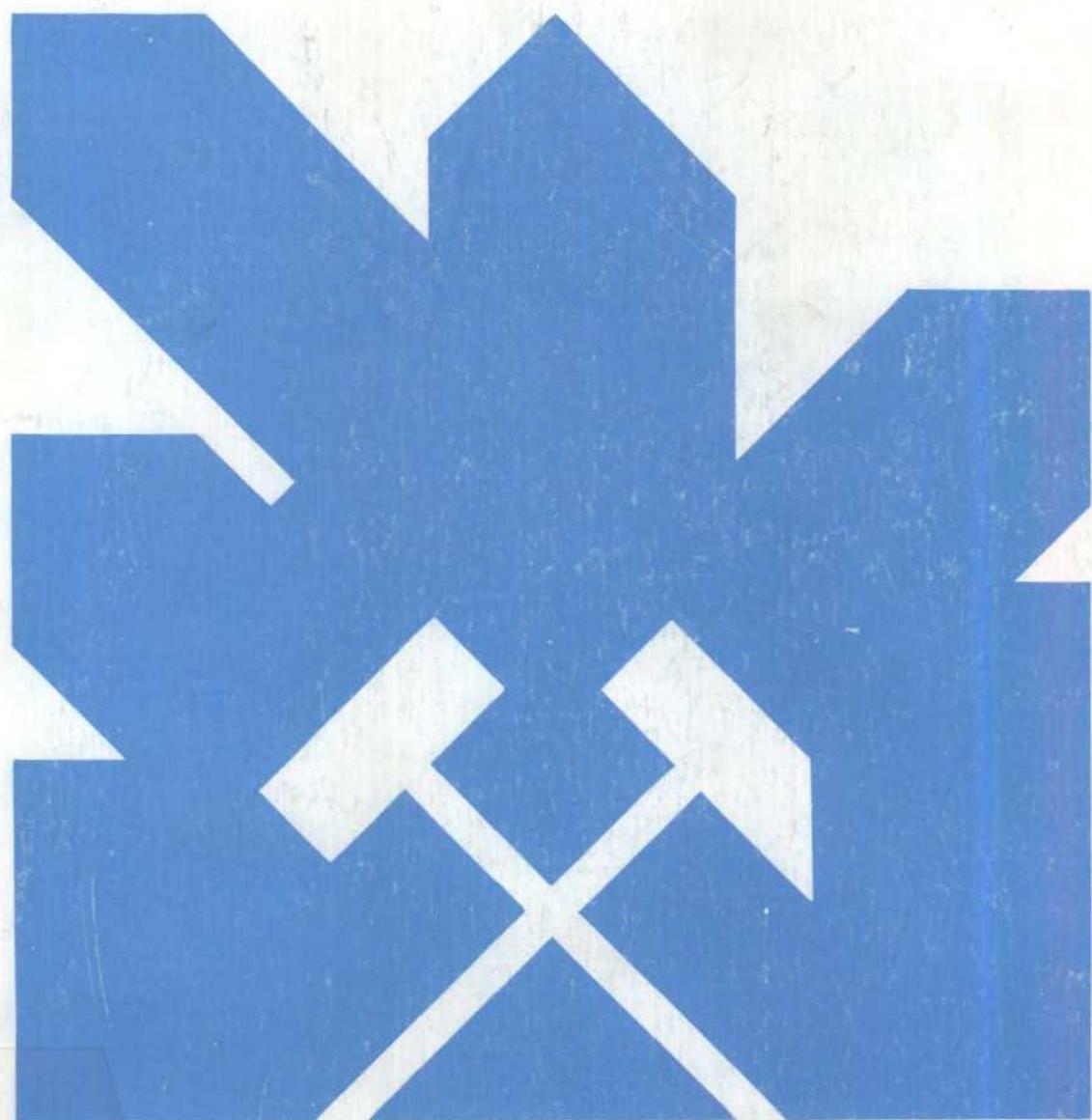


MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
COMISARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

**METODOLOGIA PARA LOS ESTUDIOS
DE APROVECHAMIENTO DE ESCOMBRERAS
DE CARBON CON FINES ENERGETICOS**



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

00678

**METODOLOGIA PARA LOS ESTUDIOS
DE APROVECHAMIENTO DE ESCOMBRERAS
DE CARBON CON FINES ENERGETICOS**

00678

Participó en la ejecución de este Proyecto, bajo normas, dirección y supervisión de la División de Geología Aplicada a la Ingeniería del Instituto Geológico y Minero de España, el siguiente equipo de trabajo de Dames & Moore Iberia, S.A.

Pedro Ramírez Oyanguren, Doctor Ingeniero de Minas, "Master of Science", Profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

Jesús Ciruelos Fúnez, Ingeniero de Minas.

Aurelio Fernández del Pozo Merino, Ingeniero de Minas.

Diciembre, 1981

	<u>INDICE</u>	<u>Pag.</u>
1.	INTRODUCCION	1
2.	OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO.....	9
3.	POSIBILIDADES ACTUALES DE UTILIZACION DEL CONTENIDO EN CARBON DE LA ESCOMBRERA.....	12
3.1	INTRODUCCION.....	12
3.2	RELAVADO.....	12
3.3	FABRICACION DE LADRILLOS,GRES Y ARIDOS LIGEROS..	19
3.3.1	Ladrillos.....	19
3.3.2	Grés	23
3.3.3	Aridos ligeros.....	24
3.4	REACTOR THAGARD.....	30
3.5	COMBUSTION.....	35
4.	RELAVADO DE ESCOMBRERAS DE CARBON.....	38
4.1	INTRODUCCION.....	38
4.1.1	Clasificación.....	41
4.1.2	Trituración.....	41
4.2	RELAVADO DE GRUESOS Y MENUDOS.....	43
4.2.1	Medios densos.....	44
4.2.2	Jigs.....	55
4.3	RELAVADO DE FINOS.....	60
4.3.1	Ciclones de medios densos.....	60
4.3.2	Hidrociclones.....	64
4.3.3	Mesas de sacudidas.....	71
4.3.4	Rheolavadores.....	75

	<u>Pag.</u>
4.3.5 Espirales Humphrey.....	80
4.3.6 Jigs de lecho filtrante.....	82
4.3.7 Flotación.....	82
4.4 CONCLUSIONES.....	85
5. COMBUSTION DE ESCOMBRERAS DE CARBON.....	87
5.1 INTRODUCCION.....	87
5.2 COMBUSTION SOBRE PARRILLA.....	87
5.3 COMBUSTION DE CARBON PULVERIZADO.....	94
5.4 COMBUSTION EN HOGARES CICLON.....	96
5.5 COMBUSTION EN LECHO FLUIDIZADO.....	97
5.5.1 Aplicación de la combustión en lecho fluidizado a escombreras de carbón	103
5.5.2 Otras aplicaciones de la combustión en lecho fluidizado.....	106
6. ESTUDIOS Y ENSAYOS QUE DEBEN REALIZARSE EN LAS ESCOM BRERAS.....	110
6.1 INTRODUCCION.....	110
6.2 ESTUDIOS A REALIZAR SOBRE LAS ESCOMBRERAS.....	110
6.2.1 Emplazamiento.....	110
6.2.2 Origen.....	112
6.2.3 Dimensiones.....	114
6.2.4 Historia.....	114

	Pag.
6.2.5 Tipo de construcción.....	117
6.2.6 Granulometría.....	120
6.2.7 Peso específico y densidad.....	125
6.2.8 Humedad.....	127
6.3 ENSAYOS PRECISOS PARA EVALUAR LOS MATERIALES DE LAS ESCOMBRERAS.....	128
7. MUESTREO DE ESCOMBRERAS DE CARBON.....	144
7.1 INTRODUCCION.....	144
7.2 METODO DE MUESTREO.....	144
7.2.1 Introducción.....	144
7.2.2 Método propuesto por el Ant. UNE 22150....	147
7.2.2.1 Muestreo aleatorio.....	147
7.2.2.2 Muestreo sistemático.....	149
7.2.2.3 Muestreo replicado.....	150
7.2.2.4 Mínima masa de incremento.....	150
7.2.3 Método del muestreo duplicado.....	151
7.2.4 Método del muestreo equiprobable.....	156
7.2.4.1 Posibilidades de realización de un muestreo equiprobable.....	161
7.2.4.2 Cálculo del número de elementos de un muestreo agrupado al azar.....	164
7.2.5 Determinación de los puntos de muestreo...	167
7.2.6 Comparación de los tres métodos.....	167
7.3 TECNICAS PARA LLEVAR A CABO LA TOMA DE MUESTRAS..	168
7.3.1 Introducción.....	168

	Pag.
7.3.2 Calicatas.....	170
7.3.3 Sondeos.....	172
7.3.3.1 Perforación con cable-Método Pen silvaniense.....	172
7.3.3.2 Perforación con hélice.....	173
7.3.3.3 Sondeo a rotación con obtención de testigo.....	175
7.3.3.4 Sondeos con circulación inversa..	176
7.4 CONCLUSIONES.....	178
8. LINEAS A SEGUIR PARA LA ELABORACION DE UN INVENTARIO NACIONAL DE ESCOMBRERAS DE CARBON.....	180
9. BIBLIOGRAFIA.....	188

LISTA DE FIGURAS DEL TEXTO

<u>FIGURA N°</u>	<u>TITULO</u>	<u>Pag.</u>
1	REACTOR THAGARD. SECCION VERTICAL	31
2	REACTOR THAGARD. SECCION HORIZONTAL	32
3	CARACTERISTICAS DE LAVABILIDAD	39
4	CONO SEPARADOR PARA LIQUIDOS DENSOS	39
5	MESA TROMP DE 2 PRODUCTOS	51
6	TAMBOR NELDCO	53
7	TAMBOR WEMCO	54
8	JIG TIPO BAUM	56
9	INSTALACION DE LAVADO DE ESCOMBRERAS DE CARBON CON JIGS BAUM	59
10	ESQUEMA IDEALIZADO DE LAS TRAYECTO RIAS DE UN CICLON	62
11	DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA INSTALACION DE HIDROCICLONES DE UNA ETAPA	66
12	DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA INSTALACION DE HIDROCICLONES DE DOS ESTAPAS	68
13	DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA HALDEX/ SIMDEX "TATABANYA", HUNGRIA	70
14	DISTRIBUCION DE PRODUCTOS EN LA MESA POR TAMAÑOS Y PESO ESPECIFICO	71
15	ESTRATIFICACION PROGRESIVA ENTRE LAS BARRAS DEBIDO A LA CAPA FLUENTE Y A LAS SACUDIDAS	72

<u>FIGURA N°</u>	<u>TITULO</u>	<u>Pag.</u>
16	DIAGRAMA DE FLUJO	76
17	INSTALACION DE RHEOLAVADORES	77
18	RHEOLAVADOR DE CONTRACORRIENTE	79
19	ESQUEMA DE LA ESPIRAL HUMPHREY	81
20	PARRILLA DE CADENAS	89
21	PARRILLA DE ALIMENTACION INFERIOR	89
22	DISTRIBUIDOR DE CARGA SPREADER STOKER	92
23	HOGAR CICLON	92
24	ESQUEMA DE CALDERA DE LECHO FLUIDI ZADO	99
25	PLANTA PARA COMBUSTION DE COLAS DE FLOTACION	108
26	PLANTA DE COGENERACION DE CICLO CE RRADO	109
27	PLANTA DE COGENERACION DE CICLO ABIERTO	109
28	ANALISIS GRANULOMETRICOS DE ESCOMBRE RAS	122
29	EXTRACCION DE MUESTRAS CON EL EMPLEO DE BARRENAS HELICOIDALES DE EJE HUECO	174

1. INTRODUCCION

Uno de los rasgos distintivos de toda región en la que se haya realizado una minería de carbón más o menos intensiva, es la proliferación de escombreras.

Estas escombreras son sùmanente variables tanto en su forma como en su tamaño. El volùmen de algunas es de unos cuantos miles de metros cùbicos, mientras que otras alcanzan varios millones. Del enorme volumen de materiales depositados en escombreras, puede servir como referencia el que, actualmente, HUNOSA produce aproximadamente un millón de metros cùbicos de estériles al año, los cuales son depositados en diferentes escombreras. En cuanto a la extensión que ocupan, suele oscilar entre unos cientos de metros cuadrados, las más pequeñas, y varios miles, las más grandes.

Los materiales de que está constituida una escombrera son : por un lado, las impurezas que acompañan a las capas de carbón, y, por otro, los que resultan de las labores propias de explotación de la mina. Las capas de carbón suelen llevar interestratificaciones pizarrosas y arenosas que se extraen junto con el carbón y que, tras el proceso de lavado, van a parar a la escombrera. En cuanto a los hastiales de las capas de carbón, suelen estar constituidos por pizarras, argilitas y areniscas fundamentalmente, apareciendo, a veces, algunos niveles de caliza. Un mineral muy corriente en las escombreras de carbón es la pirita, que, aunque no aparece en una proporción mayoritaria, sí se da en cantidad suficiente como para contribuir a agravar determinados problemas (autocombustión, contaminación de aguas, etc.)

Junto a los materiales mencionados, y mezclado con ellos, aparece una proporción importante de carbón. La presencia de este carbón en la escombrera se puede explicar por diferentes causas, entre las cuales se pueden citar las siguientes: entre las capas de carbón explotables suelen

aparecer estrechas vetas cuyo aprovechamiento no es económicamente viable y son arrojadas a la escombrera junto con los estériles, los métodos de lavado son imperfectos y, por lo tanto, dejan escapar determinadas cantidades de carbón, y, por último, hasta épocas relativamente recientes, únicamente eran aprovechadas las granulometrías medias y gruesas, pasando los finos a formar parte del esteril del lavadero.

Uno de los lugares habituales de ubicación de las escombreras han sido los valles. Los materiales, según se iban produciendo, eran amontonados en las laderas del valle más próximo al lavadero sin plantearse mayores problemas. Sin embargo, la situación ha ido evolucionando con el paso del tiempo. Hoy día las escombreras plantean una serie de problemas de tipo ambiental que se pueden resumir en los siguientes:

- . Autocombustión del carbón existente en la escombrera como consecuencia de procesos de oxidación de materias combustibles agravados por la presencia de piritas, lo que da lugar a que se viertan a la atmósfera importantes cantidades de gases nocivos.
- . Contaminación de aguas. Este fenómeno se ve especialmente agravado por la situación de las escombreras en valles que recogen las aguas que se infiltran a través de ellas y las vierten a los ríos.
- . Alteración de la fisonomía del entorno. Los paisajes se ven desfavorablemente afectados por la presencia de escombreras.

- . Inutilización de tierras de cultivo. Esto incide especialmente en zonas montañosas en las que los valles constituyen las únicas áreas con posibilidades agrícolas.

Pero, aparte de estos aspectos, que podríamos definir como de tipo ecológico, existen otros, de tipo económico, que se plantean ante una escombrera de carbón. Estos los podemos reducir a dos: por una parte, las escombreras contienen importantes cantidades de carbón y, por otra, los estériles presentes pueden ser empleados como materia prima en diferentes procesos industriales.

Por lo que se refiere al contenido en carbón, la mayor parte de las escombreras existentes se formaron en épocas en las que el carbón era empleado, fundamentalmente, para fines domésticos, o como combustible en las locomotoras de vapor. En aquellos tiempos, los granos menores de 10 mm no tenían utilidad y eran arrojados a las escombreras de estériles. Los productos finos de los lavaderos generalmente se arrojaban a los ríos, aunque a veces se vertían en balsas de decantación, las cuales, o bien se abandonaban, o, una vez drenadas, eran trasladadas a la escombrera.

Unas estadísticas realizadas en Estados Unidos (1), revelan que el 25% del carbón extraído de las minas ha ido a parar a las escombreras.

En cuanto a los estériles propiamente dichos, básicamente están constituidos por materiales arcillosos, que, como se sabe, constituyen la materia prima de numerosos procesos industriales, como: fabricación de cementos, industrias cerámicas, materiales de construcción, etc.

Un último factor a tener en cuenta es la seguridad de las escombreras. A raíz del desastre de Aberfan, en Gales, consistente en el deslizamiento de una escombrera que causó la muerte de gran número de personas, se han multiplicado los esfuerzos para determinar la estabilidad de las escombreras y, sobre todo, se ha intentado dar alguna aplicación a los materiales que las constituyen con el fin de eliminarlas.

Otro aspecto relativo a la seguridad es el de los incendios. Estos pueden originarse por diferentes causas, como: combustión espontánea, incendios forestales, fogatas hechas sobre o en las proximidades de las escombreras, fuegos intencionados para la obtención de residuos que se puedan usar como materiales para construcción de carreteras, etc. No existe ningún método general que sea válido para prevenir los incendios espontáneos de aquellas escombreras que tengan tendencia a que se produzcan. Sin embargo, el riesgo se puede reducir prestando una especial atención a los siguientes puntos: eliminar la vegetación existente en los alrededores de la escombrera, compactar los materiales, prohibir arrojar materiales inflamables a la escombrera, asegurarse de que las cenizas que se arrojen estén perfectamente apagadas, prohibir o limitar el trasiego de personal por la escombrera, rellenar y sellar todas las excavaciones y perforaciones que se hagan y someterlas a inspecciones periódicas para detectar indicios de fuegos. En cualquier caso, el mantener una escombrera en condiciones seguras supone una serie de trabajos que requieren la dedicación de personas y equipos, con los costos que ello implica.

Como consecuencia de los múltiples problemas que acarrea la existencia de escombreras, numerosas instituciones de diferentes países han dirigido sus esfuerzos hacia la búsqueda de soluciones. De esta forma, durante los últimos 50 años son muchos los documentos que han aparecido referentes al tema. Entre otros, se pueden citar los siguientes organismos que han estudiado a fondo la cuestión:

- . National Coal Board de Gran Bretaña, que en 1970 creó una oficina llamada "Minestone Executive", con la obligación de eliminar el mayor número posible de escombreras de carbón, dando la máxima utilización comercial posible a los materiales que en ellas se encuentran.

- . Houillères du Bassin du Nord et du Pas-de-Calais de Francia, que ha realizado un inventario de sus escombreras, cifrando el volumen de éstas en unos 500 millones de metros cúbicos, habiendo iniciado su utilización como combustible de alto contenido en cenizas por los años 60. Así mismo ha desarrollado el empleo de los materiales de escombrera como materia prima para la fabricación de áridos ligeros y diferentes productos cerámicos para la construcción.

- . Estados Unidos, donde se inició mucho más tarde el estudio del aprovechamiento de las escombreras de carbón, sin embargo, en los últimos años ha experimentado un extraordinario desarrollo paralelo al fuerte incremento de la producción de carbón.

- . Entre los países socialistas, se pueden citar los esfuerzos llevados a cabo por Polonia y Hungría, que desarrollaron conjuntamente el proceso Haldex para el tratamiento de los estériles del carbón.

En fin, podemos afirmar que, en España, el estudio del aprovechamiento de las escombreras de carbón no ha hecho nada más que comenzar. Por una parte su contenido energético y de materias primas para la industria y, por otra, las previsibles exigencias que planteará la Administración con el

desarrollo de futuras leyes de tipo ambiental, harán imposible que se puedan mantener las escombreras en las actuales condiciones durante mucho tiempo. Se deberá tender a considerar a las escombreras de carbón como almacenamientos temporales pendientes de su utilización definitiva.

El empleo de los materiales de las escombreras en la fabricación de determinados productos, viene determinado por dos hechos: por una parte, las propiedades químicas y físicas de dichos materiales les hacen válidos para ser empleados como materia prima y, por otro, el contenido en carbón de las escombreras permite aportar una cierta cantidad de calorías al balance energético del proceso, con lo que éste se ve favorecido. Lógicamente, para poder aprovechar la segunda ventaja se ha de verificar la primera.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético de los estériles del carbón, los procesos en los que se ha obtenido un mayor éxito son:

- . Combustión. Esta puede llevarse a cabo con un relavado previo o sin él. La tendencia actual parece ir encaminada hacia la combustión sin relavado, considerando los estériles como combustibles de elevado contenido en cenizas. En este campo, los sistemas de combustión en lecho fluidizado parecen ser los que mejor se adaptan a las necesidades que se plantean.

- . Fabricación de cemento. El material puede emplearse como aditivo para la producción de clinker de cemento Portland, después de haber sido molido muy finamente. En este caso, los estériles aportan la fracción arcillosa del clinker. El material entra en el horno giratorio mezclado con los componentes y el polvo de

la caliza. El carbón aportado con los componentes se combustiona y la energía que aporta se traduce en un ahorro de combustible, así como en una prolongación de la vida del horno. La calidad del clinker así obtenido es análoga a la del que se obtiene con los materiales clásicos.

- . Aridos ligeros. Los estériles del carbón se han empleado con éxito en la fabricación de aditivos para hormigón ligero. Para la obtención de estos productos se utilizan dos procedimientos: cintas de sinterización y hornos rotativos. Tanto en uno como en otro caso, el carbón presente en el estéril conduce a notables mejoras energéticas.
- . Ladrillos y gres. Para éstos productos, al igual que en el caso de los áridos ligeros, los estériles presentan la doble ventaja de tener unas propiedades químicas y físicas válidas, así como la posibilidad de disminuir el consumo de energía gracias a la presencia de carbón.
- . Lana de vidrio. Se puede obtener junto con el clinker de cemento en el reactor Thagard.
- . Gasificación del carbón de la escombrera. Este proceso, a pesar de haberse demostrado su viabilidad técnica, no parece tener excesivo interés, ya que mediante la gasificación se pretenden obtener productos energéticos muy nobles, como el metano, para lo cual interesa partir de los carbones más ricos.

Por último, se está produciendo una circunstancia que hace que todas las consideraciones expuestas vean notablemente

incrementado su interés, ésta es el progresivo incremento de la cantidad de materiales vertidos a las escombreras. Las razones que explican esta tendencia son: la mecanización intensiva de las explotaciones, que hace que el carbón no pueda ser arrancado de una forma tan selectiva como se hacía con los procedimientos manuales, y la explotación de yacimientos cada vez más pobres, con lo que el número de impurezas que es preciso separar en el lavadero se incrementa notablemente.

2. OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

Las escombreras de carbón están constituidas en su mayor parte por materiales arcillosos y por una mayor o menor proporción de carbón. Desde el punto de vista de su composición, las posibles aplicaciones de estos materiales son múltiples, sin embargo, el hecho que ha impulsado de una forma más decisiva a su utilización ha sido su contenido energético, consecuencia de la presencia de carbón en dichos estériles.

En este trabajo se presenta la metodología que debe seguirse para el estudio de las escombreras en relación con las posibles aplicaciones de los estériles en aquellos procesos en los que la presencia del carbón mejora sus balances energéticos.

De entre todas las aplicaciones que cumplen la condición anterior, se han seleccionado las siguientes:

- . Combustión del carbón contenido en la escombrera con o sin relavado (en el caso de realizarse un relavado previo, la combustión se puede realizar mediante los procedimientos convencionales, por lo que aquí únicamente se plantea la forma de llevarla a cabo sin él.

- . Fabricación de áridos ligeros, ladrillos y gres, y empleo del reactor Thagard para la obtención de diferentes productos (lana de vidrio, clinker, etc.).

Como se puede observar, en este estudio no se contempla la aplicación de los materiales de escombrera en la fabricación de cemento. La razón de esto estriba en que las características del sector del cemento en España no son

muy adecuadas para el empleo de estériles de carbón, ya que, por una parte, no se le plantean problemas de abastecimiento de material arcilloso, mientras que, por otra, no existe una gran proximidad geográfica entre escombreras y fábricas de cemento, por lo que habría que transportar el material de las escombreras a largas distancias, lo que incrementaría notablemente sus costos.

En el estudio se plantea la combustión de los materiales sin relavar. Se presentan los métodos más adecuados, de entre los cuales la combustión en lecho fluidizado parece ser el idóneo.

En cuanto al relavado de escombreras, se presenta toda la gama de sistemas de lavado, haciendo hincapié en aquellos que han tenido mayor éxito a lo largo de los años, así como en los que aparecen con una mayor proyección cara al futuro.

Por lo que se refiere a la fabricación de ladrillos, grés y áridos ligeros, se han estudiado los principales métodos de fabricación: Surschiste, Haldex, Surex, etc.

Pero los estériles del carbón no pueden utilizarse de una forma generalizada en las aplicaciones enunciadas, sino que previamente es preciso realizar unos análisis de las características que deben reunir dichos materiales. Desde este punto de vista, se ha dedicado un apartado a plantear las condiciones que deben cumplir los estériles para poder ser aplicados a cada proceso en concreto. Así mismo, se exponen los análisis que es preciso realizar para poder disponer de una base sólida con la que poder argumentar sobre la utilidad o no de los estériles para cada proceso industrial.

Las conclusiones que se puedan extraer de los análisis dependerán en gran medida de la fiabilidad del muestreo que

se ha realizado del conjunto de la escombrera. El muestreo plantea dos tipos de problemas: por una parte, las bases teóricas aplicables a las características de las escombreras y, por otra, los medios tecnológicos necesarios para llevar a cabo la toma de muestras.

Como resultado de todas las condiciones anteriores, se expone la sistemática a seguir desde el momento en que se plantea el estudio de viabilidad del aprovechamiento energético de una escombrera de carbón.

Por último, el estudio proporciona las directrices a seguir ante la posibilidad de realizar un inventario de escombreras en España.

3. POSIBILIDADES ACTUALES DE UTILIZACION DEL CONTENIDO DE CARBON DE LAS ESCOMBRERAS

3.1. INTRODUCCION

De las diferentes aplicaciones que se han venido dando a los materiales de las escombreras de carbón, en este trabajo únicamente se contemplan aquellas en las que se pueden obtener mejoras en los balances energéticos de los procesos utilizados. Dentro de este grupo de aplicaciones, las que se han considerado más interesantes han sido: relavado de los materiales de la escombrera para obtener productos con un mayor contenido en carbón, empleo como materia prima para la fabricación de ladrillos, grés y áridos ligeros, utilización del reactor Thagard, y combustión de los materiales tal como se encuentran en la escombrera. A continuación se pasa revista a estas aplicaciones.

3.2. RELAVADO

De una forma general, una escombrera se puede considerar constituida por dos tipos de materiales: carbón y estériles.

La presencia del carbón se puede explicar por las siguientes causas:

- . En la época en que se estaba construyendo la escombrera, no tenían salida en el mercado unas determinadas granulometrías, por lo que eran arrojadas a la escombrera.
- . Hasta después de la II Guerra Mundial no se comenzó a generalizar la instalación de lavaderos de carbón, los cuales, además, no son perfectos, sino que todos ellos se caracterizan por dejar pasar a la fracción estéril una mayor o menor proporción de carbón.

- . Los materiales de las labores en roca realizadas en las minas pueden llevar intercaladas finas vetas de carbón que no son aprovechables.

La recuperación del carbón de los estériles del lavadero no es ningún invento reciente. Ha sido bastante normal observar a habitantes de poblaciones mineras recogiendo carbón en los alrededores de las escombreras, o rudimentarias instalaciones de recuperación situadas en los ríos a los que vierten las aguas los lavaderos.

Es a partir de la II Guerra Mundial cuando se plantea la recuperación del carbón de las escombreras a gran escala. Esta idea se ve fuertemente potenciada como consecuencia de las nuevas orientaciones en materia de aprovisionamiento de sustancias energéticas.

Uno de los hechos que más ha contribuido a que el relavado de escombreras de carbón se pudiese llevar a la práctica, de una forma rentable, ha sido el desarrollo de centrales térmicas que pueden funcionar con combustibles de muy elevado contenido en cenizas, lo que simplifica notablemente los esquemas de lavado, al no tener que apurar excesivamente para rebajar las cenizas. Por otra parte, el problema de la granulometría ha quedado totalmente superado al consumirse actualmente la práctica totalidad del carbón en centrales térmicas de carbón pulverizado, lo cual permite la utilización de procedimientos de lavado que conlleven fuertes reducciones de tamaño (hidrociclones, ciclones de medios densos, flotación, etc.).

A la hora de elegir las escombreras que mejores características presentan para el relavado, se deberá comenzar por estudiar las más antiguas, pues serán las que provengan de procedimientos de lavado más rudimentarios, y en las cuales habrá tenido más incidencia la no utilidad de las granulometrías finas. Por otra parte, las escombreras

más ricas serán aquellas pertenecientes a minas cuya producción se dedicaba a la siderurgia (2). Esto se debe al hecho de que las demandas específicas de las compañías siderúrgicas están dirigidas hacia el carbón de mejor calidad, cuya finalidad es la producción de cok.

Si en todos los aspectos relativos al aprovechamiento de las escombreras de carbón, el poder disponer de muestras que permitan tener un conocimiento fiable de dichas escombreras es un tema fundamental y de considerable complejidad, en lo que se refiere al contenido en carbón, tal vez lo sea en mayor grado. Hay que tener en cuenta que a la heterogeneidad de constitución de la escombrera, hay que añadirle un nuevo factor: los posibles fuegos que la hayan podido afectar. Como referencia de la importancia de este aspecto, puede servir el que de las 390 escombreras localizadas en la Cuenca del Sur de Bélgica (3), 172 son inexplotables debido a encontrarse parcial o totalmente quemadas.

En cuanto a las técnicas de relavado, las tendencias parecen dirigirse hacia el empleo, sobre todo, de medios densos y jigs y, para las granulometrías más finas, hidrociclones de medios densos. Este tema será desarrollado con todo detalle en un posterior apartado. Otra de las soluciones propuestas para relavar escombreras ha sido el empleo de equipos móviles del tipo de los utilizados en la preparación de áridos.

La sociedad francesa Houillères du Bassin du Nord et du Pas-de-Calais (HBNPC) ha llevado a cabo una serie de experiencias sobre relavado de escombreras de carbón (4). Tras lavar varios miles de toneladas, han establecido las siguientes conclusiones:

1. El lavado propiamente dicho no origina problemas.
2. La naturaleza arcillosa de los productos puede causar problemas de cribado, almacenamiento de estériles, colmatación, etc.
3. Los circuitos de lavado se deben adaptar a las características de las escombreras.
4. Es preciso evaluar las necesidades de mano de obra, así como los precios de venta de los productos.

Estos ensayos han permitido evaluar el rendimiento R del lavado mediante la ecuación:

$$R = 140 - 1,6 b$$

donde,

R es el % de recuperación en combustible con un 45% de cenizas.

b es el % de cenizas de la escombrera.

Más tarde se determinaron, a partir de las curvas de lavabilidad de diferentes escombreras, los rendimientos y contenidos en cenizas de los productos obtenidos en el lavado de escombreras con diferentes contenidos en cenizas (tabla 1). Los resultados obtenidos muestran que, para un producto lavado con un 45% en cenizas, el rendimiento "y" varía de un 17% para una escombrera con un 75% en cenizas a un 43% para una con un 65% en cenizas, y que la ley de corte Tcm varía de un 61 a un 76% de cenizas.

TABLA 1

VALORES DE Y - Tcm EN FUNCION DE Xm

ESCOBRERA CON UN 75% DE CENIZAS			ESCOBRERA CON UN 72,5% DE CENIZAS			ESCOBRERA CON UN 70% DE CENIZAS			ESCOBRERA CON UN 67,5% DE CENIZAS		
Xm	Y	Tcm	Xm	Y	Tcm	Xm	Y	Tcm	Xm	Y	Tcm
55	29,0	77,2	55	36,5	81,1	55	43,5	86,5	55	51,0	89,4
53	26,6	73,2	53	33,9	77,1	53	40,9	82,5	53	48,2	85,4
51	24,2	69,2	51	31,3	73,1	51	38,3	78,5	51	45,4	81,4
49	21,8	65,2	49	28,7	69,1	49	35,7	74,5	49	42,6	77,4
47	19,4	61,2	47	26,1	65,1	47	33,1	70,5	47	39,8	73,4
45	17,0	57,2	45	23,5	61,1	45	30,5	66,5	45	37,0	69,4
43	14,6	53,2	43	20,9	57,1	43	27,9	62,5	43	34,2	65,4
41	12,2	49,2	41	18,3	53,1	41	25,3	58,5	41	31,4	61,4
39	9,8	45,2	39	15,7	49,1	39	22,7	54,5	39	28,6	57,4
37	7,4	41,2	37	13,1	45,1	37	20,1	50,5	37	25,8	53,4
35	5,0		35	10,5		35	17,5		35	23,0	

Xm = contenido de cenizas en % del producto lavado.

Y = rendimiento con un Xm % de cenizas (% de producto con un Xm % de cenizas respecto al total alimentado a la planta de lavado).

Tcm = ley de corte (máximo contenido en cenizas permisible en una muestra tomada del producto lavado).

Ahora bien, no se debe olvidar que estos datos son de tipo empírico y su utilidad únicamente se puede considerar demostrada en las escombreras de las cuales han sido deducidos.

Cuando se plantee el posible relavado de una escombrera, será preciso realizar dos tipos de ensayos: granulométricos y de lavabilidad.

Por lo que se refiere a los datos relativos a la granulometría de los materiales de la escombrera, las plantas de lavado de carbones, de una forma bastante generalizada, se diseñan en base a cuatro granulometrías. Estas son:

- Tamaños superiores a 50 mm
- Tamaños comprendidos entre 50 y 10 mm
- Tamaños comprendidos entre 10 y 0,5 mm
- Tamaños inferiores a 0,5 mm

Por lo tanto, será necesario efectuar un tamizado que separe estas cuatro fracciones. Una vez realizado, se precisa conocer la lavabilidad de cada una de ellas, para lo cual se someten a ensayos del tipo flotado-hundido. Las densidades de corte ordinarias son: 1,6, 1,8 y 2,0 gr/cm³. Paralelamente, se van determinando los contenidos en ceniza de los flotados y del último hundido.

Como resultado de los ensayos anteriores se tendrán las curvas de lavabilidad y de cenizas de cada fracción granulométrica, éstas serán uno de los puntos de partida fundamentales para el diseño de lavaderos adecuados a las características de las escombreras que se pretenden relavar.

En la Tabla 2, se presenta una serie de plantas de relavado de escombreras de carbón. En ella figura el procedimiento de lavado utilizado y la capacidad de cada planta (5).

TABLA 2

LOCALIZACION	METODO DE LAVADO	CAPACIDAD	PRODUCCION
Mt. Carmel, Pennsylvania	Medios densos (magnetita)	--	Antracita lavada y relleno para mina
Barnesboro, Pennsylvania (planta piloto)	Medios densos (magnetita). Hidrociclones	50 t/h	Carbón bituminoso y material para la industria cerámica
Scranton, Pennsylvania (planta piloto)	Medios densos (magnetita). Hidrociclones	50 t/h	Antracita lavada y relleno para mina
Sunuyside, Utah	Flotación	1500-1800 t/día	Carbón bituminoso y relleno para mina
Baddesley, Inglaterra	Medios densos (magnetita)	80 t/h	Carbón lavado y estéril con un 5% de carbón
Mauvers Main, Inglaterra	Medios densos (estériles de flotación)	1320 t/h	--
Carlisle, Inglaterra	Hallex	50-150 t/h	--
Glasgow, Escocia	Medios densos (magnetita)	2000t/día	Suministra 500 t/día de material arcilloso a una fábrica de áridos ligeros, además de obtener carbón lavado
Tatabanya, Hungría	Hallex	--	Carbón lavado (menos de un 12% de cenizas), carbón de elevado contenido en cenizas (20-40%) y material para industria cerámica, cementera y de áridos ligeros

3.3. FABRICACION DE LADRILLOS, GRES Y ARIDOS LIGEROS

3.3.1. Ladrillos

La aplicación de los estériles de minas de carbón a la fabricación de ladrillos se puede contemplar desde dos puntos de vista:

- . Validez de los materiales en cuanto a su composición y propiedades físicas y mecánicas.
- . Mejora de los balances caloríficos como consecuencia de la materia combustible presente en los estériles.

Por lo que se refiere al primer punto, la posible validez de los estériles como materia prima para la fabricación de ladrillos, se determina mediante análisis químicos y mineralógicos, propiedades plásticas y ensayos de calefacción lenta. En un apartado posterior se definirán estos ensayos, mientras tanto veamos algunos resultados correspondientes a unas determinadas escombreras.

En la Tabla 3, y a título de ejemplo, se dan los resultados de los análisis químicos realizados sobre muestras calcinadas de materiales procedentes de escombreras de Kentucky (cuencas Este y Oeste) (6) y de estériles de lavaderos de HUNOSA.

TABLA 3. Valores medios de las composiciones químicas de escombreras de las cuencas Este y Oeste de Kentucky y de lavaderos de HUNOSA.

	<u>SiO₂</u>	<u>Al₂O₃</u>	<u>Fe₂O₃</u>	<u>K₂O</u>	<u>CaO</u>	<u>MgO</u>	<u>TiO₂</u>	<u>Otros</u>
Kentucky (Este)	54,99	26,19	7,07	3,94	0,66	1,53	1,37	4,25
Kentucky (Oeste)	51,79	18,30	18,15	2,76	3,07	0,99	0,97	3,97
HUNOSA	56,03	27,67	6,67	3,63	1,80	1,60	1,43	1,17

Los materiales para la fabricación de productos cerámicos han de tener una composición (en % en peso) semejante a la siguiente:

SiO ₂	50-60
Al ₂ O ₃	20-30
Fe ₂ O ₃	8-10
CaO	2-4
MgO	1-3

Pues bien, si se compara dicha composición con la tabla 3, se comprueba que, excepto los materiales de Kentucky Oeste, que parecen alejarse un poco, la composición química de los estériles de estas escombreras de carbón cumple los requisitos necesarios para la fabricación de ladrillos.

En cuanto a la composición mineralógica, los estériles de las minas de carbón están constituidos en su mayor parte por minerales arcillosos (illita, montmorillonita, caolinita, etc.) y cuarzo, junto a los que aparecen calcita, siderita, magnetita, pirita, feldespatos y rutilo. Desde el punto de vista de la fabricación de ladrillos, las principales limitaciones se refieren a la presencia de:

- . Pirita, que es la impureza más perjudicial.
- . Calcita, pues durante la cocción se transforma en cal viva, que al apagarse por la acción de la humedad da lugar a la dilatación y desintegración del ladrillo.
- . Yeso.

Como se deduce de ésto, para evaluar la posibilidad de utilizar estériles de carbón en la industria cerámica, será preciso comenzar por relizar unos análisis químicos y mineralógicos de tales materiales.

Otro aspecto importante para determinar la utilidad de los estériles en la fabricación de ladrillos es sus propiedades plásticas. Estas son de gran transcendencia, dentro del proceso de fabricación, en las operaciones de amasado y extrusión. La forma de determinarlas es mediante los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad). Las arcillas plásticas tienden a laminarse cuando son extruidas, mientras que las no plásticas no se pueden extruir en columnas continuas. Los materiales que se encuentran entre estos dos límites son los más deseables.

Otros requisitos que deben cumplir los estériles para poder ser empleados en la industria cerámica son (6): han de sufrir un secado uniforme y a una velocidad razonable sin sufrir deformaciones ni agrietamientos, una vez extruidos han de tener suficiente resistencia como para poder ser manipulados sin que se deformen, el producto cocido debe madurar a una temperatura de unos 1050°C dando lugar a un material muy duro, con poca absorción y contracción. El color no es una propiedad muy importante pues se pueden emplear sustancias colorantes.

En general, para todos los requisitos anteriores existen ensayos específicos que suelen ser realizados por los fabricantes de ladrillos. Para poder predecir la validez o no de los materiales de las escombreras de carbón para la industria cerámica, sería suficiente con un pequeño número de ensayos. Estos son: límites de Atterberg, microscopia de calefacción, molturabilidad y térmico-gravimétrico, además del químico y mineralógico para estudiar la composición de los estériles.

El segundo factor a tener en cuenta, y de mayor importancia para el presente informe, es la presencia de carbón en el material que se va a emplear para la fabricación de los ladrillos. En efecto, en el proceso de fabricación de ladrillos, una vez preparada la pasta, ésta se extrusiona, se corta, se seca y se cuece. Pues bien, en las dos últimas operaciones se puede aprovechar el calor producido en la combustión del carbón presente en la masa arcillosa.

La idea de incorporar en la pasta todo o parte del combustible necesario para la cocción, para mejorar el balance calorífico de la fabricación de ladrillos, se ha materializado mediante el sistema Surschiste, puesto a punto por las HBNPC entre 1947 y 1952.

Por su parte, HUNOSA, está desarrollando un proceso que, salvo pequeñas diferencias, es análogo al Surschiste.

Tanto en un caso, como en otro, se aprovecha el poder calorífico de los estériles empleados como materia prima. Mediante la combustión del carbón contenido se pueden alcanzar 900°C , como la cocción se realiza a unos 1050°C , es preciso aportar el resto de las calorías con otro combustible (en el proceso Surschiste es gas de coquería, mientras que en el de HUNOSA es carbón).

En las últimas instalaciones Surschiste construídas en Holanda, el consumo térmico se sitúa alrededor de los 1046 KJ/kg, para un poder calorífico de los estériles del orden de 1465 KJ/kg. Si se compara con los consumos normales de las plantas que trabajan con arcilla como materia prima, que son de unos 2930 KJ/kg, se puede comprobar el gran ahorro energético que supone la utilización de estériles de carbón como materia prima para la fabricación de ladrillos.

La cuestión más importante a tener en cuenta a la hora de cocer materiales arcillosos que contienen carbón, es mantener en todo momento y en todos los puntos del horno una atmósfera lo más oxidante posible. Esto permite que se produzca la auto-cocción de la materia prima mediante la aportación de calorías que resulta de la combustión del carbón.

3.3.2. Grés (7)

La utilización de los materiales de las escombreras de carbón como materia prima para la fabricación de grés, presenta indudables ventajas respecto a los materiales tradicionales. Entre éstas se pueden citar: abaratamiento de la materia prima por tratarse de materiales de desecho, con la peculiaridad de que los costos de molienda disminuyen sensiblemente, y notable ahorro energético como consecuencia del contenido en carbón de los estériles que mejora el balance calorífico.

Actualmente no se han iniciado todavía procesos industriales de fabricación de grés a partir de estériles de carbón, habiéndose desarrollado únicamente pruebas a escala de laboratorio.

Una de las diferencias fundamentales respecto a la fabricación de ladrillos a partir de material de escombrera, es la necesidad de añadir ciertas sustancias, como la chamota, para mejorar características como la textura, deformación, altas temperaturas de cocción, etc.

El grés se fabrica por un procedimiento de extrusión, semejante al de cualquier instalación de productos cerámicos por vía húmeda. Este proceso aprovecha el carbón contenido en los estériles, el cual es suficiente para alcanzar temperaturas de 900°C sin aporte de calor exterior. La cocción se realiza a 1200°C y el ciclo es de 48 horas.

El calor excedente, debido a la mayor necesidad de aire para la combustión del carbón, se recupera para el secado del material. De este modo se prevé un ahorro del 40% de energía respecto a los procesos de fabricación de grés con materiales convencionales.

3.3.3. Aridos ligeros

Los áridos ligeros son materiales de origen natural o artificial, que, junto con un aglomerante, se emplean para la fabricación de hormigones.

Entre los áridos ligeros naturales cabe destacar las puzolanas y la piedra pómez. Entre los artificiales se encuentran los subproductos industriales, como las escorias de carbón y las de horno alto, y los productos obtenidos mediante tratamientos especiales. Dentro de estos últimos, se encuentran los áridos ligeros fabricados a partir de los materiales de las escombreras de minas de carbón.

Dos son las razones que pueden llevar a un incremento en el empleo de los áridos ligeros: por una parte, debido a la gran utilización del hormigón, existen zonas donde se pueden presentar problemas de abastecimiento de áridos convencionales y, por otra, los áridos ligeros presentan una serie de propiedades que los hacen de gran interés para la construcción, como son: su bajo peso, que se consigue sin merma de las propiedades resistentes, baja absorción y elevada estabilidad química. Otras importantes propiedades de los áridos ligeros son: su

capacidad como aislante térmico, lo cual es de gran valor en la actualidad, es un buen aislante de ruidos y presenta una gran resistencia a la humedad. Otra prometedora aplicación de los áridos ligeros es para pavimentos de carreteras, teniendo unas excelentes propiedades ante el deslizamiento en firmes húmedos.

En 1977, la producción de áridos ligeros en Estados Unidos (8) fue de unos 6 millones de metros cúbicos. De estos, un 50% se utilizó en la construcción de viviendas, un 36% en hormigones estructurales y el 9% restante en usos especiales.

Dentro de los procesos de obtención de áridos ligeros, se encuentra el tratamiento térmico de los materiales arcillosos. Como los estériles del carbón están constituidos, fundamentalmente, por rocas de este tipo (pizarras, esquistos, etc.), se puede considerar factible su utilización como materia prima para la fabricación de áridos ligeros.

Cuando se calientan rápidamente ciertos materiales silicoaluminosos, tales como los esquistos de las escombreras de carbón, se provoca su hinchamiento. Se obtienen entonces unos granulados constituidos por una pasta vitrificada, que encierran en su interior gran número de finas cavidades llenas de gas. Este fenómeno ha sido aprovechado para la fabricación de ciertos agregados ligeros a partir de esquistos.

El mecanismo de formación de esta estructura es el siguiente: al calentar la materia mineral, llega un momento en que comienza a fundir en forma de pasta de gran viscosidad; a la vez se produce un desprendimiento de gases (SO_2 , SO_3 , CO_2 , O_2), los cuales son retenidos por la pasta formando finas burbujas en su interior. Los dos factores fundamentales son, por un lado, la viscosidad y la tensión superficial de la pasta formada y, por otro, la cinética de la desgasificación.

De la viscosidad depende la cantidad de gas que se pueda retener. Según que la tensión superficial sea menor o mayor, las burbujas tendrán más o menos facilidad para desarrollarse. En cuanto a la desgasificación, se ha de producir una vez que la pasta se encuentre en estado viscoso pues, en caso contrario, los gases escaparán sin formar burbujas. Si, por otra parte, la pasta es demasiado fluída, los gases tampoco formarán burbujas.

En los materiales de las escombreras se encuentran determinadas proporciones de carbón. La combustión de este carbón proporciona una cierta cantidad de calorías, que mejoran el balance térmico del proceso.

Los áridos ligeros se pueden fabricar mediante hornos rotativos o cintas de sinterización.

De los procesos que utilizan hornos rotativos cabe destacar el SUREX. Este procedimiento ha sido desarrollado en Francia por las HBNPC en colaboración con el CERCHAR. Es muy sencillo y permite utilizar estériles de escombreras de carbón con un contenido en carbón de un 4 a un 10% (9). Estos estériles se muelen a tamaños inferiores a 0,5 mm y los productos ya molidos se mezclan con un 12% de agua.

Una vez formada la pasta, se extrusiona y corta en forma de pequeños cilindros de diferentes diámetros. Después de secar estos cilindros, pasan a un tratamiento térmico en una línea de cuatro hornos rotativos en cascada con control automático: horno precalentador, horno de decarbonación, horno de preexpansión y horno de expansión. En el precalentador, los cilindros permanecen unos 30 minutos, alcanzándose una temperatura de unos 700°C. En el de decarbonación se introduce una corriente lateral de aire para que se produzca la combustión del carbón presente; en el extremo final del horno este soplado desaparece y se alcanzan temperaturas de 1000 a 1050°C,

produciéndose la fusión de la pizarra y su posterior vitrificación. En el horno de preexpansión las temperaturas se elevan hasta 1350°C , los gránulos tienen un carácter termoplástico y los gases desprendidos les hacen hincharse. En el horno de expansión se mantiene la temperatura durante unas tres horas. Una vez concluida la expansión, los granos se pasan a un refrigerador donde se recupera el calor sensible de los productos expansionados.

El proceso SUREX permite obtener granulados con densidades aparentes que varían entre 350 y 850 kg/m^3 , dependiendo del uso a que vayan a ser destinados. El paso de unas densidades a otras se puede efectuar de forma continua, con rapidez y precisión.

La utilización del calor latente de los materiales de escombreras permite reducir el consumo térmico a menos de 2930 KJ/kg , lo que en estos tiempos de crisis energética es un factor muy favorable para la producción de áridos ligeros a partir de estériles procedentes de escombreras de carbón.

El procedimiento SUREX deja de ser eficiente cuando se pretenden obtener granos de menos de 5 mm, pues las dificultades se hacen muy grandes en la fase de preparación de los granos crudos y en la de expansión. Sin embargo, el poder disponer de granulometrías inferiores a 5 mm es de gran importancia a la hora de preparar hormigones. La solución que se ha adoptado en ocasiones es triturar los áridos de tamaño superior hasta obtener las granulometrías deseadas. Pero este proceso origina la destrucción de la pasta vitrificada, creando numerosas microfracturas en los granos, lo que origina un incremento en el coeficiente de retención del agua y, por lo tanto, la pérdida de una de las ventajas de los áridos ligeros. Se han desarrollado dos procedimientos de fabricación de áridos ligeros menores de 5 mm: calentamiento a la llama y expansión de gotas en barbotina (9).

Por lo que se refiere a la fabricación de áridos ligeros mediante cintas de sinterización, uno de los procesos que más se ha empleado es el HALDEX. En este proceso, los materiales de la escombrera con menos del 10% de carbón, junto con los estériles que resultan del lavado en hidrociclones SIMDEX (ver Relavado de finos. Hidrociclones) se muelen a menos de 0,75 mm. Si los productos tienen una composición análoga a la adjunta, se someten a sinterización.

SiO_2	=	50-60%
Al_2O_3	=	20-30%
Fe_2O_3	=	8-10%
MgO	=	1- 3%
CaO	=	2- 4%
SO_3	=	0,3- 2%

Los materiales se muelen, se mezclan con agua y se pelletizan o nodulizan. Con estos pellets o nódulos se alimenta la cinta de sinterización. En ésta, cuando se alcanzan los 900°C se produce la liberación completa del agua, a unos 1200°C, o algo menos, se produce el hinchamiento y vitrificación de los pellets.

El material ya expansionado va saliendo de la cinta en forma de torta continua, que es preciso triturar para obtener las granulometrías deseadas. La densidad aparente del producto sinterizado varía entre 450 y 850 kg/m³, obteniéndose unos valores medios de 700 kg/m³.

En Estados Unidos, el 80% de las plantas de áridos ligeros son de horno rotativo (8).

HUNOSA está desarrollando un proceso de fabricación de áridos ligeros de los del tipo de horno rotativo (7). La diferencia con el proceso SUREX estriba en que sólo son necesarios dos hornos. El secado se efectúa a 130°C, aprovechando parte del calor sobrante de la cocción. En el segundo horno, los materiales se someten a temperaturas de 1200 a 1225°C. El combustible que se piensa utilizar es carbón. Respecto al proceso SUREX, el trabajar a temperaturas más bajas permite rebajar el consumo de energía.

Para evaluar la validez de los materiales de escombrera para la fabricación de áridos ligeros, es preciso realizar ensayos de calefacción rápida, de los cuales se puede obtener información referente a: densidad aparente, tanto por ciento de absorción, estructura general, apariencia y aptitud para el hinchamiento.

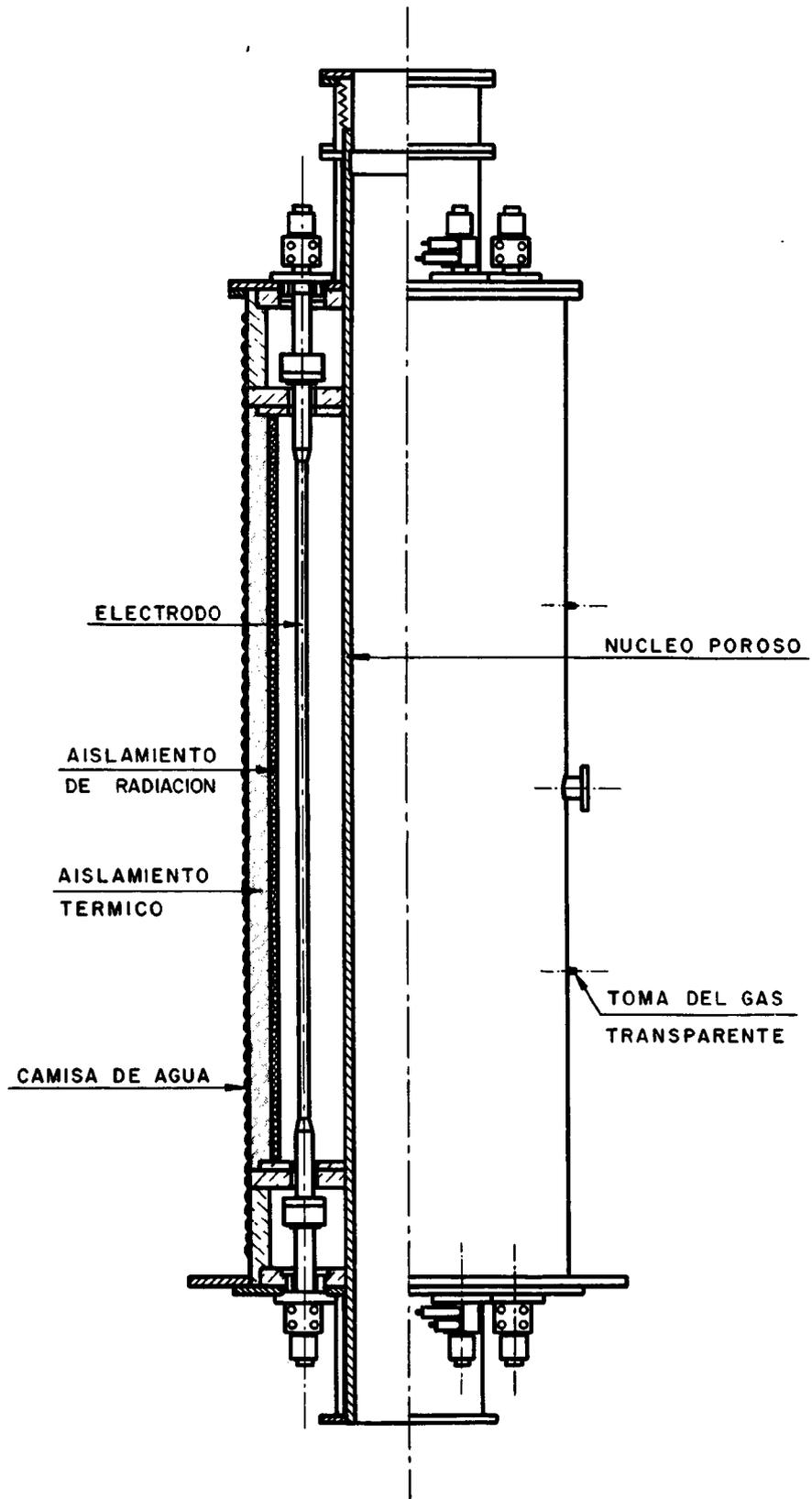
Las propiedades de los estériles determinarán el método de fabricación a utilizar: cinta de sinterización u horno rotativo. Para la utilización del horno rotativo se precisa que el material se seque rápidamente sin sufrir una gran desintegración y que se mantenga dentro de unos tamaños adecuados. Para el empleo de la cinta de sinterización, la humedad y el tamaño

de partícula no son críticos, ya que los materiales son finamente molidos y mezclados con agua para ser pelletizados.

De cualquier forma, la ejecución de los ensayos específicos, se realiza por el fabricante de áridos ligeros, no siendo preciso llevarla a cabo en un estudio general de valoración de estériles de carbón, como el que se plantea en este trabajo. En este caso, para establecer la validez de los materiales puede ser suficiente con conocer las propiedades químicas, mineralógicas, plásticas, termogravimétricas y la molturabilidad. Por lo que se refiere a las propiedades químicas, mineralógicas y plásticas, los razonamientos son análogos a los realizados en el caso de fabricación de ladrillos. La molturabilidad es de gran interés, ya que todos los procesos de fabricación conllevan una molienda inicial para reducir los materiales a tamaños muy finos. En cuanto a las propiedades termogravimétricas son importantes para conocer las temperaturas a las que se produce el desprendimiento de los diferentes productos gaseosos.

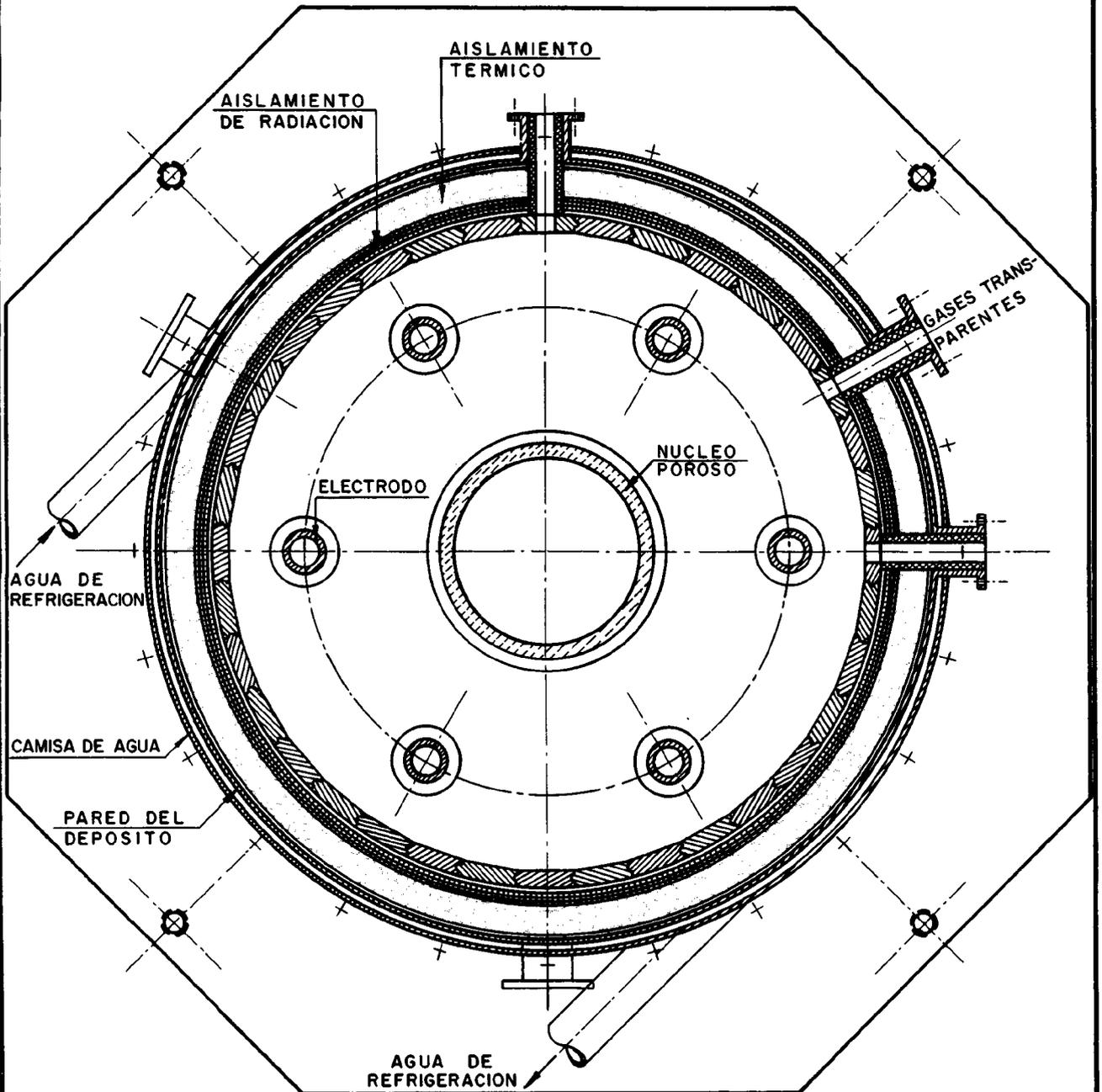
3.4 REACTOR THAGARD DE ALTA TEMPERATURA Y PARED FLUIDA (HTFW)

El reactor Thagard (Figs. 1 y 2), está constituido por una cámara de reacción cilíndrica de eje vertical de material refractario y poroso. A través de los poros se introduce radialmente un gas transparente a la radiación infrarroja (nitrógeno o hidrógeno) creando una envolvente perimetral gaseosa que recubre las paredes.



REACTOR THAGARD
SECCION VERTICAL

FIGURA 1



REACTOR THAGARD
SECCION HORIZONTAL

FIGURA 2

Los reactivos se alimentan por la parte inferior central de la cámara cilíndrica quedando confinados en el centro de la cámara por el flujo perimetral de los gases; de esta manera se elimina el contacto entre los reactivos y las paredes del reactor, evitando la escorificación de éstas y la deposición de reactivos sobre ellas.

Al no poderse realizar la transferencia de energía por contacto directo, ésta se realiza emitiendo radiaciones infrarrojas a través del material refractario y poroso, que son absorbidas por los reactivos. La energía emitida varía con la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

La cámara de reacción está completamente recubierta y aislada por un depósito de presión cilíndrico doble refrigerado por agua (camisa de agua). En el espacio anular comprendido entre la cámara de reacción y el depósito de presión, se sitúan tres electrodos paralelos al eje del reactor, alimentados por corriente alterna (480 V), que emiten la radiación necesaria para alcanzar el nivel de temperatura deseado en la cámara de reacción. El control de la temperatura se obtiene mediante medidores ópticos de radiación que generan señales para ajustar la corriente de alimentación de los electrodos y así, mantener constante la temperatura en la cámara de reacción con independencia de las reacciones químicas que se produzcan en ella.

Las ventajas más importantes del reactor Thagard HTFW frente a los reactores convencionales de alta temperatura son:

- . La transferencia de calor a los reactivos se realiza fundamentalmente por radiación, permitiendo obtener valores más altos de transferencia y alcanzar temperaturas de operación superiores a los 3000°C. El calentamiento de los reactivos a la temperatura de operación es casi instantáneo,

lo que permite unos tiempos totales de permanencia de los reactivos en la cámara de reacción menores de un segundo. El reactor Thagard HTFW es extremadamente flexible en términos de producción, consiguiendo el procesado continuo de los reactivos con cantidades inferiores al 10% de su capacidad total. El grado de transferencia de energía es independiente del régimen de flujo de los reactivos y del contacto del reactivo con las superficies del reactor. Como consecuencia de lo expuesto, se tienen menores tamaños y costos de inversión que con los reactores convencionales. Además, se eliminan los costos de mantenimiento que serían necesarios al emplear varias unidades convencionales con capacidades de alimentación pequeñas, para operar eficazmente en un amplio rango de producción.

- . Mejora la pureza del producto, ya que en el reactor Thagard HTFW no se producen compuestos intermedios ni reacciones parciales del material alimentado, que puedan contaminar el producto. La absorción del azufre se realiza adicionando en la alimentación caliza o dolomía en cantidad suficiente para formar rápidamente sulfuro de calcio como producto de desecho. Por lo tanto, se reduce la inversión de capital en equipos depuradores del producto en las fases siguientes de producción, que de emplear reactores de baja temperatura serían imprescindibles, a la vez que mejora los costos de mantenimiento al ser menor el número de equipos de la instalación. El residuo producido en el reactor es químicamente estable en condiciones normales y se puede utilizar como material de relleno en carreteras.

- . Al estar protegidas las paredes del reactor por una barrera perimetral de gases, del contacto directo con los reactivos, se eliminan costos de mantenimiento, al evitarse la escorificación y la corrosión del refractario.

En cuanto al tratamiento de escombreras de carbón mediante el reactor Thagard, el fenómeno que se produce es el siguiente : Al introducir una partícula de carbón en la cámara de reacción de un reactor Thagard HTFW, se encuentra sometida al flujo de radiaciones electromagnéticas y al no ser totalmente transparente a ellas absorbe energía tan rápidamente que provoca la desintegración de la partícula hasta que se consume totalmente su contenido de carbono, con el consiguiente aporte de energía.

Actualmente Thagard Research Corporation ha otorgado la patente para España de su reactor HTFW a HUNOSA, en donde se están gasificando las fracciones finas de los desechos de sus plantas de tratamiento mezclados con caliza para absorber el azufre contenido y obtener un subproducto utilizable como clinker de cemento y para fabricación de lana de vidrio.

También se puede obtener gas de síntesis a partir de los residuos húmedos procedentes de las espumas de flotación del lavado de carbón, sin necesidad de secado previo, en un reactor Thagard HTFW.

3.5. COMBUSTION

La necesidad de incrementar el patrimonio energético de la Humanidad, ha impulsado a reemplazar los procesos de producción de calor existentes por otros nuevos con rendimientos superiores, y cuyos residuos tengan el menor contenido energético posible. Así mismo, se tiende a aprovechar materiales

combustibles que hasta hace poco eran considerados como fuentes potenciales o marginales de energía. Estos materiales se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- . Materiales de bajo poder calorífico, como carbones con altos contenidos en cenizas y escombreras de carbón.

- . Materiales de moderado a alto poder calorífico que presentan problemas de aprovechamiento o utilización (preparación del combustible, combustión o emisiones contaminantes), como carbones con alto contenido en azufre, desechos urbanos e industriales y biomasa.

En el presente trabajo vamos a frontar, dentro del grupo de materiales incluidos en el primer apartado, el caso de las escombreras de carbón. La utilización de los materiales de escombreras en la producción de vapor se puede llevar a cabo según tres esquemas básicos:

- . Relavado para la obtención de un carbón de contenido en cenizas relativamente bajo y combustión de éste mediante las técnicas convencionales. Los problemas que pudieran plantearse para llevar a cabo este proceso son los derivados de la operación de lavado, y se contemplan en el apartado "Relavado de escombreras de carbón".

- . Combustión de los materiales tal como se encuentran en la escombrera. Estos pueden ser considerados como carbones de muy alto contenido en cenizas (75-80%), por lo que precisan de procedimientos de combustión especiales. En el apartado "Combustión de escombreras de carbón", se presentan las técnicas más importantes para quemar combustibles sólidos. De todas ellas, la que mejores características presenta para la utilización de combustibles de elevado contenido en cenizas es la "Combustión en lecho fluidizado" (FBC).
- . Mezcla de los materiales de la escombrera con carbones normales, con lo que se puede elevar el poder calorífico y disminuir el contenido en cenizas. En este caso, es la técnica del lecho fluidizado la que sigue presentándose como más conveniente para la combustión.

En cualquier caso, el empleo de los estériles del carbón para la producción de vapor es una práctica bastante extendida en varios países del mundo. Así por ejemplo, en Francia, en 1975 se recuperaron 16×10^{12} KJ, que equivalen a 400.000 t de fuel-oil, mediante la combustión de escombreras de carbón.

4. RELAVADO DE ESCOMBRERAS DE CARBON

4.1. INTRODUCCION

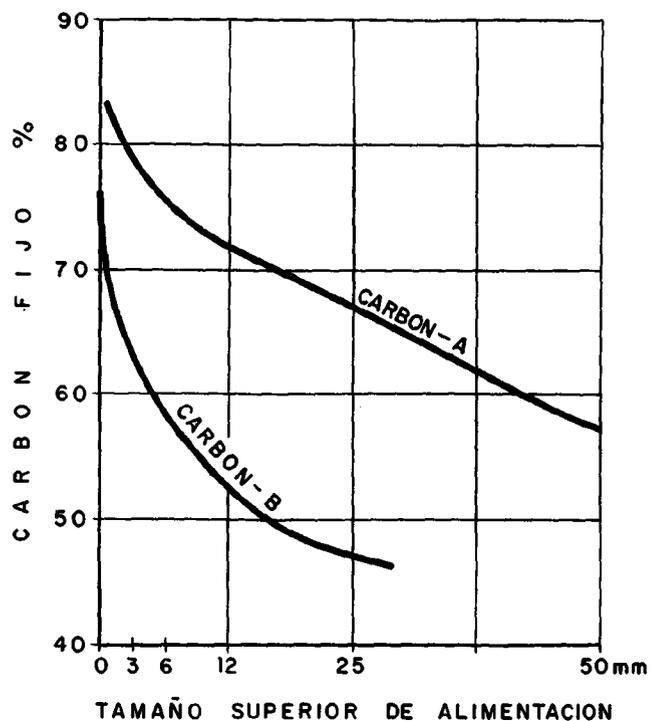
Una de las primeras cuestiones a responder a la hora de plantear el lavado de una escombrera , es el tamaño a que habrá que triturar para obtener un carbón con un determinado contenido en cenizas.

Así por ejemplo, en la Figura 3 se da una curva hipotética que relaciona el contenido en carbón con el tamaño de partícula. Si el material de que se dispone es el B, se ve que no existe ningún procedimiento práctico de lavado para obtener un producto con un 75% de carbón, debido a que hay que reducir a tamaños ultrafinos para alcanzar dicho porcentaje. Sin embargo, con el Carbón A se podría obtener ese mismo 75% triturando a 10mm. Las curvas del tipo a la de la Figura 3 se pueden obtener mediante sencillos ensayos de lavabilidad en cualquier laboratorio.

Una vez determinado el tamaño al que será necesario reducir los materiales que constituyen la escombrera, el siguiente paso es - elegir la planta más adecuada para efectuar el lavado. Esta elec-ción debe estar basada en un estudio de costos y de eficiencia. Los costos se expresarán en "costo de lavado por tonelada de carbón lavada", para emplearlos a la hora de obtener un precio de venta. La eficiencia de la planta vendrá dada por análisis efectuados sobre los estériles que de ella salgan, los cuales deberán contener un máximo de cenizas. A esta eficiencia habrá que prestarle especial atención a la hora de analizar el lavado de finos.

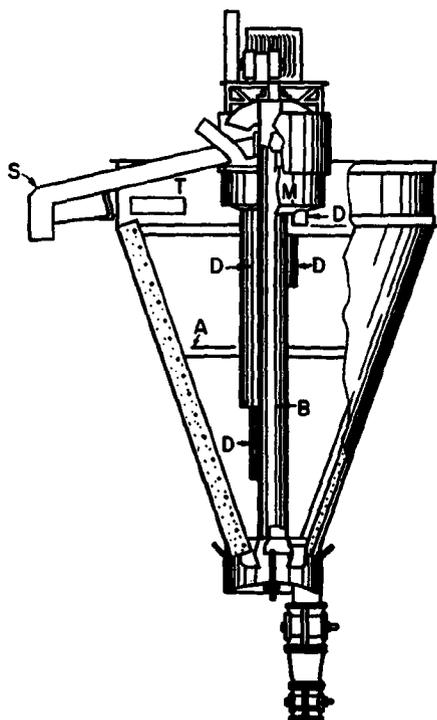
El lavado de una escombrera de carbón se puede plantear en base a dos situaciones:

- . Se dispone de un lavadero ya montado y, como mucho, se trata de adaptarlo a la problemática que plantea el lavado de la escombrera.



CARACTERISTICAS DE LAVABILIDAD

FIGURA 3



CONO SEPARADOR PARA LIQUIDOS DENSOS

FIGURA 4

- . Se trata de montar una planta nueva diseñada especialmente para el tratamiento de escombreras.

El primer caso es el más corriente en estos momentos en España, por lo que es necesario proceder a una descripción de los principales sistemas de lavado que se han venido empleando de una forma generalizada a lo largo del tiempo.

En cuanto al segundo, deberán instalarse los equipos que mejor se adapten a la problemática de las escombreras. En este sentido, en Gran Bretaña y Bélgica, se están utilizando plantas muy ligeras que fácilmente se pueden desplazar de una escombrera a otra (3).

El criterio más extendido a la hora de clasificar los sistemas de lavado, es hacerlo según el tamaño de grano de alimentación. De este modo, se pueden establecer tres grupos:

- . Lavado de granos mayores de 10mm (medios densos y jigs neumáticos).
- . Lavado de granos comprendidos entre 10 y 0.5 mm (ciclones de medios densos, hidrociclones, rheolavadores, jigs de lecho filtrante, espirales y mesas vibratorias).
- . Lavado de granos menores de 0.5 mm (flotación).

Estos tres tamaños se han establecido de un modo un tanto convencional, pues, como se verá cuando se describan los diferentes procedimientos, se producen solapes entre unos y otros. Sin embargo, desde el punto de vista de una sistematización, su empleo puede ser de utilidad.

En general, en una escombrera de carbón se encuentran materiales con una gran diversidad de tamaños, desde grandes bloques hasta partículas muy finas del tamaño de las arcillas. Como

consecuencia de ésto, puede ser necesario un proceso de clasificación y trituration antes de alimentar el lavadero.

4.1.1 Clasificación

En el tratamiento de carbones, la mayor parte de las operaciones de clasificación se realizan mediante cribado. Los clasificadores neumáticos o los ciclones de aire son muy poco empleados.

Las cribas utilizadas pueden ser estacionarias o móviles. Las móviles pueden ser de sacudidas o vibratorias, y las superficies pueden consistir en barras paralelas, chapas de acero perforadas o telas metálicas con las mallas cuadradas o rectangulares.

Otros dispositivos empleados para clasificar son los trómmeles Bradford, que llevan a cabo la doble misión de clasificar y triturar.

Las cribas más utilizadas son las vibratorias de chapa perforada o tela metálica. En las escombreras, la mayor parte del carbón se encuentra en las granulometrías más finas, por lo que el material se suele someter a un precribado a 50-70 mm, cuyo rechazo no pasa ya al lavadero.

4.1.2. Trituración

El objetivo que se persigue es reducir los materiales de la escombrera a una granulometría tal que permita recuperar el carbón existente con unos contenidos en cenizas determinados.

En una escombrera de carbón, la sustancia más abundante es la pizarra, y, en general, los materiales que se presentan tienen una dureza de blanda a media y son poco abrasivos. Por otra parte, una de las cuestiones más importantes en la conminución del carbón es la menor producción posible de sobretrituration.

Como consecuencia de estos condicionantes, los principales tipos de máquinas que se han venido empleando para triturar carbón son:

Cilindros dentados. Pueden disponer de uno o dos cilindros. Dan una granulometría muy regular, con un porcentaje de finos muy bajo. Permiten trabajar con materiales húmedos y pegajosos. La razón de reducción oscila entre 4/1 y 5/1. El máximo tamaño de alimentación (D_{max}) es:

2 cilindros: $D_{max} = 0.3-0.6 \text{ } \varnothing \text{ del cilindro}$

1 cilindro: $D_{max} = 0.33-0.5 \text{ } \varnothing \text{ del cilindro}$

En cuanto a la capacidad de trituración, viene dada por la fórmula:

$$C = K.d.V.L.$$

donde,

K es un coeficiente que varía entre 0.4 y 0.8, según que el material sea más o menos duro.

d es el d_{95} del producto de salida en mm.

V es la velocidad periférica en m/s.

L es la longitud en m de los cilindros.

Con las unidades más grandes se pueden triturar toneladas superiores a las 1000 t/h.

- Trommel triturador Bradford. Consiste en un cilindro perforado de unos 3 m de diámetro y de 5 a 7 m de largo. Gira a unas 12-18 rpm. El todo-uno entra por un

extremo, y unas paletas fijas lo elevan en el movimiento de giro. Cuando el producto llega a una determinada altura cae y se produce la trituración. Los productos triturados pasan a través de la chapa perforada, son recogidos por una cinta y llevados al lavadero, mientras que los gruesos rebosan por el otro lado del trommel. Con estos aparatos se pueden alcanzar producciones de hasta 1500 t/h. Requieren fuertes inversiones por lo que solo son aconsejables para grandes plantas, pero son baratos de mantenimiento.

- . Trituradoras de martillos. Permiten realizar unas reducciones de tamaño fortísimas, pudiendo alcanzarse en circuito cerrado razones de reducción hasta de 30/1. Alimentados con materiales pegajosos pierden mucha eficacia. Así mismo, hay que limitar su empleo cuando se trata de materiales abrasivos.

Con las grandes trituradoras de martillos móviles se pueden alcanzar producciones hasta de 1000 t/h. Se pueden conseguir reglajes inferiores a los 3 mm. Producen una cantidad de finos algo mayor que las otras trituradoras. Esta trituradora, que está entre las más versátiles del mercado, se adapta a condiciones muy duras y es de gran flexibilidad.

Otras trituradoras utilizables en la conminución del carbón son: de dos etapas, de tres cilindros y la Paktor.

4.2. RELAVADO DE GRUESOS Y MENUDOS.

Los principales métodos utilizados para el lavado de gruesos y menudos son: medios densos y jigs.

4.2.1. Medios densos

Las separaciones en medios densos incluyen aquellos procesos de preparación del carbón en los que el lavado se produce por inmersión del "todo uno" en un líquido que tiene una densidad intermedia entre el carbón y la ganga. Este proceso, inicialmente desarrollado para la concentración de menas metálicas, fue aplicado al lavado de carbón por la American Cyanamid Company en 1940. Teóricamente, cualquier tamaño de partícula podría ser tratado por el método de medios densos, sin embargo, el rango práctico de aplicación oscila entre 0.5 mm y 150 mm, aunque ocasionalmente se hayan lavado partículas de más de 350 mm. Los tamaños superiores a 6.35 mm normalmente se tratan en separadores estáticos, mientras que para los inferiores se suelen emplear separadores en los que intervienen fuerzas centrífugas.

El líquido denso ideal debería tener las siguientes propiedades: ser barato, fácil de recuperar, soluble en agua, poco viscoso, estable, inerte, no tóxico y capaz de ajustarse a un amplio rango de pesos específicos. Se han desarrollado cuatro tipos de líquidos densos susceptibles de ser utilizados industrialmente: líquidos orgánicos, sales disueltas en agua, sólidos aereados y suspensiones de finas partículas sólidas en agua. Los líquidos orgánicos se han utilizado ampliamente en análisis de laboratorio. Sin embargo, su utilización industrial en el lavado de carbones, por razones de costo y solubilidad, no se ha extendido.

En cuanto a las sales disueltas en agua, se pueden usar varias, como cloruro de zinc o de calcio. El proceso de cloruros Belknap es el único que, utilizando un verdadero líquido denso como agente separador, ha sobrevivido como aplicación a la producción comercial.

El procedimiento de los sólidos aereados consiste en utilizar

como líquido denso un lecho de arena de peso específico intermedio entre el carbón y la ganga. La suspensión se realiza en seco mediante una corriente de aire. A pesar de lo atractivo del método, únicamente se ha desarrollado el proceso Fraser & Young, el cual se aplicó en una serie de plantas de lavado de carbón bituminoso, pero en todas ellas falló, fundamentalmente debido a su mal comportamiento ante carbones húmedos.

Si se exceptúan las plantas que utilizan cloruros, la mayor parte de las instalaciones que emplean el método de líquidos densos para el lavado de carbón lo hacen con suspensiones de sólidos insolubles en agua. Los pesos específicos de separación para el lavado de carbones oscilan entre 1.35 y 1,90. En el empleo de suspensiones, hay cuatro factores que resultan críticos: concentración, viscosidad, velocidad de sedimentación y recuperabilidad del sólido disperso. En el lavado de carbones son usuales concentraciones comprendidas entre el 25 y el 45%. La densidad de una suspensión viene dada por la fórmula:

$$D = \frac{100}{(100 - c) \frac{c}{d}}$$

donde,

D es la densidad de la suspensión (gr/cc)

c es la concentración en peso de sólidos en suspensión (%)

d es la densidad de los sólidos (gr/cc)

Con sólidos de elevada densidad, como magnetita (5.000 kg/m³) o barita (4.200 kg/m³) se pueden preparar suspensiones de densidades superiores a 2.000 kg/m³, lo que permite cubrir cualquier necesidad en el tratamiento de carbones. Sin embargo, estas

partículas tienen una velocidad de sedimentación elevada, lo que hace poco estables a las suspensiones. Esta estabilidad se puede incrementar disminuyendo el tamaño de las partículas pesadas y alimentando con una determinada proporción de finos arcillosos (con un 30% de partículas arcillosas en la alimentación, se pueden conseguir velocidades de decantación de 1mm/min, que caracterizan una buena suspensión). La proporción de finos es limitada por la viscosidad de la suspensión, puesto que se debe asegurar la libre circulación de las partículas de carbón hacia arriba.

Se ha empleado un gran número de materiales para la preparación de suspensiones, entre ellos se pueden citar: arena, magnetita, pirita, pizarra, barita, loess, etc. De todos éstos, solo la arena y la magnetita se han usado masivamente en el lavado de carbones.

En líneas generales, todos los dispositivos de tratamiento se basan en hacer llegar a un recipiente el material a lavar, y el líquido denso. El producto ligero, es decir, el carbón, flota y sale por el rebose del aparato, ayudado en algunos casos por medios mecánicos. Los estériles se hunden, van al fondo y se evacuan mediante diferentes procedimientos mecánicos.

A la hora del diseño, es preciso considerar ciertos requisitos que deben satisfacer los aparatos de lavado: deben tener suficiente capacidad para tratar tonelajes elevados de carbón utilizando la mínima superficie posible; deben necesitar el mínimo medio denso circulante posible; deben mantener la mayor homogeneidad posible en el peso específico del medio en todo el volumen; las corrientes hidráulicas se deben minimizar para conseguir la mayor aproximación posible a un proceso de "flotación-hundimiento"; deben estar diseñados de tal forma que permitan una alimentación eficiente, una recuperación total del carbón lavado, y una fácil eliminación de la ganga; y la eficiencia del lavado no se debe ver afectada por oscilacio-

nes tanto en la granulometría, como en las leyes de la alimentación.

Según la naturaleza del medio denso, se pueden distinguir dos procesos de lavado:

- . Procesos que emplean suspensiones de arena. El proceso Chance es el más popular de los que utilizan una suspensión de arena como medio denso. Los recipientes empleados son del tipo cónico. - La diferencia fundamental respecto a otros métodos de medios densos es que, debido al tamaño de las partículas de arena utilizadas, la suspensión presenta una gran tendencia a la sedimentación, - lo que obliga al empleo de agitadores o corrientes ascensionales. En el caso del lavado de antracitas, que requieren un peso específico de separación de 1,70 o más alto, se suele utilizar la agitación para mantener el medio uniformemente distribuido en el cono, mientras que en carbones bituminosos, que necesitan pesos específicos de 1,50 se suelen emplear corrientes ascensionales.

Los conos Chance se alimentan por la parte superior, el carbón lavado rebosa y se hace pasar sobre unas rejillas donde se libera de los posibles granos de arena que haya arrastrado. El estéril se retira por la parte inferior, descargándose sobre unas rejillas con riego de agua que permiten recuperar la arena.

La capacidad de los conos Chance para lavar carbón es proporcional al área de la zona en la que se produce la separación y, en condiciones normales, es de unas 20 toneladas/hora por metro cuadrado de superficie.

La capacidad de descarga de estéril es, aproxima

damente proporcional al área de la sección del cono (alrededor de 500 t/h por m² de área de la sección).

- Procesos que emplean suspensiones de magnetita.
Todas las plantas que utilizan la magnetita como medio denso, realizan las siguientes funciones:

Pretratamiento de la alimentación. Como el procedimiento de líquidos densos no permite tratar todos los tamaños posibles, es necesario limitar el rango de los tamaños de alimentación. Para conseguir una granulometría por debajo de un tamaño dado, es necesario realizar una trituración, un cribado, o ambas cosas. Pero el pretratamiento más importante consiste en la separación de las partículas que son demasiado finas para ser tratadas por medios densos, que elevarían peligrosamente la viscosidad de la suspensión dificultando la circulación de las partículas. Estos finos pueden ser sometidos a tratamientos posteriores para recuperar el carbón que llevan.

Lavado. Consiste en la separación del "todo-uno" en carbón lavado y estéril. Debido al elevado número de lavadores de este tipo, se describen más adelante por separado.

Recuperación de los productos. El producto que se obtiene del lavado debe ser separado del medio denso. Esto se suele realizar mediante cribas vibratorias con riego de agua.

Recuperación del medio denso. La recuperación y regeneración del medio revisten gran importancia técnica y económica, y llegan a condicionar la ren

tabilidad del procedimiento. En una primera fase, se recupera por lavado de los productos flotado y hundido en una criba. En una segunda fase, el lavado sobre criba del producto recuperado en la fase anterior permite obtener un medio diluido, que se concentra y depura por procedimientos magnéticos.

Son múltiples los procesos de recuperación del medio que se han desarrollado, sin embargo, cabe destacar el de la American Cyanamid Company, bajo cuya licencia se han desarrollado posteriores sistemas.

Los aparatos para el lavado de carbones con medios densos se pueden clasificar en tres grupos:

- . Lavadores cónicos. En la figura 4 se representa un cono separador WEMCO con elevador central por inyección de aire. Básicamente, consiste en un tanque cónico con el vértice hacia abajo y provisto de un mecanismo de agitación constituido por aspas montadas en un eje, que mantienen el medio denso en suspensión y facilitan el flujo de partículas de carbón hacia la parte superior. La alimentación se realiza por la parte alta del cono, cerca del centro. La fracción flotada se extrae por una ranura en espiral T, mientras que la hundida resbala por las paredes del cono hasta el fondo, de donde es aspirada por el tubo central B (355 mm de diámetro) e impulsada por una corriente de aire, junto con una cierta cantidad de medio, hasta un canal de descarga S. El medio denso que se ha drenado de los productos y la cantidad que se aporta para reponer las pérdidas, se llevan al depósito M, desde donde pasa a la suspensión a diferentes profundidades por los tubos D. Los conos

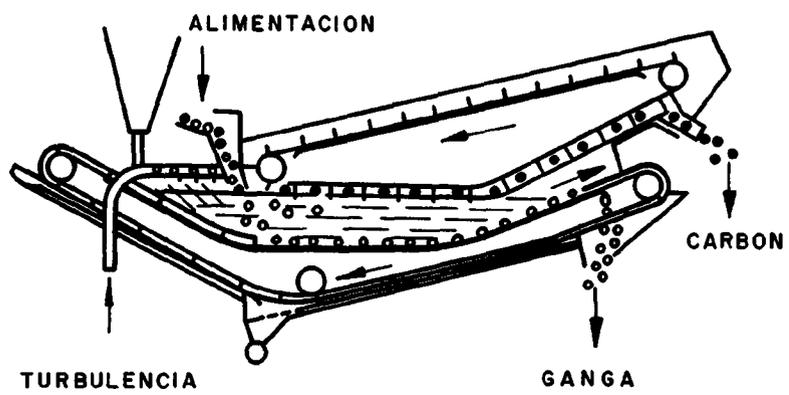
tienen diámetros comprendidos entre 1 y 6 m, con capacidades de 10 a 300 t/h.

- Lavadores tipo-artesa. Son muy variados los separadores existentes de este tipo. Entre otros se pueden citar: el Tromp, el DMS, el Link-Belt, el Barvoys, el DSM, el OCC y el M&P. Veamos alguno de estos:

Lavador Tromp. Lo desarrolló K. Tromp en Holanda y fue el primer procedimiento en emplear comercialmente magnetita como medio denso. Básicamente consiste en un baño en el que se encuentra el medio denso; el carbón y los estériles salen del baño por los extremos opuestos del aparato, con ayuda del mismo transportador de racletas (Fig. 5). La característica fundamental de este sistema es la posibilidad de obtener tres fracciones: carbón lavado, mixtos y estéril. Para esto, se realiza una gradación de densidades en el medio, desde la superficie al fondo, y se disponen dos transportadores de racletas, uno extrae el carbón lavado y el otro extrae separadamente los mixtos y estériles.

Lavador DMS. Es un lavador en el que la alimentación y la descarga de carbón lavado son transversales a la evacuación de estériles. La alimentación, una vez preclasificada y humedecida, es introducida en el fondo del baño mediante un dispositivo patentado. Los estériles son evacuados del fondo de forma continua por un transportador de racletas. En cuanto a capacidad, es el de mayor, pudiendo ser alimentado con 800 t/h.

Lavador Barboys. Su principal característica es el empleo de ruedas de paletas para extraer el



MESA TROMP DE 2 PRODUCTOS

FIGURA 5

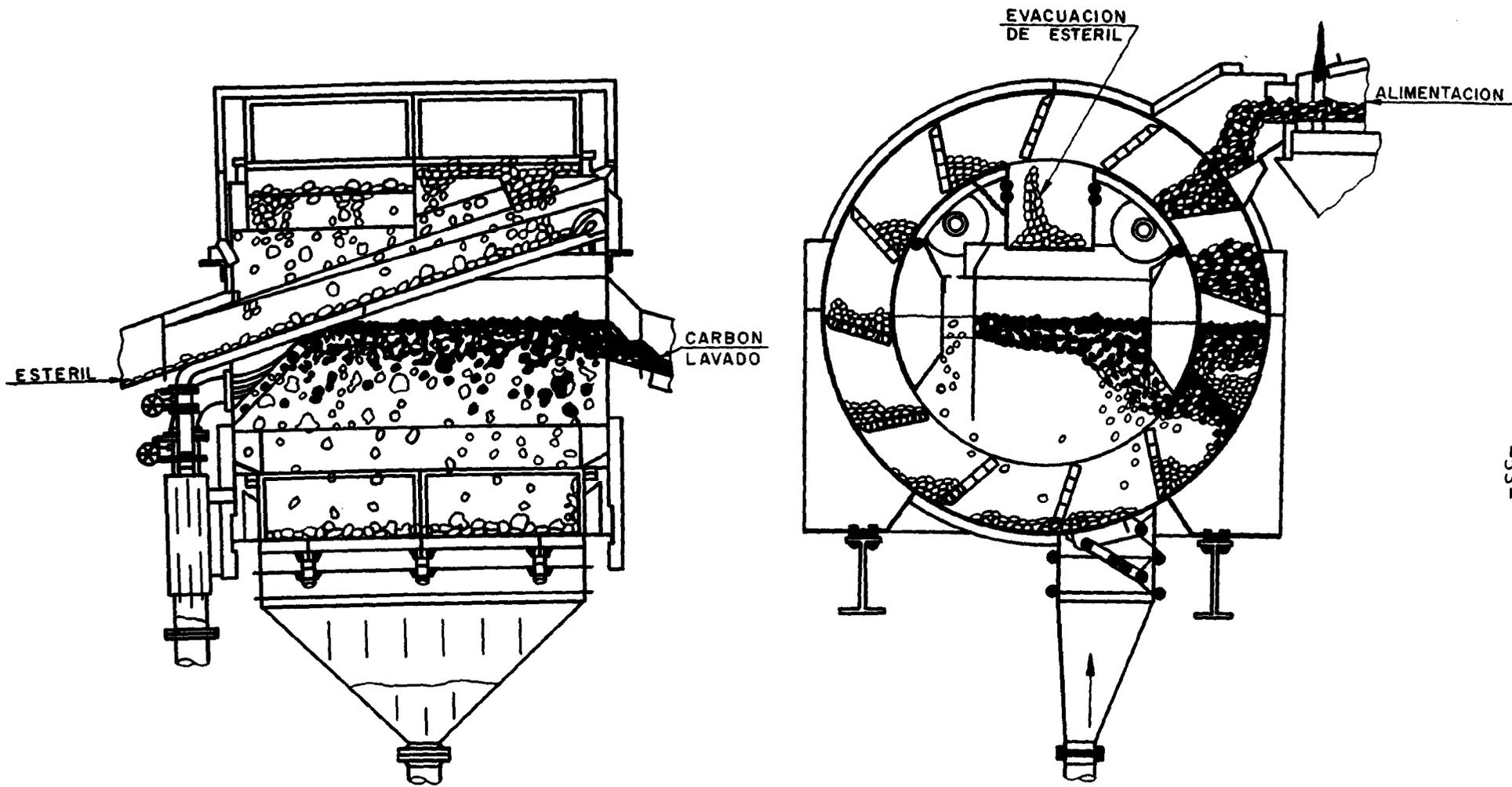
carbón lavado del baño, las cuales disminuyen no tablemente la cantidad de medio que necesita ser recirculada.

- . Lavadores tipo-tambor. El principio de separación por tambor permite tratar granulometrías muy gruesas. Se aplican los procedimientos NELDCO, WEMCO y Teska.

Tambor NELDCO. El separador consiste esencialmente en un tanque en cuyo interior existe una rueda con paletas que permite el descenso de la alimentación y eleva el estéril (Fig. 6). El rotor tiene un diámetro de unos 3 m. El carbón lavado flota y se descarga por rebose junto con parte del medio denso. El ancho del tambor depende de la capacidad que se precise, los normales son de 1,80 m y tienen una capacidad de 250 t/h. Con tanques de 3m se pueden tratar tonelajes de 500 t/h.

Tambor WEMCO Está constituido por un tambor rotativo llenado al 30% de su volumen por el líquido denso. Los elementos ligeros son evacuados por desbordamiento y los pesados se sumergen en el fondo del tambor, de donde son evacuados por paletas de elevación solidarias al rotor. En la Fig. 7 se puede observar un tambor con dos compartimentos, los cuales se han llenado con medios densos de diferente peso específico. De este modo, se pueden conseguir tres productos: estéril mixtos y carbón lavado. Las dimensiones de los tambores varían de 1,2 a 4,5 m de diámetro, y de 1,2 a 7,0 m de longitud. Los más grandes pueden tratar hasta 900 t/h.

Tambor Teska. Tiene un fundamento análogo a los anteriores. El giro es bastante lento, y dispo-

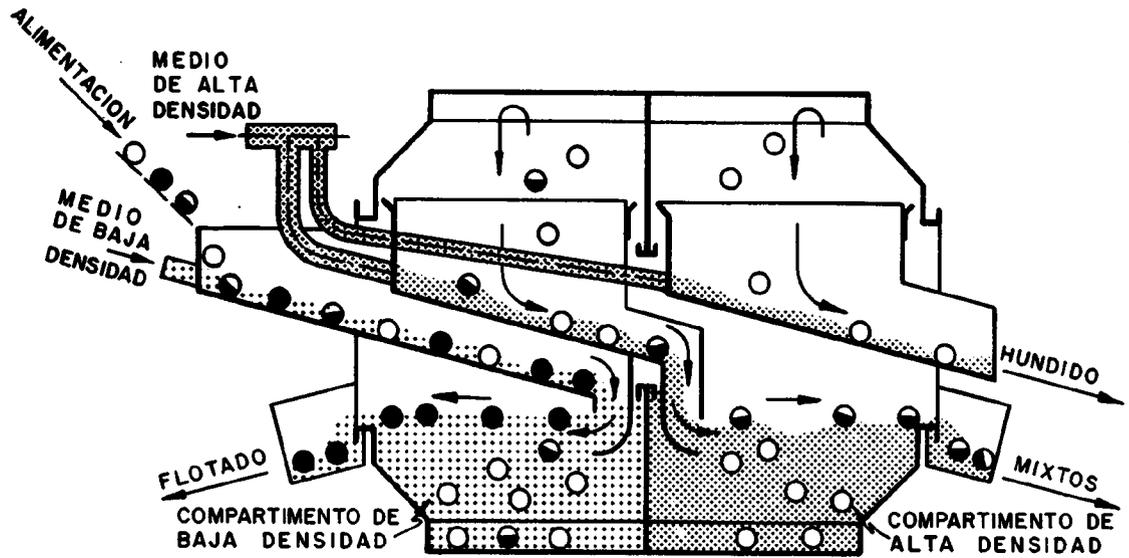


SECCION LONGITUDINAL

SECCION TRANSVERSAL

T A M B O R N E L D C O

FIGURA 6



LEYENDA

- FLOTADO
- ◐ MIXTOS
- HUNDIDO
- ▤ MEDIO DE BAJA DENSIDAD
- ▥ MEDIO DE ALTA DENSIDAD

T A M B O R W E M C O

FIGURA 7.

nen de un amplio canal de rebose del carbón lavado, lo que les dota de elevada capacidad. Para mantener el medio en un estado homogéneo, disponen de unas válvulas periféricas que originan unas corrientes controladas.

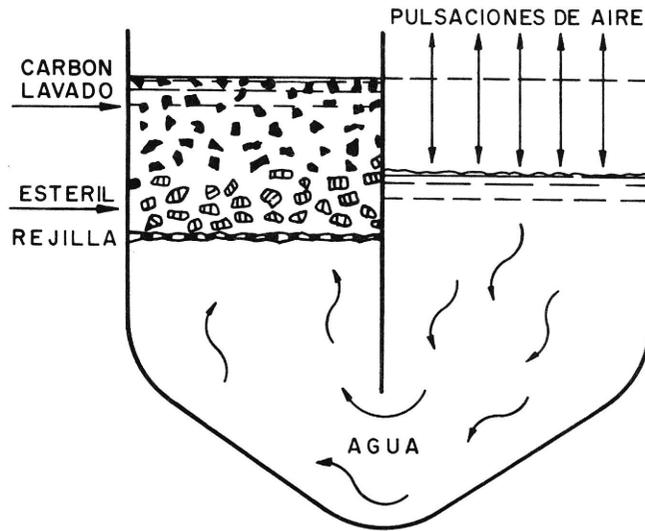
La aplicación de los medios densos al lavado de escombreras plantea, fundamentalmente, dos problemas (2):

- . Ineficiencia. Solo pueden recuperar eficientemente los trozos de carbón de gran tamaño (más de 25 mm). Las partículas más finas son eliminadas en el cribado previo al lavado. En las escombreras, lo más frecuente es que se presente más de un 65% de material menor de 25mm, lo que implica una muy baja recuperación en la cuba de medio denso.
- . Costos. En los lavados de escombreras con medios densos estáticos, el costo de recuperación de una tonelada de carbón es tal que el beneficio marginal obtenido es bastante pequeño. Esto es debido a que la capacidad de lavado de los mencionados aparatos es pequeña para tratar materiales de muy alto contenido en cenizas.

4.2.2 Jigs

El principio de separación se basa en una corriente alternativa de agua, cuya impulsión se realiza mediante un émbolo (sistema antiguo), o bien por aire comprimido (sistema moderno). Existe una gran cantidad de aparatos, cuyo fundamento es idéntico, y que únicamente se diferencian en el procedimiento para realizar las impulsiones, evacuación de productos, etc. El modelo de jig más ampliamente utilizado es el Baum, en el que la corriente de agua se origina con aire comprimido.

Un jig Baum consiste en una caja en forma de U dividida en varias secciones (Fig. 8). En la parte superior hay una chapa



J I G T I P O B A U M

FIGURA 8

perforada en la que se sitúa la alimentación. Las corrientes de agua atraviesan estos orificios y originan la separación de las partículas. Las más pesadas quedan en la parte baja del lecho, atraviesan los orificios y caen al fondo de donde son evacuadas por un tornillo sinfin que las deposita en un elevador de cangilones. Las ligeras de carbón se extraen por reboso.

Mediante un dispositivo de válvulas se hace que, durante un tiempo, el aire haga circular al agua ascendentemente, con lo que el lecho es removido (impulsión), a continuación, la válvula cambia de posición y hace que el aire haga circular al agua hacia abajo (succión), lo que obliga a las partículas más pesadas a caer hacia el fondo.

Un jig puede estar dividido en varios compartimentos, cada uno de los cuales funciona como un jig individual, con el fin de obtener productos de diferentes calidades.

La abertura de los huecos de la chapa perforada suele ser de unos 6,5 mm, aunque se han llegado a utilizar hasta de 32 mm. Esta abertura puede ser un medio de modificar la intensidad de succión, o de control de la granulometría.

De los diferentes dispositivos necesarios en la instalación de un jig Baum, se pueden destacar los siguientes:

- . Bomba de agua. Ha de tener una capacidad superior a la necesaria para poder atender a cualquier imprevisto que se presente. Está conectada con el sistema de recirculación de agua, en el cual se ha de controlar minuciosamente el contenido de partículas sólidas, que no debe sobrepasar el 16% en peso. Se ha comprobado que con agua limpia se obtienen los resultados más eficientes en el tratamiento de finos.

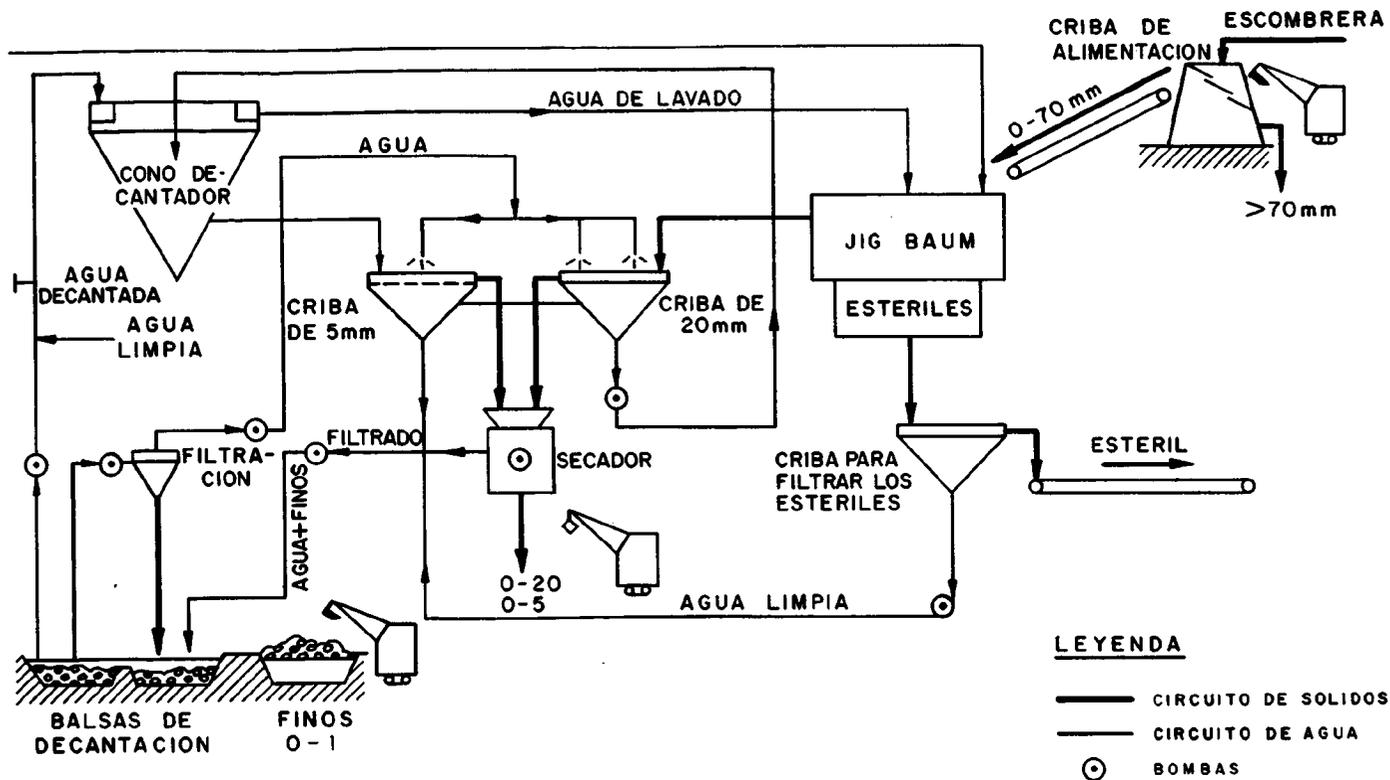
- . Tanque de gravedad. Para realizar un buen lavado con un jig se precisa una presión de agua uniforme, sin embargo, las bombas no la dan. Esto se soluciona instalando entre la bomba y el jig un tanque desde el cual sale el agua necesaria para el lavado
- . Válvulas de control. Además de las válvulas que regulan las corrientes de agua en el jig, se necesitan otras dos. Una que puede ser abierta o cerrada cuando el jig se pone en marcha o se detiene, y otra para regular el caudal de la bomba según las necesidades del tanque.
- . Compresor. La presión del aire no suele exceder de los 21 KN/m^2 . Tiene que tener un sistema de válvulas que permita disponer en cada momento del caudal y presión necesarios.

Un jig moderno, adecuadamente diseñado para obtener un producto de una calidad deseada, es tremendamente automático y funciona eficientemente aún con variaciones significativas en el tonelaje o en las características de la alimentación.

Para el lavado de gruesos, los jigs se suelen aplicar a granulometrías comprendidas entre 200 y 13 mm. Para tamaños inferiores se emplean jigs de lecho filtrante, como se verá más adelante.

En lo que se refiere a capacidades, oscilan entre 25 y 700 t/h, pudiéndose doblar con algunas combinaciones especiales.

En Gran Bretaña y Bélgica, se han desarrollado unas plantas semimóviles de lavado de escombreras, que emplean jigs Baum (3). El diagrama de flujo es muy sencillo (Fig. 9). Consiste básicamente en un cribado de los materiales de la escombrera con



INSTALACION DE LAVADO DE ESCOMBRERAS DE CARBON
CON JIGS BAUM

FIGURA 9

una malla de 70mm, los tamaños superiores se eliminan, lavándose los menores de 70mm en un jig Baum convencional. La capacidad de la instalación es de 100 a 150 t/h de "todo-uno".

4.3. RELAVADO DE FINOS

Los principales dispositivos para el relavado de finos son: - ciclones de medios densos, hidrociclones, mesas de sacudidas, rheolavadores, espirales Humphrey, jigs de lecho filtrante y flotación.

4.3.1. Ciclones de medios densos

El principio que rige la separación entre partículas ligeras y pesadas es el mismo que en los medios densos estáticos. La diferencia fundamental estriba en que la fuerza de gravedad es reemplazada por la fuerza centrífuga.

$$F_c = (M_p - M_f) \frac{V^2}{r}$$

donde,

F_c es la fuerza centrífuga

V es la velocidad tangencial

r es el radio del ciclón

M_p es la masa de la partícula

M_f es la masa del fluido desplazado por la partícula

Además, la velocidad se incrementa a medida que se desciende en el ciclón, de forma que en el ápex la fuerza centrífuga es unas 200 veces superior a la de la gravedad. Por lo tanto,

las fuerzas que tienden a separar las partículas de carbón de las de estéril, son mucho más fuertes en un ciclón que en un sistema estático.

Esto tiene dos ventajas fundamentales: primero, la gran capacidad de estos ciclones y, segundo, la posibilidad de lavar partículas finas.

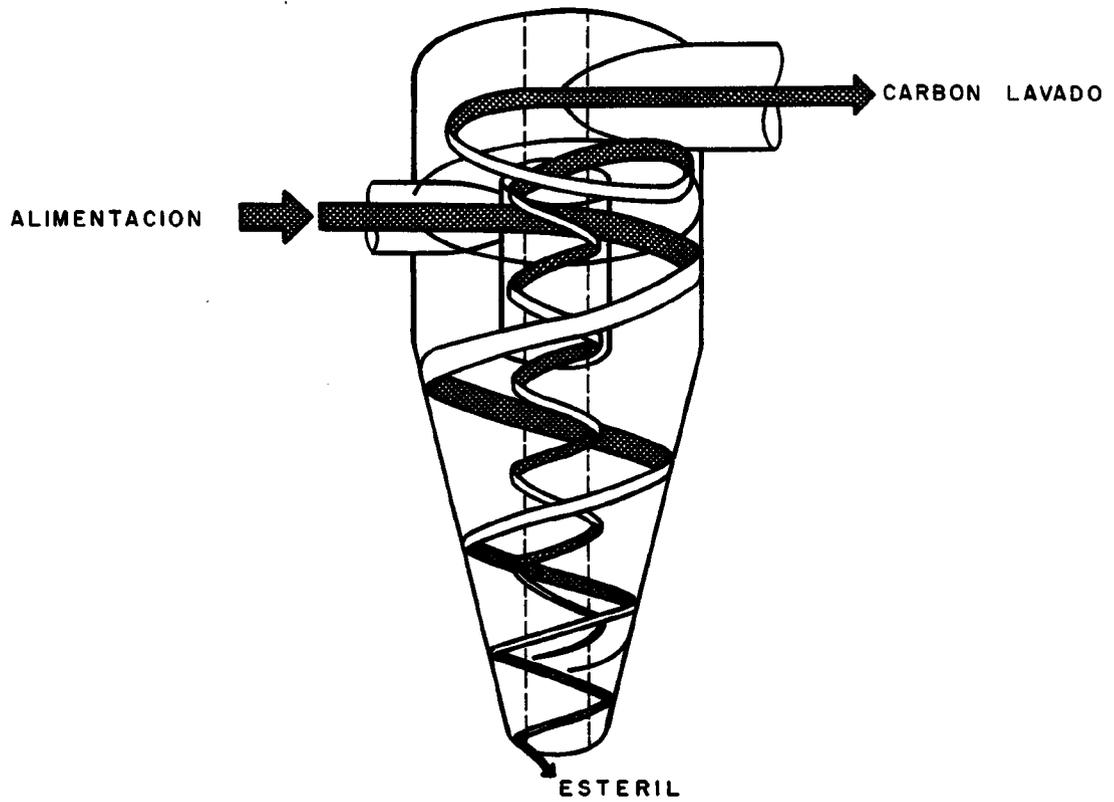
Además de las fuerzas, es importante considerar los movimientos que se originan en el ciclón. Estos consisten en un vórtice descendente que facilita el hundimiento de las partículas pesadas, y otro ascendente por el centro del ciclón que eleva las partículas de carbón hasta el punto de salida (Fig. 10).

Otro factor adicional que influye en la separación es el progresivo incremento del peso específico del medio a medida que se desciende hacia el ápex.

En cuanto a los productos utilizables para la preparación del medio denso, únicamente la magnetita se ha empleado de una forma generalizada. Uno de los factores que más influencia ejerce sobre la eficacia de la separación es el tamaño de las partículas de magnetita. El tamaño más adecuado es aquel en el que el 90% de las partículas son menores de 325 mallas, siendo esencial que esta granulometría sea mantenida.

En los medios densos estáticos, la contaminación del medio (incremento de la viscosidad como consecuencia de la presencia de finos) limita rápidamente la eficiencia del tratamiento. En los ciclones, sin embargo, la viscosidad del medio tiene una importancia menor al ser disminuida por la aparición de fuerzas de cizallamiento. Los ciclones de medios densos son bastante insensibles a la viscosidad.

El campo de aplicación de los ciclones de medios densos está comprendido entre 30 y 0,5 mm. En este rango de tamaños, estos ciclones efectúan un lavado más eficiente que el resto de los



ESQUEMA IDEALIZADO DE LAS
TRAYECTORIAS EN UN CICLON

FIGURA 10

sistemas de tratamiento de finos.

Las capacidades de las plantas de ciclones de medios densos - oscilan entre 50 y 1300 t/h. Un esquema de instalación típico consta de: cubas de deslamado (se eliminan las partículas inferiores a 0.5 mm), depósito para alimentar el ciclón, bomba, ciclón de medios densos, cribas de lavado y drenaje del carbón y estériles, secador centrífugo del carbón lavado, sistema de recuperación de la magnetita y sistema de control del peso específico.

Los conos se suelen fabricar con diámetros de 0.5 a 0.6 m. y dan unas producciones de 50 y 75 t/h respectivamente. El ángulo del cono puede ser de 20° , la presión de alimentación de 69 a 96 KN/m^2 , y se instalan inclinados para facilitar el drenaje y la alimentación.

Además de los ciclones convencionales, existen otros de forma tubular. De ellos, los más importantes son el Turpinson y el DWP (Dina Whirpool). En el DWP el cilindro es recorrido por una corriente de medio denso introducida tangencialmente por la extremidad inferior bajo una presión del orden de $96,6 \text{ KN/m}^2$. La alimentación se realiza axialmente por la extremidad opuesta y se mezcla con la corriente del medio que se remonta en el cilindro. Las partículas más pesadas son centrifugadas y rechazadas a lo largo de la pared del tubo para ser evacuadas tangencialmente. El carbón flota sobre la superficie del torbellino y se evacua axialmente por la base del aparato. En los aparatos más grandes se pueden lavar hasta 150 t/h.

La principal ventaja de los ciclones de medios densos es su alta eficiencia para el lavado de carbones de granulometría comprendida entre 0,5 y 30 mm. En cuanto a desventajas, se pueden citar: elevados costos de instalación inicial, no recuperación de menores de 0,5 mm, costos constantes de magnetita y elevados costos de mantenimiento.

4.3.2 Hidrociclones

Externamente, un hidrociclón se puede diferenciar de un ciclón de medios densos por la mayor anchura de la parte inferior, así como por un mayor ángulo (unos 120°).

En su funcionamiento, cabe destacar dos acciones: por un lado, la producida por la suspensión de las partículas más pesadas, que impide que los granos de carbón puedan caer, y, atrapados por el vórtice ascendente, se elevan hasta ser evacuados; y, por otro, la acción de las fuerzas centrífugas. En lo que se refiere a estas segundas, la aceleración de una partícula que entra en el ciclón viene dada por:

$$a = \frac{(M_p - M_f)}{M_p} \frac{V^2}{r}$$

donde,

a es la aceleración de la partícula

M_p es la masa de la partícula

M_f es la masa del fluido desplazado por la partícula

V es la velocidad tangencial

r es el radio del ciclón

Para partículas que se encuentran en una misma posición en el ciclón, la relación anterior se puede expresar de la siguiente forma simplificada:

$$a = C \left(1 - \frac{1}{SG} \right)$$

donde,

C es una constante que es igual para todas las partículas

SG es el peso específico de la partícula

Si se considera una partícula de roca de peso específico 2,4 gr/cm³ y otra de carbón de peso específico 1,3 gr/cm³ se ve fácilmente que la partícula de roca tiene una aceleración inicial 2,5 veces superior a la de carbón. Por lo tanto, la partícula de roca presentará una mayor tendencia a desplazarse según el vórtice descendente y ser arrastrada hasta el fondo del ciclón, de donde se evacua por la boquilla inferior de descarga. Por contra, la partícula ligera de carbón, es arrastrada por el vórtice ascendente, constituyendo el rebose que se extrae por el diafragma.

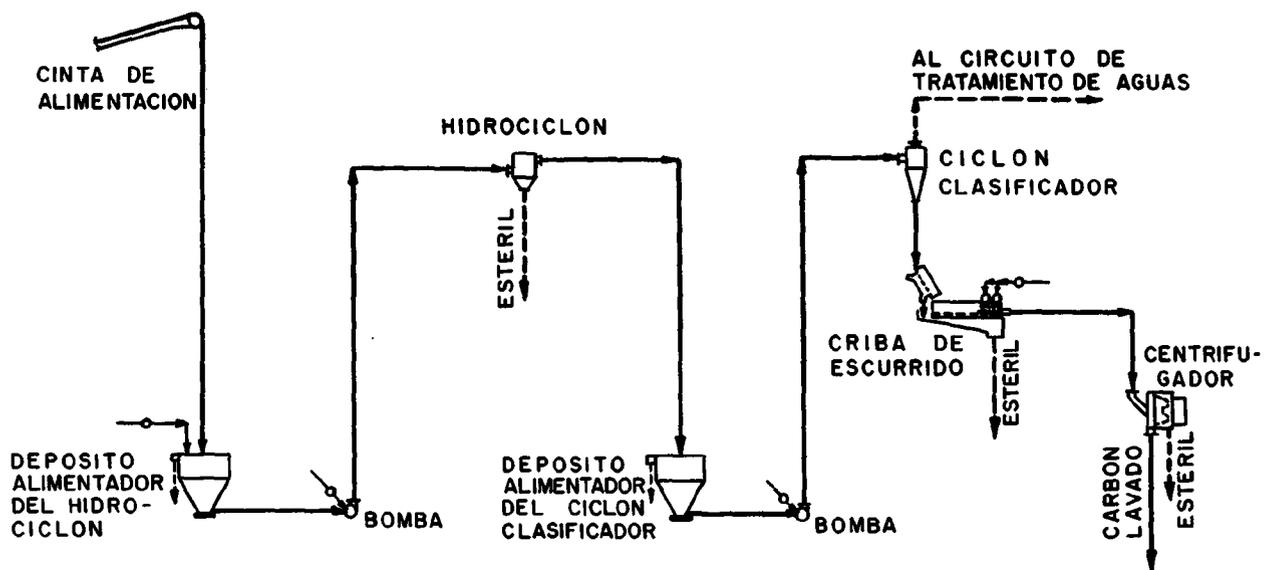
El peso específico de separación de un hidrociclón y, por tanto, el contenido en cenizas del carbón lavado, se puede variar regulando las dimensiones del orificio de descarga.

Los diagramas de flujo de las instalaciones de hidrociclones son semejantes a los de otros procesos hidráulicos de lavado de carbón. La única diferencia significativa es que son posibles tratamientos en una o en dos etapas.

Instalaciones de una etapa. (10)

Un esquema típico de tratamiento en una etapa (Fig. 11), consta de : depósito de alimentación del hidrociclón y bomba, hidrociclones, depósito de alimentación del ciclón clasificador y bomba, ciclones clasificadores, criba de escurrido y secador centrífugo.

Este tipo de planta tiene las siguientes ventajas:



LEYENDA

- CARBON
- - - ESTERIL
- ○ AGUA LIMPIA
- - - EFLUENTES

DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA INSTALACION
DE HIDROCICLONES DE UNA ETAPA

FIGURA 11

- . Puede tratar cualquier rango de tamaños inferior a 32 mm.
- . Bajos costos de capital
- . Bajos costos de operación
- . No implica costos por consumo de medios densos.

Las desventajas son:

- . Baja eficiencia de lavado
- . Necesidad de grandes cantidades de agua.

Instalaciones de dos etapas. (10)

Un esquema típico de tratamiento en dos etapas (Fig 12) consta de: depósito de alimentación de los hidrociclones primarios y bomba, hidrociclones primarios, depósito de alimentación de los hidrociclones secundarios y bomba, hidrociclones secundarios, depósito de alimentación de los ciclones de clasificación y bomba, ciclones clasificadores, criba de escurrido y secador centrífugo.

Las ventajas y desventajas de este sistema son aproximadamente las mismas que en el caso de una etapa, con la excepción de que se incrementa la eficiencia del lavado debido a que en la segunda etapa se recupera el carbón que en el otro caso podría pasar al estéril. El lavado en dos etapas es especialmente recomendable cuando se alimenta con una porción importante de carbón menor de 6-9 mm.

En cuanto a costo por tonelada/hora de carbón lavado, se incrementa aproximadamente en un 13% al pasar de una a dos etapas.

El lavado con hidrociclones es el sistema de tratamiento que

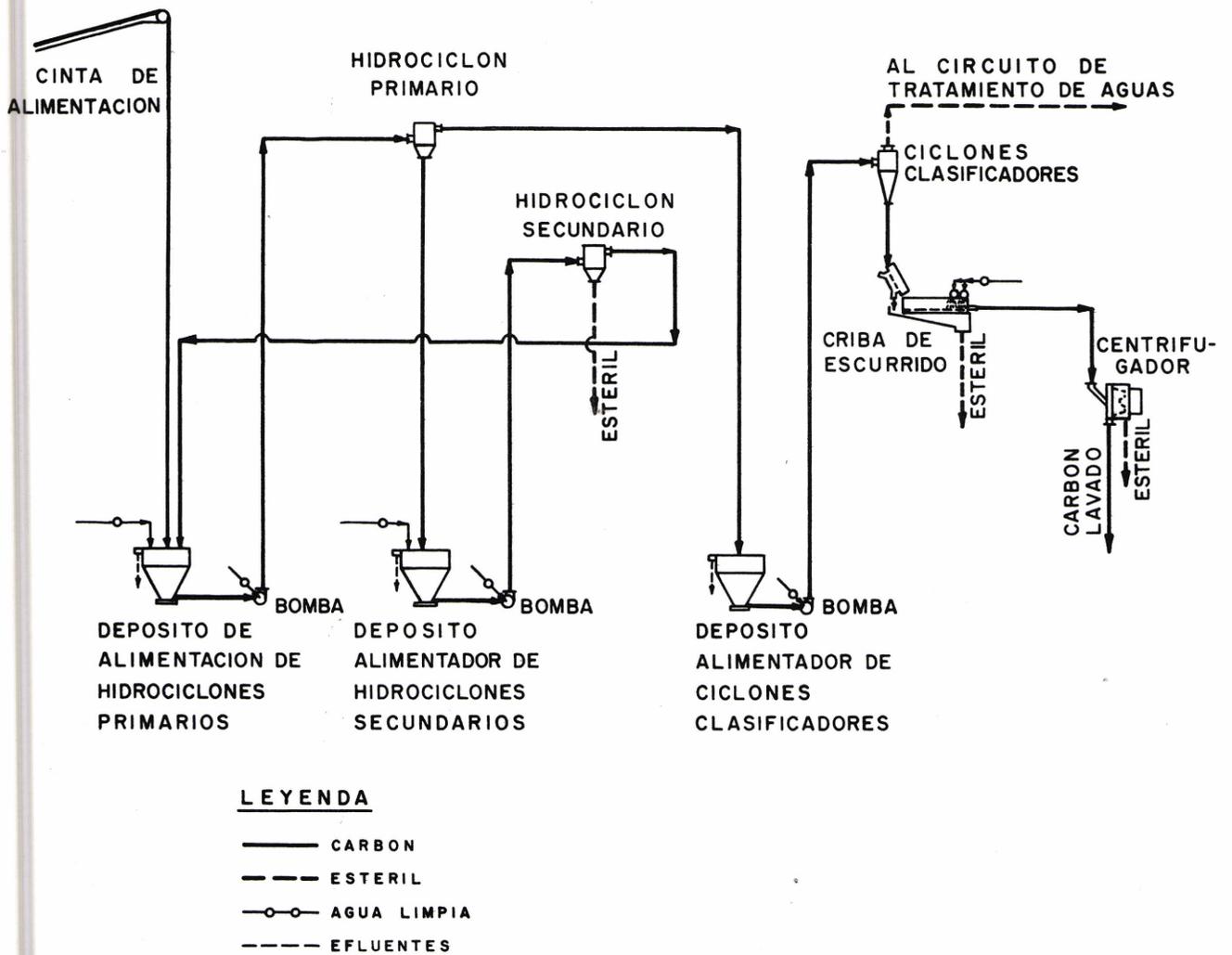


DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA INSTALACION
DE HIDROCICLONES DE DOS ETAPAS

FIGURA 12

parece tener mayores posibilidades para el relavado de escombreras. Se ha demostrado (13) que es posible recuperar hasta el 90% del carbón presente, abarcando toda la granulometría comprendida entre 32 y 0,5 mm. Además, hay que destacar la eficiencia de los hidrociclones para la eliminación del azufre.

Se ha podido comprobar que un carbón que, con sistemas de lavado convencionales, daba un 4% de azufre, lavándolo con hidrociclones solamente se obtenía un 1%.

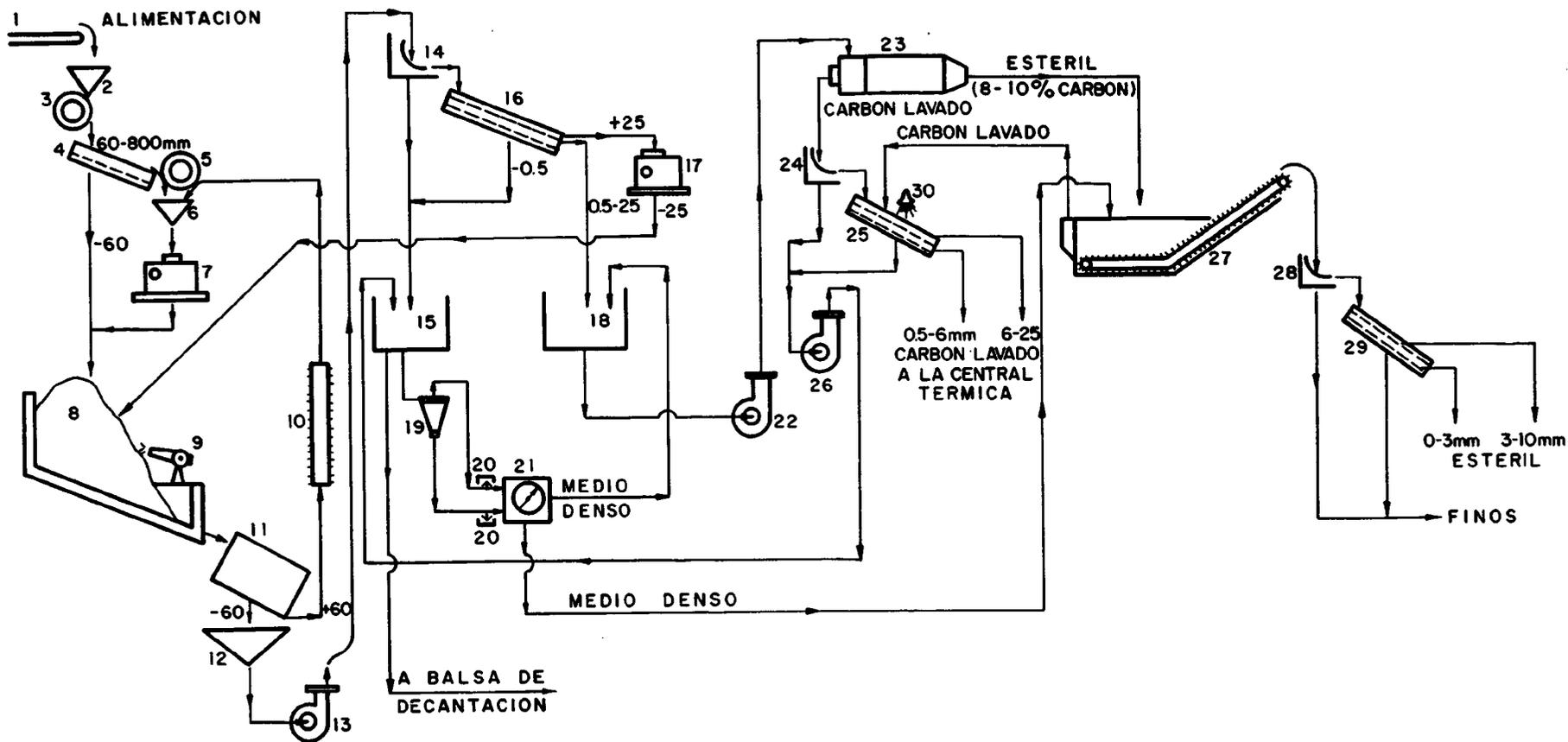
El sistema de lavado con hidrociclones que más éxito ha tenido es el Haldex (Simdex), que se pasa a describir a continuación.

Sistema Haldex (Simdex)

Este procedimiento de lavado surge en los años 60 como resultado de las investigaciones llevadas a cabo en Hungría y Polonia. Hoy día es considerado como el método más adecuado para el relavado de escombreras de carbón.

El sistema Haldex es una modificación de los procedimientos que utilizan medios densos. Para el lavado emplea unos ciclones horizontales especialmente diseñados, y como medio denso se utiliza una suspensión de partículas estériles menores de 32 mallas.

Cuando se introduce el material de la escombrera en la planta, lo primero que se hace es eliminar los trozos metálicos mediante procedimientos electromagnéticos o estriados manuales. A continuación el material es triturado, pasa a un tanque donde se mezcla con un lodo formado con partículas estériles menores de 32 mallas reprocesadas de los circuitos generales, así como con el agua que se precise para diluir hasta conseguir la densidad adecuada, lo cual se realiza mediante controles automáticos. Desde el tanque se bombea la mezcla hasta los hidrociclones, donde se obtiene un producto lavado con un contenido en carbón del 92 al 98%. El carbón lavado se clasifica en



1 CINTA ALIMENTACION
 2 TOLVA ALIMENTACION
 3 CILINDRO MAGNETICO
 4 CRIBA VIBRATORIA
 5 CILINDRO MAGNETICO
 6 TOLVA
 7 MOLINO DE IMPACTOS
 8 PILA DE MATERIAL

9 MONITOR
 10 SCRAPER
 11 TROMMEL
 12 TOLVA
 13 BOMBA
 14 TAMIZ CURVO
 15 TANQUE DE LODOS
 16 CRIBA VIBRATORIA

17 MOLINO DE IMPACTOS
 18 TANQUE DE LODOS
 19 CICLON CLASIFICADOR
 20 REGISTRO DE DENSIDAD
 21 CONTROL AUTOMATICO DE DENSIDAD
 22 BOMBA
 23 CICLON HALDEX
 24 TAMIZ CURVO

25 CRIBA VIBRATORIA
 26 BOMBA
 27 CELDA DE MEDIOS DENSOS
 28 TAMIZ CURVO
 29 CRIBA VIBRATORIA
 30 RIEGO DE AGUA

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA HALDEX / SIMDEX
 "TATABANYA", HUNGRIA

FIGURA 13

dos grupos de tamaños mediante cribas vibratorias en las que se elimina buena parte del agua que lleva. El estéril obtenido de los hidrociclones se clasifica según la utilidad que se le vaya a dar.

En la Fig. 13 se presenta el diagrama de flujo de una planta Haldex instalada en Tatabanya, Hungría (11).

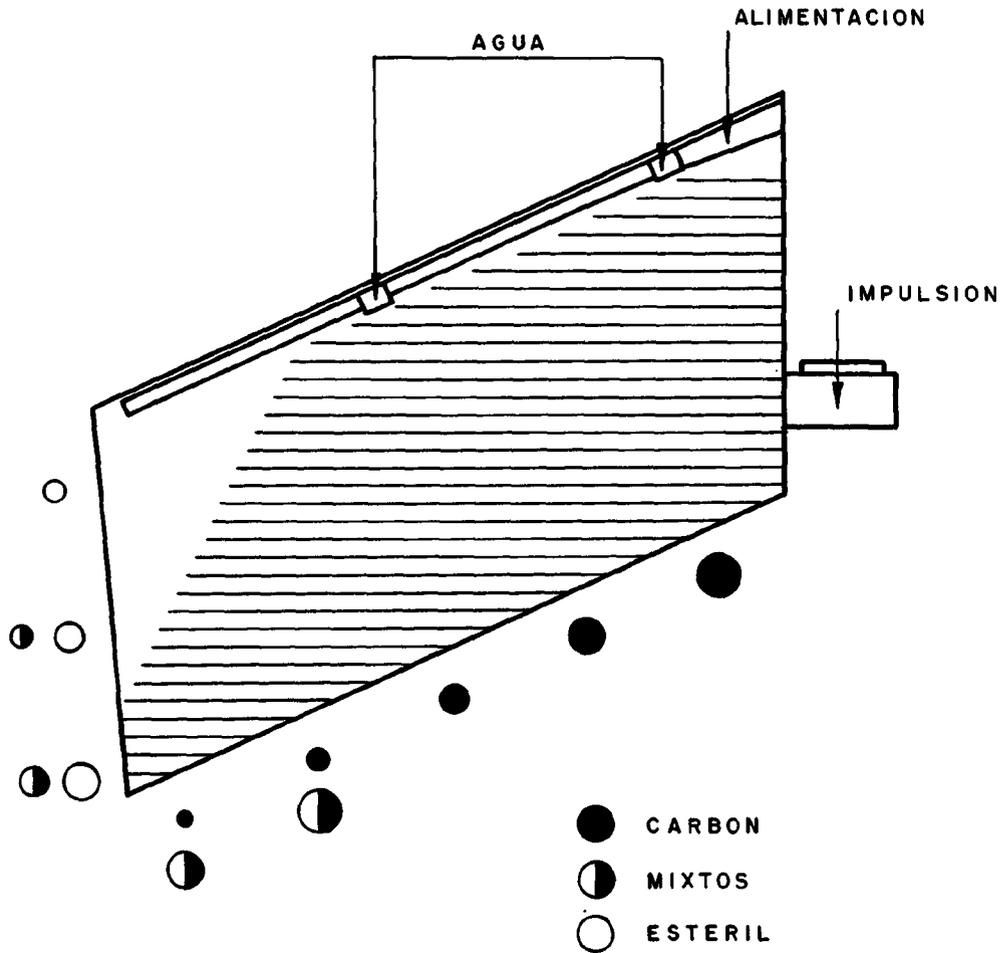
4.3.3 Mesas de sacudidas

Son aparatos constituidos por una superficie plana ligeramente inclinada con relación a la horizontal, provista de estrías.

Un mecanismo imprime sacudidas asimétricas y longitudinales.

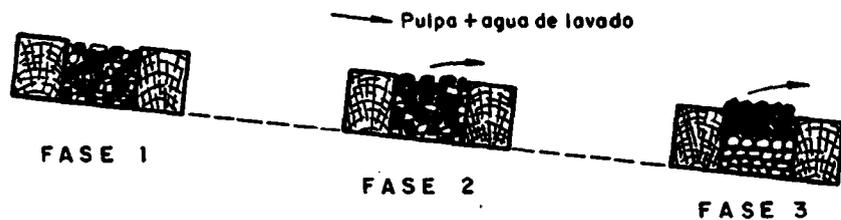
La mesa es alimentada (Fig. 14), en su parte superior, por una tolva o caja de alimentación. El agua de lavado se distribuye sobre toda su longitud, proporcionando una capa o película que desliza según la pendiente de la mesa. Las estrías forman unos topes para los granos pesados, mientras que los granos ligeros de carbón tienden a saltar sobre ellas. Los granos pesados (ganga) dispuestos entre los canales avanzan lateralmente como consecuencia de las sacudidas asimétricas imprimidas a la mesa. Así pues, se originan varias zonas (Fig. 14):

- . Zona de estériles, donde se encuentran las partículas finas densas.
- . Zona de estériles y mixtos, donde se encuentran las partículas gruesas densas y algunas mixtas finas.
- . Zona de mixtos y concentrado, donde aparecen mezcladas partículas mixtas gruesas y partículas de carbón finas.
- . Zona de concentrados, que contiene las partículas



DISTRIBUCION DE PRODUCTOS EN LA MESA
POR TAMAÑOS Y PESO ESPECIFICO

FIGURA 14



ESTRATIFICACION PROGRESIVA ENTRE LAS BARRAS
DEBIDO A LA CAPA FLUENTE Y A LAS SACÚDIDAS

FIGURA 15

de carbón más gruesas.

En el proceso de concentración, influyen tanto el peso específico, como el tamaño de los granos. En efecto, cuando el "todo-uno", entra en la zona comprendida entre dos estrías, se produce una estratificación de los granos por la acción conjunta de:

- . La sacudida, que provoca un esponjamiento de la capa de granos, y el descenso de los granos densos hasta la superficie de la mesa, disponiéndose los más finos en el fondo.
- . el agua de lavado, que arrastra los granos ligeros de carbón que forman la capa superior de los granos depositados.

En la figura 15 se pueden apreciar las etapas correspondientes a la resultante de las acciones precedentes.

Las sacudidas tienen un papel doble: permiten de una parte la estratificación y, de otra, la evacuación de las partículas es tratificadas entre las estrías.

La granulometría juega un papel fundamental en el lavado de carbones en mesas de sacudidas.

Cuanto mayor sea el número de tamaños, tanto más difícil resulta la separación. Sin embargo, es necesaria una cierta varie dad de tamaños, que asegure la movilidad de la pulpa para per mitir su correcta estratificación. Una alimentación normal es aquella cuya granulometría es menor de 9,5 mm, pero cuando se utiliza una flotación complementaria, se suelen eliminar previa mente los menores de 48-100 mallas. Cuando se lava carbón me diante mesas de sacudidas, hay que destacar la importancia de mantener unas condiciones de trabajo adecuadas. Una de las características típicas de las mesas es que dan unos excelen-

tes resultados cuando se mantienen unas correctas condiciones de operación, pero si se somete la mesa a frecuentes correcciones, los resultados dejan mucho que desear.

Veamos algunos de los factores que influyen en la marcha de una mesa:

- . Caudales de alimentación y de agua uniformes. - En efecto, si se ha conseguido determinar el caudal de alimentación para el cual el lavado es óptimo, todo incremento se traducirá en una mayor presencia de partículas de ganga en el carbón lavado. Si se disminuye la alimentación, lo que ocurrirá es que un mayor porcentaje de partículas de carbón pasará a la ganga. En cuanto al agua, se debe ajustar el caudal de forma que no se produzcan corrientes fuertes que destruyan la estratificación, ni se formen zonas secas que disminuyan la eficiencia de la separación. Las relaciones agua/sólido (dilución) normalmente utilizadas en las mesas son de 2/1. Alrededor del 90% del agua alimentada se recupera por la parte de la mesa por donde se obtiene el carbón lavado.

- . Estriado, velocidad y amplitud de las sacudidas y pendiente.- Se han ensayado numerosas distribuciones de las estrías de las mesas, sin embargo, hoy día hay una pequeña serie de tipos estandarizados que se adaptan a las necesidades que se presentan. La mayor parte de las mesas en funcionamiento disponen de estrías de caucho cementadas a una superficie también de caucho. El consumo de estrías y cubiertas de la superficie es un apartado importante a la hora de establecer costos. La velocidad de sacudida suele estar comprendida entre 250 y 300 sacudidas por minuto, mientras que la ampli-

tud es de unos 20 mm. La velocidad y la amplitud son dos variables interdependientes. Si se incrementa la amplitud hay que disminuir la velocidad y viceversa. La amplitud y la velocidad deben ser reguladas hasta obtener un movimiento uniforme de la pulpa, así como una movilidad adecuada. La pendiente deberá ser lo menor posible, siempre que permita una buena distribución de los materiales en la mesa. Puede ser necesario un incremento de pendiente cuando la capa de pulpa es gruesa, o cuando el agua disponible es escasa.

- . Tonelaje y granulometría de la alimentación.- El tonelaje que puede tratar una mesa depende en gran medida de las características de lavabilidad y de la distribución granulométrica del carbón. Las mesas actuales, alimentadas con tamaños menores de 3 mm, pueden tratar unas 7.5 t/h.

Las mesas de sacudidas suelen estar integradas dentro de procesos globales de lavado de carbón. Un diagrama de flujo típico de un proceso de este tipo se puede observar en la Fig. 16, en el cual la mesa se alimenta con las partículas gruesas que salen de un ciclón clasificador.

4.3.4 Rheolavadores

En estos aparatos, la clasificación se realiza por aluvionamiento. El bruto llega por un extremo de un canal arrastrado por una corriente de agua. A intervalos regulares y sobre el fondo del mismo están situados los rheolavadores propiamente dichos, que evacúan los estériles. El carbón limpio sale por el extremo opuesto (Fig. 17). En los orificios de salida de los productos más pesados, se inyecta agua para favorecer la clasificación.

El canal se compone de varios tramos de pendiente decreciente,

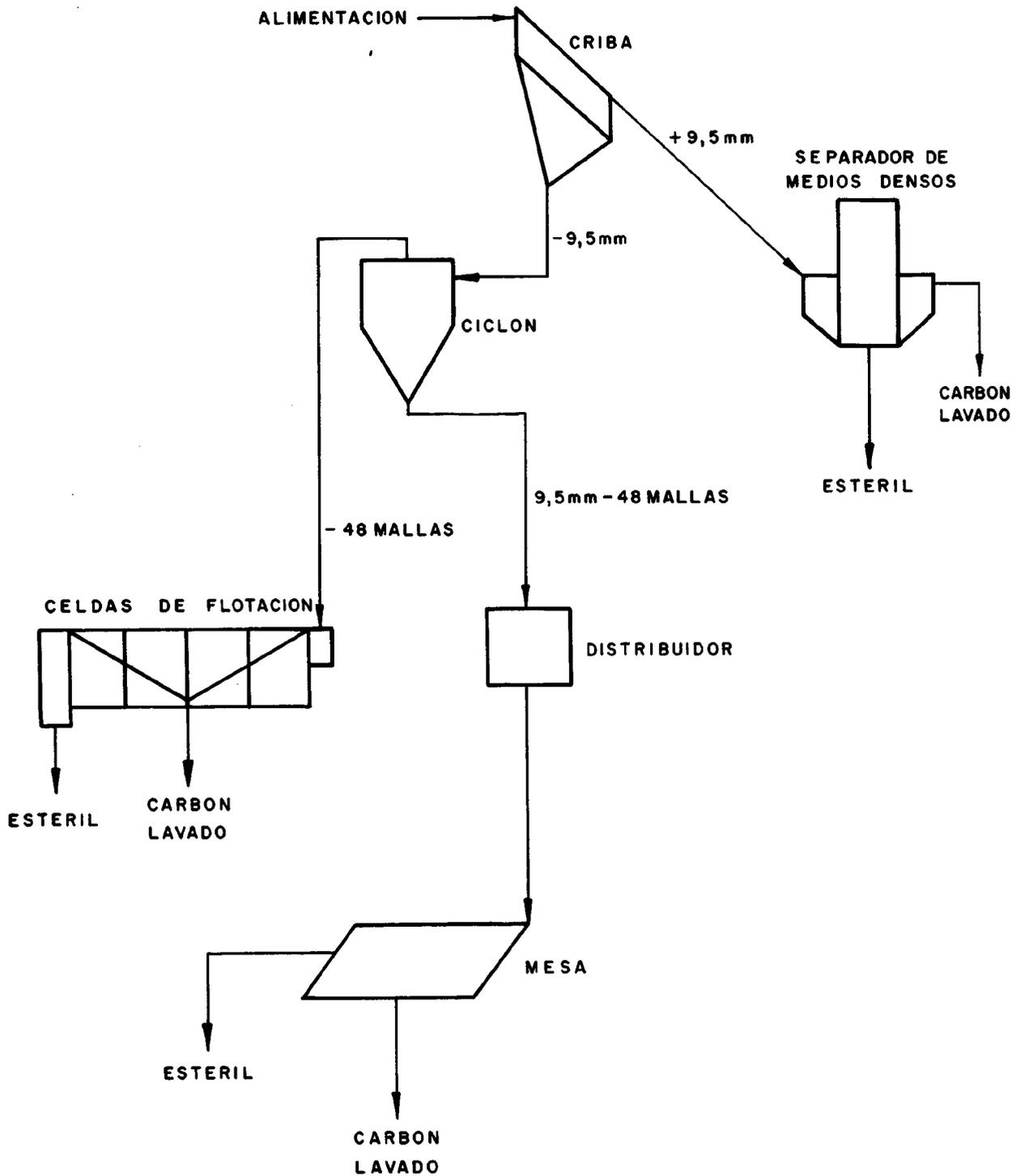
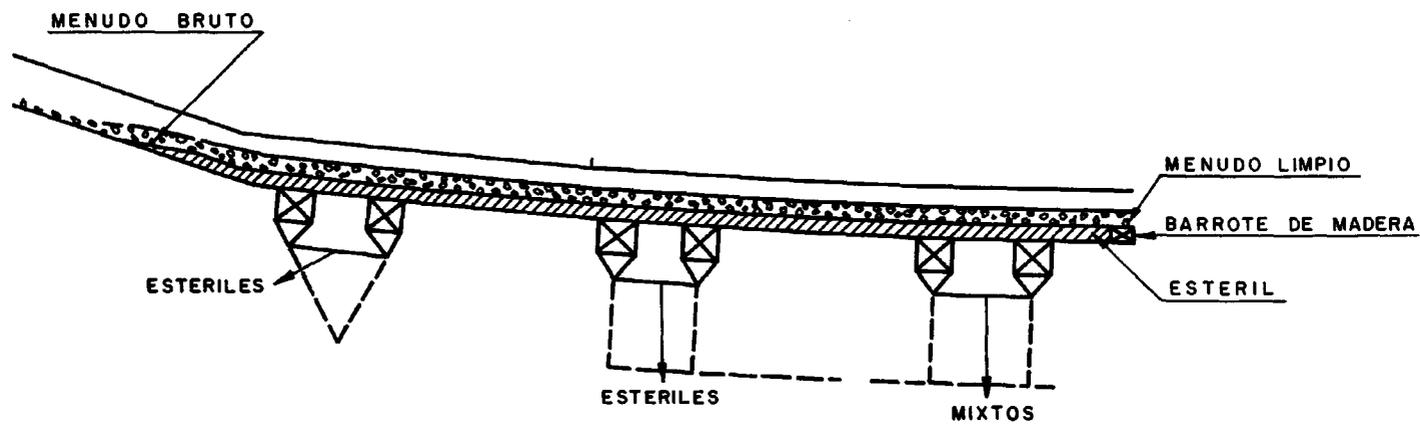


DIAGRAMA DE FLUJO

FUENTE : U.S. BUREAU OF MINES

FIGURA 16



INSTALACION DE RHEOLAVADORES

FIGURA 17

el más inclinado en cabeza, quedando casi horizontal el tramo final.

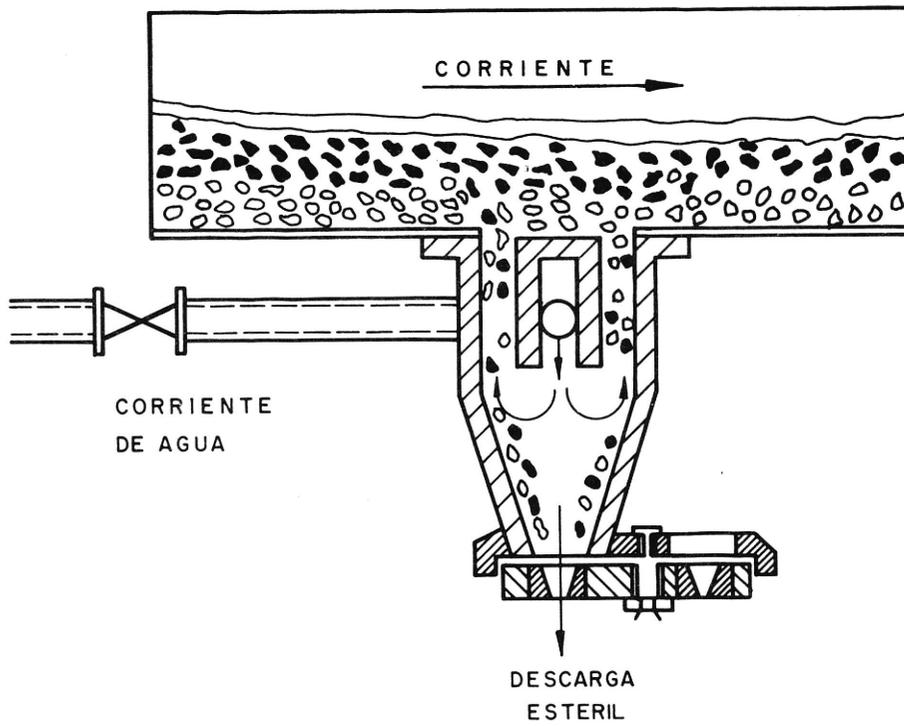
Entre los tipos utilizados conviene distinguir entre los de corriente ascendente y los de caída libre. Los primeros se instalan en el primer tramo, donde se elimina la pizarra de mayor tamaño, y los segundos, en los tramos finales, por donde salen los estériles más finos.

Como se ve en la Fig. 18, un rheolavador de contracorriente consiste en una caja situada debajo del canal, con un orificio de evacuación de su misma anchura. Se inyecta agua, que se divide en dos partes, una ascendente que favorece la estratificación y otra descendente que ayuda a la salida de los estériles. Este sistema produce, en parte, una regulación automática de la evacuación de estériles, ya que si aumenta la proporción de éstos en el lecho de lavado, la corriente ascendente, al encontrar mayor resistencia, disminuye y sale más agua por la punta, lo que facilita la salida de una mayor cantidad de estériles.

Los esquemas de instalaciones que se pueden adoptar son múltiples, las características del carbón y las circunstancias locales serán las que fijen, en definitiva, el circuito más conveniente.

En cuanto al consumo de agua, varía de unas instalaciones a otras. Por término medio se puede fijar en unos $2 \text{ m}^3/\text{h}$ por tonelada/hora de alimentación, incluyendo el agua de arrastre y las corrientes ascendentes.

El consumo de energía de una instalación de rheolavadores es análogo al de una de mesas para un tonelaje igual de carbón lavado. Sus costos de mantenimiento son los más bajos de todos los lavadores de finos. Los límites granulométricos que trata un rheolavador van de 0,5 a 10 mm. Sin embargo, los mejores resultados se logran haciendo un buen deslamado y no pa



RHEOLAVADOR DE CONTRACORRIENTE

FIGURA 18

sando de 8mm. Por otra parte, para obtener buenos resultados se precisa una alimentación regular, así como un carbón de fácil lavado. Esto hace que su aplicación al lavado de escombros, en principio, no sea muy aconsejable.

La capacidad de lavado de los rheolavadores oscila entre 100 y 150 t/h por metro de anchura del aparato.

4.3.5 Espiral Humphrey

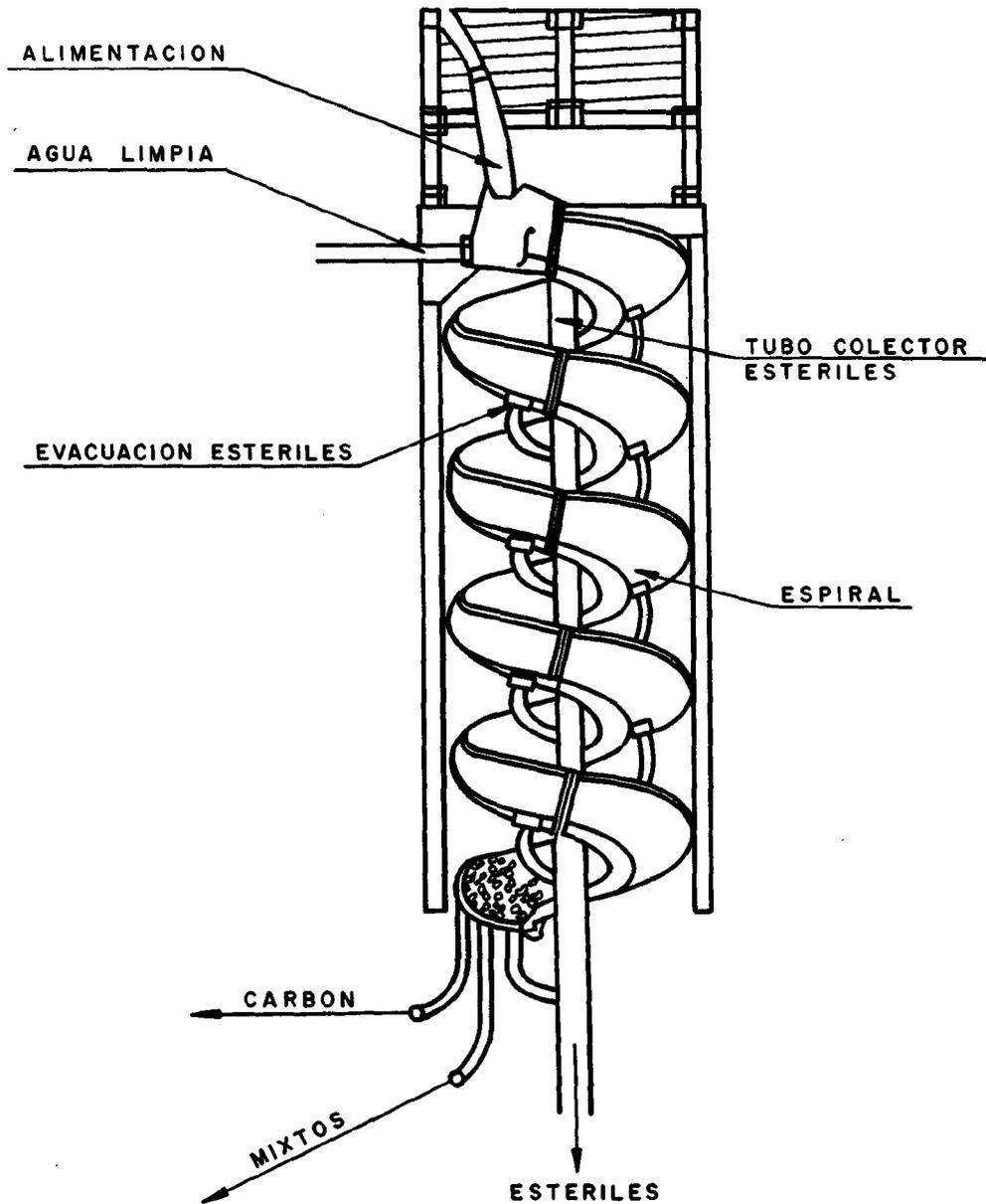
El principio en el que se basan estos aparatos es la clasificación por gravedad y fuerza centrífuga de una pulpa en una lámina de agua. Se compone de un canal helicoidal al que llega la pulpa a una velocidad de 1,5 m/s, con una concentración del 25%, desde un depósito distribuidor situado en la parte superior. La configuración de una espiral Humphrey se puede ver en la Fig. 19.

Debido a la fuerza centrífuga y a los distintos coeficientes de rozamiento del carbón y de la ganga, así como a la corriente transversal del agua, el bruto se clasifica en tres zonas concéntricas perfectamente diferenciadas: pizarras en el interior, mixtos en la zona central y carbón lavado en el exterior.

Cada 180° hay unos orificios, de unos 3 cm de diámetro, situados en la zona interna (zona de las pizarras), eliminándose a través de ellos parte del estéril. La evacuación producida por estos orificios sale por unos tubos de goma y llega a un colector vertical situado en el eje del canal.

A la salida del último elemento se tienen tres zonas, cuya delimitación se hace a voluntad mediante unas chapas. Cuanto más estrecha se deje la capa externa, se tendrá un carbón más limpio. Al final hay tres colectores para estériles, mixtos y carbón lavado.

A la vista de los resultados industriales obtenidos, es posi-



ESQUEMA DE LA ESPIRAL HUMPHREY

FIGURA 19

ble aplicar con éxito las espirales al lavado de carbones con elevada proporción de cenizas y difíciles de lavar. La granulometría óptima debe estar entre 0,1 y 2,0 mm.

Las principales características de las espirales son: simplicidad y bajo costo de lavado. Como inconvenientes hay que destacar su pequeña capacidad, lo que obliga a instalar un gran número de ellas en paralelo, y la granulometría tan estrecha con que deben ser alimentadas.

4.3.6 Jigs de lecho filtrante

Los jigs de lecho filtrante de feldespatos se emplean para lavar tamaños de grano menores de 13 mm. Son jigs del tipo Baum, en los que sobre la rejilla se dispone un lecho de partículas de feldespatos a través del cual descienden los estériles. La razón de emplear feldespatos es la gran estabilidad de estas sustancias.

Los jigs de feldespatos tienen una capacidad de 0,3 a 0,47 t/h por cada cm de ancho, dependiendo del tamaño y lavabilidad de la alimentación. Los jigs de lecho filtrante de feldespatos efectúan buenas separaciones con alimentaciones que contengan menos de un 15% de material cuya diferencia de peso específico, en gr/cm^3 , con el del lecho sea de $\pm 0,10$. Cuando el porcentaje es superior, la eficiencia disminuye.

A pesar de que no es necesario un deslamado de la alimentación, en las partículas menores de 48 mallas se obtiene una reducción muy baja de cenizas. Una de las principales características de los jigs de lecho filtrante es el poco espacio que ocupan en relación con su capacidad.

4.3.7 Flotación

La flotación es un proceso químico que depende de la adhesión selectiva al aire de algunos sólidos, mientras que, simultánea

mente, otros se adhieren al agua. La separación del carbón de la ganga se produce cuando pasa a través de la pulpa una corriente de burbujas de aire, a las cuales se adhieren las partículas de carbón que flotan hasta la superficie, de donde son evacuadas, mientras que las partículas estériles permanecen hundidas.

Para hacer posible o para facilitar el proceso, es preciso añadir una serie de agentes a la pulpa antes o durante la flotación. Las tres principales clases de agentes son: espumantes, colectores y modificadores.

La misión de los espumantes es producir burbujas estables y capaces de elevar hasta la superficie a las partículas de carbón. Como espumantes más ampliamente utilizados en el lavado del carbón, se pueden citar: amil y butil alcoholes, terpineol y cresol. El metil isobutil carbonil (MIBC) es de uso común. En la URSS se utiliza cloruro de sodio como espumante. También se utilizan ampliamente combinaciones de los espumantes anteriores con diversos hidrocarburos (keroseno, petróleo, etc.).

La función de los colectores es permitir que las partículas de carbón se adhieran a las burbujas. A la vez, el colector ha de ser selectivo hacia las partículas de carbón. Algunos espumantes, como el keroseno, el MIBC y otros aceites, hacen a la vez la función de colectores del carbón. También se puede emplear la amplia gama de colectores orgánicos utilizados en la flotación de metales, como xantatos.

En cuando a los agentes modificadores, se pueden citar los siguientes tipos: depresores, activantes, reguladores de pH, dispersantes y coloides protectores.

Los principales factores que afectan a la flotación del carbón son:

- . Tamaño de las partículas. Como regla general,

se puede admitir que es antieconómico utilizar la flotación para partículas superiores a los 0,3 mm.

- . Concentración de pulpa. Los mejores resultados se obtienen con concentraciones de pulpas bajas. El margen utilizable oscila entre el 3 y el 20%, aconsejándose utilizar una concentración del 7%.
- . Características del agua y pH. La calidad del agua debe ser considerada para una flotación eficiente. Hay que prestar especial atención a las aguas de recirculación, en especial si pueden llevar floculantes que puedan alterar la marcha de la flotación. En cuanto al pH, diferentes ensayos han demostrado que los mejores resultados se pueden obtener con pH de 6 a 7,5. Para mantener el pH bajo se puede emplear cal. Valores elevados del pH ayudan a inhibir la pirita.

Por lo que respecta a los circuitos de flotación, la mayor parte de los que se emplean son relativamente sencillos. Generalmente producen un concentrado y unos estériles primarios, sin ser necesario su relavado. La alimentación se puede hacer directamente desde las cribas clasificadoras, a través de tanques o, incluso, de hidrociclones. Los reactivos se suelen añadir en la primera celda. El número de celdas varía de cuatro a ocho para una batería, dependiendo el número total de baterías del tonelaje a lavar. Los concentrados suelen pasar por gravedad a filtros de vacío, de donde se recirculan los líquidos separados de nuevo a las celdas. Los estériles se someten a una clasificación.

Los costos de un lavado por flotación dependen grandemente de la complejidad de los circuitos. Obviamente un tratamiento que requiera procesos múltiples con largos periodos de reten-

ción y elevados consumos de reactivos, será mucho más caro que un circuito simple que requiera pocos reactivos.

4.4 CONCLUSIONES

A continuación, se presenta un cuadro en el que figuran todos los métodos de lavado analizados. De cada uno, se da el campo granulométrico habitual de aplicación, su capacidad de tratamiento y las consideraciones más importantes referentes al relavado de escombreras de carbón.

De todos los métodos vistos, cabe destacar dos para el relavado de escombreras: los jigs neumáticos y los hidrociclones. El primero podría considerarse como el idóneo para las granulometrías más gruesas, mientras que el segundo es el que se está imponiendo para el lavado de partículas menores de 30 mm.

CUADRO RESUMEN DE LOS METODOS DE LAVADO

<u>METODO</u>	<u>CAMPO GRANULOMETRI CO DE APLICACION</u>	<u>CAPACIDAD</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
Medios densos estáticos	6-150 mm	10-800 t/h	Solo tienen una eficien <u>cia</u> elevada con granos superiores a 25 mm, mien <u>tras</u> que la mayor propor <u>ción</u> de granos de carbón de la.. escombrera son in <u>feriores</u> a este tamaño.
Jigs neumáti <u>cos</u>	13-200 mm	25-700 t/h	Se han diseñado plantas móviles con jigs Baum.
Ciclones de medios densos	0,5-30 mm	50-75 t/h	Tienen una eficiencia muy elevada.
Hidrociclones	0,5-32 mm	70 t/h (Simdex)	Es el sistema con mayo <u>res</u> posibilidades para el relavado de escombre <u>ras</u> .
Mesas	0,075-9,5 mm	8 t/h	Se suelen utilizar como complemento de otros pro <u>cedimientos</u> .
Rheolavadores	0,5-10-mm	100-150 t/h/m	Su aplicación al lavado de escombreras no es muy recomendable.
Espirales Humphrey	0,1-2 mm	-	-
Flotación	<0,5 mm	-	Es un proceso caro que, en general, no parece muy justificado para el relavado de escombreras.

5. COMBUSTION DE ESCOMBRERAS DE CARBON

5.1. INTRODUCCION

Las características de los carbones que se queman eficientemente por cualquiera de los dos procedimientos convencionales de combustión (sobre parrilla y pulverizado) y la sensibilidad de ambos procedimientos a las variaciones de la calidad del combustible en la alimentación, les hace no muy adecuados para quemar escombreras de carbón.

Sim embargo, la técnica de combustión en lecho fluidizado (FBC) resulta particularmente apta para el aprovechamiento de combustibles de muy mala calidad, como son las escombreras de carbón (13).

A continuación se pasa revista a los procedimientos de combustión utilizados actualmente, haciendo hincapié en el de mayor aplicación al tema objeto de este estudio.

5.2. COMBUSTION SOBRE PARRILLA

Las parrillas primitivas estaban formadas generalmente por barras macizas de fundición con secciones trapezoidales, cuya base mayor formaba una solera fija, dejando entre ellas espacios huecos para el paso del aire de combustión. En otras ocasiones las barras eran huecas y se hacía circular por ellas aire o el agua de alimentación de la caldera para evitar la adherencia de las escorias.

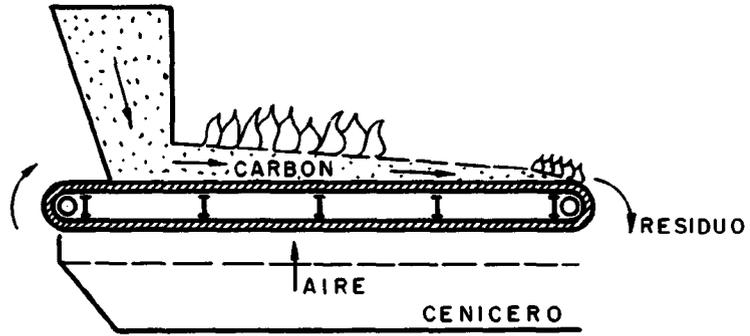
El carbón en granos, cuyo tamaño mínimo estaba limitado por la separación entre las barras de la parrilla, se cargaba a mano en las parrillas horizontales y por tolva en las parrillas inclinadas y escalonadas, de manera que se formaba un lecho de espesor entre 10 y 25 cm repartido lo más regularmente posible sobre la parrilla.

La marcha de la combustión la controlaban los operarios regulando las cantidades de aire y combustible introducido. La capacidad de producción estaba limitada por la superficie de la parrilla, que para facilitar la carga y el desescoriado no pasaba de 2 m de longitud. Actualmente sólo se emplea en instalaciones de muy poca importancia.

La introducción de las parrillas de cadenas permitió mejorar las potencias de los hogares y los rendimientos de la combustión sobre parrilla. La parrilla de cadenas está constituida por una parrilla móvil que conduce de un modo continuo el combustible al interior del hogar. La parrilla es una cadena sin fin en la que las barras pueden ser o no los elementos de transmisión, en el primer caso están articuladas entre sí y en el segundo son elementos pasivos que van montados sobre la cadena propiamente dicha.

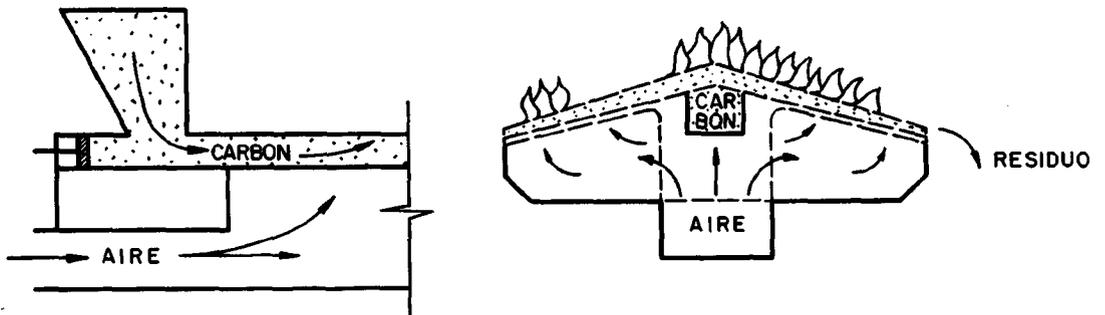
Sobre esta superficie en movimiento se deposita el combustible por gravedad mediante una tolva colocada en un extremo de la parrilla que reparte el combustible en un lecho de altura variable (entre 100 y 200 mm), dependiendo del tipo de combustible empleado.

El lecho fijo de carbón es arrastrado por la parrilla hacia el interior del hogar, donde se va quemando progresivamente hasta llegar al otro extremo de la parrilla. El aire de combustión se introduce por debajo de la parrilla de forma que las direcciones de los flujos de combustible y comburente son perpendiculares (Fig. 20). Sólo una pequeña parte del aire de combustión se introduce en la primera mitad de la parrilla, alimentándose el resto del aire de combustión en la segunda parte del recorrido, que es donde se quema la mayor parte del combustible. La velocidad de la parrilla es regulable para asegurar la combustión completa al final del recorrido, punto en el que, al perder los elementos de la parrilla su posición horizontal, se produce el quebrantamiento de la escoria y su caída al cenicero.



PARRILLA DE CADENAS

FIGURA 20



PARRILLA DE ALIMENTACION INFERIOR

FIGURA 21

Los carbones que se pueden quemar en las parrillas de cadenas son muy variados, hasta 30 ó 35% de volátiles y porcentajes de cenizas hasta 30 ó 40%.

Las parrillas de cadena permiten alcanzar potencias del hogar de $3,3 \times 10^6$ KJ/h/m² y capacidades de producción de vapor comprendidas entre 4,5 y 130 Tn/h.

Las parrillas de alimentación inferior difieren de las parrillas de cadenas fundamentalmente en que coinciden las direcciones de los flujos de aire y combustible, tanto en las de una retorta, como en las de retortas múltiples.

En ellas el carbón procedente de la tolva de alimentación es impulsado por un pistón empujador que se desplace alternativamente en el fondo de la tolva, empujando en su carrera de avance el carbón, que ha caído de la tolva en su carrera de retroceso, por una retorta y elevándolo hasta las toberas de aire situadas a ambos lados de la retorta en donde se produce la combustión. Los residuos de la combustión se van acumulando a ambos lados de la retorta sobre placas que basculan periódicamente para vaciar la escoria en los ceniceros (Fig. 21).

Los tamaños de la alimentación más adecuados están comprendidos entre 20 y 50 mm, con un paso menor del 50% a través del tamiz de 6 mm.

Las parrillas de alimentación inferior de una sola retorta permiten alcanzar potencias del hogar hasta $2,3 \times 10^6$ KJ/h/m² y producciones de vapor comprendidas entre 2 y 20 Tn/h.

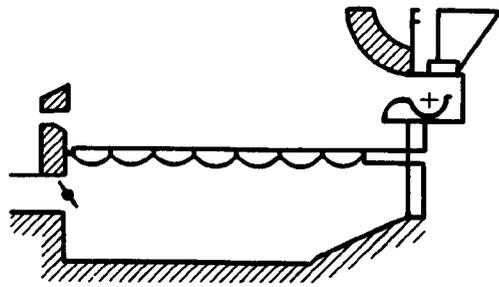
El diseño de retortas múltiples obedece al mismo criterio que el de retorta única de direcciones coincidentes de los flujos de combustible y comburente, y permite aumentar la potencia del hogar hasta $3,3 \times 10^6$ KJ/h/m², así como la producción de vapor hasta 130 Tn/h.

Las parrillas de alimentación inferior tienen una aplicación más limitada en cuanto a la calidad de los combustibles a que mar, siendo los más adecuados los de contenidos en volátiles superiores al 15% y con un máximo de cenizas del 20%. En cuanto a humedad se establece el límite máximo en el 15%.

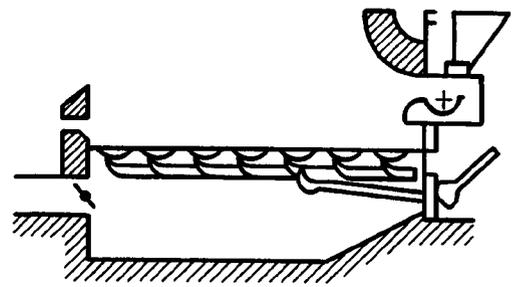
Las parrillas de impulsión longitudinal, en sus versiones vibrante y oscilante, son inclinadas y consiguen la impulsión del combustible mediante desplazamientos horizontales alternativos de las barras de la parrilla, y mediante movimientos oscilantes de los barrotos respectivamente. Estas parrillas son más populares en Europa que en América, debido a que los carbones europeos aglutinan más fuertemente que los de peor calidad americanos.

El combustible procedente de una tolva se mueve de forma que las capas próximas a los barrotos suben mientras que las capas superiores descienden, así los finos penetran en el lecho mientras que los gruesos permanecen en la superficie. El último barrote es el más ancho y sirve de zona de almacenamiento de escorias. El aire se distribuye en varios departamentos y el soplado se efectúa por debajo de los barrotos. Este tipo de parrilla es muy apropiado para quemar carbones pobres, aunque exige un contenido mínimo de volátiles entre el 14 y el 18%.

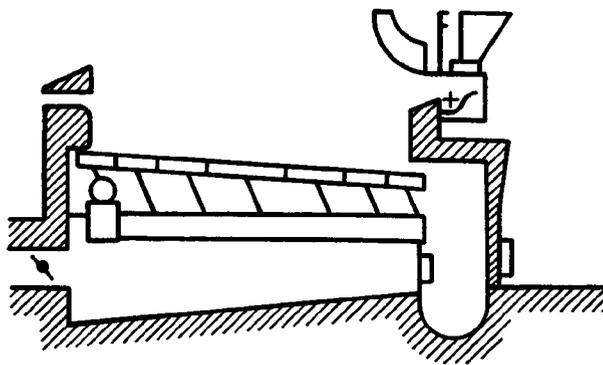
El distribuidor de carga "Spreader-Stoker" se emplea en hogares de parrillas de cualquiera de los tipos siguientes: fijas, de cadenas y de impulsión longitudinal (Fig. 22). Este cargador responde al concepto de alimentación superior en el que los flujos de combustible y comburente van en direcciones contrarias. El carbón es proyectado sobre la parrilla mediante un disco con palas rotativas situado a la salida de la tolva de almacenamiento y en un extremo de la parrilla. Las partículas más gruesas, que se proyectan a más distancia, se queman sobre la parrilla mientras que las fracciones finas se queman en suspensión. El porcentaje de partículas que arden sobre la



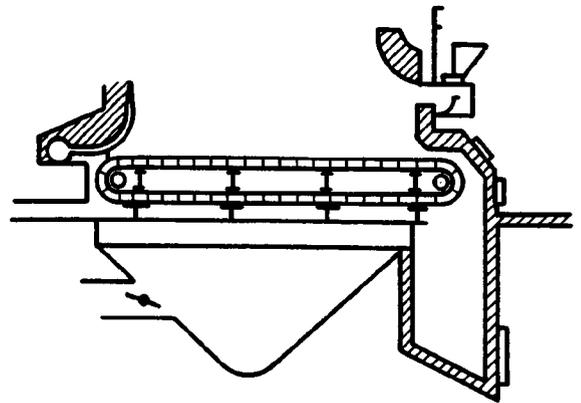
(a) PARRILLA FIJA



(b) PARRILLA VIBRANTE



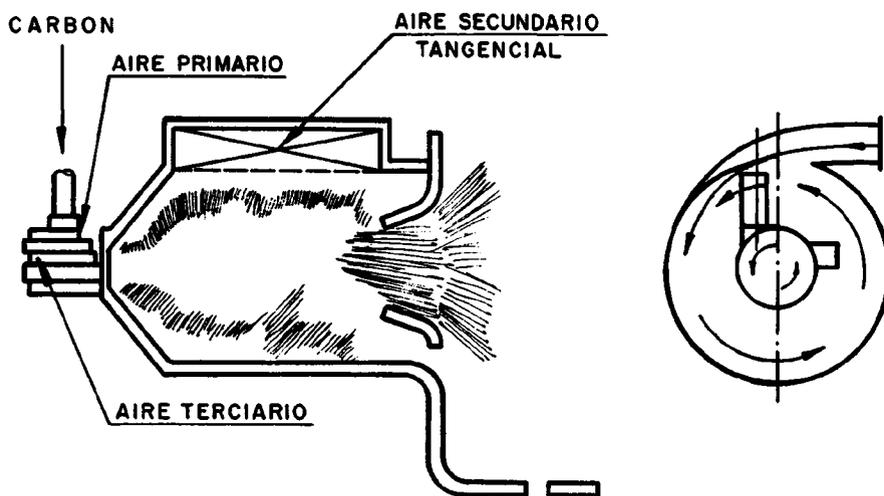
(c) PARRILLA OSCILANTE



(d) PARRILLA DE CADENAS

DISTRIBUIDOR DE CARGA SPREADER STOKER

FIGURA 22



HOGAR CICLON

FIGURA 23

parrilla depende de la granulometría del combustible, aproximadamente del 30 al 50% del carbón se quema en suspensión. Los finos quemados caen en las proximidades del extremo final de la parrilla. El tamaño máximo recomendado para la carga es de 20 mm, con un paso menor del 30% a través del tamiz de 6 mm. Si la alimentación contiene excesiva cantidad de finos, se arrastrarán demasiadas partículas con los humos, y si la alimentación es pobre en porcentaje de finos, el rendimiento de la unidad desciende a causa de que la parrilla no está diseñada para quemar tanta cantidad de carbón. El aire de combustión se suministra por la parte inferior de la parrilla, pudiéndose precalentar hasta 150°C para evitar un excesivo re blandecimiento del lecho. También se puede suministrar el aire a través de toberas situadas por encima de la parrilla y en la pared posterior del hogar para favorecer la turbulencia. El exceso de aire necesario varía entre el 22 y el 40%, dependiendo del tipo de parrilla empleado.

Los hogares de parrillas con este distribuidor de carga pueden quemar carbones con contenidos en cenizas de hasta el 70%, y responden rápidamente a las variaciones de la demanda de vapor, regulando la velocidad y orientación de las palas cargadoras y el suministro de aire.

El rendimiento de estos hogares se puede mejorar recirculando las cenizas volantes, que pueden llevar hasta el 50% del contenido de carbono.

Las potencias de los hogares con estos distribuidores de carga y con recirculación o no de cenizas volantes, para los distintos tipos de parrilla, son las siguientes:

	<u>sin recirculación</u>	<u>con recirculación</u>
Parrilla fija	$4 \times 10^6 - 6,3 \times 10^6$ KJ/h/m ²	$4,5 \times 10^6 - 8,5 \times 10^6$ KJ/h/m ²
Parrilla vibrante	$4,2 \times 10^6 - 6,8 \times 10^6$ KJ/h/m ²	$5,4 \times 10^6 - 8,5 \times 10^6$ KJ/h/m ²
Parrilla oscilante		$6,3 \times 10^6 - 9 \times 10^6$ KJ/h/m ²
Parrilla de cadena		$7,4 \times 10^6 - 11,3 \times 10^6$ KJ/h/m ²

Las producciones de vapor en estos hogares alcanzan a las 100 Tn/h.

5.3. COMBUSTION DE CARBON PULVERIZADO (16)

El combustible, molido a un tamaño máximo de 0,074 mm (del 65 al 80% de paso por el tamiz de 200 mallas) y seco, es arrastrado por una corriente de aire precalentado (aire primario), que suele ser del 15 al 70% del aire total de combustión, dependiendo del porcentaje de cenizas contenido en el carbón, hasta el quemador, el cual proyecta la mezcla al interior del hogar, donde se calienta por radiación hasta alcanzar la temperatura de inflamación a una cierta distancia de la boca del quemador. El resto del aire de combustión (aire secundario y terciario a veces) se aporta al hogar bien en el propio quemador o bien por aberturas practicadas en las paredes del hogar, provocando una agitación enérgica de la mezcla combustible-comburente, que completa la combustión con un exceso de aire comprendido entre el 20 y 30%, con lo cual la temperatura de la llama sobrepasa los 1500°C, ésto obliga a emplear hogares de paredes frías.

El consumo de energía debido a la molienda, en los hogares de carbón pulverizado, se estima en un 2% de la energía producida. Los costos de primer establecimiento de un hogar de carbón pulverizado son mayores que los de los hogares sobre parrilla; normalmente los hogares de carbón pulverizado se emplean en calderas de más de 100 Tn/h de producción de vapor.

El único inconveniente en las calderas con hogares de carbón pulverizado, es la formación de depósitos en los haces tubulares y la corrosión de los mismos causada por la acumulación de las escorias fundidas sobre ellos. Esto es consecuencia de la alta temperatura de operación del hogar de carbón pulverizado, que es superior a la de los puntos de reblandecimiento y fusión de la mayoría de las cenizas contenidas en el combustible.

La evacuación de escorias en éstos hogares se puede realizar en forma seca ó fundida. Si la evacuación se realiza en forma seca, sólo se recupera el 20% del contenido en cenizas del combustible, por el contrario, si la evacuación se realiza en estado fundido, el porcentaje de cenizas recuperadas se eleva al 50%.

Las ventajas de la combustión de carbón pulverizado en comparación con la combustión sobre parrilla, son las siguientes:

- . No existe limitación en la potencia del hogar ya que la instalación de quemadores no presenta ninguna dificultad. Actualmente se alcanzan producciones de vapor del orden de 4500 Tn/h a presiones y temperaturas de 27 MPa y 545°C respectivamente (calderas supercríticas).
- . Los hogares de carbón pulverizado permiten variaciones rápidas en la carga, dada la sencillez de regulación de los caudales de aire y carbón introducidos, con lo que se logra una respuesta rápida a las variaciones en la demanda de producción de vapor. Se establece el mínimo técnico en un 30% de la capacidad máxima de producción de vapor.
- . A causa del escaso exceso de aire (20 ó 30%) necesario para completar la combustión del carbón pulverizado, las pérdidas en la chimenea por calor

sensible son menores que en la combustión sobre parrilla.

- . Permiten una eliminación más sencilla de los depósitos producidos en los haces tubulares mediante los sopladores de hollín, con lo cual se mejora el coeficiente de disponibilidad de las calderas que emplean carbón pulverizado frente a las que queman carbón sobre parrilla.
- . Debido a la gran superficie específica del carbón pulverizado, permiten quemar combustibles con elevado contenido de cenizas (70%) y escaso contenido en volátiles (5%).

5.4. COMBUSTION EN HOGARES CICLON (14,15)

El hogar ciclón constituyó una innovación en el diseño de hogares de escoria fundida, considerándose el precursor más inmediato de la combustión en lecho fluidizado.

En estos hogares, el carbón, triturado a un tamaño máximo de 4 mallas, sin necesidad de mayor pulverización, entra junto con el aire primario tangencialmente en un cilindro horizontal refrigerado por agua, recibiendo así la mezcla un movimiento en espiral. El aire secundario se introduce a gran velocidad barriendo tangencialmente las paredes del cilindro. De esta forma las fracciones finas se queman en suspensión y las gruesas son arrojadas contra las paredes por la fuerza centrífuga (Fig.23).

Las temperaturas alcanzadas en estos hogares son superiores a los 1700°C, por lo que la mayoría de las cenizas contenidas en el combustible se funden y forman una capa líquida que resbala por las paredes del hogar y que, a su vez, atrapa las fracciones gruesas del combustible, las cuales arden al ser barridas

por el aire secundario.

Las cenizas se recuperan en estado fundido en un pozo de escorias situado al fondo del hogar.

Los inconvenientes del hogar ciclón derivan fundamentalmente de las características del carbón utilizado. Así, únicamente se pueden quemar en un hogar ciclón los carbones que contengan más del 15% de volátiles, con viscosidades de las cenizas menores de 250 poises a 1400°C y con puntos de reblandecimiento de las cenizas superiores a 1350°C.

Las ventajas de los hogares ciclón frente a los hogares de carbón pulverizado se pueden resumir en las siguientes:

- . Eliminan gran parte de la instalación de molienda al ser el tamaño mínimo de la alimentación superior al de los hogares de carbón pulverizado.
- . Reduce las dimensiones del hogar al permitir una mayor velocidad de los gases y una combustión más intensa que en un hogar de carbón pulverizado con potencia similar.
- . Disminuye las pérdidas en la chimenea por calor sensible, al reducir el exceso de aire hasta un 10 ó 15%, frente al 20 ó 30% de exceso de aire en los hogares de carbón pulverizado.
- . Reducen las erosiones en los haces de tubos y los costos de depuración de gases, ya que el 90% de las cenizas de carbón se recogen en estado fundido y solamente el 10% restante sale con los gases de combustión.

5.5 COMBUSTION EN LECHO FLUIDIZADO (FBC) (17,18,19,20,21,22,23 y 24)

La combustión en lecho fluidizado (FBC) se realiza en cámaras de combustión revestidas con refractario y/o tubos de agua.

Este proceso consiste básicamente en mantener el combustible inmerso en un lecho fluidizado de partículas inerte (arena, cenizas de carbón, caliza o dolomía). El lecho se mantiene en movimiento continuo por soplado de aire a través de una rejilla distribuidora situada en la parte inferior del lecho, que reparte uniformemente el flujo de aire. La velocidad del aire debe ser tal que las partículas del lecho no sean arrastradas al exterior. El aire introducido en el lecho actúa simultáneamente como aire de combustión y aire de fluidización (Fig.24).

Una vez formado el lecho, se calienta uniformemente hasta 500-600°C, momento en el cual se pone en marcha la alimentación de combustible que, a partir de este momento, mantiene la combustión autosustentada.

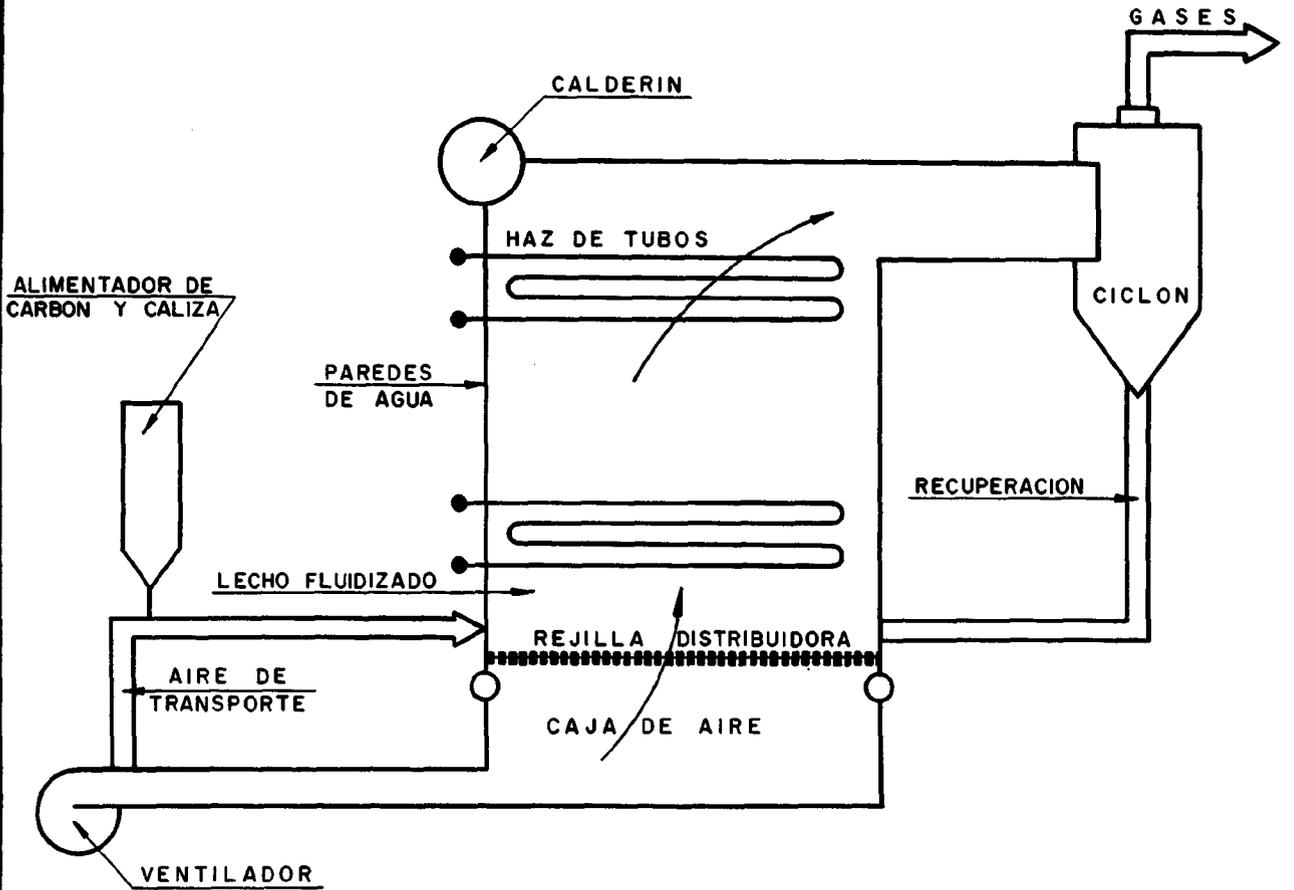
Seguidamente, al quemarse el combustible, se va elevando la temperatura hasta alcanzar la temperatura de operación del sistema de FBC, que generalmente está comprendida entre 800 y 950°C pero siempre por debajo del punto de reblandecimiento o sinterización de las cenizas.

El control de la temperatura se logra regulando la cantidad de aire soplado, la transferencia de calor y la alimentación del combustible.

Existen dos sistemas de combustión en lecho fluidizado (FBC):

- . los que trabajan a presión atmosférica AFBC,
- . los que operan presurizados entre 6 y 10 Pa (actualmente en plan experimental).

Las ventajas de la combustión de carbón en lecho fluidizado son:



ESQUEMA DE CALDERA DE LECHO FLUIDIZADO

FIGURA 24

- . La temperatura de combustión es inferior a la de los sistemas convecionales, lo que evita el reblandecimiento de las cenizas y la formación de depositos con la consiguiente reducción de la corrosión en las superficies de transferencia de calor inmersas en el lecho, al mismo tiempo que los sulfatos y cloruros de metales alcalinos y también las sales de sodio y vanadio, tan nocivas, permanecen en el lecho al no volatilizarse. Esta ventaja es importante cuando se queman combustibles de baja calidad.
- . La intensa mezcla que tiene lugar en el lecho fluidizado hace que el flujo de calor sea más uniforme y menos localizado que el de los sistemas convencionales, disminuyendo el riesgo de fallo en el haz tubular, con lo que se reduce el costo de operación. Las velocidades de transmisión de calor entre el material del lecho y los tubos inmersos en él son excepcionalmente altas por lo que precisan menor superficie de transmisión de calor que los sistemas convecionales para un mismo rendimiento, lo cual se traduce en una disminución de los costes de inversión. La absorción de calor obtenida dentro del lecho varía entre el 40 y el 60% de la total. Como consecuencia de lo expuesto, se obtiene un flujo calorífico total mayor que el de los sistemas convencionales, de forma que numerosos estudios señalan que una caldera de FBC mejora el rendimiento de las calderas convencionales entre el 2 y el 5%.
- . Los tiempos de residencia del combustible en el lecho son superiores a los del carbón pulverizado, lo que permite que se queme una alta proporción de combustible y que se obtengan mayores grados

de combustión por unidad de superficie. Utilizando pequeñas concentraciones de carbón en el lecho se reducen a un nivel muy bajo las pérdidas de calor potencial en forma de CO a las temperaturas de operación del FBC. En algunas aplicaciones de la combustión en lecho fluidizado, puede compensar el reciclado de las partículas de combustible que, bien por atrición o por disminución de tamaño (shrinkage), durante el proceso de combustión pueden abandonar el lecho arrastradas por el flujo de gases sin haberse quemado.

- . La alta inercia térmica y la ausencia de problemas de estabilidad de llama en el lecho, hacen que el sistema de FBC sea insensible a la calidad del carbón que se utilice como alimentación al lecho, permitiendo el aprovechamiento de combustibles que no se quemarían por los sistemas convencionales de combustión, como son los carbones con altos contenidos en cenizas y humedad. En consecuencia, permite reducir los costes de preparación de carbones.
- . Desde el punto de vista del control de la contaminación, la FBC retiene un alto porcentaje del azufre presente en la alimentación añadiendo al lecho caliza o dolomía, de forma que los niveles de emisión de SO₂ se mantienen por debajo de los límites admisibles. El mecanismo de la retención del SO₂ por la caliza es el siguiente: la caliza que alimenta el lecho se calcina formando óxido de calcio, el cuál reacciona con el SO₂ para formar sulfato de calcio anhidro, que se elimina en estado sólido con las cenizas, ya que la temperatura de operación es inferior a la de fusión del algez. La cantidad de caliza necesaria para retener el azufre presente se estima en el doble de la requerida para la reacción estequiométrica, aunque se

puede rebajar a costa de una granulometría más fina de la caliza en la alimentación. La inversión de una instalación de FBC, incluyendo los medios necesarios de alimentación y de manejo de las cenizas adicionales, resulta un 20-30% menor que la de una instalación convencional con depuración de gases. Esta característica permite el aprovechamiento de carbones con alto contenido en azufre, que de otro modo no se podrían quemar por los elevados índices de emisión de SO_2 ; aparte de la economía que supone en cuanto a la preparación del combustible. Las emisiones de NO_x se mantienen más bajas que en los sistemas convencionales, por ser también inferior la temperatura de operación y así contenerse la formación de óxidos de nitrógeno. Recientes investigaciones han demostrado que los álcalis contenidos en el combustible son tan eficaces para retener el SO_2 en el lecho como la caliza.

- . La utilización de los residuos de la combustión en lecho fluidizado (FBC) supone, no solamente una economía de energía, sino que también contribuye a una disminución de la polución. Los residuos sólidos generados en el proceso de FBC se componen fundamentalmente de sulfato de calcio, carbonato de calcio, cal, magnesia, sílice, óxidos de hierro y vidrios amorfos, de los cuales, el sulfato de calcio, la cal y la magnesia son aglomerantes hidráulicos, que se utilizan para estabilizar basamentos de carreteras y de vías de ferrocarril. La resistencia máxima del hormigón obtenido al fraguar los residuos de FBC ha sido de 20 MPa, esta resistencia se puede aumentar con adiciones de cemento portland, de forma que tengan aplicaciones de mayor responsabilidad, como son la construcción de macizos y pilares de bajo costo, que permiten un grado mayor

de recuperación en minas de carbón de alta calidad, o para control de techos y estabilización de muros en aquellas explotaciones que presenten problemas de subsidencia, hinchamiento o estabilidad. Otras utilizaciones de estos residuos son: correctores del pH de suelos y fertilizantes agrícolas, también se emplean en la neutralización de drenajes de presas de residuos y de escombreras en minas ácidas.

- . El sistema de combustión en lecho fluidizado bajo presión mejora todavía más algunas de las ventajas citadas: se consiguen unidades más compactas y de menor costo de inversión que las atmosféricas, porque la superficie de transferencia de calor es inversamente proporcional a la presión absoluta utilizada. Se mejora la retención de azufre con el lecho presurizado, aunque debe sustituirse la caliza por dolomía. Las emisiones de NO_x se reducen más trabajando bajo presión.

5.5.1. Aplicación de la FBC a escombreras de carbon. (13,18,19,25 y 26)

El desarrollo del sistema de combustión en lecho fluidizado (FBC) surgió como alternativa al proceso convencional de combustión de carbón pulverizado, de aquí su aplicación inicial a la obtención de vapor para generación de potencia. En los últimos años las reglamentaciones ambientales y la disponibilidad de combustibles han sido los impulsores de la aplicación de esta tecnología al aprovechamiento de las escombreras de carbón.

Es práctica usual almacenar conjuntamente las fracciones gruesas y medias de los residuos, así como recoger en presas de residuos las fracciones finas, aunque también es frecuente almacenar las fracciones finas previa filtración junto a los gruesos y medios.

A continuación se comentan los resultados de unos análisis de escombreras realizados en Inglaterra y en EEUU.

En la tabla 3 se dan los análisis químicos y los poderes caloríficos de algunas escombreras inglesas.

TABLA 3

ANALISIS DE ALGUNAS ESCOMBRERAS INGLESAS

ESCOMBRERAS	ANALISIS (% sobre muestra seca)						HUMEDAD (%)	PODER CALORIFICO (MJ/Kg)	
	C	H	O	N	S	Cenizas.		Sup.	Inf.
Kilmersdon	21,3	1,8	-	-	0,7	71,3	1,4	8,35	8,23
Desford	19,8	1,6	6,1	0,4	3,9	68,8	3,6	7,80	7,25
Markham	11,9	1,3	-	0,7	2,0	78,9	2,1	5,40	5,29
Sharlston	8,3	1,2	-	-	1,5	84,2	1,6	-	3,65
Darfield	5,1	0,9	-	-	0,8	88,5	1,1	1,70	1,68

Los contenidos de carbono de los tres primeros casos son lo su ficientemente elevados como para considerar su combustión auto sustentada en lecho fluidizado, ya que el límite práctico del poder calorífico en este tipo de calderas es de 5 MJ/Kg.

En cuanto al contenido de cenizas para la FBC, se considera co mo límite el 75%, empleando aire precalentado para la fluidiza ción. Por tanto, solo se pueden considerar los dos primeros

casos para la combustión autosustentada en lecho fluidizado.

Por otro lado, como la mezcla de carbones cumple la propiedad asociativa en cuanto al valor intrínseco de sus componentes, resulta que es perfectamente factible quemar por FBC cualquiera de los casos indicados en la Tabla 3 mezclado con carbón lavado. La proporción de calor proveniente del combustible menos noble en el FBC es superior a la admisible en el caso de carbón pulverizado.

En cuanto a los contenidos de azufre, son todos bajos excepto el del segundo caso, que tampoco presenta problemas de emisión ya que el sistema de FBC puede quemar carbones con un contenido en azufre del 4,5% sin salirse de los límites de emisión admisibles.

En la tabla 4 se indican los poderes caloríficos superiores y los contenidos en cenizas y azufre, expresados en % en peso de muestra seca, de escombreras del estado de Kentucky.

TABLA 4

PODER CALORIFICO Y CONTENIDOS EN CENIZAS Y AZUFRE DE
ESCOMBRERAS DE KENTUCKY

ESCOMBRERAS		Poder Calorífico Superior (MJ/Kg)	Cenizas (%)	Azufre (%)
Kentucky Este	Gruesos y Medios	3,31	70,49	1,21
	Finos	7,82	45,48	1,18
Kentucky Oeste	Gruesos y medios	3,68	68,19	9,42
	Finos	8,61	38,49	4,49

A la vista de estos datos, se deduce que para los finos, sus poderes caloríficos son superiores al límite de los 5 MJ/Kg de mantenimiento de la combustión autosustentada en lecho fluidizado, sus contenidos en cenizas están muy por debajo del límite práctico y los contenidos en azufre son admisibles para la FBC sin ningún tipo de depuración de gases, ni de adición de caliza al lecho.

En cuanto a la fracción compuesta por gruesos y medios, se deduce que no es posible su combustión autosustentada en lecho fluidizado, teniendo que recurrir a su mezcla con carbón lavado para conseguir ésta, ya que los costes del relavado hacen prohibitivo su tratamiento.

Conviene destacar que el potencial calorífico contenido en los finos únicamente se puede aprovechar por FBC, ya que sus contenidos en cenizas y en humedad presentan graves problemas en su combustión por métodos convencionales.

5.5.2 Otras aplicaciones de la FBC (17,25,26,27 y 28)

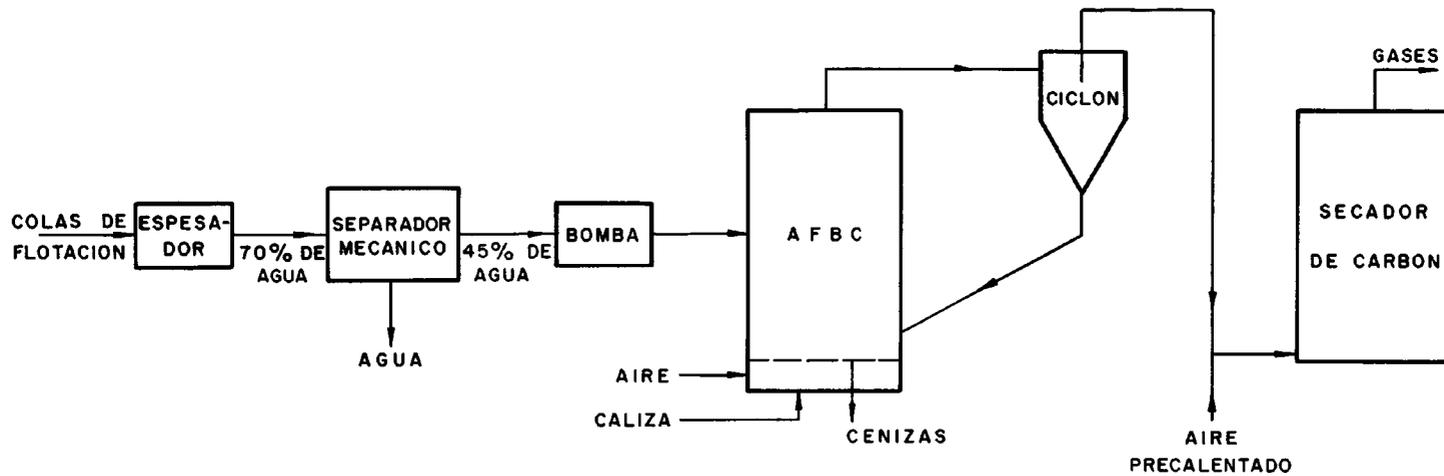
En este apartado se presentan dos aplicaciones de la FBC que, aunque no están relacionadas con escombreras, son netamente mineras. Estas aplicaciones son:

Combustión de las colas de flotación producidas en las plantas de tratamiento de carbón en un lecho fluidizado atmosférico.- A la salida del espesador las colas de flotación tienen un 70% de humedad, mediante filtrado al vacío, y menos frecuentemente a presión, se reduce el contenido en agua hasta el 45%, que es la humedad límite para mantener la combustión autosustentada de los finos obtenidos en los lavaderos de Kentucky. Esta papilla se bombea a la cámara de combustión, en la que por medio de boquillas pulverizadoras se distribuye en la parte superior del lecho. Los gases producidos en la FBC de las colas de flotación contienen la energía calorífica suficiente para cubrir las necesidades de secado de todo el carbón lavado en la plan-

ta. El diagrama de flujo de este proceso se representa en la Fig. 25.

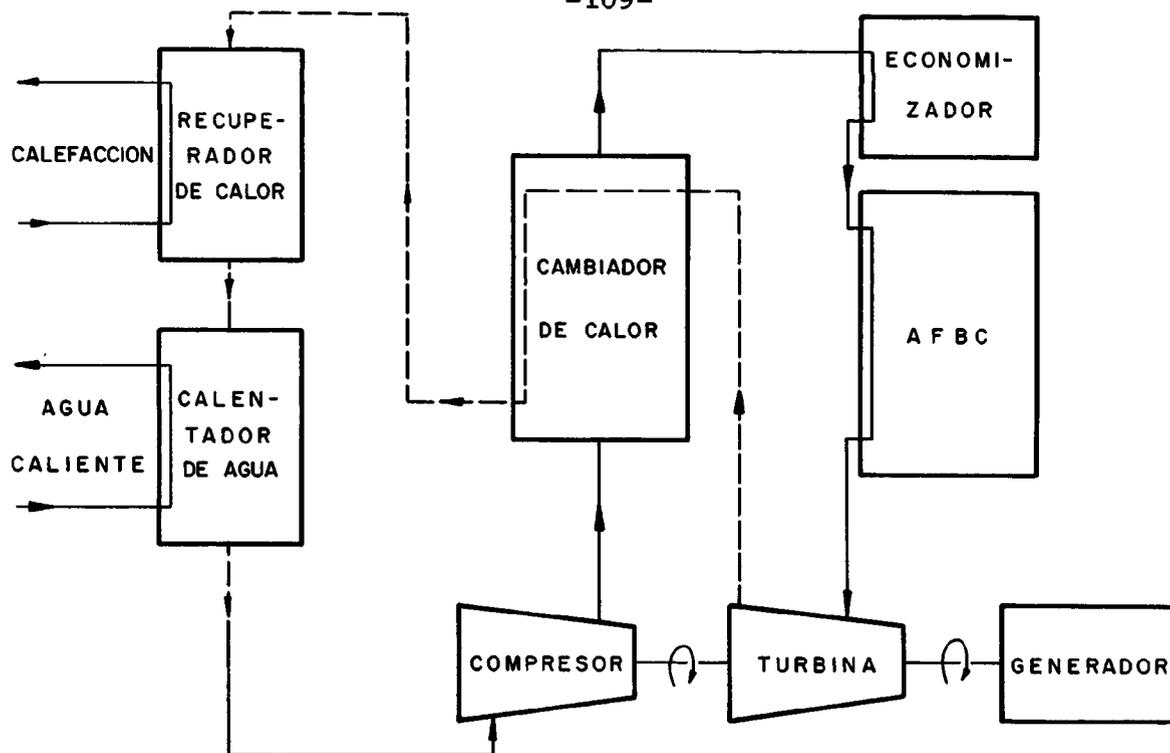
Planta de cogeneración de calor y electricidad.- Estas plantas emplean la combustión en lecho fluidizado atmosférico para calentar el aire que circula por los tubos inmersos en el lecho y mover una turbina de gas de ciclo abierto o cerrado, que produce electricidad y recupera calor para procesos industriales a partir del aire evacuado por la turbina. El diagrama de flujo para el ciclo cerrado se representa en la Fig. 26, mientras que el correspondiente al ciclo abierto es el de la figura 27.

Estos tipos de plantas son adecuados para instalarse a boca mina y cubrir las necesidades energéticas de la instalación.



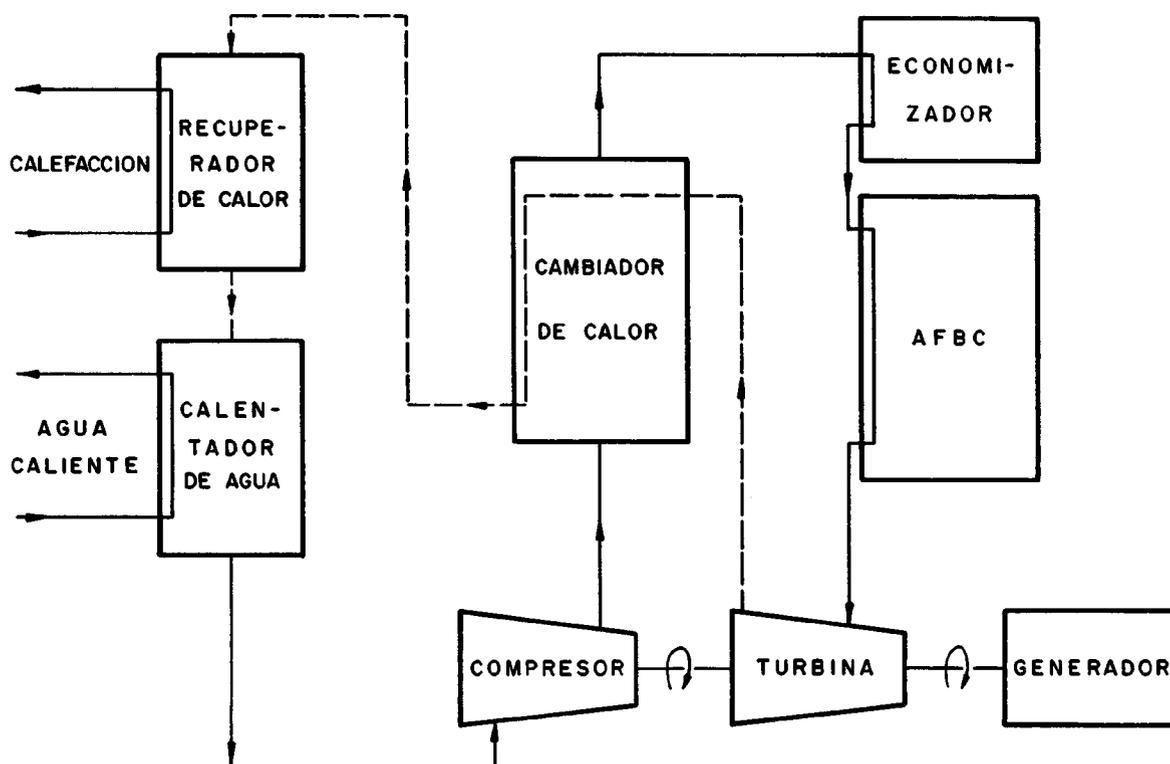
PLANTA PARA COMBUSTION DE COLAS DE FLOTACION

FIGURA 25



PLANTA DE COGENERACION DE CICLO CERRADO

FIGURA 26



PLANTA DE COGENERACION DE CICLO ABIERTO

FIGURA 27

6. ESTUDIOS Y ENSAYOS QUE DEBEN REALIZARSE EN LAS ESCOMBRERAS

6.1 INTRODUCCION

En este apartado se pasa revista a una serie de características de las escombreras que es preciso definir a la hora de plantear la viabilidad de su aprovechamiento. La utilidad de todas ellas es muy amplia y la información que suministran es de interés para todos los procesos tecnológicos que puede ser necesario aplicar para la utilización de los materiales presentes en las escombreras.

Las características que se estudian son : emplazamiento, origen, dimensiones, historia, tipo de construcción, granulometría, densidad y humedad.

Asimismo, se presentan los ensayos que son necesarios para establecer la validez o no de los materiales de las escombreras con relación a los diferentes procesos industriales que se han propuesto a lo largo del estudio.

6.2. ESTUDIOS A REALIZAR SOBRE LAS ESCOMBRERAS

6.2.1 Emplazamiento

Como resulta obvio, todas las escombreras de carbón se encuentran en la proximidad inmediata de antiguas o actuales minas y lavaderos de carbón. Las minas de carbón nunca se presentan de una forma aislada, sino que se dan en cuencas, frecuentemente de considerable extensión, en las cuales proliferan las escombreras. De este modo, el Inventario de Recursos de Carbón en España establece las siguientes zonas: Asturias Norte, Asturias Sur, Asturias Occidental, Bierzo-

Villablino, Norte de León, Guardo-Barruelo, Sur de España, Teruel Sur, Teruel Norte-Mequinzenza, Pirenaica, Baleares y Otras (29). Los yacimientos de hulla y antracita se sitúan preferentemente en el noroeste de la Península, así como en Ciudad Real y Córdoba.

El volumen de las escombreras es sumamente variable, por lo que habrá casos en los que individualmente no será posible plantear su aprovechamiento debido a su pequeño tamaño. Sin embargo, como consecuencia de la proliferación de que antes se hablaba, se puede dar el caso de que resulte viable tratar un conjunto de escombreras, utilizando para ello un mismo sistema de instalaciones. Para plantear una solución de este tipo se comprende la necesidad de disponer de mapas en los que figure la situación exacta de cada escombrera. Se deberán elaborar dos tipos de mapas:

- . Mapas topográficos ordinarios (por ejemplo a escala 1:50000), en los que se hará figurar la situación de las escombreras. Estos mapas serán de gran utilidad para analizar posibles medios de transporte, distancias a ciudades, etc.

- . Esquemas de situación. En éstos solo figurarán las ciudades y se marcarán con puntos las escombreras, las cuales se pueden agrupar por zonas para su estudio. En un margen del mapa, puede ser muy interesante presentar una tabla resumen con las zonas de escombreras, el número de ellas que hay en cada una, el tonelaje de materiales estimado y la posible cantidad de carbón existente.

Estos mapas deben ir acompañados de tablas en las que aparezcan ennumeradas todas las escombreras, la compañía propietaria de cada una y sus volúmenes aproximados. Por último, es muy interesante poder disponer de fotografías de la escombrera. Estas podrán ser tanto aéreas como terrestres; de las últimas, se podrán tomar panorámicas y de detalle, para hacerse una mejor idea del estado en el que se encuentran los materiales.

6.2.2 Origen

Como resultado de las operaciones mineras implicadas en la producción de carbón, en las escombreras se vierten los siguientes materiales:

- . Estériles de mina. Generalmente proceden de las labores de preparación efectuadas en la mina, como perforación de galerías, coladeros, recortes, etc. Cuando el método de explotación que se emplea implica la utilización de relleno, estos estériles se suelen destinar a tal fin. Comparados con los estériles procedentes del lavadero, la proporción de los de mina es muy baja, no siendo su presencia, por lo tanto, de excesiva importancia para la caracterización de la escombrera.
- . Estériles de lavadero. Son los que proceden de las operaciones de concentración del carbón. Estos estériles están constituidos fundamentalmente por una mezcla de pizarra, arenisca y carbón. Son separados durante el proceso de preparación y lavado, con el fin

de reducir el contenido en cenizas, mientras que se incrementa el valor del carbón con vistas a su aprovechamiento con fines térmicos.

Generalmente, las granulometrías más finas, cuando no han sido arrojadas a los ríos, se vierten en balsas de decantación las cuales, una vez drenadas, o se abandonan, o, si existen problemas de limitación de espacio, se transportan hasta la escombrera general.

A la hora de afrontar el estudio de una escombrera con vistas a su posible aprovechamiento, es necesario disponer de datos referentes a las formaciones litológicas existentes en el yacimiento o yacimientos de que provienen los materiales que la constituyen. Para ello, será de utilidad disponer de la geología realizada en la mina o, en su defecto, de la de la cuenca en que se encuentra el yacimiento.

El disponer de referencias respecto a los materiales que constituyen la escombrera es de gran importancia. Así por ejemplo, si se poseen unos cortes geológicos de las zonas explotadas, y se observa que los hastiales están constituidos en su mayor parte por areniscas, se desistirá de proseguir con la investigación si ésta iba encaminada a la obtención de materia prima para la industria cerámica, ya que el estéril será en su mayor proporción sílice, que no es válida para dicha industria. Así pues, dentro de lo que se podrían denominar etapas previas al reconocimiento de las escombreras, se deberá incluir una descripción geológica con columnas litológicas de los yacimientos de carbón cuya explo-

tación ha dado lugar a la escombrera. Esta, en numerosos casos, podrá realizarse a escala de cuenca minera, pues la litología se suele mantener sensiblemente constante en toda ella.

6.2.3 Dimensiones

El tamaño de la escombrera es una de las primeras consideraciones a tener en cuenta para plantear su posible aprovechamiento.

Será preciso definir, dentro de la aproximación que se considere razonable, el volumen de materiales depositados en la escombrera. Se darán casos en los que escombreras con un gran contenido en carbón no podrán ser aprovechadas debido a su pequeño volumen. Y a la inversa, escombreras mucho más pobres serán aprovechables debido a su gran tamaño.

Para la cubicación de la escombrera habrá que conocer, en primer lugar, el perfil topográfico del terreno sobre el cual se encuentra. En el caso más favorable, este perfil se podrá determinar mediante reconocimientos visuales o con mapas topográficos realizados con anterioridad a su ubicación. En caso contrario, se hará necesaria una serie de sondeos para fijar los límites de la base de la escombrera, pudiéndose aprovechar para este objeto los sondeos de desmuestre.

Una vez establecido el perfil de la base, se realizará un levantamiento topográfico de los contornos, con el que se podrá calcular el volumen total de materiales.

6.2.4 Historia

Este punto es de gran importancia al afrontar el estudio de escombreras cuya formación se remonte a bastantes años de antigüedad.

Su trascendencia se verá clara más adelante, cuando se trate el problema del desmuestre. Diferentes cuestiones que se deberán abordar en este apartado son:

- . Antigüedad de la escombrera. Este dato es importante para hacerse una idea de las posibles técnicas de lavado, en el caso de que se emplease alguna, a que se han sometido los materiales de la escombrera. Asimismo, será una referencia sobre su posible mayor o menor alteración. Un criterio que se puede seguir a la hora de definir las escombreras de mayor interés, es localizar las más antiguas, pues serán las que han dispuesto de procedimientos de lavado más rudimentarios y por lo tanto, en las que más carbón se haya vertido con el estéril.

- . Destino del carbón. Es interesante conocer la aplicación que se daba al carbón extraído de la mina a partir de la cual se formó la escombrera. Así por ejemplo, si se destinaba a fines siderúrgicos, únicamente se aprovecharían los carbones de mejor calidad, o si se suministraba a calefacciones domésticas, las granulometrías inferiores a un determinado tamaño no serían de utilidad, etc.

- . Datos referentes al vertido de materiales distintos en zonas concretas de la escombrera. Desde este punto de vista, interesará conocer si, por ejemplo, los estériles procedentes de las labores de interior

eran arrojados en algún lugar en concreto, o si se hacía de forma indiscriminada; si se seguía algún criterio para depositar finos y gruesos en puntos diferentes; si en la escombrera se vertían materiales de diferentes minas, las zonas que corresponden a cada una, etc.

- . Forma en que se constituyó la escombrera. Este es un aspecto de gran importancia, pues afecta en gran medida a la distribución y estado de los materiales, por lo que se le dedica un apartado más adelante.

- . Información sobre posibles combustiones que se hayan producido. Si este dato no figura en ningún documento, será interesante consultarlo con habitantes de la zona, pues es un fenómeno fácilmente observable, aunque no cuantificables sus efectos.

En definitiva, toda la información sobre hechos que, en cualquier momento, hayan podido afectar a la escombrera, deberá ser recogida y tenida en cuenta para posteriores etapas de la investigación.

Para dar una idea de la influencia de la antigüedad de la escombrera sobre el estado en el que ésta se encuentre, en la tabla 5 se comparan algunas características físicas de un carbón lavado, un estéril fresco (tomado de escombreras activas) y un estéril proveniente de escombreras antiguas ya alteradas (1). En ella se comprueba cómo, desde el punto de vista del relavado, las escombreras más antiguas son más interesantes que las recientes.

6.2.5 Tipo de Construcción

El procedimiento que se haya seguido para emplazar la escombrera en su posición actual, ejerce una gran influencia sobre el estado de los materiales que la constituyen. En lo que se refiere a emplazamiento de escombreras, es preciso distinguir dos cuestiones: transporte del estéril hasta la escombrera y emplazamiento definitivo.

TABLA 5

COMPARACION DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS DE CARBON, ESTERIL RECIENTE Y ESTERIL ANTIGUO

	CARBON LAVADO	ESTERIL RECIENTE ESCOMBRERAS ACTIVAS	ESTERIL ALTERADO ESCOMBRERAS ANTIGUAS
Peso Específico (gr/cm ³)	1,23-1,72	Varía considerablemente de una escombrera a otra; oscila entre 1,6 y 2,7(2,2)	Varía considerablemente debido, sobre todo, al contenido en carbón; oscila entre 1,4 y 2,7(2,0)
Granulometría	Varía desde tamaño de polvo hasta 150 mm.	Es variable, pero suelen predominar gruesos de unos 100 mm.	Mayor proporción de finos que en las recientes.
Contenido en carbón y volátiles (base seca)	80-95%	7-25%	10-45%
Poder calorífico (KJ/kg)	23000-35000	3500-14000	Mayor que el de las escombreras recientes: 7000-23000.
Contenido en azufre	1-5%	5-10%	Menos que las recientes.
Cenizas	3-12%	-	-

Existen varios procedimientos de transporte de los estériles hasta la escombrera. En la tabla 6 se dan las diferentes posibilidades, así como la viabilidad de su aplicación para las distintas granulometrías:

TABLA 6
PROCEDIMIENTOS DE TRANSPORTE DEL ESTERIL

METODO	TIPO DE ESTERIL			
	GRUESOS	FINOS SATURADOS	FINOS HUMEDOS	COMBINACION DE GRUESOS Y FINOS HUMEDOS
1. Hidráulico	No se emplea	Excelente	No se emplea	No se emplea
2. Camiones-carretera	Bueno	No se emplea	Regular	Bueno
3. Camiones-todo terreno	Excelente	No se emplea	Regular	Bueno
4. Scrapers	Excelente	No se emplea	Malo	Regular
5. Cintas	Bueno	No se emplea	Malo	Regular
6. Funiculares	Excelente	No se emplea	Regular	Bueno
7. Canales	Excelente	No se emplea	Malo	Regular

En la mayor parte de los casos, a lo que se ha recurrido es a combinar algunos de estos sistemas.

Una vez que el material se ha transportado hasta el lugar de ubicación de la escombrera, básicamente, se plantean dos opciones: formación de pilas mediante cintas o funiculares, o extensión de los materiales con bulldozers o scrapers. El que se empleen unos u otros procedimientos depende, sobre todo, de la topografía y de la distancia de la escombrera al lavadero. En terrenos accidentados la forma habitual de construir las escombreras ha venido siendo el basculamiento de camiones o vagonetas en las laderas de los valles.

El tipo de construcción de la escombrera puede influir tanto en la distribución de tamaños, como en el estado general de los materiales. Así por ejemplo, si el método utilizado ha sido el de vuelco en la ladera de un valle, se tendrá una graduación de tamaños de más gruesos a más finos de abajo hacia arriba y, en cierto modo, de la parte del valle hacia la ladera. En el caso de que la escombrera se haya construido por apilamiento en una zona más o menos llana, la distribución de tamaños podrá ser aproximadamente simétrica alrededor del eje de la pila.

Si el sistema de construcción ha implicado un trasiego importante de maquinaria (camiones, bulldozers, etc.) sobre los materiales que se estaban depositando, éstos se habrán ido compactando y disgregando, su permeabilidad habrá disminuido y, por lo tanto, la meteorización será menor que en aquellos casos en los que no se produjeran tales hechos.

Por lo tanto, al afrontar el estudio de una escombrera, será importante conocer el modo según el cual ha sido construida, lo que permitirá hacerse una idea de cómo pueden estar distribuidas las partículas según sus tamaños, y del estado general en que se encontrarán los materiales situados en las zonas internas.

6.2.6 Granulometría

Es necesario realizar análisis granulométricos para determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano que se presentan en la escombrera. No es posible determinar tamaños de grano de una forma individualizada, por lo que es preciso referirse siempre a intervalos granulométricos. Los análisis granulométricos se realizan mediante ensayos estandarizados semejantes a los realizados en los estudios de suelos.

Como consecuencia de los procesos de tratamiento del carbón y de las labores mineras, los estériles generalmente tienen unos tamaños comprendidos dentro de los siguientes rangos:

- . Estériles de mina : Mayores de 75 mm de diámetro

- . Estériles gruesos
de lavadero: Entre 75mm y 0,5 mm

- . Estériles finos
de lavadero: Menores de 0,5 mm.

De una forma más concreta, los estériles del carbón se pueden clasificar como sigue:

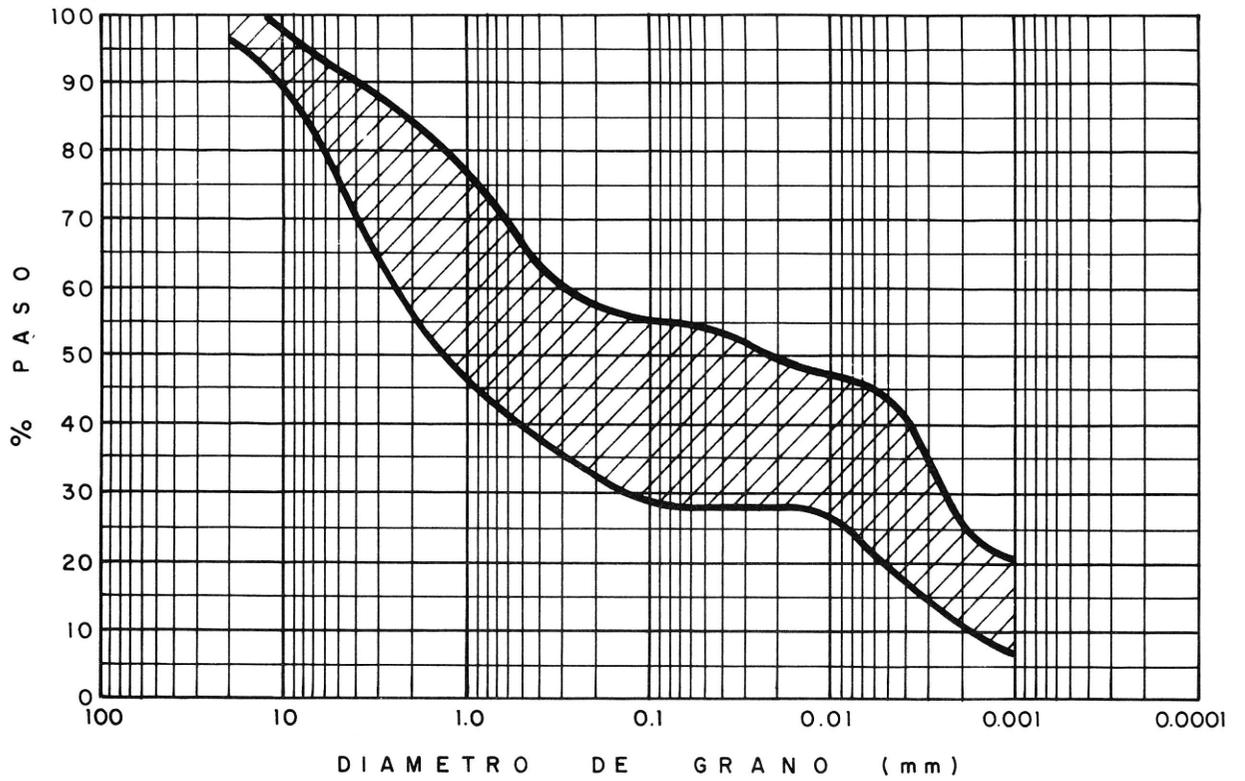
- . Estéril de mina. Son grandes trozos que normalmente se separan antes de alimentar el lavadero. La cantidad de estéril de mina es generalmente una pequeña proporción del total de los estériles, por lo que, en general, su influencia es pequeña en las características medias de la escombrera.

- . Estériles gruesos del lavadero. En general los tamaños varían de 75 mm a menos de 0,01 mm, con un máximo de un 25% de paso por el tamiz de 0,074 mm. La gradación es análoga a la de las arenas bien clasificadas.

- . Estériles finos del lavadero. Los estériles finos se obtienen de la decantación de las aguas que salen de la planta. Los tamaños de partículas oscilan entre 2 mm y 0,0005 mm. Estos materiales se vierten en forma de lodos con un porcentaje en sólidos de un 10 a un 35%, o en forma de tortas resultantes del filtrado, al vacío, por centrifugación, etc.

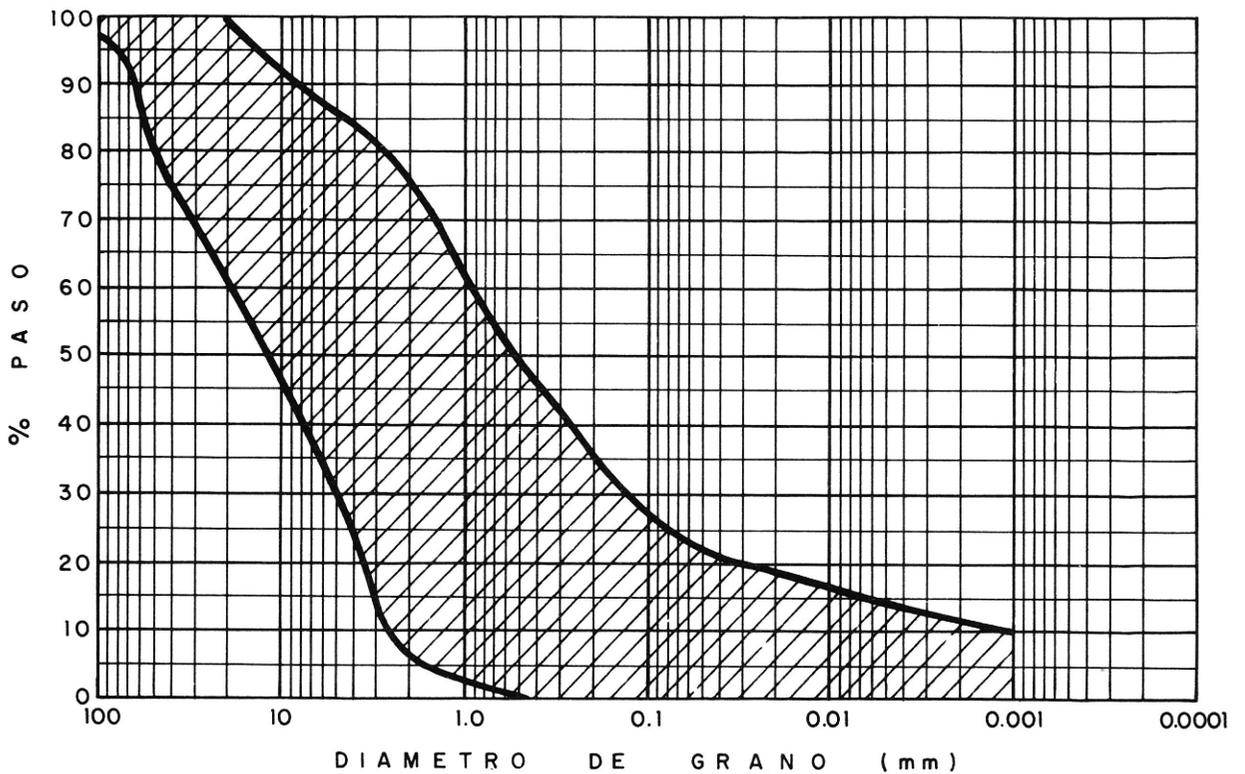
- . Combinación de estériles gruesos y finos procedentes de operaciones de filtrado. Generalmente son mezclas que se hacen en almacenamientos temporales, antes de que los productos sean transportados definitivamente a la escombrera.

En la Fig. 28 (a) se pueden observar las curvas granulométricas límites para una serie de muestras tomadas en escombreras de



ANALISIS GRANULOMETRICO DE UNA ESCOMBRERA DE ESTILL COUNTY, KENTUCKY

FIGURA 28-a



ANALISIS GRANULOMETRICO DE UNA ESCOMBRERA DE PENNSYLVANIA

FIGURA 28-b

Estill County, Kentucky, EE.UU. (30). De estas curvas se puede deducir que el estéril del carbón constituye un material razonablemente bien clasificado, con una variación de tamaños que va desde 19,05 mm hasta menos de 0,001.

Sin embargo, las conclusiones que se puedan extraer de una escombrera, difícilmente se pueden aplicar a otras. Por ejemplo, en la Fig. 28(b) se dan las curvas granulométricas límites de una escombrera de Pennsylvania (31). Como se puede observar, son de forma considerablemente diferente a las anteriores, siendo los tamaños límites de 75 mm y de 0,04 a 0,001 mm.

Dependiendo de las técnicas de construcción de la escombrera, así como del método de muestreo utilizado, la distribución granulométrica que se obtenga puede verse sensiblemente afectada.

En la escombrera antes mencionada de Estill County, se tomaron muestras en cinco sondeos y se realizaron análisis granulométricos a distintas profundidades. En la tabla 7 se reflejan los resultados obtenidos:

TABLA 7

<u>SONDEO NO.</u>	<u>PROFUNDIDAD (m)</u>	<u>TAMAÑO EFECTIVO D₁₀ (mm)</u>	<u>DIAMETRO MEDIO D₅₀ (mm)</u>
1	0-3	0,001	0,600
	3-6	0,001	0,330
	6-9	0,001	0,230
	9-12	0,001	0,500
	12-15	0,001	0,023
2	0-7	0,001	0,840
	7-10	0,001	0,330
	10-14	0,002	0,150
3	0-3	0,001	0,580
	3-6	0,001	0,400
	6-9	0,001	0,690
	9-12	0,001	0,220
	12-15	0,001	0,700
4	0-7	0,001	1,020
	7-12	0,001	0,250
	12-15	0,001	0,200

D₁₀ es la abertura de malla que permite un paso del 10% del material

D₅₀ es la abertura de malla que permite un paso del 50% del material.

Como se puede observar, la tendencia general es a disminuir el tamaño a medida que aumenta la profundidad, lo cual está estrechamente relacionado con el método de construcción de la escombrera utilizado, así como con la tendencia de las partículas finas a introducirse entre los huecos que quedan entre las más gruesas y así descender hacia las partes inferiores de la escombrera.

Por lo que se refiere a la utilidad de la granulometría, su principal aplicación surge a la hora de plantear un posible relavado de la escombrera, ya que uno de los datos que se precisan para dimensionar una planta de tratamiento es la granulometría del producto con que se va alimentar. Cuanto mayor sea la precisión con que se realice el análisis, tanto mejor será la información que se tendrá de la escombrera; sin embargo, a efectos prácticos, puede ser suficiente con distinguir entre las fracciones granulométricas siguientes:

- . Mayores de 50 mm
- . Entre 50 y 10 mm
- . Entre 10 y 0,5 mm
- . Menores de 0,5 mm

Estas cuatro fracciones se han considerado como representativas de un elevado número de escombreras, ya que responden a los intervalos de tamaño más frecuentes en numerosos esquemas de lavado.

6.2.7 Peso Específico y Densidad

La densidad de las escombreras de carbón está estrechamente relacionada con el peso específico de los materiales que las constituyen, por lo tanto, como consecuencia de la gran diferencia

entre el peso específico del carbón y del estéril, se produce una considerable variación de densidades, particularmente en el caso de tamaños gruesos.

El rango de pesos específicos de las granulometrías gruesas, está comprendido entre 1,8 y 2,4 gr/cm³. Esta variabilidad resulta de los diferentes contenidos en carbón presentes en los materiales de la escombrera. En cuanto a la densidad "in situ" de las escombreras, varía tanto con el peso específico de los materiales, como con el grado de compactación que hayan sufrido, y con el método de construcción que se haya utilizado. El rango usual de densidades es el comprendido entre 1,36 y 1,68 gr/cm³.

El peso específico de los estériles finos varía entre 1,5 y 1,8, aunque lo más normal es que lo haga entre 1,55 y 1,65 gr/cm³. Esto sugiere que en la fracción fina se encuentra un elevado porcentaje de carbón.

Debido a los procedimientos de construcción y a los menores pesos específicos, la densidad en seco "in situ" de los materiales finos es menor que la de los materiales gruesos, variando entre 0,64 y 1,12 gr/cm³, aunque el rango usual va de 0,80 a 0,96 gr/cm³.

En las escombreras antiguas, el contenido en carbón es superior al de las modernas, por lo tanto es previsible que las densidades sean también menores. Este hecho es especialmente significativo para las fracciones finas, pues los procedimientos de lavado eran mucho más deficientes que en el caso de las gruesas.

El conocimiento de la densidad de los materiales de la escombrera es de gran importancia, poniéndose de manifiesto su uti-

lidad desde el momento mismo en que se proyecta manipular la escombrera y, por lo tanto, se plantea la posibilidad de utilizar diferentes procedimientos de transporte.

6.2.8 Humedad

En los problemas de estabilidad, la humedad juega un papel fundamental, sin embargo aquí nos se tratan estos problemas.

Desde el punto de vista del aprovechamiento de la escombrera, la humedad se puede contemplar desde diversos ángulos:

- . Relavado. Si se piensa en lavar la escombrera para recuperar su contenido en carbón, con toda seguridad habrá que emplear un sistema de tratamiento por vía húmeda. Por lo tanto, el que el material esté más o menos húmedo no va a causar serios problemas, pues de todas formas habrá que añadir agua al proceso. Únicamente se puede plantear algún problema relativo al manejo de los materiales si éstos se encuentran demasiado húmedos y, debido a la presencia de sustancias arcillosas, pegajosos.
- . Fabricación de materiales cerámicos. El planteamiento en este caso es semejante al anterior. Todos los procesos de fabricación conllevan la preparación de una pasta para lo que es preciso añadir agua, por lo que el que los materiales estén más o menos húmedos tiene poca importancia.
- . Combustión. Si el contenido en carbón es tal que permite que se puedan considerar los materiales de la escombrera como un combustible de elevado contenido en cenizas, será preciso conocer la humedad, de manera análoga a como se hace con cualquier combustible sólido. En este caso, la humedad se con-

sidera un impedimento para la combustión, pues implica el consumo de una determinada cantidad de calorías que disminuye el rendimiento térmico del proceso.

6.3. ENSAYOS NECESARIOS PARA EVALUAR LOS MATERIALES DE LA ESCOMBRERA

En este apartado se presenta una serie de ensayos que resultan imprescindibles para decidir sobre la validez o no de los materiales de la escombrera para las diferentes aplicaciones que se han propuesto en el estudio.

Se han dividido en cuatro grupos:

- . Ensayos de tipo general, en los que se incluyen: granulometría, peso específico de partículas, densidad y humedad. Normalmente, el conocimiento de estas propiedades será necesario para cualquier aplicación que se presente.
- . Ensayos con relación al relavado. Para la realización industrial de un lavado de carbón, resulta imprescindible partir de la granulometría, curva de lavabilidad y curva de cenizas del producto a tratar.
- . Ensayos con relación a la fabricación de ladrillos, gres y áridos ligeros. En la industria de estos productos, la cantidad de ensayos que se suele realizar es muy elevada. Sin embargo, los materiales pueden quedar caracterizados de una forma general cuando se conocen las siguientes propiedades: composición química, composición mineralógica, plasticidad, molturabilidad y termogravimetría.

- . Ensayos con relación a la combustión. Para esta aplicación, se considera imprescindible el conocimiento de las siguientes propiedades: cenizas, volátiles, azufre, carbono.fijo, poder calorífico y fusión y reblandecimiento de cenizas.

A continuación se presentan estas propiedades junto con los ensayos precisos para determinarlas, en forma de cuadro. En éste se ha reflejado también la normativa referente a cada ensayo, cuando existe.

TABLA 8

ENSAYOS A REALIZAR EN LAS ESCOMBRERAS

Ensayos de tipo general

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
Granulometría	Tamizado para partículas gruesas y sedimentación para finas.	Se hace pasar la muestra por una serie de tamices de tamaño de malla decreciente. Llevando en ordenadas los rechazos acumulados de cada tamiz, expresados en tanto por ciento de la muestra, y en abscisas los anchos de malla correspondientes, se construye la curva granulométrica del material. La sedimentación se realiza mediante hidrómetros.	La granulometría de los finos no es de excesivo interés para el estudio de escombreras debido a su poca fiabilidad. ASTM D 431-44
Peso específico de las partículas	Picnómetro	Se llena el picnómetro de agua y se pesa a temperatura constante de 15°C. Sea G el peso. Se vacía y se seca el picnómetro y se introducen G gramos de muestra y 25 ml de agua destilada libre de aire. Tras hervir la muestra y manteniéndola a temperatura constante de 15°C se pesa. Sea G ₂ el peso. Si el tanto por ciento de humedad higroscópica de la muestra es h, el peso específico viene dado por:	UNE 32023

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
		$x = \frac{(100 - h) G}{100 (G + G_1 - G_2) - G \cdot h}$	
Densidad	Método del Mercurio	<p>Se precisa conocer la masa y el volumen de la muestra. La masa se determina por pesada con una precisión de 0,1 g. El volumen se mide mediante la cantidad de mercurio desplazada al sumergir la muestra en un recipiente lleno. La densidad viene dada por el cociente:</p> $D = \frac{\text{MASA}}{\text{VOLUMEN}}$	
Humedad	Secado en estufa	<p>Se procede en dos etapas:</p> <p>1) Secado al aire: se estabiliza la humedad de la muestra con la presión de vapor de agua en la atmósfera.</p> <p>2) Secado en estufa: se somete la muestra a 105° -110°C lo que la reduce al estado de sequedad.</p> <p>En cada etapa se obtiene una fracción de humedad, sumándolas se obtiene la total.</p>	UNE 32001

TABLA 8 (continuación)

Ensayos con relación al Relavado

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
Granulometría	Cribado en una serie de tamices.	Ver ensayos generales.	Según norma ASTM D 431-44
Curva de lavabilidad del todo-uno	Flotación-hundimiento.	Se prepara una serie de recipientes con líquidos de densidad creciente. Se introduce la muestra en el de menor densidad, una parte flota y la otra hunde. Se extraen el flotado y el hundido, se lavan, se secan y se pesan. El hundido se introduce en el recipiente con el líquido de densidad inmediatamente superior y se repite la operación, hasta llegar al líquido de densidad más alta. La curva de lavabilidad se construye llevando en abcisas las densidades de los líquidos y en ordenadas los hundidos expresados en % de la muestra.	Normas ASTM D 2013-72, N.F.M. 03-016
Curva de cenizas elementales del todo-uno	Flotación-hundimiento+cenizas	Se prepara una serie de líquidos de densidad creciente. Se introduce la muestra en el de menor densidad, una parte flota y otra hunde, se las separa, se lavan, se secan y se pesan. Con la que flota se hallan	Ver determinación de cenizas (Norma N.F.M. 03-016).

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
		<p>las cenizas.</p> <p>A partir de la ordenada 100 se lleva el peso de flotado expresado en % de la muestra, y por el punto medio de dicho intervalo se lleva el valor de las cenizas, obteniendo un punto de la curva. La porción hundida se vierte en el líquido de siguiente densidad y se repite la operación obteniendo los sucesivos puntos de la curva de cenizas.</p>	
<u>Ensayos con relación a la Fabricación de Ladrillos, Grés y Aridos Ligeros</u>			
Composición química	Fluorescencia de Rayos X	Los análisis se refieren a contenidos en óxidos. Para determinar las concentraciones se emplean curvas estandarizadas.	Los óxidos más frecuentes son: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO , CaO , TiO_2 , P_2O_5 , y SO_3 .
Composición mineralógica	Difracción por Rayos X	Mediante la difracción por rayos X se determinan cualitativamente, las especies minerales presentes. A partir de los análisis químicos, empleando fórmulas estandarizadas y programas de cálculo, se deducen las especies minerales.	Tanto los análisis químicos como los mineralógicos se realizan sobre cenizas de muestras calcinadas a 750°C . La calcinación se puede realizar a menos de 200°C con

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
Límite lí <u>quido</u>	Cuchara de Casagrande	Se prepara una mezcla de estéril <u>fin</u> amente molido y agua. Se introduce en la cuchara de Casagrande, se hace una acanaladura y se somete a golpeteo <u>has</u> ta que los labios de la acanaladura se juntan en una determinada longitud. El ensayo se repite con diferentes <u>humeda</u> des. Los puntos obtenidos se aproximan con un <u>recta</u> . La humedad <u>correspon</u> diente a 25 golpes es el límite líquido.	procedimientos especiales (32). Los análisis químicos y mineralógicos interesa <u>rea</u> lizarlos para las distintas fracciones granulométricas y densimétricas <u>ob</u> tenidas en los correspondientes ensayos. UNE 7378-75

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
Límite plástico	Moldeado de bastoncitos	Se determina la humedad de bastoncitos agrietados de 3 mm de diámetro.	La diferencia entre el límite líquido y el plástico es el índice de plasticidad.
Molturabilidad	Ensayo Hardgrove	Se muele una muestra de 50 g cuyo tamaño de grano oscile entre 1,18 y 0,6 mm. Para ello se emplea un molino estandarizado de bolas y canales, el cual da 60 revoluciones. El producto molido se seca al aire y se hace pasar por un tamiz de 0,075 mm. Si W es el peso en gramos que pasa por este tamiz, el índice de molturabilidad Hardgrove viene dado por: $HGI = 13.6 + 6.93 W$	La muestra se prepara mediante sucesivas trituraciones en una machacadora de mandíbulas.
Variación de peso con la temperatura	Análisis Termogravimétrico	En una termobalanza se va registrando la variación de peso de una muestra de la escombrera al someterla a un determinado rango de temperaturas. Los resultados se registran en termogra-	Este ensayo está especialmente indicado para la fabricación de áridos ligeros.

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
		mas, cuyos escalones determinan las temperaturas a que se desprenden ciertas sustancias de la muestra.	
<u>Ensayos con relación a la Combustión</u>			
<u>Análisis inmediato.</u>			
Contenido en cenizas	Determinación de las cenizas	Se prepara la muestra secándola al aire y triturándola para que pase por el tamiz 0,2 UNE 7050. Se introduce en una cápsula abierta de porcelana o platino, previamente desecada, y se calienta en un horno eléctrico hasta la temperatura de $815 \pm 10^{\circ}\text{C}$ que se mantiene hasta peso constante. Después se cubre la cápsula con su tapa y se saca del horno para enfriarla sucesivamente sobre placa metálica y en desecador. Por último se pesa y por comparación con el peso inicial de la cápsula con su tapa, se obtiene el peso del residuo de la incineración.	El tanto por ciento de cenizas se puede expresar sobre muestra seca (desprovista de su humedad higroscópica). UNE 32004.

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
Contenido en volátiles	Determinación de las materias volátiles del carbón	Se prepara la muestra secándola al aire y triturándola para que pase por el tamiz 0,2 UNE 7050, se introduce en un crisol de cuarzo tapado, previamente calcinado y enfriado, y se coloca en un horno de mufla eléctrico a la temperatura de $900 \pm 10^{\circ}\text{C}$. Después se saca del horno el crisol y se enfria en desecador. Por último se determina la pérdida de peso experimentada por el combustible en la incineración.	El tanto por ciento de materias volátiles se puede expresar referido a muestra seca y/o referido a muestra seca y sin cenizas UNE 32019.
Humedad	-	-	Ver ensayos generales.
Contenido en carbono fijo	-	-	El contenido en carbono fijo resulta de deducir de 100 la suma de los contenidos en volátiles, cenizas y humedad.

Otros datos analíticos importantes

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
Contenido en carbono	Determinación del contenido de carbono e hidrógeno.	Se prepara la muestra secándola al aire y se quema con oxígeno (seco y completamente libre de hidrógeno y anhídrido carbónico). Después se determina la cantidad en peso de CO ₂ producida en la combustión y a partir de ésta se calcula el contenido en carbono del combustible. Esta determinación se puede llevar a cabo adecuadamente con el semi-micrométodo de Pregl, con el método de Reihlen-Weinbrenner, o con el macro-método de Liebig.	Los combustibles ricos en carbonatos exigen una determinación especial del CO ₂ producido a partir de los carbonatos, para tenerlo en cuenta en el balance total de CO ₂ . El tanto por ciento de contenido en carbono se puede referir también a muestra exenta de agua y/o cenizas.
Valor calorífico o poder calorífico superior y potencia calorífica o poder calorífico inferior	Determinación del valor calorífico y de la potencia calorífica.	Se quema en una bomba calorimétrica una cantidad de combustible pesada al aire, la bomba está sumergida en el agua de un calorímetro, en cuyo termómetro se recoge la elevación de la temperatura inicial que proviene de la cesión del calor desarrollado en la combustión. Se hacen las correcciones necesarias	DIN 51721 El valor calorífico y la potencia calorífica se expresan en kcal/kg, siendo: 1 cal = 4,1868 J El valor calorífico y la potencia calorífica se pueden determinar a presión

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
		de la elevación de temperatura a causa de la transmisión del calor y se determina el valor calorífico del combustible teniendo en cuenta la capacidad calorífica o valor en agua del sistema calorimétrico, y las cantidades de calor producidas por la formación de ácidos (nitríco y sulfúrico) y por la combustión de algunos elementos auxiliares. Finalmente se determina la potencia calorífica teniendo en cuenta el calor de evaporación del agua formada y contenida en la muestra.	constante o a volumen constante, siendo su diferencia el equivalente en calor al trabajo de contracción. Como la bomba calorimétrica trabaja a volumen constante, este ensayo proporciona los datos analíticos a volumen constante.
			DIN 51900
Contenido en azufre	Determinación del azufre del carbón por el método ESCHKA	La muestra preparada y seca al aire se muele para que pase el tamiz 0,2 UNE 7050, y se quema juntamente con la mezcla Eschka (dos partes en peso de óxido de magnesio calcinado y puro y una parte en peso de carbonato sódico y potásico anhidro) en un horno eléctrico con atmósfera oxidante alcanzando 800°C de temperatura en una hora y manteniéndolo	El tanto por ciento de azufre determinado por este método, es el total no teniendo en cuenta la forma en que se encuentra el azufre en el combustible. UNE 32008.

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
		<p>la en esta temperatura hasta la combustión total de las partículas del crisol. Así se transforma todo el azufre contenido en sulfitos y sulfatos alcalinos. Los sulfitos se oxidan con bromo y los sulfatos se precipitan en forma de sulfato de bario que se calcinan y pesan.</p>	
<p>Contenidos de azufre en forma pirítica orgánica y de sulfatos.</p>	<p>Determinación de las formas de azufre en el carbón</p>	<p>El azufre en forma de sulfato se determina por extracción con ácido clorhídrico 5N y valorando el azufre en el extracto. El azufre pirítico se determina por extracción con ácido nítrico 2N (porque es insoluble en ácido clorhídrico diluído) indirectamente ya que se obtiene la cantidad de hierro combinado en estado pirítico y se calcula la cantidad de azufre combinado con este buzamiento.</p> <p>El azufre orgánico se determina deduciendo del tanto por ciento de azufre total (por el método ESCHKA) la</p>	<p>UNE 32009</p>

TABLA 8 (continuación)

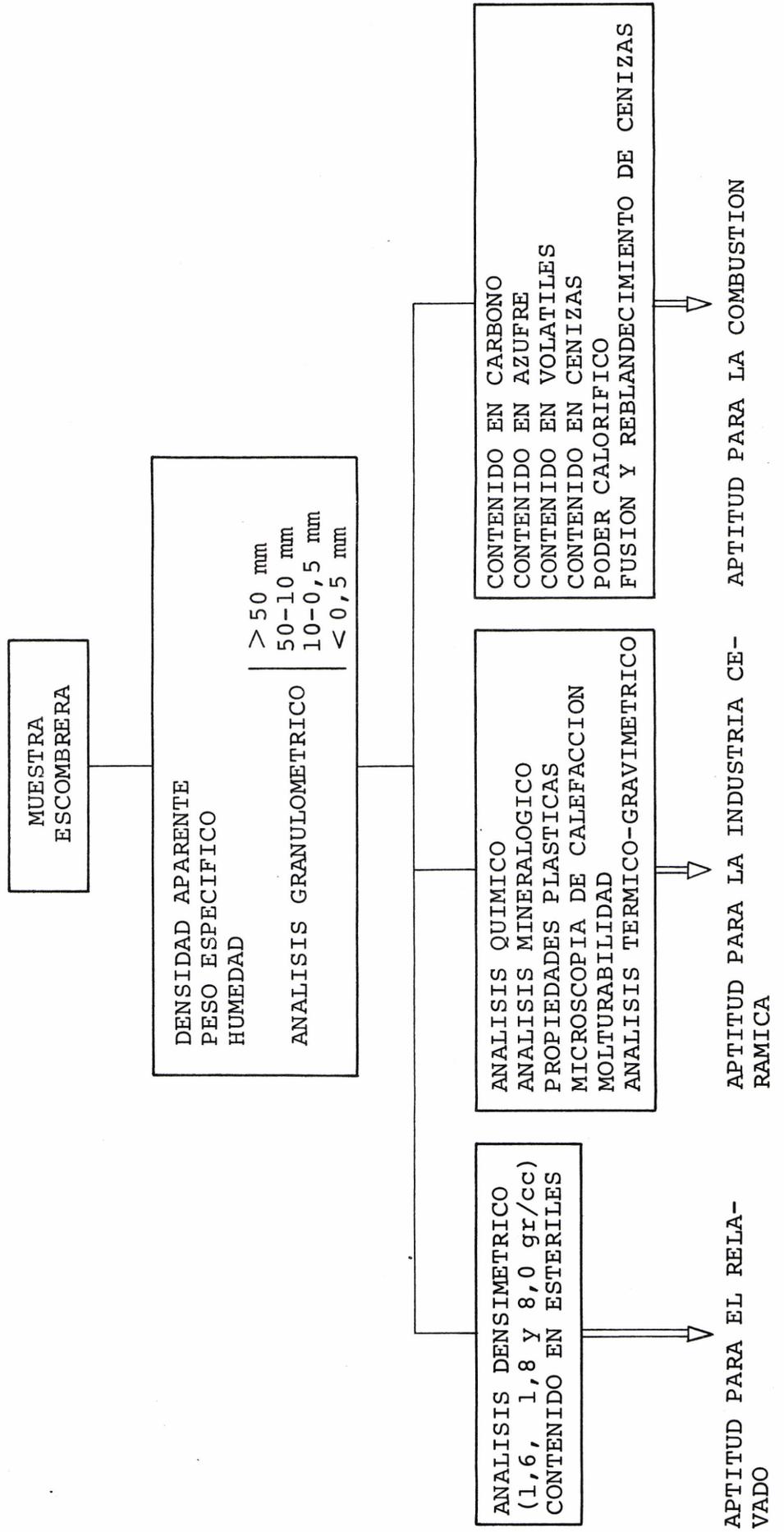
<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
		suma de los porcentajes de azufre pirítico y en forma de sulfato.	
Puntos de reblandecimiento y fusión de las cenizas	Método de los conos SEGER	Se aglomeran las cenizas con almidón en forma de conos y se disponen en un horno junto a 59 conos patrones (con puntos de reblandecimiento y fusión conocidos). Se anota la temperatura en que coincide la fusión de la muestra y la del cono patrón.	Este método es subjetivo y por tanto carece de exactitud.
-	Método BUNTE BAUM	La muestra se aglomera con dextrina en forma de cilindro, y se coloca éste entre dos pistones que ejercen presión. Al aumentar la temperatura el cilindro cede y mediante un sistema inscriptor guiado por los pistones se registra una curva sobre papel milimetrado.	La presión ejercida por los pistones sobre la muestra tiene un efecto indeseable en su reblandecimiento.
-	Método micro pirométrico de LEITZ	La muestra en forma de cubo o de cilindro de la misma altura, se obser	Actualmente es el método preferido y permite atmós

TABLA 8 (continuación)

<u>PROPIEDAD</u>	<u>ENSAYO</u>	<u>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO</u>	<u>OBSERVACIONES</u>
		<p>va y se reproduce fotográficamente des- tacada sobre un papel cuadrulado, a medida que va aumentando la temperatu- ra en un microscopio LEITZ. Cuando la arista superior deja de coincidir con una de las líneas horizontales del pa- pel se considera que se ha llegado al punto inicial de reblandecimiento. El redondeamiento de los vértices indica el reblandecimiento franco. El punto de fusión se obtiene cuando la muestra toma la forma casi esférica. Finalmente el punto de fluidez se al- canza cuando desaparece totalmente la forma inicial.</p>	<p>feras oxidantes, neutras o reductoras.</p>

TABLA 8 (continuación)

Cuadro resumen



7. MUESTREO DE ESCOMBRERAS DE CARBON

7.1. INTRODUCCION

A la hora de plantear la viabilidad del aprovechamiento de una escombrera de carbón, es preciso conocer una serie de características de los materiales que la constituyen. El conocimiento de estas características únicamente es posible mediante la realización de ensayos sobre muestras tomadas de la escombrera.

Como resulta obvio, la validez de los resultados obtenidos dependerá fuertemente de la fiabilidad del muestreo que se haya realizado.

El muestreo de una escombrera plantea problemas de distinta índole. Por una parte, nos encontramos con las dificultades propias del material a muestrear, de su distribución, granulometría, segregación, etc. Por otra, surgen las dificultades técnicas que conlleva la toma de muestras en una escombrera. Ambos aspectos van a ser tratados en este capítulo.

7.2. METODO DE MUESTREO

7.2.1. Introducción

Cuando se plantea el muestreo de los estériles de una mina de carbón, se pueden presentar dos situaciones:

- . Muestreo de los materiales según salen del lavadero.
- . Muestreo de la escombrera ya constituida.

El primer caso ha sido tratado ampliamente en numerosos estudios, pudiendo considerarse resuelto. Sin embargo, el segundo, ha sido objeto de una atención mucho más limitada, y en cualquier caso

los estudios nunca se han referido en concreto a las escombreras de carbón.

A pesar de su dificultad, en este estudio el problema que se ha planteado es el de muestrear escombreras ya constituidas, y , por lo tanto, será el que se afronte a continuación.

La bibliografía referente al muestreo de escombreras de carbón es prácticamente inexistente, habiéndose utilizado para el estudio del tema tres fuentes: Anteproyecto UNE 22150 (Combustibles sólidos y desmuestre de carbones), Método del muestreo duplicado (Visman y Aresco) y el Método del muestreo equiprobable (P. Gy).

Como se ha dicho, ninguno de ellos está pensado específicamente para las escombreras de carbón, sin embargo, introduciéndoles las oportunas correcciones, pueden ser válidos para el tema en cuestión.

La primera fase de todo muestreo consiste en definir el tamaño de la muestra que es necesario tomar para poder asegurar una determinada precisión. A su vez, si la muestra hay que descomponerla en una serie de elementos (incrementos), será necesario precisar el número de éstos.

Una escombrera de carbón puede ser considerada como un lote cualquiera de material granulado. Sin embargo, presenta una serie de peculiaridades que hacen que el muestreo sea notablemente más complicado que en otros materiales granulados. Entre otras, se pueden destacar:

- . Gran variedad de tamaños. En este sentido hay que señalar la presencia en la escombrera de grandes bloques procedentes de las labores de explotación, junto con finísimas partículas del tamaño de las arcillas, que proceden de los circuitos de finos

del lavadero y de la alteración de otras de mayor tamaño. Para la definición de la muestra que se necesita tomar, será de vital importancia el máximo tamaño de partícula presente, por lo cual este aspecto deberá ser objeto de algunas puntualizaciones.

- . Heterogeneidad de distribución. Hay que distinguir claramente entre la heterogeneidad de constitución, atribuible únicamente al hecho de que los fragmentos elementales tienen composiciones diferentes, y la heterogeneidad de distribución, que se manifiesta a una escala de volúmenes mayores, susceptibles de contener varios fragmentos. Esta heterogeneidad se origina en la escombrera como consecuencia de que los materiales tienen distintas densidades y, así mismo, diferentes tamaños, lo cual se traduce en una distribución de acuerdo con dichas características. Este tipo de heterogeneidad se conoce también con el nombre de segregación.
- . Localización de los materiales. Este aspecto se refiere al hecho de que puede darse el caso de que determinados materiales, como por ejemplo los estériles de mina, puedan ser vertidos en puntos concretos de la escombrera, y no de una forma indiscriminada como el resto de los materiales. Algo parecido podría ocurrir con los estériles finos del lavadero, los cuales, una vez drenados, pueden ser trasladados a la escombrera, a determinadas zonas que posteriormente son cubiertas por otros tipos de estériles.

Estos hechos pueden llevar a pensar en la necesidad de realizar un muestreo sistemático, que consistiría en determinar los puntos de toma de muestra de una forma dirigida, en base a la dis

tribución de los materiales presentes en la escombrera.

Sin embargo, llegar a este nivel de conocimiento de la estructura de la escombrera parece bastante improbable, pues los factores que hayan podido determinar su configuración final son enormemente imprevisibles. A la vista de estas circunstancias, el método de muestreo que parece ser más adecuado a las características de las escombreras de carbón es el aleatorio. En éste, los puntos de toma se determinarán de forma que todos los puntos de la escombrera tengan la misma probabilidad de ser elegidos como tales puntos de toma.

A continuación pasamos a exponer los tres posibles métodos de muestreo que se han considerado aplicables a las escombreras.

7.2.2. Método propuesto por el Anteproyecto UNE 22150 (33)

Este Anteproyecto no se refiere al muestreo de escombreras de carbón, sino al de carbones y lignitos duros. A pesar de ello, las bases en que se apoya son lo suficientemente amplias como para que pueda considerarse válido para muestrear escombreras de carbón.

Para que la muestra sea representativa de la escombrera de la que se extrajo, se recogerá un número definido de porciones de nominadas incrementos, distribuidas entre el total de la masa que se desea muestrear. Existen tres procedimientos para distribuir estos incrementos: muestreo aleatorio, sistemático y replicado.

7.2.2.1. Muestreo aleatorio

La varianza de la media de todas las muestras que podrían tomarse de la escombrera a muestrear, consistentes en N incrementos de la misma masa, viene dada por:

$$s^2 = \frac{1}{N} S_0^2 + \left(\frac{N-1}{N} \right) E$$

donde:

S_0^2 es la varianza de la población original, que se obtiene seleccionando aleatoriamente de la escombrera a muestrear un número n de incrementos de la misma masa. Cada uno de estos incrementos se prepara y analiza separadamente. Si el resultado del análisis del elemento i -ésimo es x_i , la varianza S_0^2 de la población original se estima de la ecuación:

$$s_0^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2 \right)$$

Para poder estimar S_0^2 de forma fiable, n ha de estar comprendido entre 30 y 100 (este número de incrementos podrá ser reajustado según las circunstancias).

E es la varianza del análisis y preparación de la muestra.

Si la precisión obtenida a un nivel de confianza del 95% se pretende que sea $\pm A$, la relación entre ésta y la varianza S^2 viene dada por:

$$A = 2\sqrt{S^2}$$

Esta precisión sería la diferencia (por exceso y defecto) existente entre el valor real de la propiedad que se esté midiendo y la media obtenida como resultado de los N ensayos efectuados con las N muestras. Por lo tanto, para alcanzar esta precisión, el número de incrementos necesario sería:

$$N = \frac{4 S_0^2}{A^2 - 4E}$$

Para deducir esta expresión se ha tomado:

$$\frac{N-1}{N} \approx 1$$

La precisión puede ser mejorada dispersando el efecto del muestreo sobre un mayor número de incrementos. Sin embargo, este número puede llegar a ser indebidamente alto e injustificado, a menos que los errores debidos a la preparación y análisis de la muestra puedan ser reducidos simultáneamente.

En el Anteproyecto UNE 22150 se propone tomar una precisión normalizada de referencia de un + 2% del valor absoluto del contenido en cenizas. Este valor se aplica para el caso de carbones con más de un 20% de cenizas, como podría ser el de las escombreras de carbón que aquí se trata de muestrear.

En esta misma Norma se supone que, muestreando en las condiciones de referencia, los valores que toma la varianza de la preparación y análisis de la muestra, en algunos casos son aproximadamente un quinto de la varianza de la media de la población original (S_0^2). Sin embargo, lo más frecuente será que cada ensayo tenga una varianza distinta.

7.2.2.2 Muestreo Sistemático.

En este caso, los incrementos se toman espaciados regularmente en la escombrera a muestrear de acuerdo con planes preconcebidos.

No existen procedimientos específicos para el cálculo de la varianza en un muestreo sistemático, por lo que es práctica usual aplicar los del aleatorio. Sin embargo, los errores reales cometidos suelen ser inferiores, por lo que la aplicación de las fórmulas del método aleatorio se traduce en una sobreestimación de los errores. Como consecuencia, el número de incrementos de

ducido es superior al necesario. Sin embargo, como estas sobre estimaciones no causan mayores problemas, es permisible que se empleen las relaciones del muestreo aleatorio para el sistemáti co.

Cuando es aplicable, el muestreo sistemático ofrece algunas ven tajas sobre el aleatorio, sobre todo las derivadas de una mayor sencillez en la definición de los puntos de toma de muestra. Sin embargo, para el caso concreto de las escombreras, el siste ma no parece ser viable, pues la definición de los puntos de toma se debería realizar en base al conocimiento de la distribu ción de los materiales, la cual, en un principio, es bastante difícil.

7.2.2.3 Muestreo replicado

En este caso, los puntos de toma de muestra se pueden definir tanto de forma aleatoria como sistemática. Consiste en agrupar un número determinado de incrementos en submuestras, con las cuales se procede a los análisis correspondientes.

Un caso particular de muestreo replicado lo contituye el dupli cado, que se analizará más adelante.

7.2.2.4 Mínima masa de incremento

Hasta ahora sólo se ha hablado del número de incrementos a tomar en un muestreo, sin hacer mención a su masa.

La mínima masa de incremento depende del tamaño de los trozos a muestrear. La masa de incremento ha de ser suficientemente grande como para asegurar que los trozos grandes no se excluyen, así como que en el incremento estén en la misma proporción que en la escombrera. El problema de tomar incrementos grandes es la mayor dificultad de su preparación y reducción para los ensa yos, aparte de las dificultades tecnológicas que se pudieran pre

sentar para su toma. En caso de que los incrementos tengan que ser grandes, su número no deberá ser reducido por ello.

El Anteproyecto UNE 22150 da las siguientes recomendaciones respecto al tamaño de los incrementos a tomar:

1. La mínima masa de incremento P kg se determina mediante la fórmula empírica:

$$P \text{ (kg)} = 0.06 D \text{ (mm)}$$

donde:

D es el mayor tamaño nominal (ancho de malla cuadrada tal que no haya más del 5% de rechazo al pasar la muestra a través de ella).

La mínima masa de incremento será de 10 kg.

2. El diámetro mínimo de la sonda empleada deberá ser 2,5 veces el mayor tamaño de partícula.

Así pues, el Anteproyecto UNE 22150 nos define el número de incrementos a tomar y la masa de cada uno. Para ello, será preciso realizar un análisis inicial cuyos resultados se tomarán como referencia en los cálculos posteriores.

7.2.3 Método del muestreo duplicado (34)

Es un procedimiento de muestreo aleatorio, en el cual cada incremento está constituido por una pareja de muestras: una grande y otra pequeña. El error de muestreo se determina a partir de cálculos hechos con datos obtenidos de estas parejas.

En este caso, el error total de muestreo se define como la su-

ma de un error debido al azar y un error de segregación, que se origina por el hecho de que los materiales de la escombrera no constituyen una mezcla perfecta. Uno y otro se cuantifican, respectivamente, mediante la varianza debida al azar y la de segregación.

La varianza debida al azar se determina a partir del valor medio de la propiedad que se trate de medir y del tamaño de la muestra.

La varianza de segregación es la originada por las desviaciones que resultan de la distribución no aleatoria de los materiales de la escombrera. En esta varianza no influye el tamaño de la muestra, únicamente depende del grado de segregación de los materiales.

La fórmula general que dá la varianza de una determinada propiedad que se desea medir a partir de una muestra de N incrementos y de peso total de W kg, es:

$$s^2 = \frac{A}{W} + \frac{B}{N} + E \quad (1)$$

donde:

A= varianza debida al azar de una muestra de un kilogramo.

B= varianza de segregación.

E= varianza de reducción y análisis de la muestra.

Esta fórmula permite calcular W y N mediante una precisión pre fijada (s^2). Para obtener los datos necesarios para aplicar la fórmula (1), es necesario proceder a un análisis previo siguiendo los siguientes puntos:

1. Procedimiento para realizar un muestreo duplicado con muestras pequeñas y grandes. Consiste en

tomar una serie de parejas de muestras de la escombrera. Cada pareja consta de una muestra (incremento) de peso relativamente pequeño, W_1 kg (alrededor de diez veces el peso de la partícula más grande), y de otra cuyo peso sea de unas 100 a 2000 veces el peso de las partículas de tamaño medio, W_2 kg.

- Determinación de la varianza debida al azar (A) de una muestra de 1 Kg. Se pesa cada muestra, y se analiza la propiedad cuya varianza se trata de calcular. Para las dos series de muestras (las grandes y pequeñas) se preparan tablas de datos semejantes a la adjunta, que se refiere al contenido en cenizas:

Muestra N°	Peso de la muestra en Kg.	Contenido en cenizas % (Pi)	(Cont. cenizas) ² (Pi) ²
1	W_1	P_1	P_1^2
2	W_2	P_2	P_2^2
3	W_3	P_3	P_3^2
⋮	⋮	⋮	⋮
n	W_n	P_n	P_n^2

Media \bar{W}

La varianza debida al azar de una muestra de 1 kg viene dada por:

$$A = \frac{\bar{W}_1 \bar{W}_2 (S_1^2 - S_2^2)}{(\bar{W}_2 - \bar{W}_1)}$$

donde:

$$S^2 = \frac{\sum P_i^2 - \frac{(\sum P_i)^2}{n}}{n - 1}$$

n= número de muestras.

\bar{W}_1 es la media de los pesos de las muestras pequeñas.

\bar{W}_2 es la media de los pesos de las muestras grandes.

S_1^2 es la varianza de la media de las muestras pequeñas.

S_2^2 es la varianza de la media de las muestras grandes.

3. Determinación de la varianza de segregación (B).
Se calcula a partir de la fórmula

$$B = S_2^2 - \frac{A}{\bar{W}_2}$$

4. Varianza de reducción y análisis (E). Esta varianza no depende directamente de las dos series de muestras, sino de la preparación y el análisis de la muestra total recogida de la escombrera. Si para su estudio se recogen submuestras de peso W' de la muestra total y se someten a un proceso de conminución para reducir el tamaño de los granos, la varianza debida al azar varía según la expresión:

$$A' = A \left(\frac{D'}{D} \right)^3$$

donde:

A' es la varianza de la submuestra triturada.

A es la varianza de la muestra total (sin triturar).

$(D'/D)^3$ es la relación entre los volúmenes medios de las partículas triturada y sin triturar.

Si posteriormente las partículas se someten a otra reducción de tamaño, la varianza A'' vendrá dada por:

$$A'' = A \left(\frac{D''}{D} \right)^3$$

La varianza debida a todo el proceso de reducción y análisis será:

$$E = 2 \left(\frac{A'}{W'} + \frac{A''}{W''} + \dots \right) + 0.01$$

El multiplicar por 2 tiene como finalidad disponer de un factor de seguridad, el cual se ha fijado en base a resultados experimentales, y que se necesita para compensar las imperfecciones de la mezcla y la presencia de sobretriturados.

El término 0,01 es la varianza debida al análisis y, en este caso, corresponde a la determinación del contenido en cenizas. Cada tipo de análisis tendrá una varianza dada.

Una vez conocidos A, B y E , y fijado S^2 por la confianza con que se pretenda realizar el muestreo, se puede calcular el peso de la muestra W y el número de incrementos N a partir de la ecuación (1).

Se obtendrá una relación entre W y N, que permitirá al muestreador regularlos según las necesidades que plantea cada situación particular.

Lo normal es que E no tenga que ser considerado debido a que los valores que toma son muy pequeños en relación con W y N, por lo que se suele considerar como un factor de seguridad.

Entre otros, este método es válido, para la realización de ensayos de contenido en cenizas, flota-hunde y granulométricos, todos ellos necesarios para el estudio de escombreras de carbón.

En cuanto a la determinación de los puntos de muestreo, si se tiene una idea de la posible distribución de los materiales de la escombrera, habrá que situarlos teniéndola en cuenta. Sin embargo, lo más normal será que el nivel de conocimientos de esta distribución sea bastante bajo, por lo que se aconseja como método de localización de los puntos de toma de muestra, el del azar. La forma de proceder se describe más adelante.

7.2.4. Método del muestreo equiprobable (35)

Este método de muestreo no se puede llevar a la práctica de una forma estricta, sin embargo, si se adoptan ciertas suposiciones sí puede ser utilizado. En lo que se refiere a la determinación de los puntos de toma de muestra, en el muestreo equiprobable se hace por el procedimiento aleatorio.

Un medio continuo se dice que es heterogéneo cuando los diferentes elementos en que se puede dividir tienen composición distinta. Tanto la teoría como la experiencia han demostrado que los errores que se pueden cometer en un muestreo, tienen por origen profundo directo o indirecto la heterogeneidad del lote muestreado.

El muestreo de un lote L (escombrera) de n fragmentos se dice

que es equiprobable, cuando las C_n^P combinaciones posibles de P fragmentos tienen la misma probabilidad de ser utilizadas para constituir la muestra.

A partir de la condición de equiprobabilidad, e introduciendo diversos parámetros relativos al material a muestrear, P. Gy ha deducido la siguiente expresión para la varianza del error asociado a la toma de muestra:

$$s^2 = \left(\frac{1}{W} - \frac{1}{M} \right) C d^3 \quad (2)$$

donde:

- s^2 es la varianza del error asociado a la toma de la muestra.
- W es la masa de la muestra
- M es la masa de la escombrera
- C es la constante de muestreo del material, que se definirá más adelante.
- d es la dimensión de los fragmentos más gruesos a muestrear.

La masa de la escombrera será generalmente lo suficientemente grande como para poder despreciar el término $\frac{1}{M}$.

La constante de muestreo C se define mediante la expresión:

$$C = f . c . g . l .$$

donde:

- .f es el parámetro de forma, que, a efectos prácticos, se puede considerar constante e igual a 0.5.
- .c es el parámetro medio de constitución mineralógica, que viene dado por la expresión:

$$c = \frac{1-a}{a} [(1-a) \delta_1 + a \delta_2]$$

donde:

- a es el contenido medio en carbón de la escombrera (valor decimal).
- δ_1 es la densidad media del estéril.
- δ_2 es la densidad media del carbón.
- .g es el parámetro de distribución granulométrica. Se tomará como 0,25, siempre que la granulometría del material se extienda en más de seis módulos AFNOR (seis tamices consecutivos tales que la diferencia entre la abertura de malla de dos consecutivos es de $\sqrt[10]{10}$ micras). En caso contrario, es preciso recurrir a tablas correctoras.
- .l es el parámetro de liberación, cuyo valor oscila entre cero (carbón perfectamente homogéneo) y uno (carbón perfectamente liberado). Se calcula mediante ensayos granulodensimétricos en los que se determina la distribución de densidades en cada clase granulométrica. El modo de proceder consiste en calcular una tabla de valores semejante a la siguiente:

DIMENSION (d_α) DENSIDAD (δ_β)		entre	entre	entre	entre	entre	inferior
		d_1 y d_2 mm	d_2 y d_3 mm	d_3 y d_4 mm	d_4 y d_5 mm	d_5 y d_6 mm	a d_6
Inferior a δ_1 gr/cc	$\frac{M_{\alpha\beta}}{M_\alpha}$						
	$a_{\alpha\beta}$						
entre δ_2 y δ_1 gr/cc	$\frac{M_{\alpha\beta}}{M_\alpha}$						
	$a_{\alpha\beta}$						
entre δ_3 y δ_2 gr/cc	$\frac{M_{\alpha\beta}}{M_\alpha}$						
	$a_{\alpha\beta}$						
entre δ_4 y δ_3 gr/cc	$\frac{M_{\alpha\beta}}{M_\alpha}$						
	$a_{\alpha\beta}$						
Superior a δ_4 gr/cc	$\frac{M_{\alpha\beta}}{M_\alpha}$						
	$a_{\alpha\beta}$						

$$\sum_{\beta} M_{\alpha\beta} = M_\alpha.$$

donde, $a_{\alpha\beta}$ son los contenidos en carbón de cada fracción granulométrica y clase densimétrica. Con los datos de la tabla se calcula el parámetro H mediante la expresión:

$$H = \frac{\sum_{\alpha} d_{\alpha}^3 \frac{M_{\alpha}}{M} \sum_{\beta} \frac{M_{\alpha\beta}}{M_{\alpha}} \left(\frac{a_{\alpha\beta} - a}{a} \right)^2 \delta_{\beta}}{\sum_{\alpha} d_{\alpha}^3 \frac{M_{\alpha}}{M}}$$

donde:

$$d_{\alpha}^3 = \frac{1}{2} (d_{\alpha-1}^3 + d_{\alpha}^3)$$

a es la media de los contenidos en carbón.

M es la masa de la muestra analizada.

$M_{\alpha\beta}$ es la masa de las distintas clases densimétricas de cada fracción granulométrica.

d_{α} son los distintos tamaños de corte

d_{ρ} son las distintas densidades de corte.

El parámetro de liberación se calcula a partir de H y del parámetro medio de constitución mineralógica mediante la expresión:

$$l = \frac{H}{c}$$

Otro procedimiento consiste en tomar una fracción granulométrica de masa M_{α} , comprendida entre dos tamices consecutivos de una serie, con n_{α} fragmentos (superior a 500). De esta fracción se extrae al azar y uno a uno una muestra de n'_{α} fragmentos y masa M'_{α} . El contenido real en carbón de esta muestra se dispersará con una varianza relativa igual a:

$$s^2 = \left(\frac{1}{M'_{\alpha}} - \frac{1}{M_{\alpha}} \right) f. g. l_{\alpha} . c. d^3$$

de donde se puede despejar l_{α} si se conoce el resto de las variables. Este l_{α} será el correspondiente a la fracción granulométrica α , y podrá tomarse como parámetro de liberación de la escombrera si α es la fracción granulométrica más gruesa.

Una vez calculada la constante de muestreo, podremos calcular la masa de la muestra que haga que ésta sea representativa de

la escombrera mediante:

$$W = \frac{C \cdot d^3}{S^2} \quad (3)$$

donde S^2 vendrá fijado por el error de muestreo tolerado y, por lo tanto, constituye un dato del problema.

Todo exceso sobre W se traducirá en un descenso del error cometido, y viceversa.

7.2.4.1 Posibilidades de realización de un muestreo equiprobable.

Desde un punto de vista estricto, únicamente será posible realizar un muestreo equiprobable si se cumple una de las dos condiciones siguientes:

- . La muestra se extrae fragmento a fragmento, de forma que cada uno de ellos es determinado al azar. Para proceder de éste modo sería preciso, o bien realizar un sorteo entre todos los fragmentos que constituyen el lote, o bien emplear tablas de números aleatorios para su determinación.
- . El lote ha sido sometido a una serie de acontecimientos de tipo aleatorio, y se puede considerar que la distribución espacial de los fragmentos es homogénea y resultado del azar, lo que permite tomar muestras que gozan de las mismas propiedades que las equiprobables sin necesidad de tener que tomar la muestra fragmento a fragmento.

Veamos la posibilidad que se pueda satisfacer alguna de estas dos condiciones en el muestreo de escombreras de carbón. La primera, es prácticamente imposible satisfacerla, pues

tomar muestras, cuyo tamaño tendrá un orden de magnitud de cientos de kilogramos, fragmento a fragmento, no parece viable. Por lo que se refiere a la segunda condición, no se puede asegurar que una escombrera tenga una distribución espacial homogénea, ya que los materiales se distribuyen, por una parte, como consecuencia de la acción de la gravedad, por lo que se ve afectada por la densidad y tamaño de las partículas, y por otra, según zonas de vertido que dependen de condicionantes difíciles de prever.

Así pues, la posibilidad de realizar un muestreo estrictamente equiprobable parece bastante problemática.

Una escombrera de carbón se puede considerar como un lote heterogéneo, no manipulable y con una ley de distribución de los materiales desconocida, es decir, que la distribución de los materiales ni se conoce ni se puede actuar sobre ella. En tal caso, el método de muestreo más aconsejable es el del azar.

Un muestreo se dice al azar, cuando el conjunto de circunstancias que llevan a la designación, una por una, de las unidades de muestreo es demasiado complicado como para ser previsible, y cuando es independiente de las propiedades del o de los fragmentos que constituyen la muestra designada. De esta ignorancia y de esta independencia, se deduce el postulado de que la probabilidad de designación es la misma para todas las unidades presentes en el momento del muestreo.

La forma más segura de realizar un muestreo al azar es mediante procedimientos del tipo lotería, ruleta, etc, o bien utilizando tablas de números aleatorios.

Existen dos maneras de realizar un muestreo al azar:

- . Muestreo simple al azar: consiste en que los fragmentos destinados a constituir la muestra son ex-

traídos uno a uno al azar. Como ya se comentó anteriormente, no es operativo el realizar un muestreo de este tipo.

- . Muestreo agrupado al azar: se determinan puntos de muestreo al azar, con una tabla de números aleatorios, por ejemplo fijando sus coordenadas. Una vez determinados los puntos, se toma un cierto volumen de muestra en cada uno de ellos. Este muestreo se puede considerar equiprobable en la medida en que los elementos tengan un volumen tal que den cabida a cualquier partícula del lote, indiferentemente de su tamaño, así como que la distribución de los fragmentos en cada elemento sea equiprobable, lo cual se conseguirá tanto mejor cuanto menor sea el volumen del elemento.

El procedimiento de muestreo agrupado al azar parece ser el más adecuado para el desmuestre de escombreras de carbón. Como se puede deducir de su definición, el factor crítico que determina su equiprobabilidad o no es el tamaño de los elementos.

El volumen de los elementos, básicamente, viene determinado por dos factores:

- . Ha de ser tal que permita recoger las mayores partículas presentes en la escombrera. Las muestras generalmente serán de forma cilíndrica y para cumplir la condición anterior su diámetro deberá ser aproximadamente el doble de la dimensión de las partículas más grandes.
- . Existe una serie de limitaciones tecnológicas que no permiten superar determinados tamaños de muestra. Este hecho será comentado con más amplitud en el apartado de toma de muestras.

En vista del carácter crítico del volumen de los elementos que han de constituir la muestra, la postura más coherente, antes de iniciar el muestreo, será decidir el volumen del tomamuestras más adecuado a la escombrera objeto del estudio. Una vez hecho ésto, ya quedará fijado el volumen de los elementos, el cual se mantendrá constante durante toda la fase de muestreo. A partir de este momento, vamos a llamar P el peso de cada elemento.

7.2.4.2 Cálculo del número de elementos de un muestreo agrupado al azar

El error de muestreo cometido al realizar un muestreo agrupado al azar, se puede estimar del siguiente modo:

Supongamos que la muestra se compone de N elementos, cada uno de los cuales tiene una masa P, y que la escombrera se puede considerar constituida por R elementos análogos a los que constituyen la muestra. La varianza de la media de la propiedad de la escombrera S^2 (ag.) que se muestre, que surge como consecuencia de tomar una sola de todas las posibles combinaciones de N elementos que se pueden realizar con los R de la escombrera, viene dada por:

$$S^2 (ag.) = \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{R} \right) \frac{R}{R-1} S^2 (ak.)$$

donde:

S^2 (ak.) es la varianza de los R valores de la propiedad que se muestrea, que pueden ser medidos en la escombrera.

Si se compara el volumen total de la escombrera (que puede ser del orden de millones de metros cúbicos), con el de cada elemento, se deduce que los términos de la forma $\frac{1}{R}$ pueden despreciarse, por lo que la ecuación anterior queda:

$$S^2(\sigma g.) = \frac{1}{N} S^2(\sigma k.) \quad (4)$$

En la práctica, se puede estimar $S^2(\sigma k.)$ analizando los N elementos tomados para constituir la muestra (a condición de que N sea lo suficientemente grande para permitir un cálculo de la varianza). De este modo:

$$S^2(\sigma k.) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\sigma g_j - \sigma g.)^2 \quad (5)$$

donde:

σg_j es el valor de la propiedad que se muestrea, calculado en cada elemento que se ha tomado.

$\sigma g.$ es la media de los valores de la propiedad que se muestrea en todos los elementos que constituyen la muestra.

Con las ecuaciones (4) y (5), se puede expresar la varianza del error de ensayo de la forma:

$$S^2(\sigma g.) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (\sigma g_j - \sigma g.)^2 \quad (6)$$

En ésta ecuación se tiene que:

$S^2(\sigma g.)$ viene fijada por el intervalo de confianza que se pretenda otorgar al ensayo. Por lo tanto es un dato de partida.

$\sum_{j=1}^N (\sigma g_j - \sigma g.)^2$ se calculará una vez que se haya realizado el muestreo.

$\frac{1}{N(N-1)}$ depende del número N de elementos que se tomen. Veamos a continuación la forma de calcularlos.

Como se vió en su momento, la varianza del error de ensayo en el caso de un muestreo equiprobable, viene dada por la ecuación:

$$S^2 = \frac{C \cdot d^3}{W}$$

de donde se puede calcular la masa total de la muestra W , simplemente despejando:

$$W = \frac{C \cdot d^3}{S^2}$$

La varianza S^2 es la que se fija previamente al muestreo, por lo tanto:

$$S^2 = S^2(\sigma g.)$$

Así pues, si se ha determinado el tipo de tomamuestras que se va a utilizar y, por lo tanto, se puede conocer el peso P de cada elemento, el número de elementos de que constará la muestra agrupada al azar será:

$$N = \frac{W}{P} = \frac{C \cdot d^3}{P \cdot S^2}$$

Con este valor de N se podrá aplicar la ecuación (6). Si se verifica, el tamaño de la muestra será el adecuado. En el caso de que:

$$\frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (\sigma g_j - \sigma g.)^2 > S^2(\sigma g.)$$

será preciso incrementar el número de elementos para reducir el error de muestreo hasta el límite fijado por S^2 .

Por lo tanto, tras ésto, queda determinado el número de elementos a tomar para asegurar que el error de muestreo cometido es inferior a uno dado. A continuación, hay que situar los puntos en los que se deben tomar las muestras.

7.2.5 Determinación de los puntos de muestreo

Para las condiciones que se dan en la escombrera, el método de muestreo que más se aproxima al caso equiprobable es aquel según el cual los puntos de desmuestre se determinan al azar.

Para determinar las coordenadas de los puntos de muestreo, se utilizará una tabla de números aleatorios, que se puede encontrar en cualquier tratado de Estadística.

La forma de proceder consiste en trazar el paralelepípedo envolvente de la escombrera. Según las dimensiones de este paralelepípedo, se pueden ir determinando, en la tabla de números aleatorios, tandas de tres cifras, que corresponden: la primera a la abcisa del punto de toma de muestra, la segunda a la ordenada, y la tercera a la cota. Cuando la cifra obtenida de la tabla corresponda a un punto situado fuera del paralelepípedo, no se tomará en consideración y se pasará a la siguiente cifra.

7.2.6 Comparación de los tres métodos de muestreo

De los tres métodos de muestreo propuestos, consideramos que el del muestreo duplicado es el más adecuado para el caso de las escombreras de carbón.

El muestreo equiprobable es el que presenta una base teórica más desarrollada, sin embargo, la determinación de la constante de muestreo de la ecuación (1) puede resultar bastante engorrosa y, en cualquier caso, siempre introduce un factor de incertidumbre en los cálculos. Por otra parte, en la ecuación (3), el número R de posibles elementos es tremendamente elevado, por lo que, en términos prácticos, el muestreo podría considerarse

que se está realizando en una población infinita, mientras que la base teórica de los razonamientos aplicados se refiere a ca sos finitos.

Por lo que se refiere el Anteproyecto UNE 22150, la fórmula que se emplea para el cálculo del número de incrementos es análoga a la utilizada en el caso del muestreo equiprobable. Sin embar go, el tamaño de la muestra se calcula en base a unas expresio nes ("Mínima masa de incremento") que dan unos pesos de muestra ciertamente bajos para el volumen de materiales que se trata de muestrear en una escombrera.

En cuanto al método del muestreo duplicado, es el que presenta unas bases teóricas más evidentes, a la vez que define perfecta mente el sistema operativo para llevar a cabo el cálculo del peso de la muestra y el número de incrementos necesario. Debi do a ésto, recomendamos adoptar como método de muestreo de las escombreras de carbón el "Método del muestreo duplicado", tal como ha sido descrito por Visman y Aresco (34).

7.3 TECNICAS PARA LLEVAR A CABO LA TOMA DE MUESTRAS

7.3.1. Introducción

Como se vió en el apartado anterior, el método de muestreo más aconsejable para las características de las escombreras de car bón es el aleatorio. Con este procedimiento, cualquier punto de la escombrera puede ser elegido para tomar en él un elemen to de la muestra. Así pues, habrá que disponer de sistemas de toma que permitan acceder a todas las zonas de la escombrera. La única técnica que puede cumplir este requisito es la de los sondeos,

Los puntos críticos a la hora de realizar una toma de muestras en una escombrera de carbón son:

- Granulometría de las partículas. Está claro que con las técnicas de sondeos resulta imposible recuperar todos los tamaños presentes en la escombrera. Sin embargo, la proporción de fragmentos grandes, por ejemplo superiores a 75-100 mm, suele ser muy baja respecto al volumen total de la escombrera. Las granulometrías de mayor tamaño pueden proceder de las labores de interior o del lavadero. En todas las minas en que se empleen métodos de explotación con relleno, el estéril producido en el avance de las galerías se emplea para rellenar los tajos, por lo que a la escombrera se vierten unas cantidades muy pequeñas o nulas de tales materiales. Por otra parte, los sistemas de lavado suelen realizar una fase de precribado y trituración a 50-75 mm, por lo que una buena proporción del material que vaya a parar a la escombrera ya será inferior a este tamaño. Por último, existe una razón de tipo práctico que hace que el recuperar o no los tamaños gruesos no tenga excesiva importancia. Esta es la siguiente: como se sabe, los ensayos granulométricos son necesarios a la hora de plantear el posible relavado de la escombrera. Pues bien, la experiencia ha demostrado que en los tamaños de grano superiores a 50 mm, el carbón presente es muy escaso, cuando no nulo. Por lo tanto, el introducir en los circuitos de tratamiento de centrales eléctricas, lavaderos o fábricas de ladrillos a dichos granos, no supone ninguna ventaja en cuanto a aportación de energía. Debido a ésto, lo más normal será efectuar un precibado a 50 mm del material de la escombrera, no sometiendo los tamaños superiores al resto del tratamiento. En definitiva, únicamente la granulometría inferior a 50 mm tiene importancia de cara a las aplica-

ciones de los estériles del carbón con fines ener
géticos.

- . Finalidad de la muestra. Este es un aspecto que determina el estado en el que deberá ser tomada la muestra y, por lo tanto, el procedimiento empleado para llevar a cabo dicha toma. Si la muestra va a ser utilizada para la realización de ensayos gra
nulométricos, está claro que el material que se extraiga de la escombrera se ha de encontrar lo me
nos degradado posible, por lo que no se podrán em-
plear procedimientos de toma de muestras que impli-
quen una disgregación del material. Si la utili-
dad que se le piensa dar a la muestra es la deter-
minación, por ejemplo, de la composición química,
no importa que el material se encuentre triturado
pues, entre otros, los análisis de éste tipo con-
llevan una fina molidenda del material a analizar.

- . Representatividad de la muestra. Como se ha vis-
to, la forma de determinar los puntos de toma es
al azar, pues bien, la muestra deberá corresponder
al punto elegido y no a ningún otro. Esto implica
el que se tengan que adoptar especiales precaucio-
nes para evitar, cuando se toma una muestra a una
cierta profundidad, que se mezclen los materiales
correspondientes a distintas alturas. Como conse-
cuencia de esto, en gran número de casos habrá que
proceder a entubar los pozos de donde se extraen
las muestras.

De una forma general, existen dos grandes grupos de procedimien-
tos para llevar a cabo la toma de muestras: calicatas y sondeos.

7.3.2. Calicatas

Este procedimiento de toma de muestras consiste en abrir zanjas

de las que se pueden extraer los materiales prácticamente inalterados.

La forma más económica de realizarlas es mediante el empleo de retroexcavadoras.

Pese a poder considerarse como el método de toma de muestras más perfecto, presenta una serie de inconvenientes que limitan tremendamente su utilización. Entre éstos, se pueden citar:

- . Las retroexcavadoras son máquinas muy pesadas, por lo que su movimiento por la escombrera puede llegar a ser peligroso debido a las inestabilidades que ésta lleva asociadas.
- . Las máximas profundidades de zanja son del orden de unos metros, por lo que en escombreras con decenas de metros de altura, únicamente podrían muestrearse zonas muy superficiales. Para poder realizar zanjas más profundas es preciso remover grandes cantidades de materiales, lo que hace al procedimiento impracticable.

A pesar de sus inconvenientes, la realización de calicatas es el método idóneo para las fases previas del muestreo. Estas calicatas se realizarán en diferentes puntos de la escombrera que no planteen problemas de acceso para que la operación sea lo más económica y rápida posible.

La información a obtener de la inspección visual de estas calicatas se referirá a: granulometría más probable de la escombrera, posibles combustiones que se hayan podido producir, tipo de estéril y una idea sobre el posible contenido en carbón de la escombrera. Además servirán para obtener el material que se precisa para realizar los ensayos previos al muestreo definitivo.

7.3.3. Sondeos

Aunque es un procedimiento de toma de muestras bastante caro, es el único que permite acceder de una forma viable a cualquier punto de la escombrera. La gran diferencia, respecto a las calicatas, estriba en que los materiales, en mayor o menor grado, siempre sufren alteraciones.

A la hora de ejecutar sondeos, se pueden plantear dos situaciones: que la muestra deba mantener su granulometría primitiva, o que pueda ser empleada aunque haya sido triturada. Según un caso u otro, se deberán utilizar técnicas diferentes.

Los métodos de sondeo más adecuados para el trabajo en escombreras son:

7.3.3.1 Perforación con cable- Método Pensilvaniense

Es un procedimiento de perforación a percusión, en el cual un trépano se deja caer de forma repetida y continua sobre el fondo del sondeo. Esta forma de sondear permite realizar sondeos de gran diámetro en los que se puede introducir tubería.

A medida que el trépano golpea el fondo del pozo, va avanzando. Cuando ha profundizado una cierta cantidad, se introduce una cuchara y se extraen los detritus formados en el fondo en forma de lodo. Estos detritus constituirán la muestra para el estudio de la escombrera.

Generalmente, las paredes del pozo van a ser muy inestables, por lo que puede ser necesario llevarlo entubado hasta muy cerca del fondo. Con ésto se evitará, por una parte, que se derrumbe el sondeo y quede atrapado el trépano, y por otra, que la muestra se contamine con materiales de zonas superiores.

Con este método de perforación se obtienen muestras trituradas,

que se pueden utilizar para la determinación del contenido en carbón o para los análisis de los materiales de la escombrera. Sin embargo, estas muestras no sirven para realizar análisis granulométricos ni de humedad, ya que el sondeo se suele hacer con agua, por lo que al final el pozo puede quedar lleno del agua de perforación o de la proveniente de la escombrera. Es un método lento, cuya única ventaja podría ser el permitir realizar sondeos de gran diámetro (se puede llegar a 400 mm), los cuales no son de gran valor para el desmuestre de escombreras de carbón.

7.3.3.2. Perforación de hélice

Para la perforación de materiales poco consolidados es especialmente adecuado el empleo de barrenas helicoidales, pues éstas compactan las paredes del sondeo. Además, si se utilizan helicoidales huecas, se pueden tomar muestras por su interior, haciendo la barrena de revestimiento (Fig. 29).

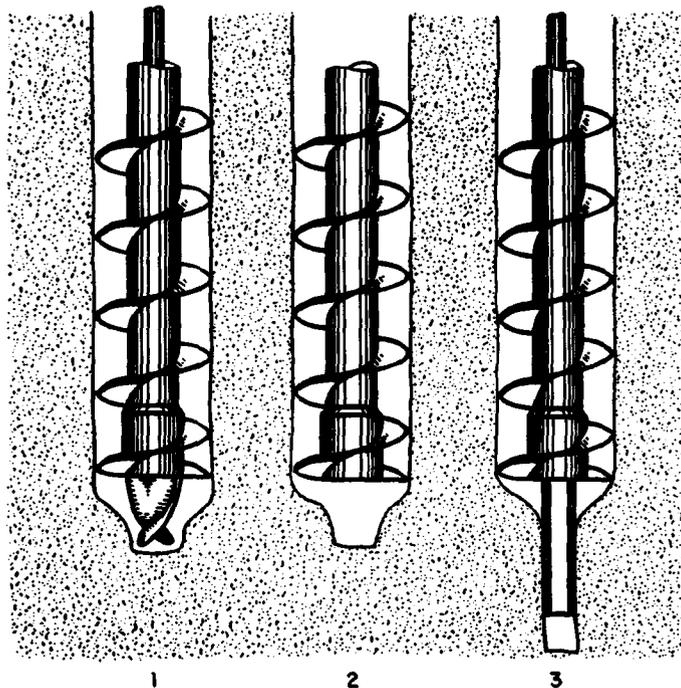
Existen dos tipos de barrenas helicoidales: las barrenas con cabeza helicoidal solamente, que se emplean para grandes diámetros (203 a 609 mm), y barrenas helicoidales continuas, que constan de una serie de barrenas que se van empalmando sucesivamente.

Para muestrear escombreras, lo más adecuado es utilizar barrenas continuas, que permiten alcanzar profundidades de más de 30 m.

La muestra que se obtiene de la barrena helicoidal se encuentra alterada, pero en grado mucho menor que con el procedimiento de la cuchara, pudiéndose además realizar tomas periódicas de muestras inalteradas descendiendo por el interior del tren de barrenas un tomamuestras o tubo sacatestigos (Fig. 29).

En Estill County, Kentucky, se han realizado muestreos de escombreras de carbón antiguas utilizando la perforación helicoidal.

- 1.- PERFORACION CON LA BARRENA
- 2.- EXTRACCION DEL CUERPO CENTRAL
- 3.- TOMA DE MUESTRAS



EXTRACCION DE MUESTRAS CON EL EMPLEO DE
BARRENAS HELICOIDALES DE EJE HUECO

FIGURA 29

dal (21), habiéndose obtenido unos resultados muy positivos.

La principal limitación de este método estriba en el hecho de su incapacidad para superar los posibles bloques de roca que pueden aparecer en el sondeo.

7.3.3.3. Sondeo a rotación con obtención de testigo

Es el método más adecuado para la toma de muestras en escombreras de carbón. Por una parte, permite el empleo de máquinas muy ligeras, lo que es de gran importancia a la hora de desenvolverse sobre la escombrera. A la vez, estas máquinas se pueden adaptar a otros sistemas de perforación que empleen otros útiles, como triconos, con lo cual se podrá avanzar de una forma rápida hasta el punto de toma sin extraer testigos; alcanzado este punto, se introduce el tubo sacatestigos y se obtiene la muestra.

En cuanto al diámetro del testigo a extraer, normalmente interesará que sea superior o igual a 100 mm, que se puede considerar una cifra adecuada para recuperar las partículas de 50 mm. Como se recordará, se considera que en las granulometrías inferiores a 50 mm es en las que será más probable la presencia de carbón.

Por lo que se refiere al útil de perforación, debido a la naturaleza de los materiales presentes en la escombrera, lo más aconsejable parece ser el empleo de coronas de Widia.

La forma de llevar a la práctica el muestreo duplicado cuando se realiza una perforación con testigo, es la siguiente: si el volumen del tubo sacatestigos es suficiente para que de él se pueda obtener una pareja de muestras (una grande y otra pequeña según el apartado 7.2.3), se tomará la más pequeña, que será del orden de 2,5 kg, de un extremo del testigo, mientras que el resto del testigo se utilizará para la muestra grande. De esta forma, cada vez que se extraiga el tubo sacatesti

gos lleno de material, se podrá aprovechar para obtener una pa
reja de muestras. En el caso de que en una extracción no se
recupere el material suficiente para la muestra, no hay ningún
problema porque se puede realizar otra maniobra.

Una vez que se inicia un sondeo, se puede aprovechar para tomar,
no únicamente las muestras estrictamente necesarias, sino extraer
algún que otro testigo en exceso de cara a su almacenamiento pa
ra posteriores análisis que pudieran hacer falta.

Así pues, recomendamos los sondeos a rotación con extracción
de testigo de 100 mm de diámetro, para el estudio de las es-
combreras de carbón. Lógicamente, si es factible el empleo
de diámetros superiores, se obtendrá una mayor información sobre
los materiales que constituyen la escombrera. En el caso de que
la recuperación del testigo sea difícil, se puede utilizar aire
como fluido de perforación. La principal limitación al empleo
del aire es la presencia de agua, que obliga a utilizar espu-
mantes y, si la cantidad llega a ser importante, puede hacer
inviable su empleo.

Si se utilizan baterías de 100 mm de diámetro y 3 m de longitud
y se supone una recuperación del 80%, el volumen de muestra
que podría obtenerse en una maniobra es de 0.02 m^3 , lo que su
pone un peso aproximado de 49 kg. El máximo tamaño de partícu
la que normalmente se podrá recuperar con un sondeo de 100mm
es de 75 mm, por lo que el peso W_1 del "Muestreo duplicado" se
rá de unos 6 kg. Si se supone un tamaño medio de partícula de
20 mm, el peso W_2 será de unos 21 kg. Así pues, con los 49 kg
que se pueden extraer en una maniobra se tiene material de sobra
para las dos muestras W_1 y W_2 .

7.3.3.4 Sondeos con circulación inversa

La circulación inversa consiste en hacer que el fluido de per-
foración descienda por el espacio anular existente entre las

paredes del sondeo y el tren de perforación y suba por el interior del varillaje.

Los ripios de la perforación ascienden por el interior de las varillas hasta la superficie. Debido a ésto las varillas han de tener un diámetro interior muy grande.

Este procedimiento permite perforar con gran rapidez, llegando a alcanzarse velocidades cinco veces mayores que las de los métodos convencionales. Además, el testigo se obtiene menos alterado, pues está menos tiempo en contacto con el agua. Aún así, la humedad del material quedaría totalmente alterada, respecto a la original.

Por lo que se refiere al costo, el de éstos equipos es bastante mayor que el de los equipos normales.

Pero el mayor inconveniente a la hora de aplicar los sondeos con circulación inversa a las escombreras, se debe a la gran permeabilidad de éstas. En efecto, en escombreras que no hayan sufrido compactación, o en zonas con poca abundancia de granulometrías finas el agua se infiltrará con suma facilidad tanto por las paredes, como por el fondo del sondeo, por lo que el testigo no dispondrá del suficiente caudal para ascender. Esto se puede limitar, en parte, entubando el pozo, sin embargo, las fugas del fondo será bastante difícil evitarlas, por lo que la aplicación del método queda sensiblemente limitada.

Un aspecto a tener en cuenta cuando se está sondeando una escombrera de carbón es lo que hay que hacer cuando se cortan materiales quemados. En Bélgica, el criterio que se utiliza es abandonar el muestreo de la escombrera si se extraen más de 3 m de tierras rojas, o si se miden en el fondo temperaturas superiores a 90°C.

7.4. CONCLUSIONES

Como resultado de todo lo visto referente al muestreo de escombreras, a continuación se establecen, de una forma resumida, los puntos a seguir para poder llevarlo a cabo.

De las diferentes propiedades de la escombrera que puede ser necesario conocer, la más importante es su contenido en carbón. Por lo tanto, ésta será la que se emplee para determinar la fiabilidad del muestreo.

Los pasos a dar para muestrear una escombrera de carbón son:

1. Recoger información acerca de la posible distribución de los materiales en la escombrera. Para ésto, un buen sistema puede consistir en consultar a personas que hayan visto la construcción de la escombrera.
2. Si la información recogida lo permite, localizar zonas de muestreo según los tipos de materiales. Esto puede conducir a que, a priori, se eliminen algunas partes de la escombrera de cara a su aprovechamiento. En caso contrario, se considerará a la escombrera como un todo-uno.
3. Se realiza una serie de calicatas en puntos, fácilmente accesibles. De éstas se extraerán conclusiones referentes a posibles combustiones que se hayan podido producir, de la granulometría preponderante y del contenido en carbón. Si las impresiones respecto al posible aprovechamiento fuesen reiteradamente negativas, se intentará realizar más calicatas antes de iniciar los sondeos o de rechazar la escombrera.

4. Si se decide continuar con el muestreo, se calcu la el paralepípedo envolvente de la escombrera y, al azar, se determinan las coordenadas de 10 pun tos, ésta cifra se puede alterar según los casos. Con los resultados obtenidos en esos puntos, y se gún se explicó en el apartado "Método del muestreo duplicado", se calcula la ecuación:

$$s^2 = \frac{A}{W} + \frac{B}{N}$$

En ésta, se ha despreciado el error debido a la reducción y análisis de la muestra ya que, como se dijo en su momento, su valor es muy pequeño en relación a W y N, por lo que no tomarlo en consideración no produce mayores problemas.

5. Se sustituyen en la ecuación anterior el W y el N de las muestras tomadas (N = 10), si la varian-
za calculada es menor que la admitida como error de muestreo, la toma de muestras realizada será considerada suficiente. Toda muestra que se to me posteriormente, se traducirá en una disminu-
ción de los errores.

En el caso de que al sustituir W y N, la varian-
za obtenida sea mayor que la admitida, habrá que proseguir tomando muestras aleatoriamente según la relación que se obtenga entre W y N en la ecuación. Cuando la varianza sea menor que la admitida, se podrá dar por terminado el mues treo.

8. LINEAS A SEGUIR PARA LA ELABORACION DE UN INVENTARIO NACIONAL DE ESCOMBRERAS DE CARBON

En diferentes países se ha demostrado la posibilidad de utilizar los materiales de las escombreras de carbón en numerosos procesos industriales. Los estudios realizados se encuentran considerablemente avanzados, y, en algunos casos, ya se cuenta con una larga experiencia a escala industrial.

En España, este tema está dando sus primeros pasos, y, ante la posibilidad de aplicar tecnologías ya desarrolladas, se impone, como etapa inicial, proceder a un reconocimiento de las escombreras de que se dispone, en vistas a estudiar la viabilidad de su aprovechamiento.

Por lo que se refiere a la elaboración de un Inventario Nacional de Escombreras de Carbón, en un principio parece que los esfuerzos se deben dirigir hacia las zonas más prometedoras, que en nuestro caso son las cuencas Asturianas y Leonesas, ya que, en estas zonas, se concentra el mayor volumen de escombreras. Además, los carbones que contienen son antracita y hulla de elevado poder calorífico, y, sobre todo en Asturias, se plantean serios problemas derivados de la situación de las escombreras en lugares estratégicos (vías de ferrocarril, carreteras, etc).

El reconocimiento de estas escombreras se deberá realizar en sucesivas etapas, no debiéndose pasar nunca a una etapa más avanzada sin haberse cumplido todos los objetivos de la precedente.

En base a las características de las escombreras de carbón, y teniendo en cuenta sus posibles aplicaciones, estimamos que deben ser ejecutadas las siguientes fases para establecer la viabilidad de su aprovechamiento.

FASE 1

Esta fase es aplicable a todas las escombreras de las cuencas objeto del estudio.

Una vez planteada la posibilidad de tratar unas determinadas escombreras, el primer paso a dar es situarlas. En una cuenca minera, habrá que agrupar las escombreras por zonas según las condiciones específicas de cada caso, como proximidad geográfica, posibilidades de comunicación, accesibilidad, etc.

Para poder materializar esta situación, será preciso utilizar una cartografía de base. Como la única que existe de una forma generalizada es la 1:50000, ésta será la que se emplee.

Para la localización de las escombreras, puede aportar una valiosa ayuda la fotografía aérea. Sin embargo, las disponibilidades en este sentido son bastante reducidas, ya que, por una parte el Vuelo Nacional tiene una escala demasiado grande (1:30000) para localizar las escombreras, y por otra, data de 1956, por lo que gran cantidad de las escombreras actuales no figurarán en él. Pese a esto, no se debe descartar el empleo de fotografía aérea, para lo cual será interesante buscar información en organismos como el Instituto Geográfico, Diputaciones Provinciales, Icona, Iryda etc., sobre posibles vuelos recientes que se hayan podido realizar.

A la vez que se sitúan las escombreras, será necesario hacer un reconocimiento visual de cada una de ellas. En éste, se hará una estimación del volumen de materiales existente en cada caso. La estimación será aproximada, sin necesidad de recurrir a técnicas de medida especiales. Mientras se está realizando el reconocimiento, se deberán tomar fotografías panorámicas y de detalle de las escombreras.

Como resultado de esta Fase 1, se tendrá una serie de mapas topográficos a escala 1:50000, en los que aparecerán representa-

das las escombreras en forma de puntos, que se numerarán correlativamente. Los mapas llevarán anexas unas tablas en las que se relacione el número de cada escombrera con su nombre, situación, compañía propietaria y volumen aproximado.

Además de los mapas topográficos, puede ser interesante elaborar unos esquemas de situación, en los que únicamente figurarán los puntos de situación de cada escombrera, las ciudades, las vías de comunicación, los posibles consumidores de materiales de escombrera (centrales térmicas, fábricas de ladrillos, etc) y la situación de posibles lavaderos de carbón antiguos o actuales.

Con las escombreras ya situadas en mapas, se procederá a agruparlas según zonas, en base, sobre todo, a su proximidad geográfica y a las facilidades de comunicación entre ellas.

A continuación, habrá que comenzar por fijar un orden de prioridades para realizar el estudio de las escombreras localizadas. El primer criterio a seguir es el que ya se indicaba anteriormente, es decir el derivado de la situación y del volumen de las diferentes escombreras. El paso siguiente consistirá en analizar una serie de aspectos conyunturales que las afecten, y que pueden ser decisorios a la hora de establecer el orden de estudio. Estos aspectos son:

- . Problemas derivados de la presencia de escombreras en puntos críticos. Entre éstos se pueden citar: contaminación ambiental, situación de escombreras en puntos por los que deben pasar vías de comunicación, o en áreas de expansión urbana, etc. Como consecuencia de esto, se impone una eliminación de las escombreras, o al menos un cambio de emplazamiento.

- . Existencia en la zona de industrias cerámicas que

plantean la posibilidad de utilizar como materia prima los estériles de las escombreras.

- . Fuerte consumo en la zona de áridos para la construcción y escasez de tales materiales. Como consecuencia de esto, cabría la posibilidad de construir una fábrica de áridos ligeros, la cual podría ser alimentada con materiales de escombrera.
- . Proximidad de centrales térmicas capaces de consumir combustibles de elevado contenido en cenizas. Los estériles del carbón pueden considerarse como combustibles de este tipo.

Como consecuencia del planteamiento de éstos y de otros factores que pudieran influir sobre las posibilidades de aprovechamiento de las escombreras, se podrá llegar a la conclusión de que algunas de las zonas en que se agruparon tienen mayor interés que otras, por lo que su estudio deberá ser afrontado con prioridad. Así pues, en este momento, ya se deberá tener determinada la primera zona de escombreras a estudiar.

FASE 2

Una vez situados en la zona que se ha de estudiar de una forma intensiva, los datos de las escombreras que será preciso concretar en esta Fase 2 son: origen, historia, dimensiones exactas y tipo de construcción. Todas estas características se han presentado en el apartado 6.2, por lo que no se considera necesario profundizar en su significado. Así mismo, también será conveniente determinar el posible contenido en carbón de las escombreras, que se puede deducir, en parte, del conocimiento de las instalaciones de lavado que se utilizaban para generar los estériles que iban a parar a las escombreras, o a partir de algunas muestras tomadas en puntos convenientes.

Un hecho al que se debe prestar una gran atención es el de las posibles combustiones que hayan podido afectar a los materiales de las escombreras. Esto puede determinar, en gran medida, la viabilidad del aprovechamiento de los materiales existentes con fines energéticos.

Así pues, una vez ejecutada la Fase 2, se poseería suficiente información para poder predecir el interés de la zona, o en su defecto, el de alguna escombrera en particular, y, por lo tanto, decidir sobre si se lleva a cabo o no el muestreo definitivo, el cual constituye, con gran diferencia, la fase más cara del estudio.

Por último, en lo que se refiere a esta Fase 2, sólo resta insistir en que deberá ser aplicada a todas las zonas seleccionadas en la Fase 1, siguiendo el orden de prioridad establecido en ésta.

FASE 3

Esta fase se puede definir como la de muestreo. Su objetivo fundamental es suministrar una serie de muestras que sean representativas de las escombreras objeto del estudio, para, con ellas, poder proceder a la realización de los ensayos que permitan evaluar la validez de los materiales presentes para las diferentes aplicaciones que se han propuesto en el presente estudio.

Como se dijo anteriormente, ésta es la fase más cara del estudio, por lo que únicamente deberá ser aplicada a las escombreras de cada zona que se hayan considerado como más interesantes en la Fase 2.

Este muestreo se ha de caracterizar fundamentalmente por:

- Ha de ser representativo, con un determinado margen de confianza, de los materiales de la escombrera.

- . Ha de proporcionar unas muestras en unas condiciones adecuadas para la realización con ellas de los ensayos que se consideran necesarios.

Los diferentes métodos posibles de muestreo se han descrito en el apartado 7.2. Como allí se indicó, se ha considerado como más adecuado para la problemática de las escombreras el "Método del muestreo duplicado" (Ap. 7.2.3).

A grandes rasgos, este método consiste en tomar en cada punto de muestreo dos muestras, una grande y otra pequeña. Con las medias y desviaciones típicas correspondientes a las dos familias de muestras (las grandes y las pequeñas), se puede separar la influencia que en el error de muestreo tienen la heterogeneidad de composición y de distribución respectivamente. Esto se cuantifica mediante las llamadas varianzas debida al azar (A) y varianzas debida a la segregación (B). Con estas dos varianzas se puede calcular la total, debida al error de muestreo, mediante la expresión:

$$s^2 = \frac{A}{W} + \frac{B}{N}$$

Esta varianzas deberá tomar valores comprendidos dentro de ciertos límites. Esto se traduce en que uno de los puntos de partida para la realización del muestreo es la varianzas debida al error de muestreo (s^2) admitida.

De la fórmula anterior se obtiene una relación entre W y N, que son el peso total de la muestra y el número de tomas (incrementos) en que ésta se deberá realizar.

En el apartado 7.4. se aconsejaba que el número inicial de puntos de muestreo fuese de diez, para, posteriormente, si fuese preciso, incrementarlo en base a los resultados de los análisis efectuados. Sin embargo, esto presenta el inconveniente de que,

como los análisis van retrasados respecto a la toma de muestras, cuando se conozcan sus resultados la sonda ya se habrá cambiado de escombrera, por lo que si el número de muestras deducido es superior a diez, habrá que volver a cambiar la máquina de emplazamiento para tomar las muestras restantes. Para superar esta pega, se comenzará estudiando una de las escombreras de mayor tamaño, y, sin retirar la sonda de la escombrera, se realizarán los análisis que correspondan, en base a éstos se calculará el número de muestras necesario, el cual se podrá utilizar como referencia para el resto de las escombreras.

Para la localización de los puntos de muestreo, se utiliza el procedimiento aleatorio, con el cual cualquier punto de la escombrera puede ser elegido para tomar en él una pareja de muestras.

Para poder cumplir con la condición de que las muestras se encuentren en un estado adecuado para la realización con ellas de los ensayos que se consideren necesarios, y a la vez tener la posibilidad de acceder a cualquier zona de la escombrera, el procedimiento de toma más adecuado es el de sondeos con recuperación de testigo. Durante la ejecución de estos sondeos se pueden presentar, de forma inesperada, grandes bloques de roca difíciles de atravesar tomando testigo. La mejor forma de solucionar el problema será perforar el bloque sin tomar testigo, por ejemplo con un tricono, y, cuando se haya atravesado, volver a introducir la corona para la toma de testigos.

Una vez que se dispone de la muestra representativa, en las condiciones adecuadas, se procederá a determinar las propiedades que se consideran imprescindibles para poder evaluar la utilidad de los materiales de la escombrera con fines energéticos. Estas son:

- Generales: granulometría, densidad, peso específico y humedad.

- . Para el relavado: curvas de lavabilidad y de cenizas.

- . Para la industria cerámica: composición química y mineralógica. En este caso podría ser conveniente la realización de algún ensayo más (ver Ap.6.3), sin embargo, a partir de los resultados de los análisis químico y mineralógico, se pueden deducir los posibles rangos de variación de las otras propiedades de una forma aproximada, lo cual es suficiente para un estudio general de viabilidad, como el que aquí se contempla.

- . Para la combustión: poder calorífico, contenido en cenizas, contenido en carbono, contenido en volátiles, fusibilidad de las cenizas y contenido en azufre.

En base a los resultados de los análisis, a las conclusiones de las fases 1 y 2, y a diversos parámetros económicos que puedan afectar al problema, se podrá establecer la viabilidad o no de la utilización de los materiales de las escombreras de carbón estudiadas con fines energéticos.

9. BIBLIOGRAFIA

- (1) Maneval David R., Recent European Practice in Coal Refuse Utilization. Proceedings of the First Kentucky Coal Refuse Disposal and Utilization Seminar, May 22, 1975. Cumberland, Kentucky.
- (2) Gay Larry T. and Batchelder S., Processing Plant for the Reclamation of Coal Proceedings of the Third Kentucky Coal Refuse Disposal and Utilization Seminar, May 11-12, 1977, Lexington, Kentucky.
- (3) Thomas-Moiset F. Traitement in Situ des Déchets de Lavoirs a Charbons et Valorisation des Produits Extraits. Annales des Mines de Belgique, Fevrier 1980.
- (4) H.B.N.P.C. La Recuperation de Combustibles pour Centrales Electriques á partir d'Anciens Terrils dans le Bassin Huiller du Nord et du Pas-de-Calais. Revue de l'Industrie Minérale, Juillet 1978.
- (5) Maneval David R., Reprocessing of Coal Refuse for a Second Yield of Steam Coal. Proceedings of the Third Kentucky Coal Refuse Disposal and Utilization Seminar, May 11-12, 1977, Lexinton, Kentucky.
- (6) Bland Alan E. et al., Kentucky Coal Preparation Plant Refuse Characterization and Uses. Proceedings of the Second Kentucky Coal Refuse Disposal and Utilization Seminar, May 20-21, 1976, Pineville, Kentucky.
- (7) González Cañibano J., Fabricación de Materiales de Construcción a partir de los Estériles del Carbón. II Curso sobre Escombreras y Presas de Residuos, "Diseño, Utilización y Problemas Ecológicos". Fundación Gómez Pardo, Noviembre 1981.

- (8) Hammond J.D., Lightweight Aggregate as a Construction Material. Proceeding of the Third Kentucky Coal Refuse Disposal and Utilization Seminar, May 11-12, 1977, Lexington, Kentucky.
- (9) Chauvin R. et Delannoy G., Valorisation des Rejets Solides de l'Industrie Houillère. Revue de l'Industrie Minérale, Avril 1977.
- (10) High-Temperature Fluid-Wall Reactor. Technical Bulletin, Thagard Research, Corporation. Irvine, California.
- (11) Collins W. and Draeger Ernest A., Cyclone Cleaning of Fine Coal Refuse. Proceedings of the Second Kentucky Coal Refuse Disposal and Utilization Seminar, May 20-21, 1976, Pineville, Kentucky.
- (12) McLean D.C. et al., Investigation of the Haldex (Simdex) process for Beneficiating Coal Refuse, Hungarian Practice 1969. Special Research Report Number SR-80, The Pennsylvania State University, March 31, 1971.
- (13) Lentz Erwin C. Waste Materials that you can Handle in a Fluidized Bed. Power, August 1981.
- (14) Thring. The Science Of Flames and Furnaces. Wiley 1962.
- (15) Perry Robert H., Chemical Engineers' Handbook. Fifth edition McGraw-Hill.
- (16) Field et al., Combustion of Pulverized Coal. The British Coal Utilization Research Association 1967.
- (17) The Direct Use of Coal. Prospects and Problems of Production and Combustion. Congressional Office of Technology Assessment. Ballinger Energy Series 1979.

- (18) Gibson J., Combustion of Fuels of Low Calorific Value in Fluidised beds. 10 Congreso Mundial de Minería, Septiembre 1979. Istanbul, Turquía.
- (19) Bland Alan E. et al., Preliminary Assessment of the secondary Energy Recovery Potential of Kentucky Coal Refuse Institute for Mining and Mineral Research Laboratory. Lexington, Kentucky.
- (20) Comunicaciones de las Primeras Jornadas sobre Fluidización. E.T.S.I.I. Febrero 1980, Barcelona.
- (21) Unleashing a Black Beauty. Compressed Air Magazine. April 1978.
- (22) Keller Lawrence J., Fluidized-bed Boiler. Power Engineering. March 1978.
- (23) Fluidized-bed Combustion Proves Viable for Generating Steam. Power, November 1980.
- (24) Proceedings of the Twelfth Intersociety Energy Conversion Conference, August-September 1977, Washington, D.C.
- (25) National Coal Board. Utilization of Colliery (Washery) Tailings. Final Report on Research Project 7220-EC/811 to the European Coal and Steel Community- December 1978.
- (26) Jeffs E., Germany Pushes Fluidised Bed Research for Clean Environment. Energy International. September 1980.
- (27) Holcomb R.S., Development Progress on the Atmospheric Fluidized Bed Coal Combustor for Cogeneration Gas Turbine System for Industrial Cogeneration Plants. Journal of Engineering for Power, April 1980.

- (28) The Combustion Engineering Fluidized Bed Sub-Scale Unit Operating Experience and Test Results. Combustion Engineering Inc.
- (29) Inventario de Recursos de Carbón en España. Centro de Estudios de la Energía. Comisaría de Energía y Recursos Minerales, Ministerio de Industria y Energía, Febrero 1979.
- (30) Bishop Charles S. and Rose Jerry G., Physical and Engineering Characteristics of Coal Preparation Plant Refuse. Ohio River Valley Soils Seminar. Shales and Mine Wastes: Geotechnical Properties, Design and Construction, October 8, 1976, Lexington, Kentucky.
- (31) Almes Richard G. and Butail A., Coal Refuse; its Behavior Related to the Design and Operation of Coal Refuse Disposal Facilities. Ohio River Valley Soils Seminar. Shales and Mine Waste: Geotechnical Properties, Design, and Construction, October 8, 1976, Lexington, Kentucky.
- (32) Augenstein D. and Sun S.C., Methodology for the Characterization of Anthracite Refuse. Special Research Number SR-86, The Pennsylvania State University, July 1, 1971.
- (33) I.G.M.E. Proyecto de Desarrollo de Tres Normas para Minería. Anteproyecto UNE 22150.
- (34) Coal Preparation. J.W. Leonard, editor, 4th Edition, 1979. SME-AIME.
- (35) Gy P., L'Echantillonnage des Minerais en Vrac. Revue de l'Industrie Minière, Janvier 1967 et Septembre 1971.