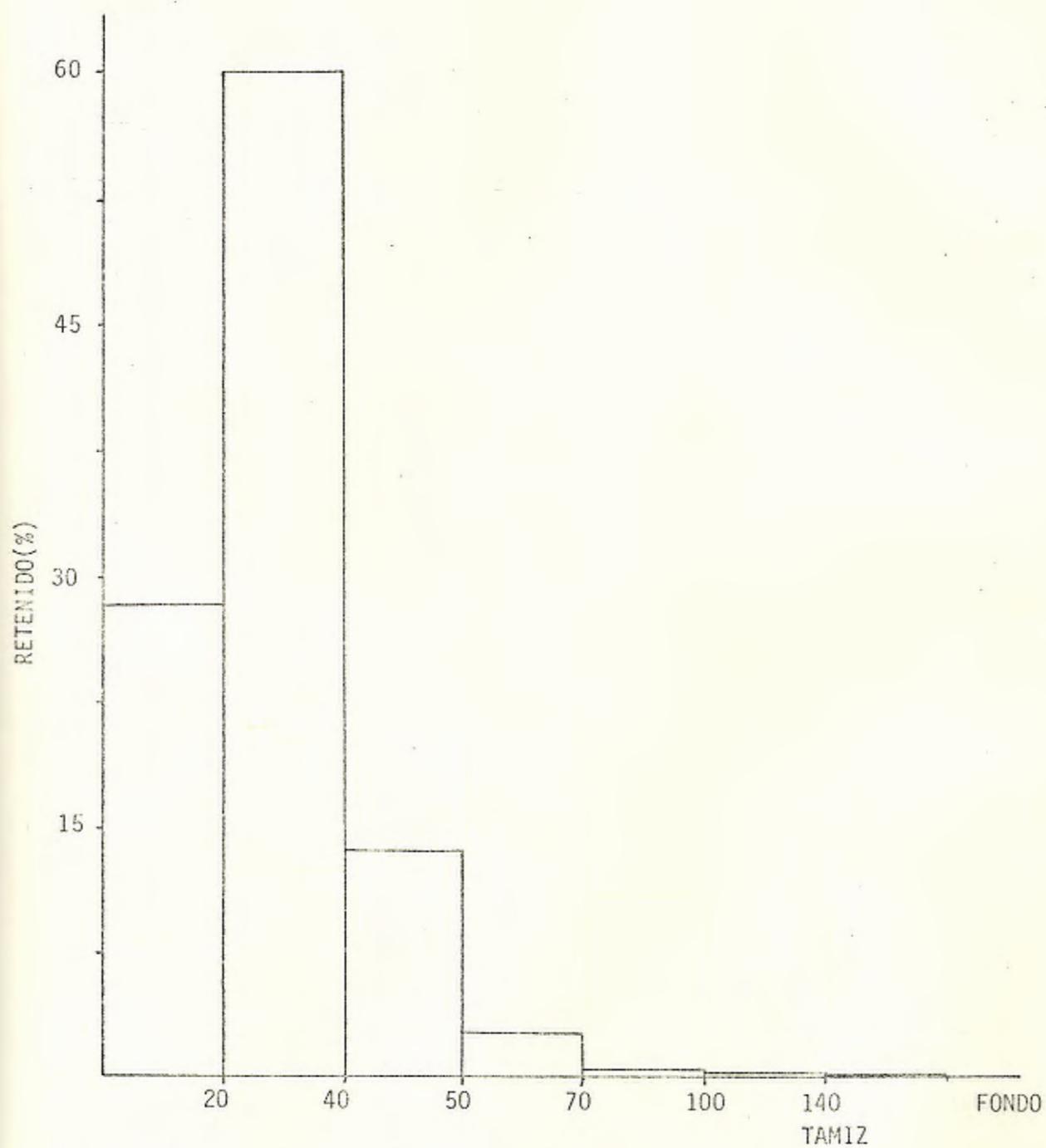


Fig. N° 12.- Análisis granulométrico de arena de AFS 21

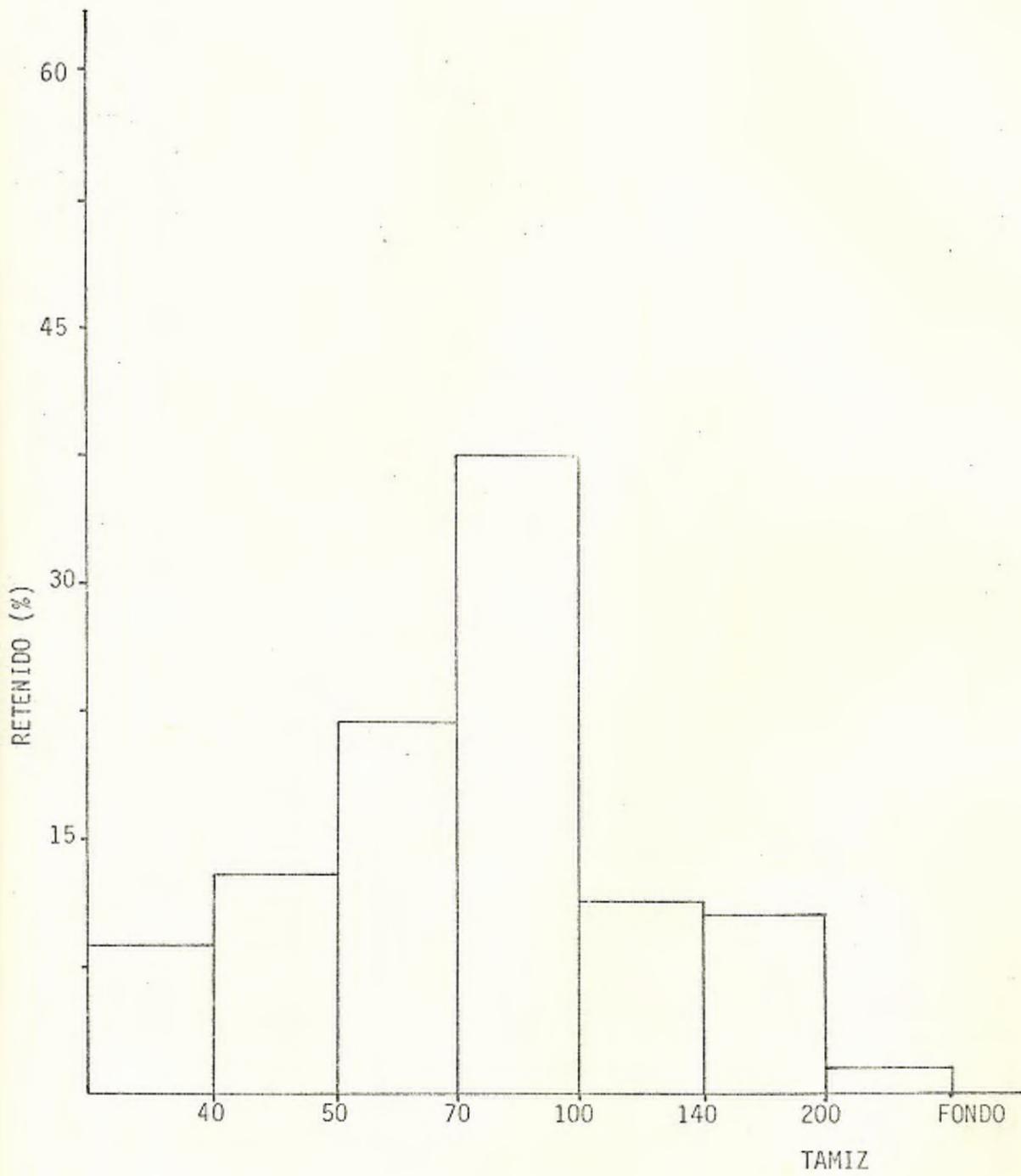


Fig. N° 13.- Análisis granulométrico de Arena de AFS 72

Nº DE GOLPES	VOLUMEN DE ARENA (cm )	INDICE DE POROS	POROSIDAD (%)	DENSIDAD RELATIVA (%)
0	54.15	0.901	47.39	
3	58.28	0.766	43.37	62.20
6	60.19	0.710	41.52	73.30
12	62.21	0.654	39.54	79.40
24	63.52	0.620	38.27	81.90
36	64.89	0.586	36.95	83.80
48	65.77	0.565	36.10	84.80
80	66.55	0.544	35.23	85.70

TABLA VI.- DENSIDAD RELATIVA DE ARENA PROCEDENTE DE LIMON INDANZA DE AFS = 21

Nº DE GOLPES	VOLUMEN DE ARENA (cm <sup>3</sup> )	INDICE DE POROS	POROSIDAD (%)	DENSIDAD RELATIVA (%)
0	51.53	0.997	49.92	
3	58.12	0.771	43.50	35.24
6	59.56	0.730	42.20	44.94
12	61.33	0.680	40.48	46.37
24	62.70	0.640	39.02	58.82
36	64.32	0.600	37.50	62.97
48	65.17	0.580	36.71	64.75
80	65.89	0.560	35.89	66.36

TABLA VII.- DENSIDAD RELATIVA DE ARENA PROCEDENTE DE LIMON INDANZA DE AFS= 72

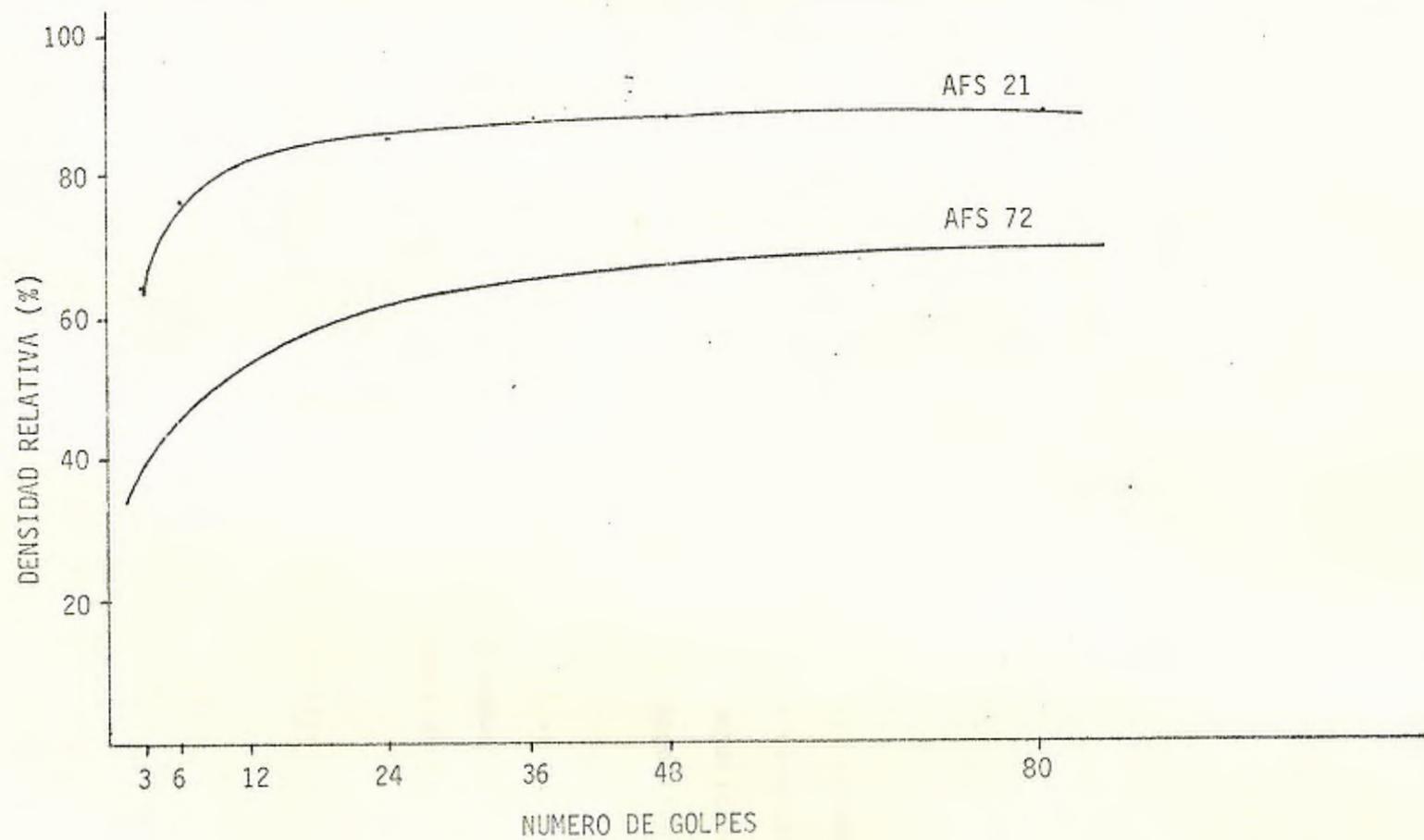


Fig. N° 14.- Variación de la densidad relativa según el grado atacado.

Los gráficos de las figuras 12 y 13 indican la \*distribución granulométrica de las arenas cuya AFS es de 21 y 72 respectivamente. Se puede apreciar en la Fig. N° 12 que el mayor porcentaje de arena queda retenido en tamiz # 40 lo cual es indicativo de que se trata de una arena gruesa. En el apéndice C se indica la abertura de malla en milímetros para las distintas normas existentes. La norma usada en este caso es la ASTM por lo que, para el tamiz # 40 corresponde una abertura de 0.42 mm.

Con los datos de las Tablas VI y VII se realizaron curvas de la densidad relativa versus el grado de atacado. La figura N° 14 indica las compacidades de las arenas de número de finura 21 y 72 respectivamente.

De acuerdo a la Tabla III (3.2.1) se puede definir a la arena de AFS 21 como una arena compacta, mientras que la arena de AFS 72 como una arena de compacidad media.

### 3.2.2 Preparación de las mezclas refractarias

El equipo utilizado en la preparación de las mezclas refractarias fue el molino mezclador del laboratorio marca Simpson.

\*Escala Ampliada de Apéndice D.

Los materiales usados en la elaboración del refractario fueron arena sílicea, piedra natural, bentonita sódica y agua. Además se utilizó en porcentajes muy pequeños como agente ligante el silicato de sodio y el ácido bórico.

Inicialmente se prepararon mezclas utilizando arena gruesa (AFS 21) y arena fina (malla 140-100) con bentonita y agua. En estas mezclas se varió los porcentajes de arena que formaban el refractario, manteniéndose constante los otros parámetros (bentonita y agua). El propósito de esto fue el de observar el comportamiento de las arenas al combinarse con la bentonita, en otras palabras, buscar la mejor disposición o acomodo de los granos de arena para obtener una mayor densidad.

A las mezclas anteriormente estudiadas se les agregó silicato de sodio o ácido bórico.

En este caso se mantuvo constante los porcentajes de arena, bentonita, y agua, variando sólo el porcentaje del agente ligante.

También se realizaron algunas mezclas utilizando caolín en vez de bentonita, en éstas se redujo el porcentaje de agua, debido a que el caolín necesita menos agua que la bentoni-

ta ya que como se estudió en el Capítulo II, su composición química es diferente.

La mezcla de la materia prima se realiza en el molino mezclador de la empresa, de la siguiente manera:

Se coloca primero la arena de sílice (en las proporciones anteriormente indicadas) paralelamente con la bentonita y se mezclan durante 2 minutos; se apaga el molino y se agrega el agua, a continuación, se prende el molino y se mezcla durante el tiempo necesario para obtener una masa plástica homogénea, seguidamente se agrega el silicato de sodio.

Con la mezcla preparada se procede a revestir las cucharas, para lo cual, se baña la pared interior de las cucharas con una mezcla de bentonita y agua, o con barro; con el propósito de que el refractario se adhiera en mejor forma a las paredes de las cucharas.

Otro tipo de mezcla que se elaboró fue utilizando piedra natural de cuarzo.

La piedra que se indica en la Fig. 9 (a) tiene un tamaño promedio de 12 milímetros.

El 50% de este material formaba parte de la mezcla, el 50% restante lo formaba: la arena gruesa (AFS 21), la fina (AFS 72) y la bentonita.

El material que se indica en la Fig. 9 (b) es piedra natural que se encuentra en Río Verde en la península de Santa Elena. Esta roca se la obtiene en distintos tamaños desde una pequeña piedra hasta una roca de gran tamaño. También se elaboró mezclas con esta piedra natural. Las proporciones de las mezclas se detallan en el Capítulo IV.

### 3.2.3 Verificación de las Propiedades de las Mezclas

Las propiedades que se estudiarán son las siguientes: porosidad, densidad relativa, permeabilidad, resistencia a la compresión y refractariedad.

Para determinar la porosidad y la densidad relativa se utilizará el mismo método explicado en la sección 3.2.1 correspondiente a la parte de arena de sílice.

El instrumento usado para determinar la permeabilidad es el permeámetro. (Dietert).

La permeabilidad se define como la propiedad física de la

masa moldeada de una mezcla de arena que permita el paso de gas a través de la misma. Se determina por la cantidad de aire que puede pasar a través de la muestra cilíndrica de norma AFS (50.8 mm x 50.8 mm) bajo una presión también normalizada, una mezcla de arena de permeabilidad elevada tiene buenas propiedades de ventilación debido a su porosidad.

A continuación definiremos tres condiciones al medir la permeabilidad:

- Permeabilidad base.- La permeabilidad de los granos compactados de arena en seco sin contenido de arcilla u otra sustancia aglutinante.
- Permeabilidad en verde.- La permeabilidad de una masa de arena moldeada en condición humedecida.
- Permeabilidad en seco.- La permeabilidad de una masa de arena moldeada que contiene arcilla y/o aglutinantes según la clasificación de la AFS y que ha sido secada completamente entre 104 y 110°C y enfriada en un secador hasta la temperatura ambiente.

La permeabilidad en verde será la que se determina en el análisis de laboratorio.

Las probetas se preparan utilizando el instrumento compactador norma. De la muestra de arena se pesa una cantidad suficiente para producir una probeta de ensayo cilíndrica de norma AFS de 50.8 a 50.8 mm (2 x 2 pulg) (3golpes).

La resistencia a la compresión de una arena en verde, se define como la resistencia máxima que una muestra es capaz de soportar cuando se la prepara, apisona y ensaya de acuerdo con el procedimiento norma. Debe utilizarse una probeta de forma cilíndrica de 50.8 mm de diámetro por 50.8 mm. de altura preparada como se indicó anteriormente.

El equipo utilizado es la máquina universal de ensayos para arenas.

El procedimiento para un ciclo de mezclado corriente para un mezclador de arena de laboratorio es:

- Añadir la arena al mezclador y hacerlo girar lo bastante para extender la arena uniformemente.
  
- Añadir la cantidad de arcilla deseada de manera que se eviten pérdidas en forma de polvo o por adherencia a las superficies inactivas del mezclador.

- Accionar el mezclador y dejarlo girar por dos minutos.  
Evitar pérdidas de arcilla en forma de polvo por medio de una cubierta apropiada y dejarlo asentar el polvo un minuto después del período de mezclado justamente descrito.
- No accionar el mezclador de nuevo hasta que se haya añadido toda el agua de preparación. Se recomienda este procedimiento para evitar pérdidas de agua que salpique sobre las partes inactivas del mezclador.
- Cubrir el mezclador y mezclar durante tres minutos.

La mezcla así preparada se utiliza para determinar la permeabilidad y resistencia a la compresión en verde.

La refractariedad puede determinarse por tres métodos: Con el horno GF (Fisher) de sinterización de un máximo de 1500°C; con el aparato Dieter (AFS) que da los puntos A y B de sinterización, y con el método de los conos Seger.

El equipo que tiene el Laboratorio de la ESPOL es el sinterizador DIETER, que al momento no está operativo, pero por datos de CRIDESA, el mismo está alrededor de 1550°C.

# DE GOLPES	VOLUMEN DE ARENA (cm <sup>3</sup> )	INDICE DE POROS	POROSIDAD (%)	DENSIDAD RELATIVA (%)
0	52.48	0.960	48.90	
3	60.80	0.693	40.93	58.80
6	62.29	0.652	39.46	64.28
12	63.35	0.625	38.46	67.16
24	64.35	0.599	37.46	69.53
36	65.33	0.575	36.62	71.43
48	65.82	0.569	36.10	72.20
80	66.73	0.542	35.14	73.68

AFS 21 85%

AFS 72 15%

TABLA VIII.- DENSIDAD RELATIVA DE MEZCLA DE ARENA SILICEA EN LAS PROPORCIONES INDICADAS.

# DE GOLPES	VOLUMEN DE ARENA (cm <sup>3</sup> )	INDICE DE POROS	P O R O S I D A D (%)	DENSIDAD RELATIVA (%)
0	53.81	0.913	47.72	
3	60.82	0.692	40.89	71.49
6	62.06	0.658	39.68	75.29
12	65.21	0.578	36.63	81.19
24	66.20	0.555	35.69	82.40
36	67.16	0.532	34.73	83.46
48	67.21	0.531	34.68	83.51
80	69.61	0.478	32.34	85.52

AFS 21 88%

AFS 72 12%

TABLA IX.- DENSIDAD RELATIVA DE LA MEZCLA DE ARENA  
SILICEA EN LAS PROPORCIONES INDICADAS.

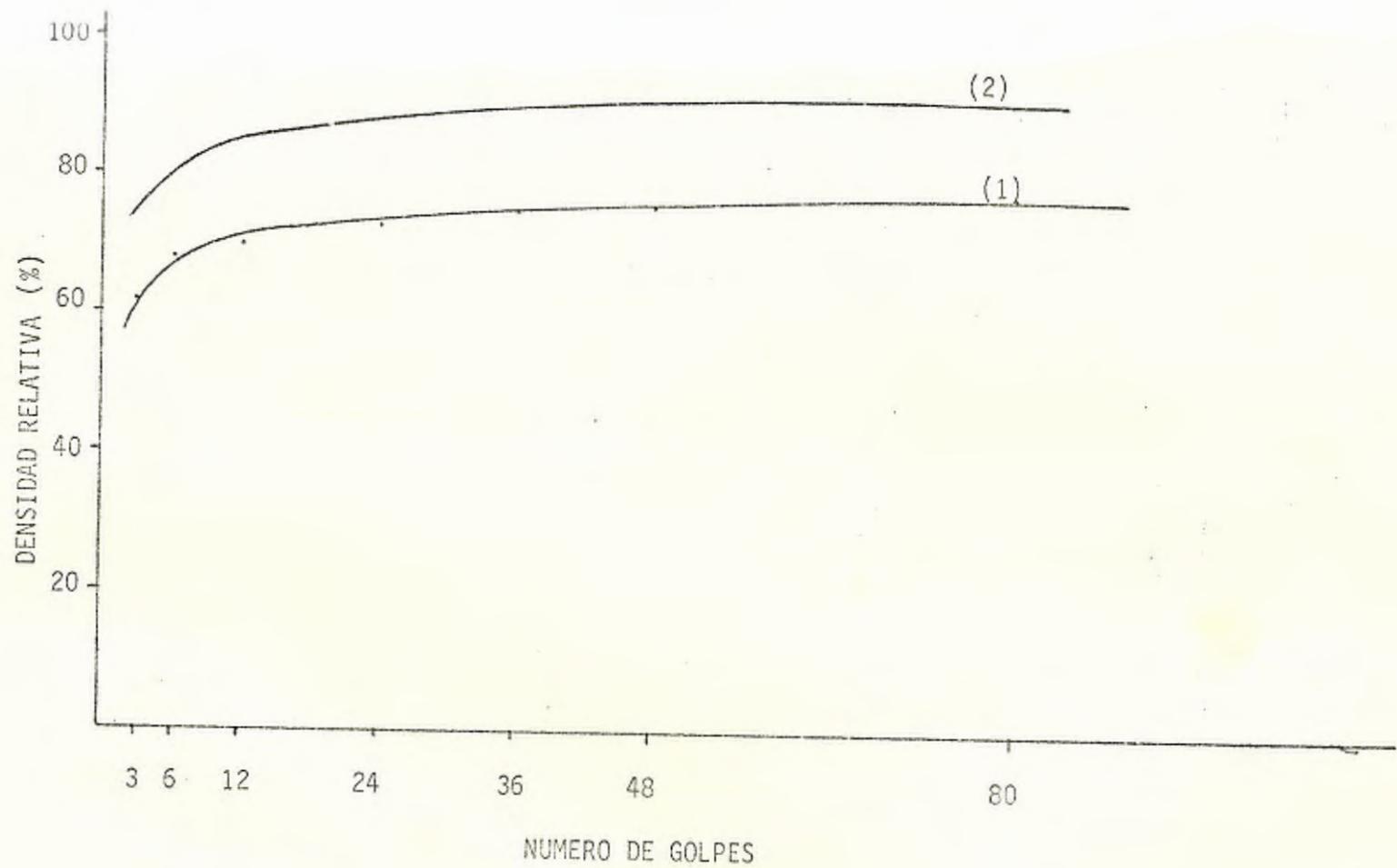


Fig. Nº 15.- Variación de la Densidad Relativa según el grado de atacado.

Proporción de mezcla:	Arena Sílicea AFS 21	88%
	Arena Sílicea AFS 72	12%
	Bentonita	7%
	Agua	6%
	Silicato de sodio (del peso de bentonita)	4%

# DE GOLPES	PERMEABILIDAD	RESISTENCIA A LA COMPRESION (lb/pulg <sup>2</sup> )
3	350	12.4
6	250	16.0
12	193	20.0
24	145	30.4
36	120	37.3
48	107	41.6
80	88	47.4

TABLA X.- VARIACION DE LA PERMEABILIDAD Y RESISTENCIA A LA COMPRESION SEGUN EL GRADO DE ATACADO.

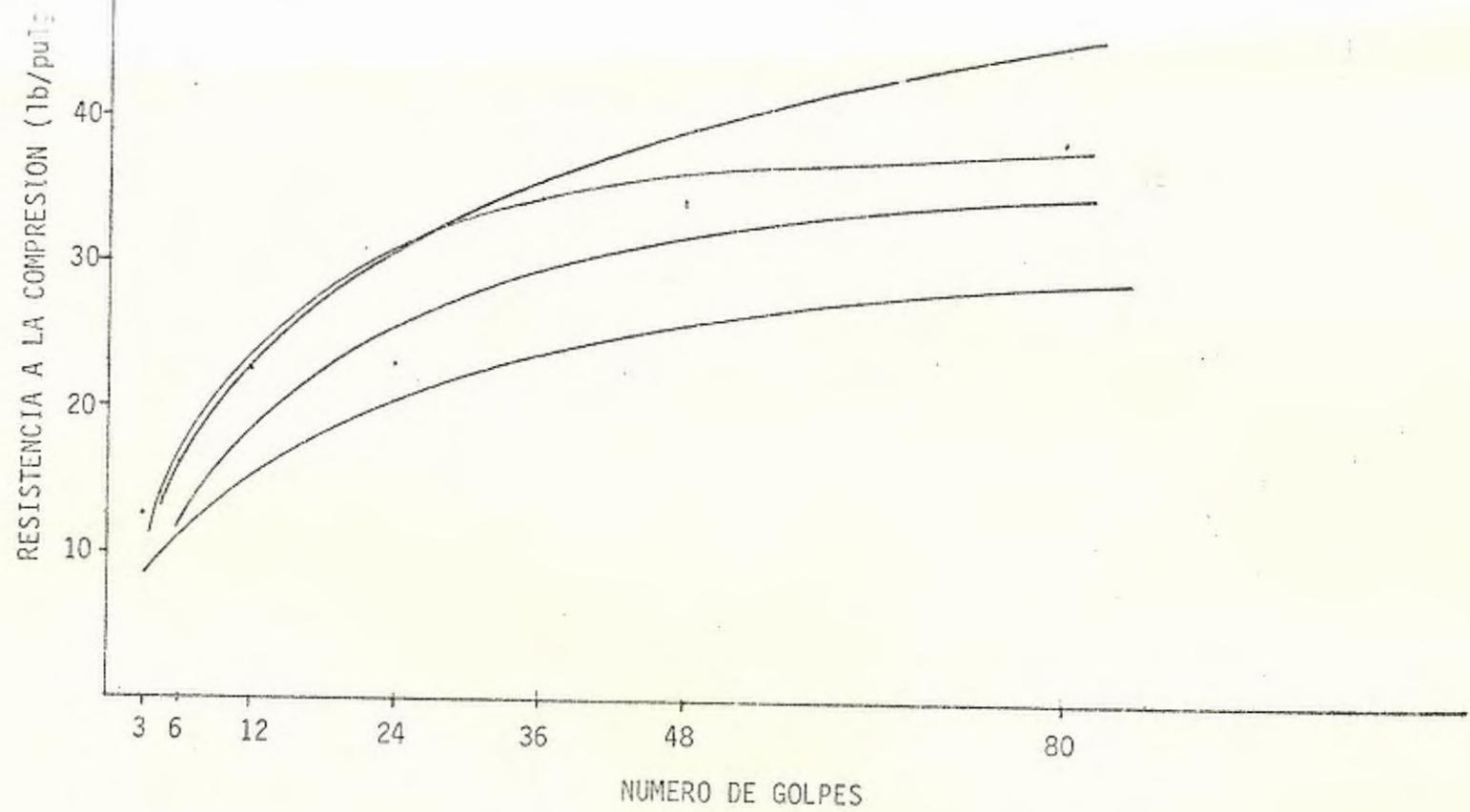


Fig. N<sup>o</sup> 17.- Variación de la resistencia a la Compresión según el grado de atacado.

Curvas: (1) AFS 21 85%      AFS 72 15%

Curvas: (2) AFS 21 85%      AFS 72 12%

Aparte de las mezclas presentadas en las Tablas VIII y IX se realizó un sinnúmero de mezclas variando no solo porcentajes de arena sino también la granulometría de las mismas. De este grupo de mezclas ensayadas se hizo una selección previa, para incluirlas en el presente trabajo; tomando como factor principal la compacidad de las mismas.

En la figura 15 se presenta las curvas de mezclas formadas con arena procedente de Limón-Indanza, se puede apreciar que la que tiene un mayor porcentaje de arena gruesa es la más compacta. Haciendo referencia a la Tabla III, la Curva (1) corresponde a una arena de compacidad media, mientras que la Curva (2) indica una arena compacta.

Debido a que la mezcla cuyas proporciones se indican en la Tabla IX presenta una mejor distribución de los granos de arena (mayor compacidad) se la selecciona como base para preparar las mezclas refractarias con bentonita y agua y silicato de sodio o ácido bórico.

La resistencia a la compresión en verde es un parámetro im-

portante de considerar ya que la mezcla debe tener buena consistencia para que se mantenga adherido a las paredes del cubilote formando un solo cuerpo hasta que se realice la sinterización del mismo.

Las mezclas que se realizan con caolín tuvieron una resistencia a la compresión en verde muy baja, debido a la poca plasticidad de la arcilla, y aún poniendo porcentajes elevados de silicato de sodio, las probetas tenían poca consistencia.

#### 3.2.4 Selección de la Mezcla Optima

De acuerdo a los análisis realizados en laboratorio (considerando las limitaciones de equipos) se hace la selección de la mezcla que será utilizada en los trabajos de planta. Cabe indicar que la mezcla refractaria seleccionada servirá como guía para iniciar las pruebas en planta y estará sometida a los cambios necesarios para obtener mejores resultados en su comportamiento como refractario monolítico. Esto se debe a que en el laboratorio no se pudo probar la mezcla (como se verá en el capítulo IV) bajo las mismas condiciones de esfuerzos térmicos a las que está sometida en el cubilote y sus accesorios.

Por lo tanto, la mezcla óptima deberá cumplir con lo siguiente:

- Mayor resistencia a la compresión (en verde)
- Mayor densidad relativa
- Menor porosidad
- Menor permeabilidad
- Mayor refractariedad (punto de sinterización)

Observando los resultados gráficos y haciendo una comparación basándose en los parámetros anteriormente mencionados la mezcla seleccionada es la que tiene las siguientes proporciones:

Arena Silícea AFS 21	88%
Arena Silícea AFS 72	12%
Bentonita	7%
Agua	6%
Silicato de sodio (del peso de la bentonita)	4%

#### ESTUDIO EN HORNOS DE CUBILOTE Y ACCESORIOS

Una vez realizados los análisis de laboratorio y habiendo seleccionado la mezcla óptima se procede al estudio en planta.

Se estudiará el comportamiento del refractario en las cucharas de colado, antecrisol de cubilote y cubilote.

Los parámetros a controlarse son: tiempo de duración del revestimiento y desgaste del mismo, además se tomará en cuenta el tiempo de secado del revestimiento plástico colocado ya sea en el horno o en la cuchara de colado.

### 3.3.1 Cucharas de Colado y Transporte

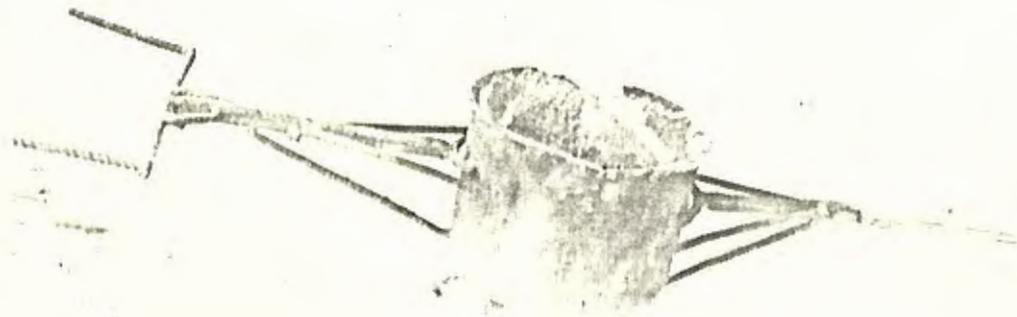
En la Fig. N° 18 se puede apreciar las cucharas de colado y transporte que se revistieron con la mezcla en estudio.

El revestimiento se coloca en la cuchara manualmente usando un pinsón con la finalidad de compactar lo mejor posible el refractario.

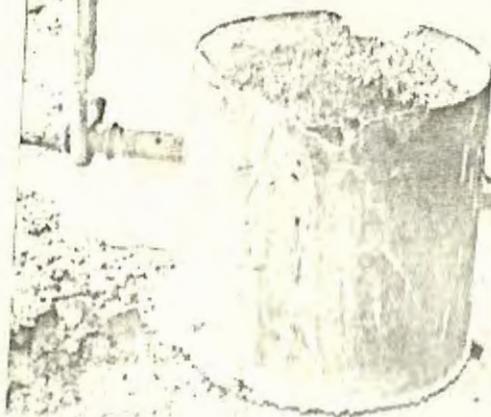
### 3.3.2 Antecrisol de Cubilote

El antecrisol de cubilote es un recipiente revestido con material refractario que almacena el metal fundido que proviene del horno de cubilote y mantiene la temperatura del metal por medio de una fuente externa de calor.

El revestimiento del material se lo hace en forma similar



(a)



(b)

Fig. Nº 18.- Cucharas de Colado (a) y Transporte (b)  
revestidas con Refractario Monolítico.

a las cucharas de colado, es decir, manualmente.

### 3.3.3 Cubilote

El revestimiento monolítico se instalará en la zona más crítica del cubilote; es decir, la zona de fusión. El montaje del refractario puede hacerse por medio de tres variantes:

Desmontando los anillos o secciones del cubilote y dejándolos sobre el suelo de la nave y atacando el revestimiento con un martillo neumático.

Otra variante es la de preparar un molde en el que partiendo del mismo refractario se moldean ladrillos. Estos ladrillos, aún en estado húmedo y plástico, se colocan formando anillos de la forma alternada de los ladrillos de una pared. Después se golpea el conjunto con un mazo de madera de forma que el revestimiento cede quedando las juntas tapadas, evitándose fugas.

La tercera variante es utilizando un molde cilíndrico, el mismo que se coloca en el interior de la zona que se va a revestir introduciendo el material entre la pared del cubilote y la del molde para luego compactarlo con un pisón

neumático.

Este molde se va sacando paulatinamente a medida que se va revestiendo con el propósito de facilitar el desmoldeo del mismo.

Secado del revestimiento.-

El día anterior al de la primera colada de un revestimiento nuevo se llena de coke el cubilote hasta la zona de precalentamiento, se enciende y se deja arder a fuego lento, con lo que el revestimiento está al día siguiente seco y caliente (800°C).

Se hicieron las siguientes pruebas:

PRUEBA N° 1

Mezcla utilizada:

Arena silicea AFS 21	88%
Arena silícea AFS 72	12%
Bentonita sódica	7%
Agua	6%
Silicato de sodio (del peso de bentonita)	4%

La mezcla se preparó en el molino mezclador de la fábrica durante 5 minutos, tiempo suficiente para obtener una masa homogénea.

A continuación se procedió a revestir las cucharas de transporte y colado (Fig.18).

El revestimiento se lo hizo en forma manual, utilizando un mazo para su compactación.

El espesor del revestimiento para ambas cucharas es de 3 centímetros aproximadamente.

El secado del revestimiento se lo hace prendiendo leña seca en el interior de las cucharas, secándolas a fuego lento durante 4 ó 5 horas.

PRUEBA N° 2

Después de haber logrado resultados positivos en las cucharas de colado con el refractario plástico preparado en las proporciones antes indicadas (Prueba N° 1), se procedió a utilizar en el cubilote como material de parcheo, revistiendo una tercera parte en la zona sobre toberas, como indica la Fig. N° 19.

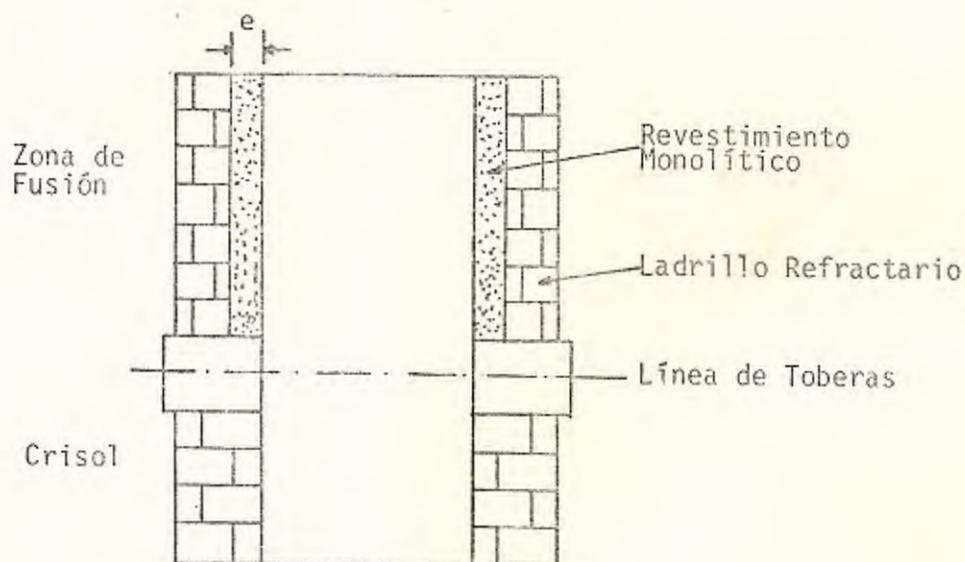


Fig. N° 19.- Esquema demostrativo de la parte del cubilote revestida con el refractario plástico.

El parcheo se realiza en forma manual y es compactado con un pistón manual.

La parte más clara es el refractario en estudio. Se puede notar que se revistió exactamente arriba de una de las toberas. El espesor (e) del revestimiento es de 5 centímetros aproximadamente.

El tiempo de secado fue de 3 horas aproximadamente, que es el tiempo de precalentamiento del horno de cubilote mediante la cama de coke.

El refractario no soportó las condiciones de trabajo consumiéndose una parte y derrumbándose otra.

La arena que se fundió hizo más viscosa la escoria, lo cual originó dificultades en la fundida.

### PRUEBA N° 3

Se revistió una parte de la zona de fusión, como se aprecia en la Fig. N° 22 .

Se realizó el parcheo exactamente en la parte superior de una de las toberas.

El secado se realizó lentamente a una temperatura de 1400°F, mediante la cama de coke.

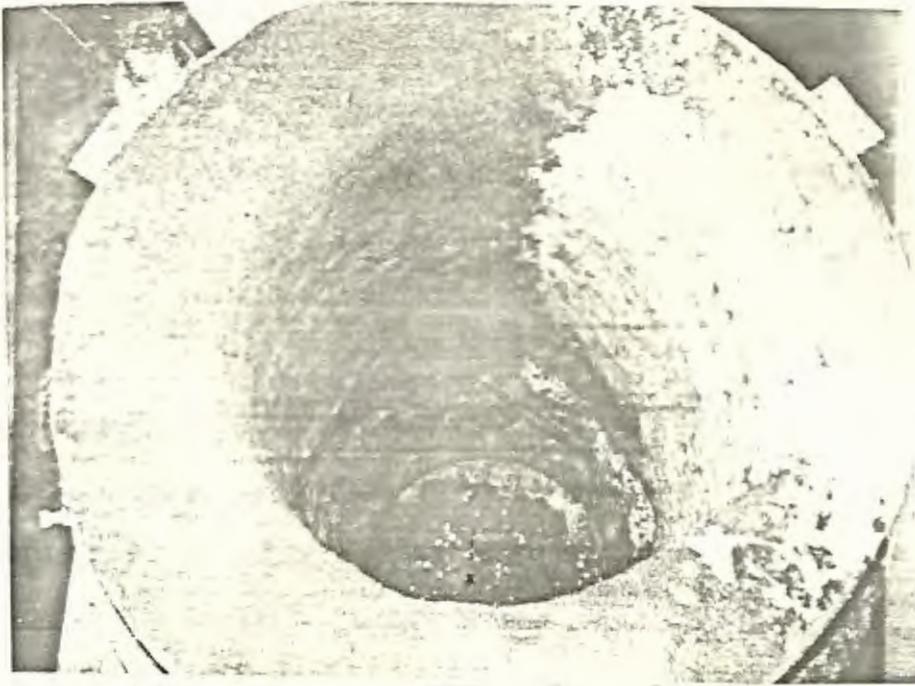


Fig. N° 22.- Zona de Fusión del Cubilote

Se fundieron 26 cargas de hierro, cada una de 80 Kg. A partir de la sexta carga se agrega un fundente para hacer más fluida la escoria se llevó un registro de funcionamiento del cubilote; no hubo ninguna anomalía en el escoriadero, ni en las toberas, el tiempo entre cada picada fue de aproximadamente 10 minutos.

El revestimiento después de fundir quedó en buenas condiciones.

#### PRUEBA N° 4

Esta vez se fundieron 19 cargas de 90 Kg cada una, es decir, 10 Kg.

más que en la anterior.

Al siguiente día de la fundida se pudo observar que el refractario en estudio prácticamente no había sufrido desgaste y durante el funcionamiento del cubilote no se presentó ningún problema en el escoriadero.

El siguiente paso después de haber logrado resultados positivos con la mezcla refractaria, fue el de empezar a disminuir hasta eliminar completamente el carburo de calcio y paralelamente ir aumentando la cantidad de refractario colocado en la zona de fusión del cubilote.

Anteriormente, el tiempo que se tardaba entre cada picada era de 20 minutos debido a que la arena sílicea que formaba parte del refractario se fundía haciendo más viscosa la escoria. Este problema se solucionó agregando carburo de calcio; ahora, que la arena del refractario no se funde, se tratará de eliminar el agente fluidificante de la escoria.

#### PRUEBA N° 5

El resultado fue excelente ya que no se presentaron problemas en las toberas ni en el escoriadero. Se fundieron 22 cargas de 90 Kg cada una; se disminuyó el uso de carburo de calcio colocando solo

en ciertas cargas a criterio del hornero.

La fluidez de la escoria fue normal.

El desgaste del refractario se indica a continuación:

h (cm)	e (cm)
0	4
15	4
20	5.0
30	5.5
40	4.5
50	2.5

El valor inicial de e fluctúa entre 8 y 10 centímetros debido a que en la parte central de la zona de fusión hay ladrillos que han sufrido cierto desgaste. Los valores arriba indicados no implican una fusión del material refractario, lo que sucede es que al limpiar la escoria que queda adherida al revestimiento se cae por parte del refractario debido a que el espesor de la capa sinterizada es mínima.

Se realizaron algunas pruebas más sin usar carburo de calcio, los resultados fueron satisfactorios, por lo que, se procedió a

revestir íntegramente la zona de fusión del horno, tal como se detalla en la prueba N° 6. En ciertas partes de la zona de fusión donde había desgaste del ladrillo refractario se colocó piedra natural de cuarzo procedente de Río Verde tal como indican las fotografías de la Fig. N° 23. Estas piedras después del funcionamiento normal del cubilote permanecían intactas y no se fundían.

El comportamiento de las piedras, es un indicativo que la elevada refractariedad del material y por consiguiente de la calidad del mismo.

#### PRUEBA N° 6

En las fotografías de la Fig. N° 24 se indica el desmontaje de las distintas partes del cubilote, para ello se utiliza el puente grúa.

El procedimiento seguido para colocar el revestimiento fue el siguiente.

Se sacan tres hileras de ladrillos de la zona de fusión tal como se indica en la Fig. N° 25.

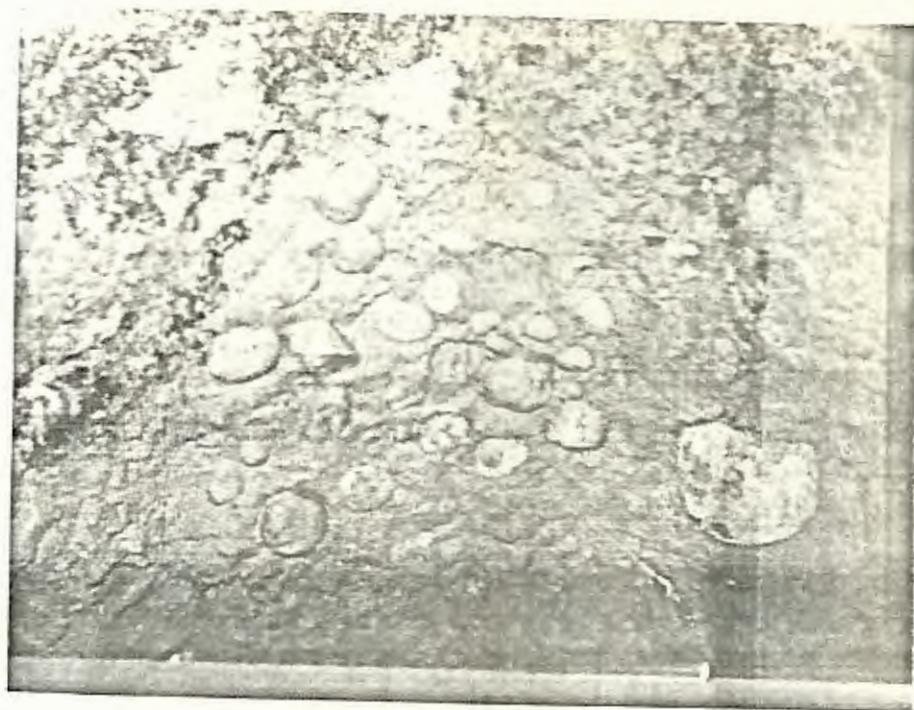


Fig. N° 23.- Revestimiento de cubilote con piedra natural de cuarzo.

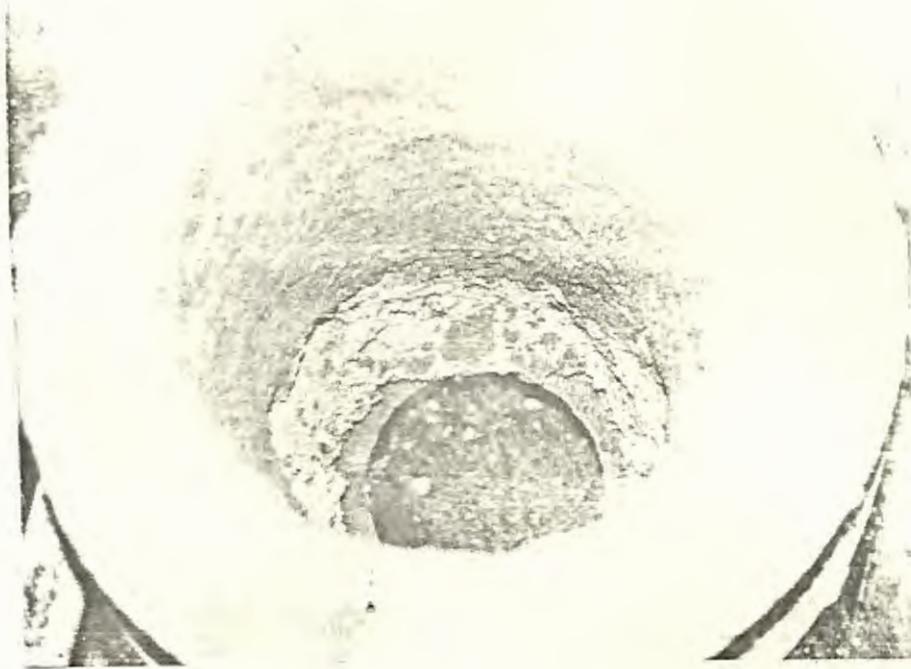


Fig. N° 28.- Zona de Fusión Revestida

presentó ningún problema durante el funcionamiento del horno).

Al día siguiente de la fundida se desmontó el horno y se observó que el refractario no había sufrido ningún desgaste, por lo que no fue necesario el parcheo que normalmente se realizaba.

Este revestimiento duró 80 cargas de 90 Kg cada una. El desgaste sufrido por el refractario fue el siguiente:

h(cm)	e(cm)
0	2
10	2.5
20	3
25	3.5
30	3
35	4
40	0

El espesor  $e$  inicial fue de 15 cms. Observando los valores arriba indicados se puede deducir que el desgaste ha sido mínimo y que se podía haber usado este revestimiento algunas cargas más.

En el siguiente capítulo se hará un análisis más detallado de cada una de las pruebas realizadas.

## C A P I T U L O   V

### DISCUSION DE RESULTADOS

Dadas las condiciones de trabajo en las fundiciones dedicadas a la producción de hierro gris con horno de cubilote, se ha podido comprobar las siguientes deficiencias en cuanto al uso de refractario en el horno y equipo auxiliar:

- 1.- Uso de ladrillo sílico-aluminoso de bajo porcentaje de alumina
- 2.- Uso de concreto hecho de ladrillo molido y bentonita, con indiscriminada utilización de ladrillos de diversa composición química.
- 3.- Uso de arena procedente del Río Guayas que no tiene más de 60% de sílice.

Estas prácticas de aplicación de refractario en cubilote trae como consecuencia una serie de efectos técnicos y económicos nocivos en la producción y que radican principalmente en: bajo rendimiento del refractario, lo que significa una mayor tasa de refractario por toneladas de hierro producido. Las razones se deben a que en todos los casos mencionados el refractario no posee las características y propiedades que exige el proceso, como por ejemplo, punto de sinterización, naturaleza de su reacción a temperaturas elevadas, etc. Por estas

causas el material se funde a consecuencia de la temperatura ó se disuelve en la escoria. Encontrándose en la práctica que las relaciones de consumo de refractario por tonelada de metal fundido son del orden de 120-150 Kg/tonelada Fe.

Se ha demostrado que el uso de refractario en base a piedra natural y arena de sílice de diferente granulometría procedente de los yacimientos Río Verde y Limón proveen de tasas de uso de refractario de alrededor de 60 Kg/tonelada Fe.

En la Prueba N° 1 se revistió las cucharas de colado con el propósito de observar principalmente el comportamiento del refractario a elevada temperatura.

En la figura N° 18 se puede notar el estado del revestimiento tanto en la cuchara de colado como en la de transporte después de haber sido utilizadas. El revestimiento no sufrió prácticamente desgaste sintetizándose en forma homogénea. El resultado fue favorable para el parámetro (temperatura) que se estaba controlando; el inconveniente que se presentó, es que al limpiar la escoria adherida a las paredes de las cucharas el refractario se desmoronó. Cabe indicar que el refractario elaborado con arena procedente del Río Guayas también tiene el mismo inconveniente. El desgaste en las cucharas usando uno u otro refractario es similar, razón por la cual no se puede establecer una diferencia notoria en cuanto a calidad, sin embargo, el comporta-

causas el material se funde a consecuencia de la temperatura o se disuelve en la escoria. Encontrándose en la práctica que las relaciones de consumo de refractario por tonelada de metal fundido son del orden de 120-150 Kg/tonelada Fe.

Se ha demostrado que el uso de refractario en base a piedra natural y arena de sílice de diferente granulometría procedente de los yacimientos Río Verde y Limón proveen de tasas de uso de refractario de alrededor de 60 Kg/tonelada Fe.

En la Prueba N° 1 se revistió las cucharas de colado con el propósito de observar principalmente el comportamiento del refractario a elevada temperatura.

En la figura N° 18 se puede notar el estado del revestimiento tanto en la cuchara de colado como en la de transporte después de haber sido utilizadas. El revestimiento no sufrió prácticamente desgaste sinteriéndose en forma homogénea. El resultado fue favorable para el parámetro (temperatura) que se estaba controlando; el inconveniente que se presentó, es que al limpiar la escoria adherida a las paredes de las cucharas el refractario se desmoronó. Cabe indicar que el refractario elaborado con arena procedente del Río Guayas también tiene el mismo inconveniente. El desgaste en las cucharas usando uno u otro refractario es similar, razón por la cual no se puede establecer una diferencia notoria en cuanto a calidad, sin embargo, el comporta-

miento (respecto a la temperatura) del refractario en estudio fue indicativo de que el punto de sinterización de la arena se encuentra en el rango de 1400-1500°C.

Esta temperatura estimativa se define basándose en la temperatura del metal fundido que soportan las cucharas.

Una vez determinada la temperatura de sinterización de la mezcla se procedió a revestir una parte del cubilote sobre la línea de toberas tal como se observa en la Figura N° 21.

El propósito de revestir arriba de una de las toberas fue el de reafirmar lo expuesto en el punto 4.2 del Capítulo IV de la formación de terrones sobre las toberas debido a que la arena del revestimiento se fundía. Si el refractario monolítico daba resultados favorables entonces no tenía porque producirse dichos terrones y por consiguiente dificultades en la marcha del horno.

Durante el funcionamiento del cubilote se pudo notar después de la primera picada que la escoria no tenía la fluidez normal. De la segunda picada en adelante empezaron a presentarse dificultades en la fusión del metal, ya que la escoria se volvió menos fluida, produciéndose destrucción en las toberas, además la capacidad del crisol del cubilote se redujo, por lo que, bajó la producción del metal obtenido en cada sangrada.

En la Prueba N° 3 se varió la mezcla refractaria usando además de arena de sílice piedra natural de cuarzo. La Fig. N° 22 indica la parte del horno que fue revestida, nótese a la derecha de la foto las piedras (puntos blancos) que forman parte del revestimiento.

Esta mezcla dió mejores resultados que la anterior, no hubieron dificultades en la operación y el tiempo entre cada picada fue de 10 minutos.

En la figura N° 29 se puede apreciar el refractario después de una jornada de trabajo. Una parte del revestimiento (superior) se resbaló formando una masa con el carbón de coke. La otra parte estaba sin desgaste (exactamente arriba de la tobera). El refractario presenta una capa sinterizada de aproximadamente 5 milímetros; no se pudo lograr un control de la duración del revestimiento ya que al quitar del horno la escoria adherida en su interior se cayó gran parte de éste.

Debido a que se fundieron más cargas de lo normal (26) se produjo un calentamiento excesivo del horno en tal grado que se coloreó un pedazo de la plancha que forma el cuerpo del cubilote. Cabe indicar que el sobrecalentamiento se produjo en el sector revestido con material usado diariamente en la fábrica.

En la prueba N° 4 se utilizó una mezcla refractaria de iguales proporciones que la anterior. Durante la marcha del horno no se presentaron



Fig. N° 29.- Zona de Fusión del Cubilote después de una jornada de trabajo.

problemas en la escoria. No se pudo tomar medidas en la zona desgastada del refractario, ya que como en el caso anterior se cayó parte de éste.

La razón por la cual el revestimiento no soportaba los esfuerzos mecánicos en el momento de la limpieza se debía principalmente a que se recubría de una parte de la zona de fusión, lo cual no permitía formar un solo cuerpo al revestimiento, además, tratándose de mezclas diferentes, el desgaste no se efectuó en forma homogénea.

En la siguiente prueba (N° 5) se revistió la mitad de la zona de fu -

la parte superior de la zona de fusión produciéndose un desgaste de 5.5 cm. El espesor (e) de la pared del refractario es de 15 cm.

En la figura N<sup>o</sup> 23 se puede apreciar una parte del revestimiento antes (foto superior) y después (foto inferior) de haber sido utilizado.

Puede observarse que las piedras no han sufrido desgaste alguno, lo cual indica la elevada refractariedad de este material.

La última prueba consistió en revestir íntegramente la zona de fusión, para ello se procedió a sacar los ladrillos refractarios que formaban parte de ésta, tal como se indica en la figura N<sup>o</sup> 25. Se compactó fuertemente con un pisón neumático como indica la figura N<sup>o</sup> 27.

En la figura N<sup>o</sup> 28 se puede observar la zona de fusión revestida en su totalidad. Este revestimiento duró sin necesidad de parcheo, 80 cargas.

La figura N<sup>o</sup> 31 presenta el estado del refractario después de fundir 40 cargas. Nótese la capa sinterizada uniforme, los picos que se ven en la parte superior son formados en la unión entre la zona de fusión y la zona de carga.

Se puede apreciar la zona completamente limpia de escoria.

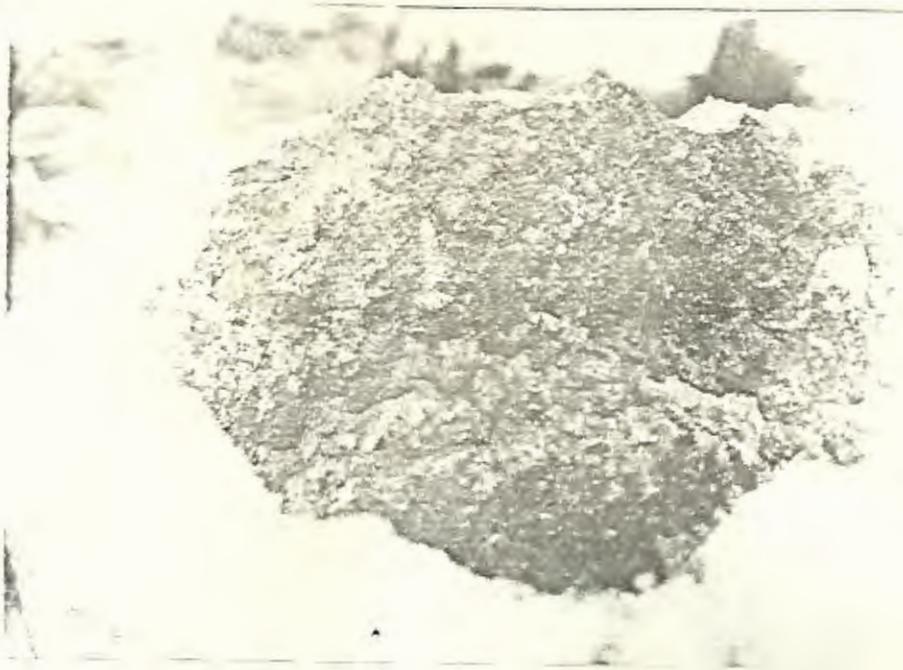


Fig. N° 31.- Refractario Sinterizado  
Prueba N° 6 (40 cargas)

A continuación se dibuja el perfil de desgaste del revestimiento después de haber resistido 80 cargas (Fig. N° 32).

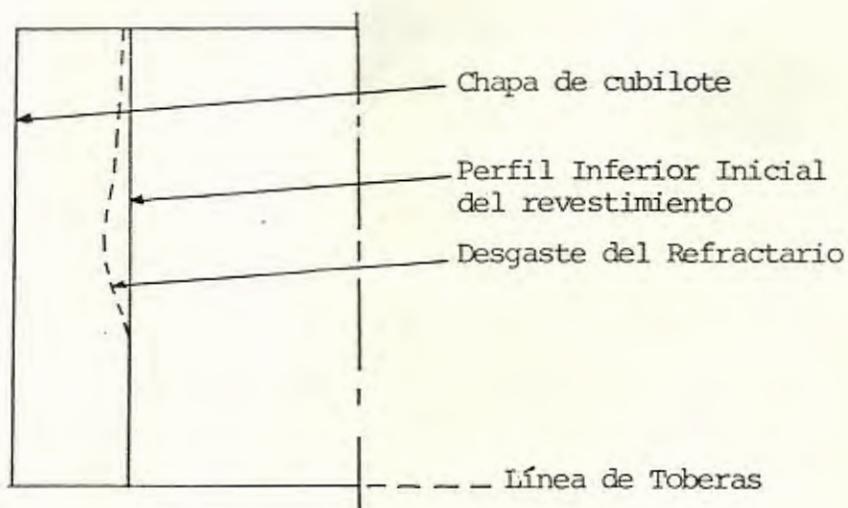


Fig. N° 32.- Desgaste de Refractario  
Prueba N° 6 (80 cargas)

El perfil fue elaborado con los datos obtenidos midiendo el espesor del revestimiento en la zona de fusión y que se indican en la página 110. Se observa que el mayor desgaste se produjo a 35 cm. de la parte superior con un consumo de 4 cm.

La figura N° 33 presenta las condiciones del refractario después de haber soportado las 80 cargas (que implican 7.2 Ton de metal fundido).



Fig. N° 33.- Refractario Sinterizado  
Prueba N° 6 (80 cargas)

Cabe indicar que las 80 cargas no son un factor determinante en cuanto a la duración del revestimiento, ya que se puede deducir de los perfiles de las figuras 30 y 32 que se podía seguir fundiendo.

Como acotación final se indica que el revestimiento no tuvo necesidad de parcheo ni de limpieza de la escoria.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez terminadas las pruebas de laboratorio y en planta, habiendo experimentado el revestimiento monolítico con arena silícea y piedra natural, se deducen las siguientes conclusiones:

- 1.- Punto de sinterización del refractario elaborado con arena silícea y piedra natural superior al preparado con arena procedente del Río Guayas.
- 2.- Consumo de refractario por tonelada de metal fundido inferior, con una razón de 2 a 1 aproximadamente (respecto al utilizado por las diversas fundiciones que fabrican su refractario con arena del Río Guayas).
- 3.- Resistencia al desgaste y agrietamiento superior.
- 4.- Es compatible con las reacciones del cubilote.
- 5.- Se reducen costos ya que hay un menor consumo de refractario por tonelada de metal fundido.
- 6.- Mientras más fino es el grano de arena es más factible que sinte-

rice y funda. (Esta es una de las razones que incidió para obtener resultados positivos con la mezcla preparada con piedra natural).

7.- El grado de compactación influye en el comportamiento del refractario, ya que es directamente proporcional a la resistencia de la compresión.

8.- El revestimiento elaborado es de características conocidas.

#### RECOMENDACIONES

Debido a las limitaciones de equipos de laboratorio se deja como inquietud la investigación de las propiedades del caolín proveniente del yacimiento de Pindilig-Azoguez.

Naturaleza de la escoria

Acida

Básica

Modo de aplicar refractario en reparación:

Manual

Pistola Neumática

Tipo de curado de refractario de mantenimiento y reparación:

.....  
.....  
.....

Controles antes de ponerlo en funcionamiento:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Observaciones:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

A P E N D I C E B

Fórmulas utilizadas para calcular la densidad relativa

$$V_s = \frac{P_s}{\gamma_s}$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} h$$

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{V}{V_s} - 1$$

$$n = \frac{1 + \rho}{\rho}$$

$$D_R = \frac{\rho_{\text{máx}} - \rho}{\rho_{\text{máx}} - \rho_{\text{mín}}}$$

POROSIDAD, RELACION DE VACIOS Y PESO UNITARIO DE SUELOS  
TÍPICOS EN ESTADO NATURAL

Descripción del Suelo	Porosidad n(%)	Relación de vacíos e	Contenido de humedad w (%)	Peso unitario (gr-cm <sup>3</sup> )	
				$\gamma_d$	$\gamma$
1. Arena Uniforme suelta	46	0.85	32	1,43	1,89
2. Arena Uniforme Densa	34	0,51	19	1,75	2,09
3. Arena graduada, suelta	40	0,67	25	1,59	1,99
4. Arena graduada, densa	30	0,43	16	1,86	2,16
5. Morena glacial con partículas de todo tamaño.	20	0,25	9	2,12	2,32
6. Arcilla glacial blanda	55	1,2	45	...	1,77
7. Arcilla glacial resistente	37	0,6	22	...	2,07
8. Arcilla blanda ligeramente orgánica	66	1,9	70	...	1,58
9. Arcilla blanda muy orgánica	75	3,0	110	...	1,43
10. Bentonita blanda.	84	5,2	194	...	1,27

w = contenido de humedad del suelo saturado, en por ciento del peso del suelo seco.

$\gamma_d$  = peso unitario del suelo seco

$\gamma$  = peso unitario del suelo saturado

A P E N D I C E C

SERIE DE TAMICES NORMALIZADOS

FRANCIA MF x 11-501		ESTADOS UNIDOS ASTM E11-39		GRAN BRETAÑA BSA/BSS 410		ALEMANIA DIN 1171	
Designación de tamices	Apertura	Designación de tamices	Apertura	Designación de tamices	Apertura	Designación de tamices	Apertura
módulo	mm	número	mm.	número	mm.	número	mm.
17	0.040	3.5	5.66	5	3.353	2	1
18	0.050	4	4.76	6	2.812	3	2
19	0.063	5(2)	4	7	2.411	4	1.50
20	0.080	6	3.36	8	2.057	5	1.20
21	0.100	7	2.83	10	1.676	6	1
22	0.125	8	2.38	12	1.405	8	0.750
23	0.160	10	2	14	1.204	10	0.600
24	0.200	12	1.68	16	1.003	11	0.500
25	0.250	14	1.41	18	0.853	14	0.430
26	0.315	16	1.19	22	0.699	16	0.400
27	0.400	18	1	25	0.599	20	0.300
28	0.500	20	0.84	30	0.500	24	0.250
29	0.63	25	0.71	36	0.422	30	0.200
30	0.80	30	0.59	44	0.353	40	0.150
31	1	35	0.50	52	0.295	50	0.120
32	1.25	40	0.42	60	0.251	60	0.100
33	1.60	45	0.35	72	0.211	70	0.090
34	2.0	50	0.291	85	0.178	80	0.075
35	2.50	60	0.250	100	0.152	100	0.060
36	3.15	70	0.210	120	0.124		
37	4	80	0.177	150	0.104		
38	5	100	0.149	170	0.089		
		120	0.125	200	0.076		
		140	0.105	240	0.066		
		170	0.088	300	0.053		
		200	0.074				
		230	0.062				
		270	0.053				
		325	0.044				
		400	0.037				

B I B L I O G R A F I A

1. AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, El Horno de Cubilote y su operación, Continental, México, 1961, 50p.
2. AMERICAN FOUNDRY MEN'S SOCIETY, Manuales para clases de Fundición, ESPOL, Guayaquil, 1978.
3. CENIM, Fusión de Acero, ESPOL, Guayaquil, 1980 60p.
4. CENIM, Fusión de Hierro, ESPOL, Guayaquil, 1980 40 p.
5. CENDES, Arenas de Moldeo, Guayaquil, 1971
6. DIETERT, W., Preparación de Arenas de Moldeo
7. ERNITZ, A., Manual de Asilación Térmica
8. LAMBE-WHITMAN, Mecánica de Suelos, Limusa, 1972, 40p.
9. NORTON REFRACTORIES, Mc Graw Hill, EE. UU., 1949, 130p.
10. SALMANG, H. La Cerámica, Reverté, Barcelona, 1954, 70 p.
11. SEARLE, A.B. Modern Brick Making, Ernest Benn, Londres, 1956, 150 p.
12. SINGER F., Cerámica Industrial (Vol. I Tomo 9), URMO, 1971 45p.
13. TSHEBOTARIOFF, G. Mecánica del Suelo, Aguilar, Madrid, 1960 40p.
14. TERZAGHI-PECK, Mecánica de Suelos, el Ateneo, 1958, 30p.
15. WHITING-CORPORATION, Useful Information for Foundrimen, ESPOL, Guayaquil, 1978.