

**ESTUDIO DE VIABILIDAD SOBRE LA AGLOMERACION DE FINOS DE  
CARBON**

**ALVARO SIERRA ZAFRA  
GUILLERMO ENRIQUE GOMEZ CASTELLANOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2004**

**ESTUDIO DE VIABILIDAD SOBRE LA AGLOMERACION DE FINOS DE  
CARBON**

**ALVARO SIERRA ZAFRA  
GUILLERMO ENRIQUE GOMEZ CASTELLANOS**

**Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar el título de Ingeniero Metalúrgico**

**Director  
CUSTODIO VASQUEZ QUINTERO  
Ingeniero Metalúrgico, Magíster**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2004**

## **DEDICATORIA**

A DIOS, por ser mi guía y permitirme ser quien soy.

A mis padres, Alvaro y Yolanda, por guiarme por el buen camino y apoyarme y quererme durante toda mi vida incondicionalmente.

A mi hermano Jair, a mis abuelos Maria, Abel y Bertha, a todos mis tíos y primos por brindarme su amor y apoyo incondicional.

A mis amigos Guillermo, Rodrigo y Carlos compañeros de vida, y a todos mis compañeros Johanna Patricia, Sandra, Cesar, Luis, Leidy, Johanna Milena y demás por su amistad desinteresada y gran apoyo en estos años gratos de universidad.

Alvaro

## **DEDICATORIA**

A DIOS, que me permitió lograr esta meta.

A mis padres Gloria y Guillermo, que gracias a ellos soy quien soy en la vida.

Guillermo

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander por permitir nuestra formación intelectual.

La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales y a todos sus docentes por permitirnos hacer parte de ésta y darnos una formación integral.

Al profesor Custodio Vásquez Quintero por su invaluable colaboración, dirección y gran apoyo en el desarrollo de esta investigación.

Al profesor Arnaldo Alonso Baquero por su gran colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Al personal técnico de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por su amable colaboración, en especial a Mario Navarrete (Kiko), Daniel Garavito (Lechuga), Ambrosio Carrillo (Ranchopaja), y Javier (Tocineta).

A nuestros compañeros Johanna Patricia, Sandra, Cesar, Luis, Johanna Milena, Leidy y demás con quienes compartimos muchas experiencias.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	1
1 TECNOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS Y SU COQUIZACION	5
1.1 PROCESOS IDENTIFICADOS	5
1.2 ANÁLISIS DE LOS PROCESOS	5
1.2.1 Etapas fundamentales	5
1.2.2 Identificación de variables que caracterizan los procesos	8
1.2.3 Discusión de los procesos	8
1.2.3.1 Procesos que utilizan aglomerantes	8
1.2.3.2 Procesos de briquetización sin aglomerantes	10
1.3 SELECCIÓN DEL PROCESO	12
1.3.1 Comparación de alternativas	12
1.3.1.1 Con relación al producto	12
1.3.1.2 Con relación al proceso	12
1.3.1.3 Proceso seleccionado	13
1.4 COSTOS EN LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS	14
1.5 FORMA DE LA BRIQUETA	15
1.6 COMPUESTOS AGLOMERANTES UTILIZADOS EN LA PRODUCCION DE BRIQUETAS	16
1.6.1 Aglomerantes utilizados	16
1.6.1.1 Brea (Alquitrán) del carbón	16
1.6.1.2 Asfaltos del petróleo	17
1.6.1.3 Arcillas bentonitas	17
1.6.2 Alternativas de uso de aglomerantes	17

1.7 COQUE	18
1.7.1 Propiedades físicas y químicas	18
1.7.2 Carbones coquizantes y no-coquizantes	20
1.7.3 Pruebas para distinguir los carbones coquizantes	22
1.7.4 Producción de coque en Colombia	23
2. METODOLOGÍA	24
2.1 PLAN DE TRABAJO	24
2.2 PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS	24
2.2.1 Caracterización de las muestras	25
2.2.1.1 Materia prima	25
2.2.1.2 Limpieza de las muestras	25
2.2.1.3 Pesado de las muestras	25
2.2.1.4 Secado de las muestras	25
2.2.1.5 Incinerado de las muestras	26
2.2.1.6 Determinación de la humedad de las muestras	27
2.2.1.7 Determinación del porcentaje de cenizas de las muestras	27
2.2.1.8 Determinación del porcentaje de materia volátil de las muestras	28
2.2.1.9 Determinación del índice de hinchamiento de las muestras	28
2.2.1.10 Determinación del poder calorífico de las muestras	28
2.2.1.11 Determinación del azufre total de las muestras	28
2.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL	28
2.3.1 Equipos	28
2.3.2 Producción de briquetas	30
2.3.2.1 Preparación de la mezcla	30
2.3.2.2 Fabricación de briquetas	30
2.3.3 Tratamiento térmico de las briquetas	30
2.3.4 Análisis post-producción de briquetas	31
2.3.4.1. Caracterización de las briquetas	31
2.3.4.2. Pruebas de resistencia mecánica	31
2.3.4.2.1. Ensayo de caída libre	31

2.3.4.2.2. Ensayo de compresión	31
2.3.5. Coquización	33
2.3.6 Análisis post-producción de coque	33
2.3.6.1. Caracterización del coque	33
2.3.6.2. Pruebas de resistencia mecánica	39
3. RESULTADOS	40
3.1 DESCRIPCIÓN	40
3.1.1 Caracterización del carbón	40
3.1.2 Briquetización	40
3.1.3 Pruebas mecánicas a briquetas	42
3.1.3.1 Resistencia a la caída	42
3.1.3.2 Resistencia a la compresión	45
3.1.4 Caracterización de las briquetas	48
3.1.4.1 Influencia de la bentonita sobre el contenido de cenizas	49
3.1.4.2 Influencia de la bentonita sobre el contenido de materia volátil	50
3.1.4.3 Influencia de la bentonita sobre el poder calorífico	51
3.1.5 Caracterización del coque	51
3.1.6 Pruebas mecánicas al coque	53
3.1.6.1 Ensayo de caída	53
3.1.6.2 Ensayo de compresión	54
4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN	55
4.2 PRUEBAS MECÁNICAS DE LAS BRIQUETAS	55
4.2.1 Resistencia a la caída	55
4.2.2 Resistencia a la compresión	56
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS BRIQUETAS	56
4.3.1 Influencia de la bentonita sobre el contenido de cenizas	56
4.3.2 Influencia de la bentonita sobre el contenido de materia volátil	56
4.3.3 Influencia de la bentonita sobre el poder calorífico	57
4.4 CARACTERIZACIÓN DEL COQUE	57

4.5 PRUEBAS MECÁNICAS DEL COQUE	57
5. CONCLUSIONES	58
6. RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXO A	65
ANEXO B	77
ANEXO C	80
ANEXO D	86
ANEXO E	91

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Diagrama plan de trabajo	24
Figura 2. Selección de variables y rangos	25
Figura 3. Metodología experimental	26
Figura 4. Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo I estufadas a 65°C	42
Figura 5. Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo I estufadas a 75°C	43
Figura 6. Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo II estufadas a 65°C	43
Figura 7. Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo II estufadas a 75°C	44
Figura 8. Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo III estufadas a 65°C	44
Figura 9. Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo III estufadas a 75°C	45
Figura 10. Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo I estufadas a 65°C	45
Figura 11. Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo I estufadas a 75°C	46
Figura 12. Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo II estufadas a 65°C	46
Figura 13. Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo II estufadas a 75°C	47

Figura 14. Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo III estufadas a 65°C	47
Figura 15. Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo III estufadas a 75°C	48
Figura 16. Bentonita versus cenizas	50
Figura 17. Bentonita versus materia volátil	50
Figura 18. Bentonita versus poder calorífico	51

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	<b>pág.</b>
Fotografía 1. Balanza analítica AINSWORTH	27
Fotografía 2. Estufa eléctrica MERMMERT	27
Fotografía 3. Mufla eléctrica ELEKTRO	28
Fotografía 4. Bomba calorimétrica estática BICASA	29
Fotografía 5. Mezclador MITSUBISHI	29
Fotografía 6. Briqueteadora a nivel de laboratorio	30
Fotografía 7. Longitud de la briqueta	40
Fotografía 8. Ancho de la briqueta	40
Fotografía 9. Altura de la briqueta	41
Fotografía 10. Estufa eléctrica K.H. HUPERT CO	31
Fotografía 11. Briquetas de mezcla de carbón alto volátil con tres por ciento de bentonita y doce por ciento de humedad, en la cual se efectuó un tratamiento térmico durante 60 min. a una temperatura de 75°C	41
Fotografía 12. Briquetas de mezcla de carbón medio volátil con tres por ciento de bentonita y ocho por ciento de humedad, en la cual se efectuó un tratamiento térmico durante 90 min. a una temperatura de 65°C	41
Fotografía 13. Maquina universal de ensayos TREBEL	32
Fotografía 14. Maquina de caída libre	32
Fotografía 15. Montaje del proceso de coquización	33
Fotografía16. Vista lateral del montaje del proceso de coquización	34
Fotografía17. Productos de coquización de briquetas, mezcla de carbón Tipo I con seis por ciento de bentonita y ocho por ciento de humedad	52

Fotografía18. Productos de coquización de briquetas, mezcla de carbón TipoIII con tres por ciento de bentonita y doce por ciento de humedad	53
Fotografía19. Productos de coquización de briquetas, mezcla de carbón Tipo II con seis por ciento de bentonita y doce por ciento de humedad	53

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Identificación de los procesos	5
Cuadro 2. Etapas fundamentales del proceso de fabricación	6
Cuadro 3. Tipificación de los procesos reportados en la literatura	7
Cuadro 4. Caracterización del carbón	40
Cuadro 5. Variables críticas en el proceso de briquetización	40
Cuadro 6. Caracterización del las briquetas	49
Cuadro 7. Caracterización del coque	52
Cuadro 8. Resistencia a la caída del coque	54
Cuadro 9. Resistencia a la compresión del coque	54
Cuadro 10. Resultados de humedad	77
Cuadro 11. Resultados de cenizas	77
Cuadro 12. Resultados de materia volátil	78
Cuadro 13. Resultados de poder calorífico	78
Cuadro 14. Resultados de azufre	79
Cuadro 15. Resultados de índice de hinchamiento	79
Cuadro 16. Resistencia a la compresión de carbón tipo I a 65°C	80
Cuadro 17. Resistencia a la compresión de carbón tipo II a 65°C	80
Cuadro 18. Resistencia a la compresión de carbón tipo III a 65°C	81
Cuadro 19. Resistencia a la compresión de carbón tipo I a 75°C	81
Cuadro 20. Resistencia a la compresión de carbón tipo II a 75°C	82
Cuadro 21. Resistencia a la compresión de carbón tipo III a 75°C	82
Cuadro 22. Resistencia a la caída de carbón tipo I a 65°C	83
Cuadro 23. Resistencia a la caída de carbón tipo II a 65°C	83

Cuadro 24. Resistencia a la caída de carbón tipo III a 65°C	84
Cuadro 25. Resistencia a la caída de carbón tipo I a 75°C	84
Cuadro 26. Resistencia a la caída de carbón tipo II a 75°C	85
Cuadro 27. Resistencia a la caída de carbón tipo III a 75°C	85
Cuadro 28. Resultados de humedad en briquetas a 75°C	86
Cuadro 29. Resultados de cenizas en briquetas a 75°C	87
Cuadro 30. Resultados de materia volátil en briquetas	88
Cuadro 31. Resultados poder calorífico en briquetas a 75°C	89
Cuadro 32. Continuación resultados poder calorífico en briquetas	89
Cuadro 33. Resultados de azufre en briquetas	90
Cuadro 34. Resultados de humedad en coque 75°C	91
Cuadro 35. Resultados de cenizas en coque 75°C	91
Cuadro 36. Resultados de materia volátil coque 75°C	92
Cuadro 37. Resultados poder calorífico en coque 75°C	92
Cuadro 38. Continuación resultados poder calorífico en coque	93
Cuadro 39. Resultados de azufre total en coque	93
Cuadro 40. Resistencia a la caída del coque	93
Cuadro 41. Resistencia a la compresión del coque	94

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Obtener un aglomerado de finos de carbón y observar la influencia del aglomerante en las características del carbón utilizado.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Obtener aglomerados coherentes y resistentes de finos de carbón.
- Determinar la influencia que tiene el aglomerante en características del carbón tales como el poder calorífico, el contenido de cenizas, carbono fijo y materia volátil.
- Evaluar la factibilidad de utilizar el carbón aglomerado como combustible.
- Determinar la viabilidad de coquizar dichos aglomerados de carbón.

## ABSTRACT

TITLE: STUDY OF VIABILITY ON THE FINEST MATERIAL OF COAL MASS.\*

ALVARO SIERRA ZAFRA, GUILLERMO ENRIQUE GÓMEZ CASTELLANOS.\*\*

KEYWORDS : Mass, briquette, the finest material of coal, bentonite, ashy, coke.

The finest material generated in the process of refining coal is used in thermoelectric;. For the companies that generate them accumulate in big piles pollutants in the atmosphere, this problem includes the refining of coal to coke those which when being washed, it finest material is separated from to coke, because they present problems obstructing pipes.

The viability was evaluated of amassing finest material by means of a compiling process that consisted on elaborating mixtures of coal, and bentonite it dilutes varying these three parameters, later on the briquettes were elaborated and for finish they were subjected to a thermal treatment varying temperature and time on the stove, later the briquettes were studied considering the effect of the bentonite addition like binder, first on the properties of the coal like fuel and second evaluating the mechanical resistance of this material agglomerate. The three mixtures were also selected with better mechanical properties, which were to coke and analyzed later on in the same way that the briquettes were.

It was observed that the production of briquettes of coal using as binder bentonite is viable. As a result briquettes possess good properties like fuel diminishing their heating power a little, but the ashy content of the agglomerate, the coke production achieved, however the resulting coke wasn't the best having as contained main disadvantage of ashy from 11% to 15% and to be able to heating of 11000 BTU / lb.

---

\*Research

\*\*Faculty of Phisic-Chemistrys. Engineering. School of Metallurgycal Engineering and Materials Science.

Msc. Custodio Vásquez Quintero.  
Physic-Chemistry Engineering.

## RESUMEN

**Titulo: ESTUDIO DE VIABILIDAD SOBRE LA AGLOMERACIÓN DE FINOS DE CARBÓN.\***

**ALVARO SIERRA ZAFRA, GUILLERMO ENRIQUE GOMEZ CASTELLANOS. \*\***

**PALABRAS CLAVE: Aglomeración, briqueta, finos de carbón, bentonita, poder calorífico, cenizas, coque.**

Los finos generados en el lavado de carbones son comúnmente utilizados en termoeléctricas para generar energía, este uso no consume la producción total por lo que las empresas que los generan los acumulan en grandes pilas contaminantes del ambiente, este problema incluye carbones coquizables que al ser lavados, sus finos son separados de la coquización porque presentan problemas obstruyendo tuberías.

En esta investigación se evaluó la viabilidad de aglomerar dichos finos mediante briquetización, elaborando mezclas de carbón, bentonita y agua variando estos tres parámetros, posteriormente se elaboraron las briquetas y por último fueron sometidas a un tratamiento térmico variando temperatura y tiempo en la estufa, después se estudiaron las briquetas considerando primero el efecto de la adición del aglomerante sobre las propiedades del carbón como combustible y evaluando la resistencia mecánica del material aglomerado. Además se seleccionaron tres mezclas teniendo en cuenta aquellas con mejores propiedades mecánicas, que fueron coquizadas y analizadas del mismo modo que las briquetas

Se observó que la aglomeración de carbón dentro de los rangos utilizados en el proyecto es viable, obteniéndose briquetas con buenas propiedades como combustible presentando un poder calorífico entre 12200 y 14800BTU/lb., y aumentando el contenido de cenizas 3.1% adicionando 3% de bentonita y 5.7% adicionando 6% de bentonita, la producción de coque se logró, sin embargo el coque resultante no alcanza los valores mínimos para ser utilizados como reemplazo del coque tradicional teniendo como principal desventaja contenidos de cenizas del orden de 11% al 15% y poder calorífico de 11000BTU/lb.

---

\* Investigación

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Química. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Msc. Custodio Vásquez Quintero.

## INTRODUCCIÓN

La situación que se presenta en todas las minas de carbón del país es la generación de carbones con tamaño de partícula fina después del proceso de conminución y lavado ( $< 0.5$  mm), los cuales no tienen utilidad en las empresas donde se compra carbón por los problemas que ocasiona, no se utiliza en ningún proceso por lo que se apilan estos finos sin generar ganancia alguna creando problemas económicos. La única utilidad de estos finos es quemarse en plantas termoeléctricas, pero debido a la abundancia de finos no todo el carbón se consume de esta forma. Algunos de estos carbones son coquizables y de muy buena calidad pero no se pueden coquizar, ya que presentan problemas en los hornos de coquización, tapando sus tuberías.

En el proyecto se quiso dar un aporte a la solución del problema antes expuesto, aglomerando carbón fino y coquizándolo posteriormente.

El uso de la leña en la cocción de alimentos es tradicional en los hogares campesinos y en las regiones apartadas de Colombia. Sin embargo, con el paso del tiempo, esta actividad doméstica ha causado grandes problemas al ecosistema del país.

La tala indiscriminada de árboles y de bosques ha erosionado el suelo, ha provocado la sequía de ríos y arroyos, así como la pérdida de biodiversidad (varias especies de plantas, animales e insectos) y problemas de salud por las malas prácticas del uso de la leña como combustible.<sup>(1)</sup>

En la actualidad las briquetas de carbón se utilizan como combustible en los hogares, este sistema se ha convertido en una nueva alternativa para evitar la tala de bosques en los sectores rurales. A pesar de ser uno de los principales países exportadores de carbón, Colombia aún no posee la infraestructura para hacer de este mineral una verdadera alternativa energética.

En el proyecto se evaluó la posibilidad de obtener aglomerados de finos de carbón de buena calidad con la posibilidad de ser utilizados a nivel industrial.

Las briquetas de carbón tienen una gran cantidad de aplicaciones, por lo general lo que se busca es disminuir el impacto ambiental, ya que las briquetas emiten una cantidad mínima de humos, a continuación se describirán las aplicaciones más comunes.

El gobierno, a través de Carbocol –la empresa estatal ya liquidada que se encargó del manejo de las políticas carboníferas- firmó un convenio con la China para suplir a toda la zona cafetera de briquetas, que permitieron al campesino utilizarlas en sus hogares, en reemplazo de la leña.<sup>(2)</sup>

Actualmente en Colombia se están produciendo briquetas, Industrias Tecsol, que con el apoyo de Minercol y Colciencias, han desarrollado una alternativa energética diferente, mucho más amigable con el medio ambiente y adaptada a los hábitos de los habitantes del campo, teniendo como resultado que el uso de briquetas mejora la calidad de vida de miles de familias y protege los bosques.

Según Pedro Guevara, ingeniero químico de Tecsol, las evaluaciones sociales, técnicas, económicas y ambientales de las briquetas han dado resultados favorables, pues un kilogramo de briketa equivale a tres kilogramos de leña. Una familia promedio de 5 miembros habitualmente consume 15 kilogramos de leña, es decir, que pasarían a consumir cinco de briquetas.

Colombia es el país con mayores reservas de carbón en América Latina, lo que representa una riqueza energética en un momento coyuntural, pues el Protocolo de Kioto propone como alternativa ecológica las reservas de bosques y la captura de CO<sub>2</sub> propio de la combustión de materiales minerales.

Actualmente se cuenta con una capacidad instalada para construir 1.000 toneladas de briquetas cilíndricas al año, sin embargo el país necesita aumentar la producción para cubrir la demanda que tienen los hogares del campo y los habitantes de los pueblos apartados.

Dentro de las evaluaciones ambientales que se hicieron a las briquetas en estudios internacionales se encuentra un muestreo isocinético, que permite medir las emisiones de gases como, material particulado, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, contaminantes del medio ambiente. También se realizó la composición de gases de combustión como el monóxido de carbono, el dióxido de carbono y el oxígeno. Estas evaluaciones confirmaron la importancia de este sistema como una alternativa para conservar el medio ambiente de las zonas rurales.

Hoy por hoy en Colombia se deforestan cerca de 700.000 hectáreas de bosques al año, de las cuales aproximadamente 350.000 son empleadas como leña para la preparación de los alimentos en los hogares campesinos.

Si 500 familias utilizaran briquetas como combustible en sus hogares, las emisiones de gas carbónico (CO<sub>2</sub>) se reducirían en 2.500 toneladas al año y se dejarían de talar 82 hectáreas de bosques. Además, las amas de casa se expondrían menos a gases de combustión y los niños no interrumpirían sus labores escolares para dedicarse a recolectar la leña para cocinar.<sup>(1)</sup>

También actualmente se fabrican briquetas de carbón vegetal en Industrias San Felipe, de Manizales. Las briquetas son resultante como subproducto de el aprovechamiento de bosques cultivados de coníferas, el cual ha sido sometido a un tratamiento industrial de molido, aglutinado, troquelado y

secado, con aplicaciones de desmoldantes y estabilizadores de combustión biológicos que garantizan los beneficios de las briquetas como son, combustión estable y libre de emisiones de humo y olores, sin necesidad de corrientes de aire fuertes para prender ni para mantener su combustión.<sup>(3)</sup>

Estas características hacen de las briquetas un producto 100% biológico y protector del medio ambiente. Las briquetas de carbón tienen una forma ovalada, a manera de huevo, su color es negro y cada briqueta tiene un peso aproximado de 28 – 34 gramos, genera una temperatura promedio de 67.12°C a partir de los 15 minutos promedio que demora la estabilización de la combustión.

MINERCOL pretende sustituir hasta el 50% del consumo de leña comercial en el sector residencial rural por cerca de 265000 toneladas de carbón en el año 2005. Sin embargo, esta ambiciosa meta está sujeta a que el desarrollo de las briquetas les confiera las suficientes ventajas técnicas, económicas y comerciales sobre otros energéticos. También se busca como acciones complementarias a un programa de trapiches autosuficientes, la sustitución de leña por carbón en el sector panelero, sustituyendo paulatinamente leña por la mezcla bagazo-carbón en hornillas y de instalación de calderas de carbón económicamente rentables. De acuerdo con las metas de largo plazo podría sustituirse hasta un 30% de los trapiches medianos (1000) y grandes (100), lo que equivaldría a un consumo esperado de 500000 ton/año en el 2005.<sup>(5)</sup>

Por otro lado en la mayoría de los países desarrollados se encuentran exitosas fabricaciones de briquetas. Un ejemplo es la industria que se basa sobre la carbonización del aserrín y corteza, en el sur de los EE.UU empleando hornos de fundición, rotativos-múltiples, que producen quizás entre 20 Y 50 ton de carbonilla fina por día. Este carbón vegetal, una vez aglomerado, destinado a las parrilladas, puede venderse en los despachos al por menor. Los gases del horno se queman para producir vapor para fuerza eléctrica, transformando por lo tanto el desperdicio de aserrín y corteza en dos productos útiles, energía eléctrica y briquetas de carbón vegetal. Al mismo tiempo se reducen al mínimo los problemas de la contaminación del aire y de la eliminación de desperdicios.

En general las briquetas de carbón se utilizan para chimeneas, encendido de hornos de fabricación de ladrillos, en la industria panelera, como combustible alternativo en cocinas portátiles y estacionarias, unidades de calentamiento de agua, estufas y equipos generadores de vapor, y las de carbón vegetal en asados y parrilladas.

En el presente proyecto se busca una aplicación distinta a las briquetas de carbón, estudiando la viabilidad de coquizarlas, para que puedan ser utilizadas en la fabricación de acero y fundiciones.

Como delimitaciones del proyecto, el carbón seleccionado fue adquirido en la planta de lavado de carbones situada en Paz del Río Boyacá, en donde el día que se obtuvo se estaban lavando carbones provenientes de minas situadas en Samacá Boyacá los cuales son carbones de muy buena calidad y coquizables, estos carbones se lavaban con intervalos de dos horas, debido a esto se seleccionaron estas muestras.

Los rangos de bentonita y agua fueron seleccionados según bibliografía y gracias a la experiencia de profesores y técnicos de arenas de moldeo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales que recomendaron seguir el procedimiento de mezcla para arenas de moldeo según normas AFS.

# 1. TECNOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS Y SU COQUIZACION

## 1.1 PROCESOS IDENTIFICADOS

La información bibliográfica disponible ha permitido identificar los procesos codificados en el Cuadro 1, los cuales corresponden a las tecnologías de uso más corrientes para la producción de briquetas de carbón mineral.

Dos de los procesos mencionados, el Rexco (P-2) y el Brennstoff-Technick (P5), no constituyen propiamente técnicas de fabricación, sino, métodos de tratamiento del carbón cuya finalidad es la producción de un combustible sólido de características especiales con aplicación industrial y doméstica, sin ser briquetas.

**Cuadro 1.** Identificación de los procesos <sup>(6)</sup>

PROCESO	CÓDIGO	PAIS DE ORIGEN	ENTIDAD PROPIETARIA DEL PROCESO
Bepex	P-1	USA	K-G Industries
Rexco	P-2	INGLATERRA	National Carbonising Co. Ltda.
NCB	P-3	INGLATERRA	National Coal Board
NFC	P-4	USA	National Fuels Corp. Of New York and American Cyanamid Co.
Brennstoff-Technik	P-5	ALEMANIA	ND
Baumco	P-6	INGLATERRA	ND
Homefire	P-7	INGLATERRA	Coal Research Establishment
Lurgi Spulgas	P-8	ALEMANIA	Lurgi Spulgas
Phurnacite	P-9	INGLATERRA	National Coal Board
Sapoznikov	P-10	URSS	ND
SACH	P-11	FRANCIA	Société Anonyme Des Charbonnages D'Hensies

## 1.2 ANÁLISIS DE LOS PROCESOS

### 1.2.1 Etapas fundamentales

Las etapas fundamentales de los procesos de fabricación de las briquetas pueden apreciarse en el Cuadro 2:

**Cuadro 2.** Etapas fundamentales del proceso de fabricación <sup>(6)</sup>

ETAPAS GENERALES DEL PROCESO	UTILIZAN AGLOMERANTES					NO UTILIZAN AGLOMERANTES					
	P-1	P-4	P-6	P-9	P-11	P-2	P-3	P-5	P-7	P-8	P-10
Análisis del carbón	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Lavado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Secado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Conminución	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Carbonización		X	X			X	X	X	X		X
Enfriamiento del carbón		X									
Adición y mezcla de aglomerante	X	X	X	X	X						
Tratamiento térmico	X			X	X						
Briqueteo	X	X	X	X	X		X		X	X	X
Carbonización de briquetas		X	X	X			X			X	X
Enfriamiento-apagado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Oxidación y apagado									X		

Un análisis del Cuadro 2 permite identificar un conjunto de operaciones comunes, correspondientes a la etapa de preparación de materias primas, cuya finalidad es la de ajustar las características del carbón a las necesidades del proceso o a las exigencias de calidad del producto final.

Tales operaciones son:

Lavado del carbón para disminuir el contenido de cenizas.

El secado del material lavado para cumplir con las restricciones de humedad impuestas por el proceso.

La trituración del carbón para conseguir el tamaño de partícula apropiado.

Se debe calentar el carbón en algún punto del proceso para disminuir el contenido de volátiles hasta niveles que aseguren la combustión del producto sin la producción de humos u olores molestos.

Otro aspecto del análisis es la distinción que se establece entre procesos que utilizan aglomerante para conformar la briqueta y los que se valen únicamente de la presión ejercida por la prensa. Tal distinción permite la clasificación indicada en el Cuadro 3, donde se introduce, además, una segunda característica de los procesos relacionada con la temperatura de aplicación de la presión para aglomerar el carbón.

**Cuadro 3.** Tipificación de los procesos reportados en la literatura <sup>(6)</sup>

PROCESO	CODIGO	A		B	
		1	2	1	2
Bepex	P-1	X		X	
Rexco (1)	P-2	-	-	-	-
NCB	P-3		X		X
NPC	P-4	X		X	
Brennstoff-Technik (1)	P-5	-	-	-	-
Baumco	P-6	X		X	
Homefire	P-7		X		X
Lurgi Spulgas	P-8		X	X	
Phurnacite	P-9	X		X	
Sapoznikov	P-10		X		X
Sach	P-11	X		X	

A-1: Briqueteo con aglomerante

A-2: Briqueteo sin aglomerante

B-1: Briqueteo en frío

B-2: Briqueteo en caliente

(1) No produce briquetas. Se trata de un proceso de carbonización para elaborar semicoque destinado al consumo doméstico e industrial.

La revisión del Cuadro 3 permite observar una relación más o menos constante entre el uso de aglomerante y la temperatura de briqueteo, al establecer que los procesos que utilizan materiales adhesivos generalmente prensan el carbón en frío, mientras que los demás lo hacen a temperaturas elevadas y se caracterizan por efectuar tratamientos térmicos preliminares.

La distinción entre los dos tipos de procesos se explica desde el punto de vista de los principios de aglomeración. En el primer caso, el briqueteo se fundamenta en la creación del enlace aglomerante-carbón, mientras que en el segundo, la formación de la briqueta se basa en las propiedades plásticas del carbón, puestas de manifiesto bajo condiciones especiales de temperatura.

La excepción al comportamiento anterior la constituye el proceso P-8 (Lurgi Spulgas) el cual no utiliza aglomerante y se briquetea a baja temperatura. La explicación esta en que este proceso explota las características de aglomeración que resultan de la estructura física de los lignitos utilizados.

### **1.2.2 Identificación de variables que caracterizan los procesos**

Las variables relacionadas con las materias primas son el tipo de carbón, el contenido de humedad y, en algunos casos, el contenido de cenizas y materia volátil. Sin embargo, las tres últimas pueden ajustarse mediante métodos físicos a las exigencias del proceso.

En cuanto hace a las condiciones de operación, las variables fundamentales son la temperatura, la presión y el tiempo, ya que estas inciden directamente sobre las necesidades energéticas del proceso; sobre el tipo de equipo, de materiales a utilizar y sobre la frecuencia del reemplazo de los mismos. A su vez, el tiempo de operación fija el tamaño del equipo para satisfacer una capacidad determinada.

### **1.2.3 Discusión de los Procesos**

Se ha logrado establecer la clasificación de los procesos en dos grandes grupos diferenciados por el uso o no de compuestos aglomerantes durante la fase de conformación de la briqueta.

A continuación se discute cada una de las tecnologías con el fin de sustentar la escogencia del proceso sobre el cual se realizará la prefactibilidad.

#### **1.2.3.1 Procesos que utilizan aglomerantes**

Corresponden a este grupo los identificados con los códigos P-1, P-4, P-6, P-9 y P-11. Estos, después de una revisión de las etapas generales pueden reclasificarse en dos sub.-grupos principales, así:

Subgrupo No. 1: Procesos P-1, P-9, P 11

Subgrupo No. 2: Procesos P-4, P-6

La categorización anterior se basa fundamentalmente en la secuencia en que se desarrollan las operaciones del proceso. Sin embargo, debe anotarse que existen algunas diferencias en las características del carbón utilizado pues mientras los primeros trabajan con carbones de bajo contenido de volátiles, los segundos utilizan carbones altos en volátiles (P-4) o mezclas de carbones coquizables con materiales altos en volátiles ( P-6).

Las características de estos procesos, y sus diferencias fundamentales se observan mejor en el Cuadro 1. Ambos subgrupos involucran una etapa de preparación y adecuación de la materia prima, la cual comprende el lavado del carbón, cuando es necesario, para reducir el contenido de cenizas hasta niveles del 10% o menores. Una vez lavado, el material se tritura y se muele para llevarlo a tamaños entre 0.1 mm. y 5 mm.

Posteriormente se seca (procesos del subgrupo No.2), completando así la preparación.

En el primer caso el secado obedece a la necesidad de reducir el contenido de humedad para evitar dificultades en el prensado, disminuir el consumo de aglomerante y controlar la formación de grietas en la briqueta al producirse la liberación del agua durante la devolatilización.

En el segundo caso la oxidación preliminar se hace con el fin de mejorar las propiedades de aglomeración del carbón y facilitar así la conformación de la briqueta. Esta comprende las etapas de adición y mezcla del aglomerante, calentamiento de la mezcla y la aplicación de presión en los moldes para compactar la masa y darle su forma característica.

Para los carbones con el tamaño de partícula y el contenido de humedad mencionados, la cantidad de aglomerante añadido está en la relación de 92 a 8 (92 partes de carbón y 8 de aglomerante, en peso). Después de la adición, la mezcla se calienta hasta el punto de reblandecimiento del aglomerante para permitir la homogenización de la masa.

La etapa de calentamiento busca, además, llevar la mezcla a la temperatura requerida (50-60°C) para conformar la briqueta.

Esta última operación se lleva a cabo en prensas de doble rodillo en las cuales se aplica la presión de moldeo. Dicha presión varía, para los procesos en estudio, entre 1200 y 288 Kg/cm<sup>2</sup>.

En algunos casos (proceso P-6) el aglomerante es reemplazado añadiendo al material a briquetear carbón coquizable, en proporciones hasta del 10% en peso.

La adición tiene por objeto mejorar las propiedades de aglomeración del material de base.

Luego de la conformación de la briqueta se procede a la adecuación del producto final, etapa que encierra el conjunto de operaciones hechas con el propósito de dar al producto las características deseadas de acuerdo con las exigencias del uso y del usuario. Estas son:

➤ Devolatilización

Consiste en un tratamiento a alta temperatura (450-900°C) mediante el cual se elimina parte de los compuestos volátiles del carbón y del aglomerante hasta reducirles a niveles que aseguren la combustión de la briqueta sin producir humo u olores desagradables.

El tratamiento no es necesario cuando se utilizan carbones naturalmente bajos en volátiles. Sin embargo, se hace algunas veces, como en el caso del proceso Phurnacite (P-9), con el propósito de recuperar materiales valiosos y de abastecer el alquitrán utilizado en la fabricación, como aglomerante.

Además de las altas temperaturas necesarias, la operación tiene la particularidad de requerir tiempos de procesamiento prolongado debido a las dificultades que se presentan para transferir el calor a través de la briqueta.

➤ Enfriamiento y apagado de las briquetas

Cuando la devolatilización es necesaria, las briquetas salen del horno de tratamiento a temperaturas cercanas a los 900°C. Esta temperatura debe reducirse a 40°C para permitir las operaciones de manejo del producto y para evitar la combustión al ponerse en contacto con el aire circundante.

El apagado se realiza haciendo circular sobre la masa, en ausencia de aire, los gases producidos en la devolatilización. Para el enfriamiento se utiliza agua a temperatura ambiente.

### **1.2.3.2 Procesos de briquetización sin aglomerantes**

Corresponden a esta categoría los procesos P-3, P-7 y P-10. Se basan en el principio empírico de que las propiedades de los carbones bituminosos prácticamente sin ningún poder de aglomeración, altos o bajos en volátiles, pueden mejorarse considerablemente mediante la devolatilización (tratamiento térmico) rápida en capas delgadas o lechos.

Comprenden las siguientes operaciones:

➤ Preparación del carbón

El carbón se lava, cuando es necesario, para ajustar el contenido de cenizas a niveles inferiores al 5%. Luego se seca hasta cuando la humedad llegue al 15% en unos procesos (P-7) o al 4% en otros. (P-3). Una vez se ha reducido la humedad se procede a la trituración del material.

El tamaño de partícula debe determinarse experimentalmente. Sin embargo, éste está alrededor de la malla -10 ( menor de 1.27 mm.) .

#### ➤ Tratamiento térmico del carbón

Se lleva a cabo en lechos fluidizados utilizando como agente de fluidización un gas inerte (nitrógeno, por ejemplo) o mezclas de aire-vapor.

El propósito de la operación consiste en reducir el contenido de materia volátil hasta valores por debajo del 23% para evitar la producción de humo durante la combustión. Ésto se logra calentando el carbón a temperaturas por encima de 350°C. De paso se puede, como la velocidad de calentamiento es suficientemente alta, mejorar las propiedades plásticas de prácticamente cualquier carbón bituminoso permitiendo así su aglomeración sin necesidad del uso de compuestos aglutinantes.

Tal situación se alcanza para la mayoría de los carbones en el intervalo de 400 a 450°C.

Los procesos en lecho fluidizado presentan la particularidad de permitir la operación prácticamente continua de las plantas de briqueteo, a diferencia de los métodos convencionales en los cuales la reducción de los volátiles puede tomar hasta 18 horas.

Esta desproporción es debida a la forma como se efectúa el tratamiento térmico. En el primer caso la velocidad de calentamiento es alta debido a que la fuente de calor rodea cada partícula y en estas condiciones el proceso no toma mas de 15-30 minutos; mientras que en el segundo, además de que la fuente no está en contacto directo con el material, se tiene el inconveniente, que el calentamiento debe ser lento para evitar el reblandecimiento y posterior deformación de la briqueta.

#### ➤ Briquetización

El carbón tratado se extrae del lecho y se transporta isotérmicamente a las máquinas de briqueteo para su aglomeración. Esta operación se realiza prácticamente a la misma temperatura del tratamiento térmico ya que se trata de aprovechar para la conformación de la briqueta las propiedades plásticas del carbón puestas de manifiesto mediante el calentamiento rápido.

#### ➤ Manejo del producto

Las briquetas calientes se enfrían desde 400°C hasta 150°C, en una atmósfera inerte, durante 40 minutos y posteriormente se sumergen en agua

durante otros 40 minutos, hasta cuando su temperatura se haya reducido a 40°C, para permitir la fácil manipulación y el empaque.

### **1.3 SELECCIÓN DEL PROCESO**

#### **1.3.1 Comparación de alternativas**

De acuerdo con la descripción anterior, la selección del proceso debe hacerse sobre dos tecnologías básicas caracterizadas por el uso o no de compuestos para aglutinar las partículas de carbón y conformar la briqueta.

##### **1.3.1.1 Con relación al producto**

Los productos obtenidos con ambos procesos tienen calidades comparables, es decir, su comportamiento como combustible doméstico es similar cuando se utilizan bajo las mismas condiciones, sin embargo, la devolatilización en lecho fluidizado permite la obtención de briquetas devolatilizadas de calidad más uniforme.

Con relación a las materias primas el tratamiento en lecho fluidizado tiene la ventaja de no utilizar aglomerantes, compuestos que sí son indispensables en la tecnología tradicional y que constituyen un costo adicional significativo ya que en la mayoría de los casos son más costosos que el propio carbón.

##### **1.3.1.2 Con relación al proceso**

La confrontación de algunas de las variables fundamentales, como el tipo de proceso, el tiempo total de operación, el rendimiento industrial, y las temperaturas de operación, señalan algunas ventajas técnicas para los procesos que no utilizan aglomerantes. Estos, por ejemplo, permiten reducir el tiempo de procesamiento de más o menos 16-18 horas, requerido para la devolatilización en hornos convencionales tipo retorta, a 15-30 minutos en el lecho fluidizado, obteniendo de paso rendimientos ligeramente superiores y calidades más uniformes.

Los procesos de briqueteo sin aglomerante trabajan a temperaturas más bajas debido a que hay un mejor aprovechamiento de la energía térmica requerida para eliminar los volátiles y una menor resistencia al flujo de calor ya que el tratamiento se efectúa sobre las partículas individuales y no sobre la masa compactada.

Si embargo, presentan varios problemas de operación que deben tenerse en cuenta:

El transporte del carbón devolatilizado desde el lecho a la briqueteadora es isotérmico, debiendo mantenerse a 400-425°C.

El lecho fluidizado exige controles estrictos de temperatura, del orden de más o menos 2°C. Con el fin de no deteriorar la calidad del producto ni afectar el rendimiento.

La conformación de las briquetas se basa en el aprovechamiento del poco alquitrán remanente después de la volatilización. En consecuencia, se requiere trabajar a temperaturas elevadas y altas presiones, superiores a las comunes del proceso que utilizan aglomerante adicional.

Se recomienda hacer el apagado de las briquetas en atmósferas inertes.

Finalmente se considera dentro de los elementos de selección la versatilidad del proceso para adaptarlo a la producción de briquetas con las características apropiadas para el tipo de usuario a que están dirigidas. La inclusión de esta variable muestra como, el lecho fluidizado, solo es posible producir briquetas devolatilizadas como consecuencia de los principios en que se fundamenta la aglomeración. Elimina así la posibilidad de tener otras alternativas más económicas como las briquetas no devolatilizadas que podrían sustituir la leña, ya que en el caso de querer producir las habría necesidad de utilizar aglomerantes, lo cual significaría caer en la tecnología tradicional.

Este problema no se tendría con el proceso con aglomerantes donde la producción de briquetas no devolatilizadas constituye una etapa intermedia, anterior al tratamiento térmico para la reducción del contenido de materia volátil.

### **1.3.1.3 Proceso seleccionado**

Los estudios precedentes han servido para señalar las ventajas y desventajas relativas de cada una de las tecnologías consideradas. De acuerdo con dichos estudios, los procesos sin aglomerante parecen presentar algunas ventajas técnicas significativas sobre el método tradicional de briqueteo con aglomerante, especialmente en los aspectos que se refieren al valor de las materias primas, al tiempo de procesamiento y a las condiciones de operación.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, esta última técnica presenta limitaciones en cuanto al producto ya que solo permite la producción de un solo tipo de briquetas. Además, la devolatilización en lecho fluidizado y posterior briqueteo a alta temperatura conlleva algunas dificultades operativas importantes como son: el control de temperatura, las elevadas

presiones de briqueteo que reducen la vida del equipo u obligan al uso de materiales costosos y el transporte isotérmico del carbón en algunas etapas del procesamiento.

Muchas de las dificultades encontradas se deben a que el procedimiento es relativamente nuevo, siendo posible que aún no se haya ganado la suficiente experiencia para su dominio. En efecto, solo hacia 1960 comenzó a funcionar en Inglaterra la primera unidad comercial de que se tiene noticia. De ahí en adelante la experimentación ha continuado y se han producido varios cambios en los sistemas de control y transporte.

En consecuencia, se considera conveniente iniciar la producción haciendo uso del procedimiento tradicional de briqueteo con aglomerantes, técnica mediante la cual se han producido las briquetas en el mundo desde que éstas ingresaron al mercado de los combustibles de uso doméstico. Debe tenerse si la precaución de tratar de buscar distintas alternativas de compuestos aglutinantes que sustituyan la brea debido al costo de este último y a los riesgos que implica su utilización.

#### **1.4 COSTOS EN LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS**

El costo de la fabricación de briquetas depende fundamentalmente de tres factores: el costo de los finos de carbón fino entregado sobre la planta lista para ser procesada, el costo del adhesivo y los costos de capital. Los carbones finos que normalmente tienen poco valor, para justificar la inversión en una planta de briquetas son tratadas con un valor cero. Ello sin embargo no es cierto porque para abastecer la planta con carbón fino desde su fuente, hasta ella, se gasta dinero. Si no todos los finos de carbón derivan de recuperaciones manejadas por la industria de briquetas, se hallará que el precio de los finos de carbón aumenta regularmente apenas las briquetas aparecen en el mercado. Las fabricaciones exitosas de briquetas, como las que funcionan en los Estados Unidos y en otros países desarrollados, dependen de la coincidencia favorable de factores que generalmente no se presentan en los países en vía de desarrollo, y que son:

-Un mercado establecido para combustible casero tipo parrillada de alto precio.

-Capacidad de producir finos de carbón para briquetas a un costo muy bajo, cerca de los principales mercados y en volúmenes estables durante todo el año.

-Un volumen elevado de ventas apropiado para absorber la producción potencial de la planta.

-Suficiente capital para buen equipo y mano de obra hábil para el funcionamiento y la manutención.

-Un método adecuado de mercadeo, empaque y de distribución que permita al producto alcanzar adecuada penetración en el mercado a precios satisfactorios.

Mayormente en los países desarrollados se encuentran exitosas fabricaciones de briquetas. Un ejemplo es la industria que se basa sobre la carbonización del aserrín y la corteza, en el sur de los EE.UU. empleando hornos de fundición, rotativos-múltiples, que producen quizás entre 20 Y 50 ton de carbonilla fina por día. Este carbón vegetal, una vez aglomerado, destinado a las parrilladas, puede venderse en los despachos al por menor. Los gases del horno se queman para producir vapor para fuerza eléctrica, transformando por lo tanto el desperdicio de aserrín y corteza en dos productos útiles, energía eléctrica y briquetas de carbón vegetal. Al mismo tiempo se reducen al mínimo los problemas de la contaminación del aire y de la eliminación de desperdicios.

### **1.5 FORMA DE LA BRIQUETA**

Las briquetas de carbón pueden tener una forma ovalada, a manera de huevo, su color es negro y cada briqueta tiene un peso aproximado de 28-34 gramos, genera una temperatura promedio de 67.12°C a partir de los 15 minutos promedio que demora la estabilización de la combustión.<sup>(1)</sup>

Otras presentaciones de la briqueta pueden ser:

Briquetas de carbón grandes:

- Forma cilíndrica con 22 agujeros
- 150 mm. de diámetro
- 75 mm. de altura
- Peso: 1.725 kg.
- Duración promedio de la briqueta: 3 horas
- Energía equivalente: 1/4 de galón de kerosene

Briquetas de carbón chicas:

- Forma cilíndrica con 8 agujeros
- 100 mm. de diámetro
- 55 mm. de altura
- Peso: 0.6 kg.
- Duración promedio de la briqueta: 1.5 horas
- Energía equivalente: 1/6 de galón de kerosene<sup>(6)</sup>

## **1.6 COMPUESTOS AGLOMERANTES UTILIZADOS EN LA PRODUCCION DE BRIQUETAS**

### **1.6.1 Aglomerantes utilizados**

Desde hace mucho tiempo (1842) se ha venido investigando y descubriendo compuestos que permiten y facilitan la aglomeración del carbón, sobre todo la de los carbones duros (Antracitas, semiantracitas y algunos bituminosos).

Los resultados de tales investigaciones indican que los aglutinantes pueden ser de origen orgánico o inorgánico. Entre los primeros se cuentan la brea del carbón, los almidones, algunas resinas, gelatinas, residuos orgánicos industriales y agrícolas (Por ejemplo las cascarillas de arroz y café). Al segundo grupo pertenecen el cemento, la arcilla, varios silicatos y residuos de la industria química como las lejías de sulfito resultantes de la fabricación del papel. De los anteriores, los más utilizables en la producción de briquetas, así como sus ventajas y desventajas, son brea (alquitrán) del carbón, asfaltos del petróleo, arcillas bentonitas.

#### **1.6.1.1 Brea (Alquitrán) del carbón**

Producto de uso muy difundido en Europa, donde se emplea en cerca del 90% de las briquetas fabricadas con aglomerante. Se obtiene del proceso de eliminación de volátiles del carbón, mediante el tratamiento de la corriente gaseosa desprendida durante la operación. Puede utilizarse sólido (El tamaño de partícula recomendado está entre 14 y 120 mallas) o en estado fundido, prefiriéndose la última forma a la primera, puesto que así se reducen los problemas de manejo derivados de su peligrosidad por ser un poderoso cancerígeno.

Las características principales del producto sólido para ser utilizado como aglomerante son:

Punto de reblandecimiento	68-80°C
Carbono libre	14-21%
Materia volátil	65-75%
Cenizas	0.4 -0.5%
Tamaño de partícula	55% menor de 0.5 mm

Debido a los elevados precios del producto en el mercado se ha buscado sustituir la brea por alquitrán crudo derivado de la carbonización a baja temperatura. Sin embargo, se han encontrado dificultades como el poco rendimiento de alquitranes obtenido a las temperaturas de operación, y el efecto adverso de este aglomerante durante la etapa de tratamiento térmico

de briquetas. Además, presenta riesgos de manejo similares a los de la brea por ser también un agente cancerígeno.

#### **1.6.1.2 Asfaltos del petróleo**

Cerca del 80% de las briquetas americanas se aglomeran con asfalto obtenido como residuo de la destilación del petróleo y la tendencia en los países europeos es hacia el cambio por este subproducto.

Sus características son similares a las del alquitrán y por lo tanto también lo son sus efectos sobre el producto. Es decir, con su aplicación se logra la deseada aglomeración y la protección de las briquetas contra las inclemencias del tiempo. Aunque no afecta el contenido de cenizas, eleva los niveles de humo en cantidades apreciables.

Cuando se utiliza en lugar del alquitrán, permite un mayor contenido de humedad libre en el carbón.

Las briquetas producidas con este material demoran más tiempo para enfriarse después de la desvolatilización debido a que se afecta su habilidad para transportar el calor. Como es lógico, el efecto altera el valor del producto como combustible debido a que la ignición es más lenta y difícil.

#### **1.6.1.3 Arcillas bentonitas**

Permiten adiciones relativamente altas, del orden de 2-4% mayores en comparación con otras sustancias similares.

Además tienen la ventaja de mejorar sus propiedades mecánicas, y por ende las del combustible, con la temperatura durante los tratamientos térmicos y la combustión de las briquetas.<sup>(16)</sup>

#### **1.6.2 Alternativas de uso de aglomerantes**

Generalmente los aglomerantes tienen un costo superior al del carbón, de ahí que sea necesario establecer un balance entre su costo y la cantidad necesaria para hacer una buena briqueta, como variable fundamental para seleccionar el más aconsejable.

En otras palabras, debe buscarse una reducción de costo por el uso de aglutinantes teniendo en cuenta no desmejorar las propiedades de la briqueta y no interferir con algunas operaciones del proceso de fabricación: debe permitir la desvolatilización a temperaturas relativamente bajas, así como facilitar la conformación de la briqueta utilizando presiones moderadas.<sup>(17)</sup>

En este proyecto se utilizará arcilla bentonita ya que está es la mas económica en comparación con la brea del carbón y el asfalto del petróleo, también mejora propiedades mecánicas y de combustible de las briquetas. La brea del carbón tiene en contra que es cancerígena y puede generar problemas de salud ocupacional, además el proceso de aglomeración es más complicado en comparación con el que usa bentonita. .<sup>(7)</sup>

En este proyecto las etapas de trituración, clasificación, lavado, y molienda del carbón no son necesarias de realizar por que se va a utilizar un carbón fino que viene de un proceso de lavado, tampoco es necesario el secado, ya que el poder aglomerante de la arcilla bentonita se activa con el agua. La etapa de tratamiento térmico (Desvolatilización), es la coquización.

## **1.7 COQUE**

### **1.7.1 Propiedades físicas y químicas**

El coque es un residuo poroso que se obtiene al someter carbones bituminosos de tipo adecuado, a un proceso de carbonización a alta temperatura fuera del contacto con el aire, hasta alcanzar el desprendimiento de casi todas las materias volátiles, quedando un producto final constituido en su mayor proporción por carbono fijo, con adición de pequeñas cantidades que no exceden de 2-3 %, de hidrogeno, oxígeno y nitrógeno, y además las sustancias incombustibles que formarán las cenizas; también el coque contiene agua en proporciones que varían según el método seguido durante la manufactura para el apagado a la salida de los hornos. Los poros que dan aspecto intumesciente al coque, se deben al desprendimiento de gases de la masa pastosa que se prepara en las primeras fases de su elaboración.

Los constituyentes más nocivos en el coque son las cenizas, el azufre y las materias volátiles, incluyendo el agua. Como el rendimiento en coque es solo de 2/3 a 3/4 del carbón empleado en su manufactura, el contenido original de cenizas aumenta proporcionalmente, por tal razón se hace preciso depurar el carbón antes de coquizarlo, triturándolo y lavándolo, para remover en lo posible las partículas de pizarra, piritas y demás materias extrañas, procurando que las cenizas en el coque no excedan de 10% al final.

Cuando el coque es producido mediante un proceso rápido y a temperatura relativamente baja, como cuando se trata de producir gas, el coque resultante es de un color negro mate de apariencia esponjosa y de textura semejante a la piedra pómez; se enciende con relativa facilidad, aunque menos pronto que el carbón bituminoso, y puede ser quemado en hogares

abiertos, pero cuando se obtienen mediante la aplicación del calor en forma continua y prolongada, como sucede cuando se trata de producir coque metalúrgico, el producto es más duro y denso. En los coques de mejor calidad de este tipo, el producto es de color gris plateado brillante, con lustre semimetálico, es buen conductor del calor y electricidad y solo puede ser quemado en hogares de fuerte tiro.

El coque compacto que se forma en las paredes interiores de las retortas de gas (carbón de retorta), solo puede ser quemado en pequeños hornos de modelo especial, pero tiene alto rendimiento calorífico.

El coque es un carbón parcialmente grafitizado, siendo su densidad intermedia entre la del carbón y la del grafito, por tal razón debería ocupar menos espacio que el carbón, pero debido a su naturaleza esponjosa, un volumen dado de coque es menos pesado que un volumen igual de carbón. Hay pues que considerar en el coque, su densidad aparente y su densidad verdadera. La densidad aparente del coque se determina por medio del conocido aparato llamado hidrómetro; deben observarse ciertas precauciones para medir la densidad aparente del coque, las pruebas deben efectuarse sobre trozos del mismo tamaño y de la misma forma aproximadamente; al sumergirse las muestras en el hidrómetro, deben ser movidas varias veces de arriba abajo, para remover las burbujas, las muestras de coque por su gran porosidad no deben permanecer más de 5 minutos en el agua, y deben someterse a un secado previo antes de realizar las pruebas de densidad. Para determinar la densidad verdadera del coque, se usa el picnómetro, también muy conocido, en el que se opera pulverizando previamente la muestra. Es esta combinación de propiedades que le da al coque la importancia especial que tiene en la fundición de minerales de hierro, por ser sustancia suficientemente densa para resistir la oxidación por el bióxido de carbono en las partes más elevadas del horno, en tanto que su estructura vesicular le da una extensa superficie para la acción del aire calentado y facilita su ingreso por las toberas. El rendimiento en coque puede variar mucho según la clase de carbón en bruto que se use como materia prima, y también según el método seguido en su manufactura; en condiciones muy desfavorables y empleando carbones de inferior calidad, el rendimiento puede alcanzar tan solo a 25 %, mientras que en otros casos puede obtenerse 50% y hasta 75% de coque.

La composición del coque varía promedio dentro de los límites siguientes:

Carbono Fijo 90 a 95 %

Cenizas 2.5 a 5.0 %

Agua 5.0 a 10 %

La mayor parte de los elementos minerales constituyentes del carbón permanecen en el coque, incorporados en las cenizas; entre dichos

elementos queda el residuo de azufre que no se desprendió en forma gaseosa durante la carbonización; se considera que generalmente queda en el coque la mitad del azufre contenido en el carbón original, que puede encontrarse en la forma de sulfuro mineral, como la pirita, o bien como azufre orgánico proveniente de los vegetales que originaron el carbón, o por último en la forma de sulfatos en pequeñas cantidades.

La medida de la microdureza de los carbones y de los coques se ha hecho necesaria en vista de la heterogeneidad de sus componentes, que resta importancia para fines tecnológicos a los datos relativos a las medidas de la macrodureza. Las medidas se efectúan con el microscopio y el microdurómetro Reichert.

Las medidas sobre las microdurezas, han permitido constatar:

Que los semi-coques á 500°C tienen una microdureza comparable a la de los carbones.

Que la curva alcanza un máximo a los 1000°C que es la temperatura de carbonización industrial más corriente.

Que se produce una baja de la curva hacia los 2000°C fenómeno que debe ser confirmado y dilucidado con más experimentos.

La diferencia constatada entre los coques y los semi-coques, no deja de tener interés práctico, ya que la mezcla de sustancias carbonosas que integran la pasta que se emplea como materia prima del coque, depende de sus propiedades mecánicas y de su microdureza; a lo que se debe añadir finalmente, que en una mezcla cada uno de sus componentes (reconocibles mediante sus propiedades ópticas entre nicols cruzados) conserva casi siempre su propia microdureza.

### **1.7.2 Carbones coquizantes y no-coquizantes**

No todos los carbones bituminosos son susceptibles de producir coques de buena calidad al ser sometidos a los procesos especiales de carbonización que se emplean en la elaboración de dicho producto; carbones de constitución química muy semejante acusada por sus análisis, difieren en los resultados correspondientes en sus respectivas pruebas de coquización; de manera que no hay relación directa entre la composición elemental de un carbón y su capacidad de ser coquizado; la aptitud para producir coque de calidad aceptable se terminaba antes para cada tipo de carbón según su procedencia, por medio de pruebas empíricas pero a medida que avanzaron las investigaciones realizadas con relación a las condiciones genéticas de deposición de los carbones y su correspondiente constitución petrográfica, se

ha llegado a explicar el diferente comportamiento de carbones correspondientes al mismo tipo según su clasificación química, pero que difieren en cuanto a la constitución petrográfica de sus elementos componentes, lo que permite ya en algunos casos, aumentar la gama de los carbones aprovechables, mediante procedimientos de preparación mecánica y mezclas de las diversas fracciones en proporciones adecuadas para obtener pastas, en las que se han corregido previamente las condiciones adversas de los carbones brutos y que después de ser briqueteados, pueden ser sometidos al proceso de coquización en hornos, y rendir productos de buena calidad.

Las primeras investigaciones realizadas sobre los elementos petrográficos macroscópicos que en forma de bandas o fajas, se presentan en todos los mantos de carbón bituminoso en Inglaterra, se deben a M. C. Stopes, citado por W. Francis; a dichos elementos que pueden ser diferenciados macroscópicamente, y que son separables unos de otro, los denominó como se ha indicado anteriormente con los nombres de “fuseína”, “vitreína”, “claraína”, y “duraína”.

Son muy interesantes los experimentos de Lessig sobre coquización; este autor ha podido establecer que el poder coquizante de la “fuseína” y “duraína” es nulo, la “claraína” es el elemento que presenta los mayores poderes coquizante y aglutinante, en tanto que la “vitreína”, carece de poder aglutinante. Bury ha logrado valiéndose de los procedimientos de flotación, efectuar una separación de los elementos tratando un carbón considerado inaparente para coque, y separando la “fuseína” por flotación, obtener coque excelente, estos descubrimientos están llamados a tener una importancia capital en la fabricación de coques metalúrgicos.

Wheeler citado por Kitazaki, separó químicamente en 1927, una fracción a la que llamó fracción gama, y creyó que era la sustancia que producía la coquización, coking principle, la hipótesis de que las propiedades coquizantes se deben a un elemento especial que contienen, mantuvo el problema sin solución durante varias décadas; ahora se atribuyen las propiedades coquizantes de los carbones a la interacción molecular.

La resistencia y propiedades cohesivas del coque, están también íntimamente relacionadas con la naturaleza de los carbones que se emplean en su elaboración, pudiendo ser o no “conglutinantes”, “caking” – or – “no caking” coals. Según sea el grado de compacticidad o fragmentación del coque que producen.

Los carbones aparentes para coquización, son los que se caracterizan por sus buenas propiedades aglutinantes y bajo contenido en cenizas; los mejores carbones para coque, son los que tienen de 20 á 30 % de materias

volátiles cuando se destilan a 900°C. Los carbones de coque al ser calentados se hinchan, y después de pasar por un estado muy marcado de intumescencia, dejan un residuo poroso muy coherente, que es lo que constituye el coque. Otros carbones que al contrario no presentan señal de intumescencia al calentarlos dejan un residuo incoherente, son los carbones del tipo “no-coquizante”, y pueden ser ricos en oxígeno y arden con llama larga o bien ricos en carbono y entonces arden con llama corta y sin humo; entre estos extremos, hay tipos intermedios que pueden tener propiedades más o menos “coquizantes”.

Solo los carbones que dan un coque resistente a las presiones sacudidas, pueden ser considerados en la categoría de buenos carbones “coquizantes”.

### **1.7.3 Pruebas para distinguir los carbones coquizantes**

Aun cuando no hay ninguna prueba física ni química que permita determinar en forma expedita si un carbón es o no aparente para producir buen coque, hay algunas pruebas que en muchos casos dan idea aproximada de las propiedades coquizantes de los carbones examinados, una de ellas consiste en determinar la proporción H/O, la que indica que el carbón tiene las cualidades de fusión e intumescencia necesarias para una buena coquización, cuando es de 59% o mayor.

Cuando la proporción es menor de 55%, puede coquizarse en hornos de colmena, aunque es raro que pueda producir un buen coque. Los carbones que se acercan al tipo antracita, los carbones intemperizados y los del tipo boghead-cannel, se apartan considerablemente de la anterior regla. La solubilidad del carbón en anilina también puede usarse como indicador de las propiedades coquizantes, el carbón insoluble en anilina, se congutina y se hincha al coquizarse. Una prueba simple y que en muchos casos da resultados satisfactorios es la del mortero de ágata, los carbones coquizables se adhieren a la superficie lateral del mortero al triturarse, lo que no sucede con los no coquizables. Otra prueba que se usa con frecuencia para determinar las cualidades coquizantes de un carbón consiste en mezclar el carbón pulverizado con arena y calentar la mezcla, la aptitud de un carbón para coquizarse se juzga por la proporción de arena que cementa el carbón; las cualidades relativas de los diferentes carbones se fijan por una escala formulada a propósito; todos los carbones dejan un residuo, pero en muchos casos es polvoriento e incoherente y de ningún valor, si no es briquetado. Se asume que un buen carbón coquizante, debe tener más de 30% de materiales volátiles, y no tener más de 1 ½ % de azufre y 0.02% de fósforo.

#### **1.7.4 Panorama del coque en Colombia.**

El consumo “per cápita” de hierro y acero que se considera como índice para medir el nivel económico de las naciones está aumentando en forma considerable en los últimos años, hecho que unido a la escasez de dichos productos de apremiante necesidad, ha estimulado el interés de varios países sudamericanos, para establecer sus respectivas industrias siderúrgicas, con capacidad para abastecer por lo menos sus propias necesidades.

Siendo el coque metalúrgico una de las dos materias primas que intervienen en mayor cantidad en los procesos siderúrgicos, constituye su producción una de las mayores necesidades para el funcionamiento normal de dicha industria.

Aunque las reservas del carbón son suficientes en varios países que están tratando de desarrollar su siderurgia, la calidad de los carbones no es la mayor parte de los casos, apropiada para la fabricación de coque metalúrgico de características aceptables, siendo necesario mezclarlos con brea ú otros carbones importados.

A continuación reseñamos brevemente la situación de Colombia, con respecto al coque.

Este país está dictado de considerables reservas de carbón, su producción de dicho combustible sólido, ha aumentado notablemente en los últimos años (1'500,000 T.M); tiene cinco yacimientos importantes situados convenientemente con relación a los centros industriales de consumo, uno está próximo a Bogotá y los otros dos cerca de Medellín, Cali, Guajira y Cesar respectivamente.

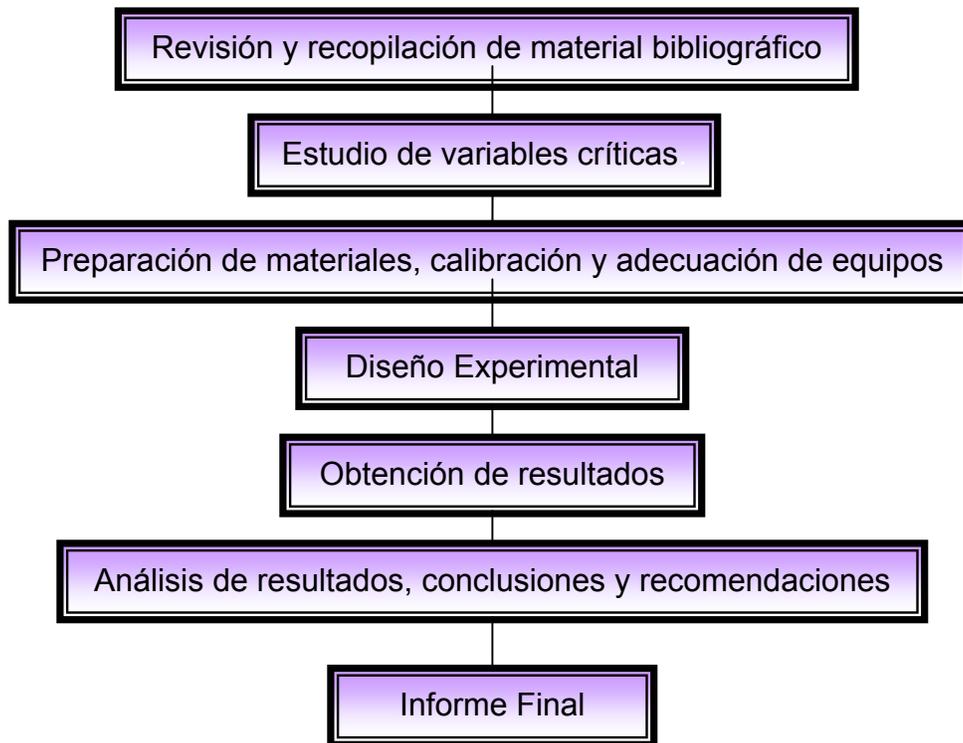
A mérito de un contrato celebrado entre el gobierno de Colombia y la Banque de París et des Pays – Bas; se ha construido una planta lavadora de carbón cerca de Cali. Siendo Colombia uno de los países de Sud América, en la que la demanda de hierro y acero, ha aumentado en mayor proporción en los últimos años, era natural que su Gobierno tratara de asegurar el establecimiento de una industria siderúrgica propia, cuya financiación se ha llevado a cabo con el aporte del capital privado y del Estado. La planta siderúrgica ha instalado en las inmediaciones del yacimiento de mineral de hierro de Paz del Río, situado a 280kms. por carretera al N.W de Bogotá y a 2,225 M. de altura sobre el nivel del mar. Las reservas estimadas de carbón en una región vecina a las instalaciones, se calcula en 1,9000 millones de toneladas; la calidad de los carbones es apropiada para la elaboración de coque metalúrgico.<sup>(8)</sup>

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 PLAN DE TRABAJO

El desarrollo del presente trabajo de investigación se llevó a cabo mediante la ejecución de las siguientes etapas; ver figura 1, la selección de las variables críticas se ilustra en la Figura 2 y el desarrollo experimental en la Figura 3.

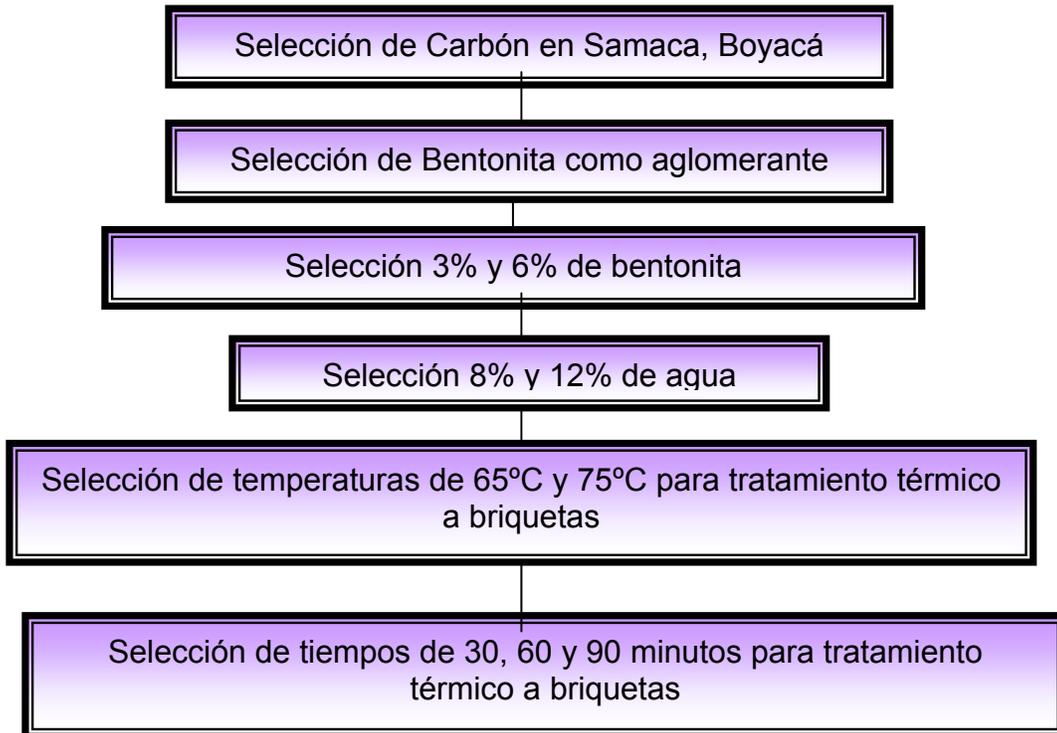
Figura 1. Diagrama plan de trabajo



### 2.2 PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

Es importante mantener un procedimiento de prueba consecutivo para que los resultados sean realmente comparables y asegurar gran precisión.

Figura 2. Selección de variables y rangos.



## 2.2.1 Caracterización de las muestras

**2.2.1.1 Materia prima.** El material utilizado para la investigación fueron finos de carbón lavado provenientes de minas ubicadas en Samacá, Boyacá, con un tamaño de partícula menor a 0.5 mm, del cual se extrajeron muestras representativas bajo norma ASTM D2013-01 de tres clases de carbón que se clasificaron como carbón Tipo I, Tipo II y Tipo III. Como aglomerante se utilizó arcilla bentonita sodica nacional, obtenida en el mercado local.<sup>(15)</sup>

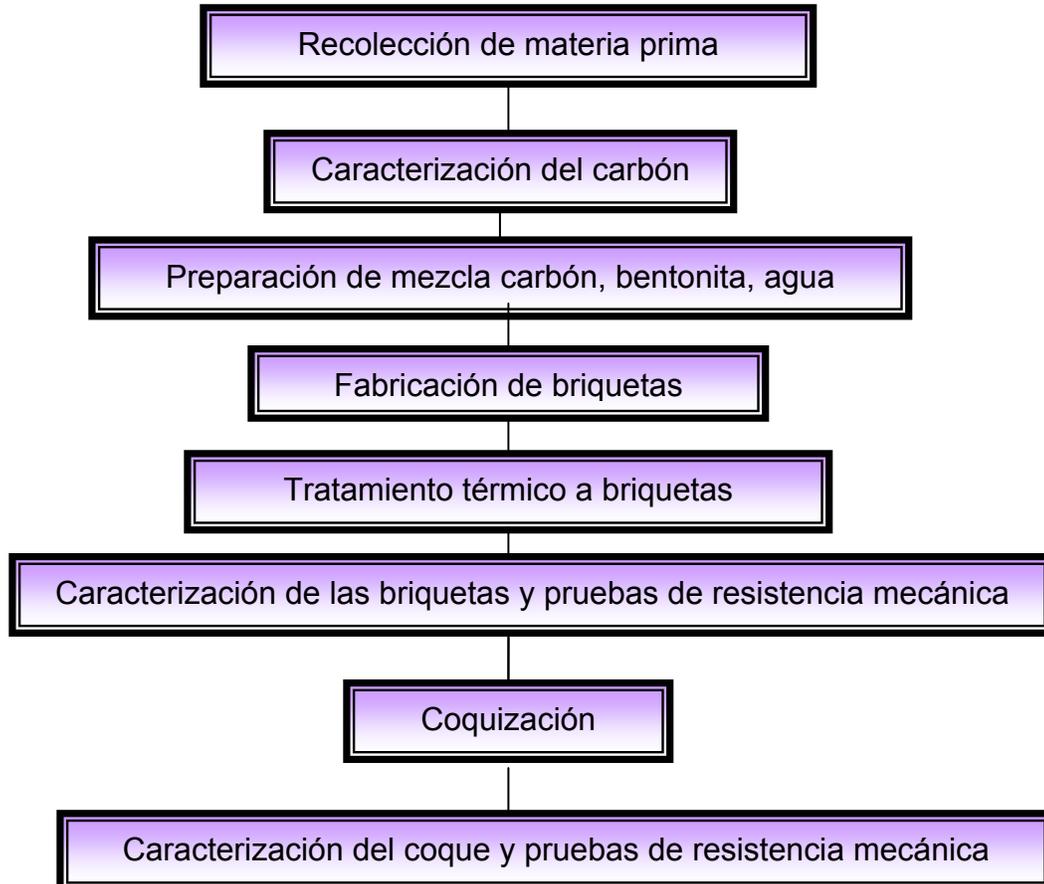
**2.2.1.2 Limpieza de las muestras.** La preparación y limpieza de las muestras fueron omitidas debido a que el carbón se encontraba en estado lavado, lo que garantizaba su pureza.

**2.2.1.3 Pesado de las muestras.** Todas las medidas de peso fueron realizadas en la balanza analítica AINSWORTH ubicada en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Industrial de Santander. La Fotografía 1 muestra la balanza analítica utilizada.

**2.2.1.4 Secado de las muestras.** La totalidad de las muestras analizadas fue secada al aire para eliminar el exceso de humedad debido al lavado

previo a que fueron sometidas. Para su caracterización en el Laboratorio las muestras fueron secadas en la estufa eléctrica MERMMERT ubicada en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Industrial de Santander. La Fotografía 2 muestra la estufa eléctrica utilizada.

Figura 3. Metodología experimental.



**2.2.1.5 Incinerado de las muestras.** Todas las muestras fueron incineradas para el ensayo de cenizas en la mufla eléctrica ELEKTRO ubicada en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Industrial de Santander, mufla la cual tiene un rango de operación de 100°C-1000°C. La Fotografía 3 muestra la mufla eléctrica utilizada.

**Fotografía 1.** Balanza analítica AINSWORTH.



**Fotografía 2.** Estufa eléctrica MERMERT.



**2.2.1.6 Determinación de la humedad en las muestras.** La determinación de la humedad en carbones se realizó de acuerdo a la norma ASTM D3173-00.<sup>(9)</sup>

**2.2.1.7 Determinación de porcentaje de cenizas en las muestras.** La determinación de porcentaje de cenizas en carbones se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 3174- 00.<sup>(10)</sup>

**Fotografía 3.** Mufla eléctrica ELEKTRO.



**2.2.1.8 Determinación de porcentaje de materia volátil en las muestras.** La determinación de porcentaje de materia volátil en carbones se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 3175- 01.<sup>(11)</sup>

**2.2.1.9 Determinación del índice de hinchamiento en las muestras.** La determinación del índice de hinchamiento en carbones se realizó de acuerdo a al procedimiento adjunto en el anexo A.<sup>(14)</sup>

**2.2.1.10 Determinación del poder calorífico de las muestras.** La determinación del poder calorífico en carbones se realizó con una bomba calorimétrica estática de acuerdo a la norma ASTM D 5865- 02.<sup>(12)</sup>

**2.2.1.11 Determinación de azufre total de las muestras.** La determinación del azufre en carbones se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 3177- 89 (Reapproved 2002).<sup>(13)</sup>

## **2.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL**

**2.3.1 Equipos.** Los ensayos se realizaron utilizando el mezclador, briqueteadora y estufa eléctrica ubicadas en el Laboratorio de Fundición de la Planta de Aceros Alvaro Quiroga Correa, además se utilizaron las instalaciones del Laboratorio de Carbones de la Universidad Industrial de Santander donde se encuentran equipos como la bomba calorimétrica, balanza analítica, estufa eléctrica, mufla eléctrica, horno horizontal.

**Fotografía 4.** Bomba calorimétrica estática BICASA.



**Fotografía 5.** Mezclador MITSUBISHI.



**Fotografía 6.** Briqueadora a nivel de laboratorio.



### **2.3.2 Producción de briquetas**

**2.3.2.1 Preparación de la mezcla.** Las mezclas utilizadas se prepararon utilizando el mezclador, adicionando primero el aglomerante y el carbón en una relación en peso determinada y mezclando durante cuatro minutos en seco y posteriormente se agregaba el agua en una relación en peso determinada y se procedía a mezclar durante tres minutos la mezcla húmeda según norma AFS. Las diferentes mezclas preparadas se conservaron dentro de recipientes herméticos para evitar su alteración al contacto con el medio ambiente. Los tipos de mezcla realizados se encuentran en el Cuadro 5.

**2.3.2.2 Fabricación de briquetas.** Las briquetas fueron fabricadas utilizando la briqueadora a nivel de laboratorio ubicada en el Laboratorio de Procesos de Minerales de la Planta de Aceros Álvaro Quiroga Correa, en la que se introducía la mezcla manualmente con la ayuda de un cucharón, debido a la falta de un sistema dosificador y se iba ejerciendo presión con la ayuda de un madero sobre la mezcla para facilitar la acción de la briqueadora, las briquetas caían en una bandeja ubicada en la parte inferior de la briqueadora de donde periódicamente se recogían y clasificaban. El peso promedio de las briquetas fue de 6,5 gramos y sus dimensiones fueron aproximadamente de 4 cm. de largo por 3 cm. de ancho y 2,5 cm. de alto.

**2.3.3 Tratamiento térmico de las briquetas.** El total de briquetas fabricadas para cada una de las mezclas fue dividido en tres partes iguales de las

cuales dos se trataron a temperaturas de 65°C, 75°C, durante tiempos de exposición a las briquetas de 30 min., 60 min., y 90 min. Y una última parte se dejó para secado al aire durante 48 horas. Este procedimiento se llevó a cabo en la estufa eléctrica ubicada en el Laboratorio de Fundición de la Planta de Aceros Alvaro Quiroga Correa.

### **2.3.4 Análisis post-producción de briquetas**

**2.3.4.1. Caracterización de las briquetas.** Las briquetas obtenidas fueron caracterizadas con los ensayos de humedad, cenizas, materia volátil, poder calorífico, índice de hinchamiento y contenido de azufre procediendo de manera idéntica al procedimiento de caracterización del carbón inicial y utilizando los mismos equipos como se indica en los numerales 2.2.1.2 al 2.2.1.11.

**Fotografía 10.** Estufa eléctrica K.H. HUPERT CO.



**2.3.4.2. Pruebas de resistencia mecánica.** Las briquetas obtenidas fueron evaluadas desde el punto de vista de su resistencia mecánica mediante los ensayos de caída y compresión.

**2.3.4.2.1. Ensayo de caída libre.** Se tomó una muestra de cada tipo de mezcla (tres briquetas) y se realizó el ensayo de caída libre (ver Fotografía 14) en la máquina ubicada en el Laboratorio de Procesos de minerales de la Planta de Aceros Alvaro Quiroga Correa, dejando caer cada briqueta desde una altura de 1,8 metros, y contabilizando el número de caídas que soportaba la briqueta sin partirse, luego se hizo un promedio del número de caídas que soporta cada clase de muestra.

**2.3.4.2.2. Ensayo de compresión.** Se tomaron muestras de cada mezcla (3 o 4 briquetas) y se realizó el ensayo de compresión a cada briqueta en la máquina universal de ensayo de compresión (ver Fotografía 13) ubicada en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingenierías

Fisicomecánicas, y al final promediando el valor de todos los ensayos se obtuvo el resultado de resistencia a la compresión.

**Fotografía 13.** Máquina universal de ensayos TREBEL.



**Fotografía 14.** Máquina de caída libre.



### 2.3.5. Coquización.

La coquización se desarrollo de acuerdo al proceso descrito a continuación, el cual consiste en colocar las briquetas dentro de un tubo metálico circular posicionado dentro del horno horizontal (ver fotografías 15 y 16) a una temperatura de 1000°C, dejándose pasar a través de él un flujo constante de nitrógeno, para garantizar la atmósfera totalmente ausente de oxígeno dentro del tubo, luego este gas es enviaba a una lechada de cal donde fue parcialmente neutralizado(ver fotografías 15 y 16 donde se observa el horno horizontal, el tubo contiene briquetas en su interior, conectado a la fuente de nitrógeno y la salida de gases de coquización dirigidos hacia una lechada de cal).

Las briquetas se mantuvieron durante un promedio de tres horas en el horno en estas condiciones para obtener el coque.

### 2.3.6 Análisis post-producción de coque

**2.3.6.1. Caracterización del coque.** El coque obtenido fue caracterizado con los ensayos de humedad, cenizas, materia volátil, poder calorífico y contenido de azufre, procediendo de manera idéntica al procedimiento de caracterización del carbón inicial y utilizando los mismos equipos como se indica en los numerales 2.2.1.2 al 2.2.1.11.

#### Fotografía 15. Montaje del proceso de coquización



**Fotografía16.** Vista lateral del montaje del proceso de coquización.



**2.3.6.2. Pruebas de resistencia mecánica.** El coque obtenido fue evaluado desde el punto de vista de su resistencia mecánica mediante los ensayos de caída libre y compresión, aplicando el mismo procedimiento que se siguió para evaluar la resistencia mecánica de las briquetas en los numerales 2.3.4.2., 2.3.4.2.1. y 2.3.4.2.2., esto con el fin de relacionar de manera directa la mejora en las propiedades mecánicas de los aglomerados.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 DESCRIPCIÓN**

El desarrollo del presente proyecto para evaluar la viabilidad de obtener aglomerados de carbón fino, se realizó de acuerdo con lo estandarizado por las normas ASTM, para asegurar la validez de los resultados.

El carbón utilizado proviene de minas ubicadas en Samacá Boyacá, el cual se caracterizó en el Laboratorio de Carbones de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, posteriormente se realizaron 72 mezclas de carbón teniendo en cuenta variables como porcentaje de bentonita, porcentaje de humedad, temperatura de estufado y tiempo de estufado.

A continuación se llevó a cabo el proceso de aglomeración con un proceso de briqueteo de las mezclas en la Planta de Aceros Alvaro Quiroga Correa de la Universidad Industrial de Santander.

Posteriormente se evaluó la resistencia mecánica de las briquetas fabricadas, por medio de los ensayos de compresión y caída libre, de aquí se escogieron las seis mejores mezclas desde el punto de vista mecánico y se caracterizaron bajo normas ASTM.

Por último se montó un proceso de coquización en el horno horizontal ubicado en el laboratorio de carbones, para coquizar las tres mezclas escogidas, coque que después fue caracterizado bajo normas ASTM.

#### **3.1.1 Caracterización del carbón**

En el Anexo B se pueden observar los cuadros con los valores para realizar el cálculo de porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas, porcentaje de materia volátil, poder calorífico, índice de hinchamiento, porcentaje de azufre total y porcentaje carbono fijo de los carbones utilizados, cuyos resultados se muestran en el cuadro 4.

**Cuadro 4.** Caracterización del carbón.

Tipo de Carbón	Humedad [% en peso]	Cenizas [% en peso]	Materia volátil [% en peso]	Azufre total [% en peso]	Poder calorífico [BTU/lb.]	Índice de hinchamiento	Carbono Fijo [% en peso]
Tipo I	0,964218	5.12436	24.95354	0.5433	15108.4	9	68.9579
Tipo II	0,919729	5.01619	18.62549	0.5142	13040.8	6	75.4386
Tipo III	0,932404	5.33956	13.85863	0.5481	15510.7	9	79.8694

### 3.1.2 Briquetización

Se realizaron en total 72 mezclas, en las fotografías 7,8 y 9 se observan las dimensiones de las briquetas obtenidas, y en las fotografías 11 y 12 se observan ejemplos de estas mezclas.

**Cuadro 5.** Variables críticas en el proceso de briquetización.

AGLOMERANTE [bentonita % en peso]	3 y 6
HUMEDAD [% en peso]	8 y 12
TIEMPO EN EL HORNO [minutos]	30,60 y 90
TEMPERATURA EN EL HORNO [°C]	65 y 75

**Fotografía 7.** Longitud de la briqueta



**Fotografía 8.** Ancho de la briqueta



**Fotografía 9.** Altura de la briqueta



**Fotografía 11.** Briquetas de mezcla de carbón alto volátil con tres por ciento de bentonita y doce por ciento de humedad, en la cual se efectuó un tratamiento térmico durante 60 min. a una temperatura de 75°C.



**Fotografía 12.** Briquetas de mezcla de carbón medio volátil con tres por ciento de bentonita y ocho por ciento de humedad, en la cual se efectuó un tratamiento térmico durante 90 min. a una temperatura de 65°C.



### 3.1.3 Pruebas mecánicas a briquetas

Se realizaron tres ensayos a cada una de las 72 mezclas de resistencia a la caída y a la compresión, de los cuales se puede observar el promedio en el Anexo C.

#### 3.1.3.1 Resistencia a la caída

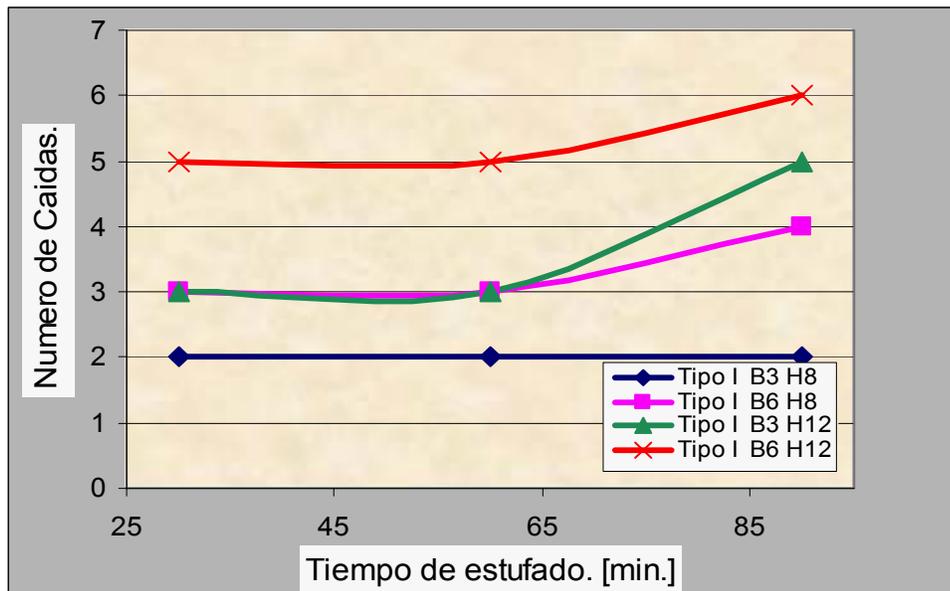
En las figuras 4 a la 9 se aprecia la influencia del tiempo de estufado en el número de caídas que resisten las briquetas de los carbones analizados teniendo en cuenta el porcentaje de bentonita, el porcentaje de humedad y la temperatura de estufado.

Se observa como a 75°C el número de caídas que resisten las briquetas es mayor que a 65 °C.

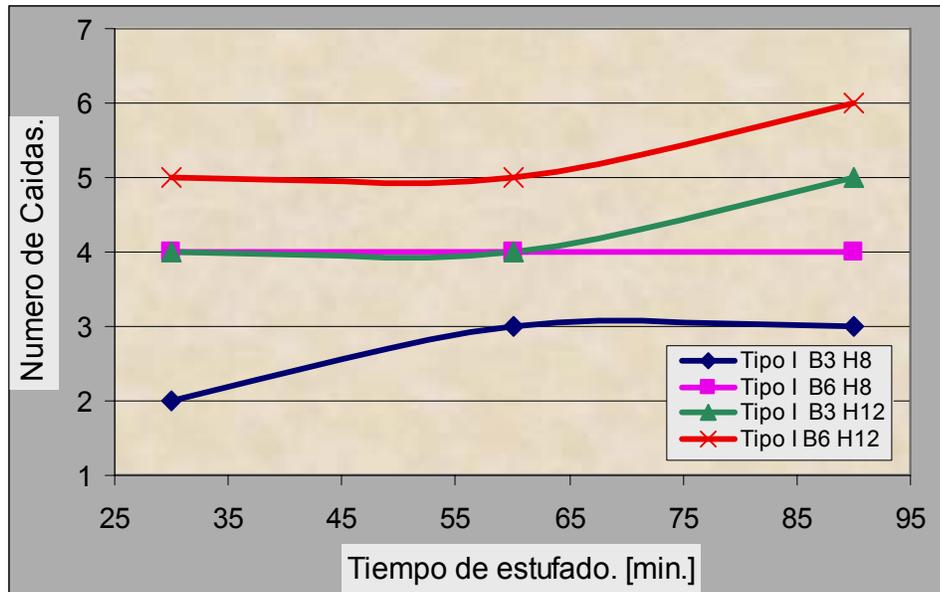
Se aprecia claramente que a medida que aumenta la humedad en la briketa, más caídas resisten al igual que cuando aumenta el porcentaje de bentonita.

En general el comportamiento de las gráficas de número de caídas versus tiempo de estufado es el mismo para los tres tipos de carbón analizados.

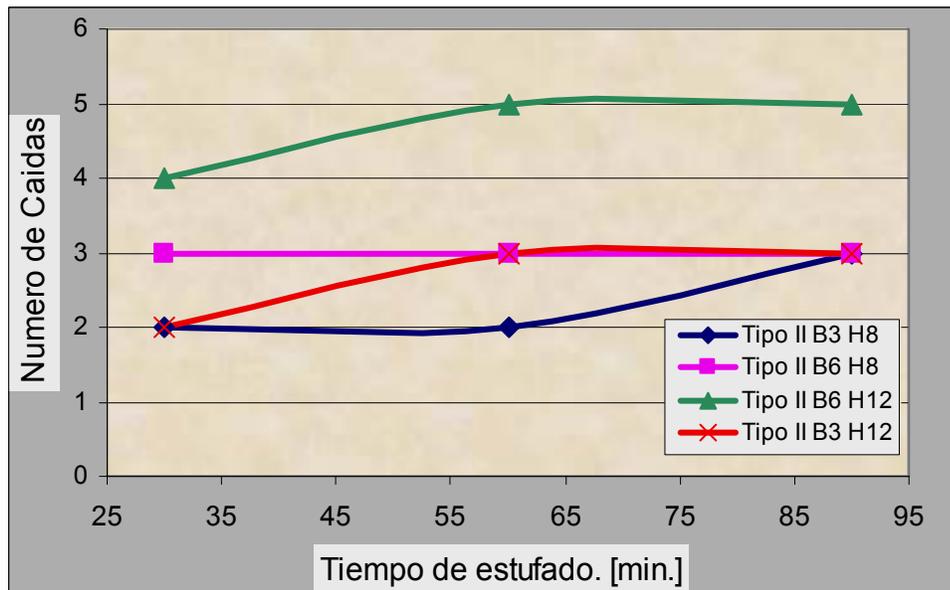
**Figura 4.** Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo I estufadas a 65°C



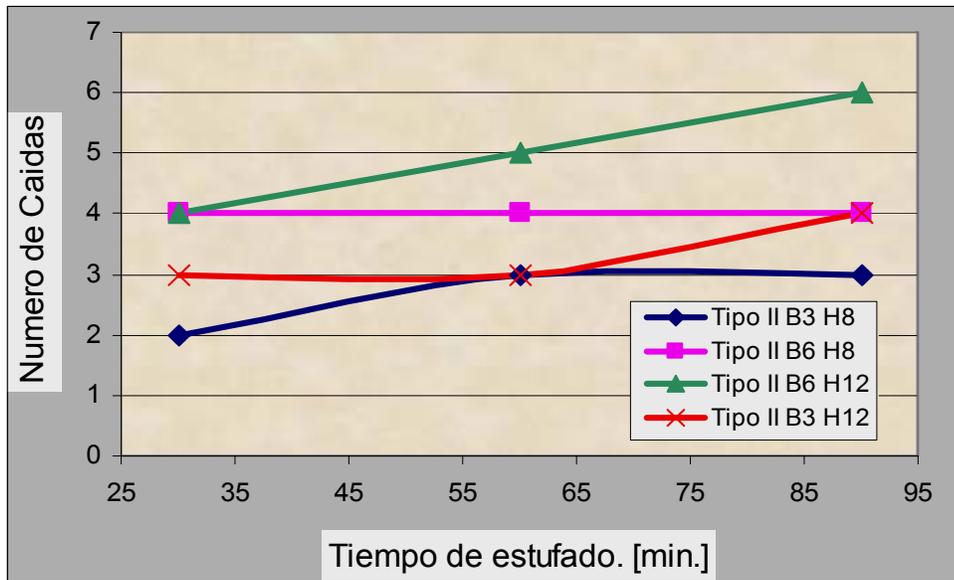
**Figura 5.** Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo I estufadas a 75°C



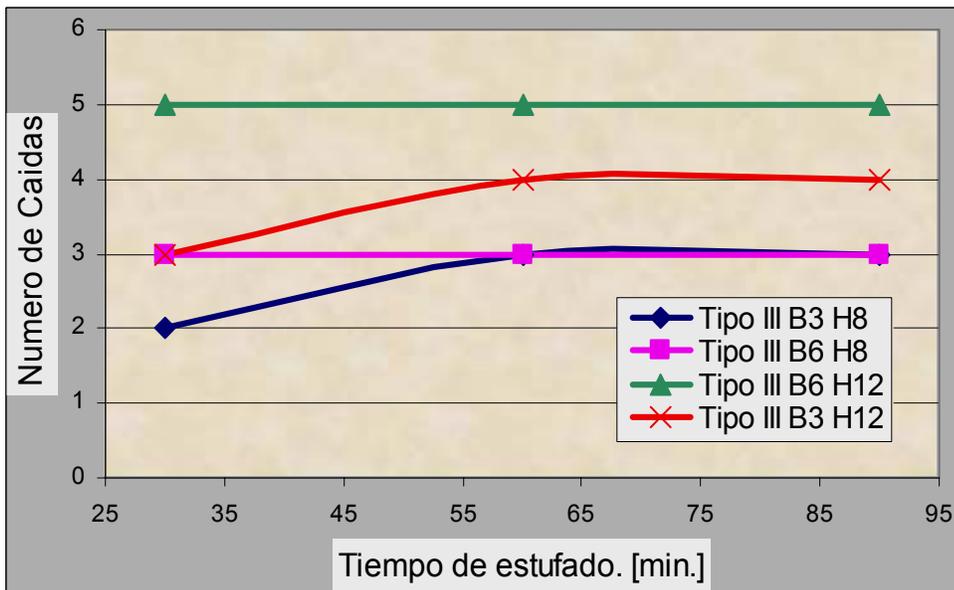
**Figura 6.** Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo II estufadas a 65°C



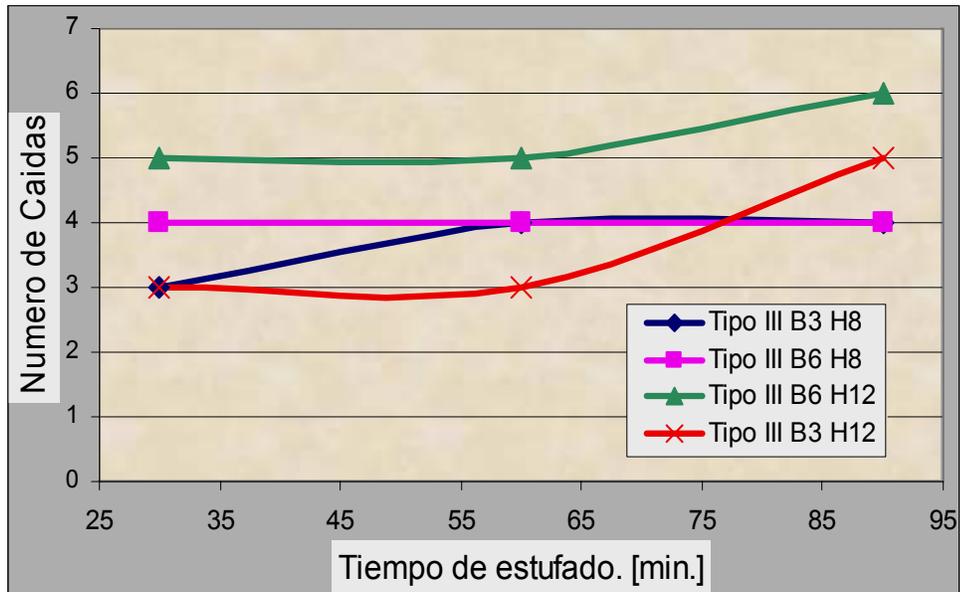
**Figura 7.** Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo II estufadas a 75°C



**Figura 8.** Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo III estufadas a 65°C



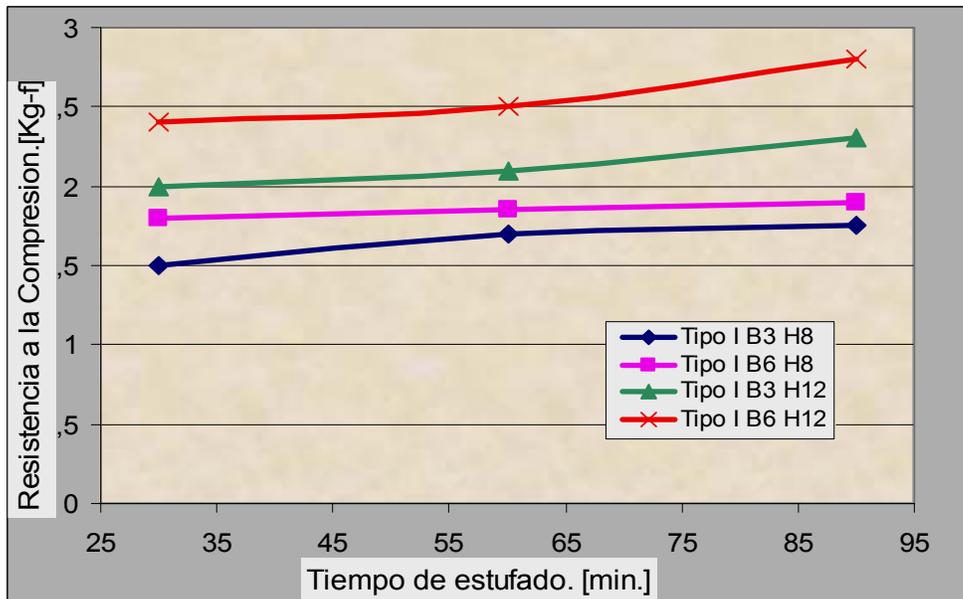
**Figura 9.** Resistencia a la caída de briquetas de carbón tipo III estufadas a 75°C



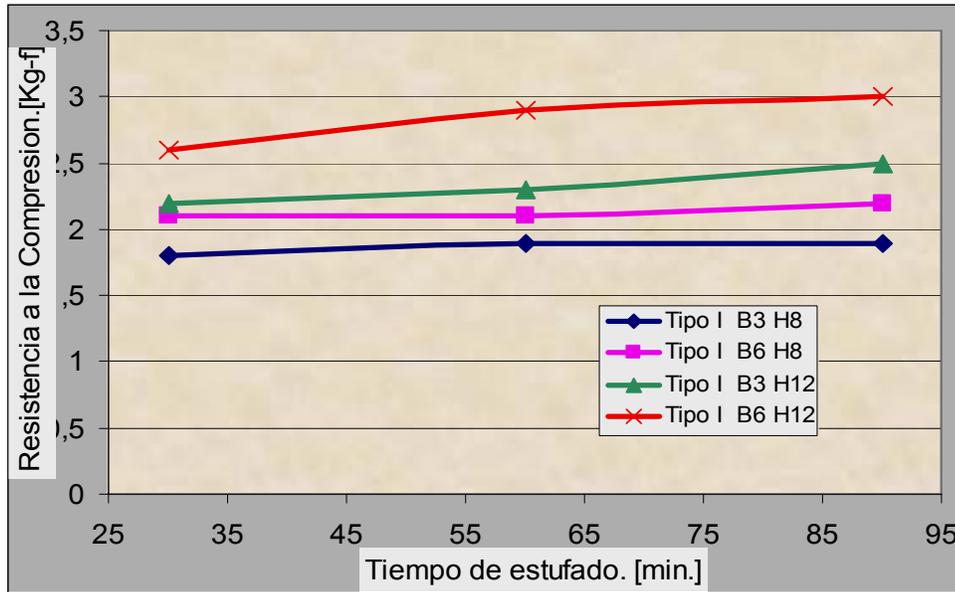
### 3.1.3.2 Resistencia a la compresión

En las figuras 10 a la 15 se observa la influencia del tiempo de estufado en la resistencia a la compresión de las briquetas fabricadas analizando la influencia de variables como el porcentaje de humedad, la temperatura de estufado y el porcentaje de bentonita.

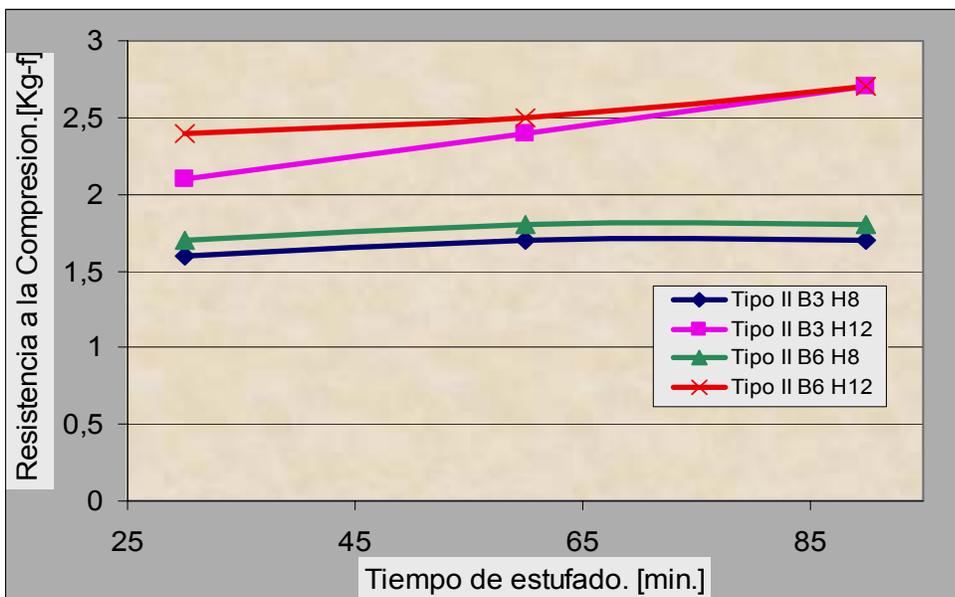
**Figura 10.** Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo I estufadas a 65°C



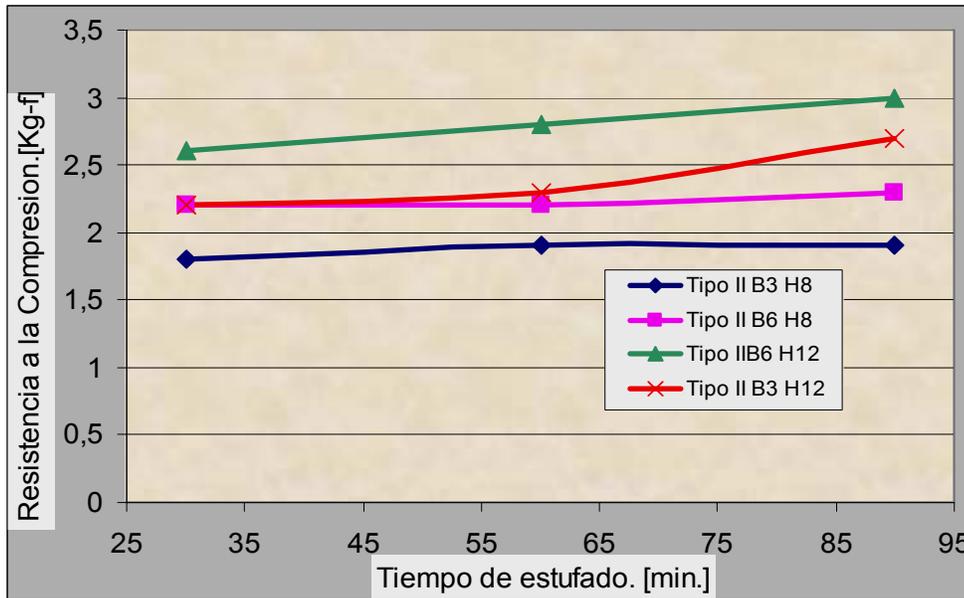
**Figura 11.** Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo I estufadas a 75°C



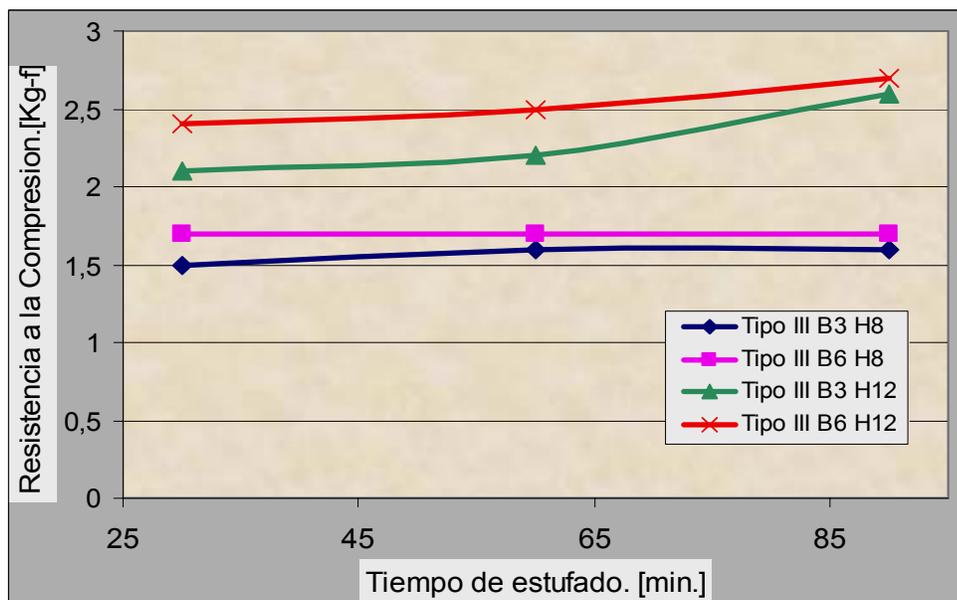
**Figura 12.** Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo II estufadas a 65°C



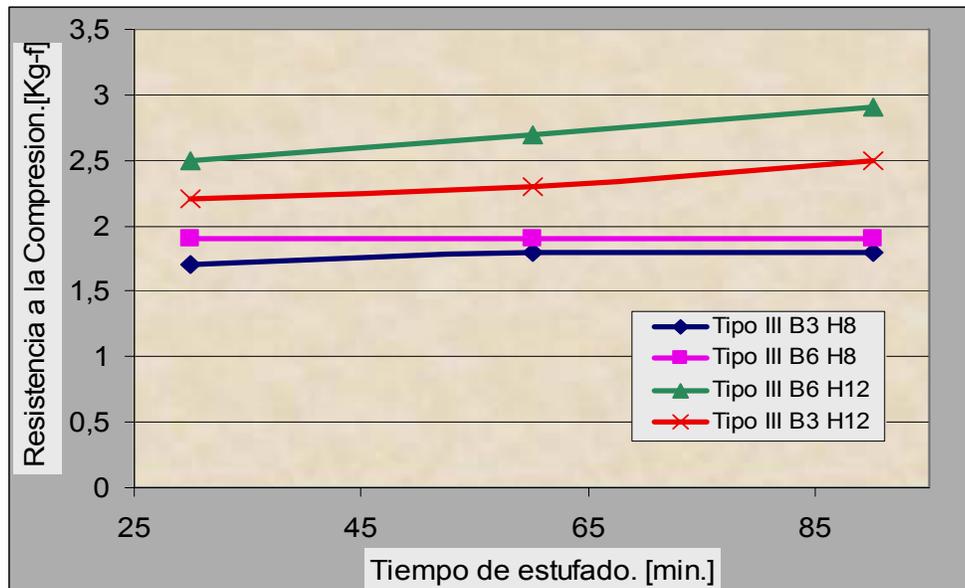
**Figura 13.** Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo II estufadas a 75°C



**Figura 14.** Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo III estufadas a 65°C



**Figura 15.** Resistencia a la compresión de briquetas de carbón tipo III estufadas a 75°C



Los tres tipos de carbones estudiados presentan un comportamiento bastante similar, a medida que el tiempo de estufado es mayor, la resistencia a la compresión también aumenta; cuando la briqueta es sometida a una temperatura mayor, la resistencia a la compresión es más alta.

La resistencia a la compresión aumenta cuando el porcentaje de bentonita es mayor; del mismo modo que el porcentaje de humedad, ya que la resistencia a la compresión aumenta significativamente.

### 3.1.4 Caracterización de las briquetas

Se caracterizaron las 6 mejores mezclas de carbón desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, las cuales fueron:

- ♦ Carbón Tipo I , bentonita 6%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.
- ♦ Carbón Tipo I , bentonita 3%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.
- ♦ Carbón Tipo II , bentonita 3%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.
- ♦ Carbón Tipo II , bentonita 6%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.
- ♦ Carbón Tipo III, bentonita 6%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.
- ♦ Carbón Tipo III, bentonita 3%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.

**Cuadro 6.** Caracterización de las briquetas

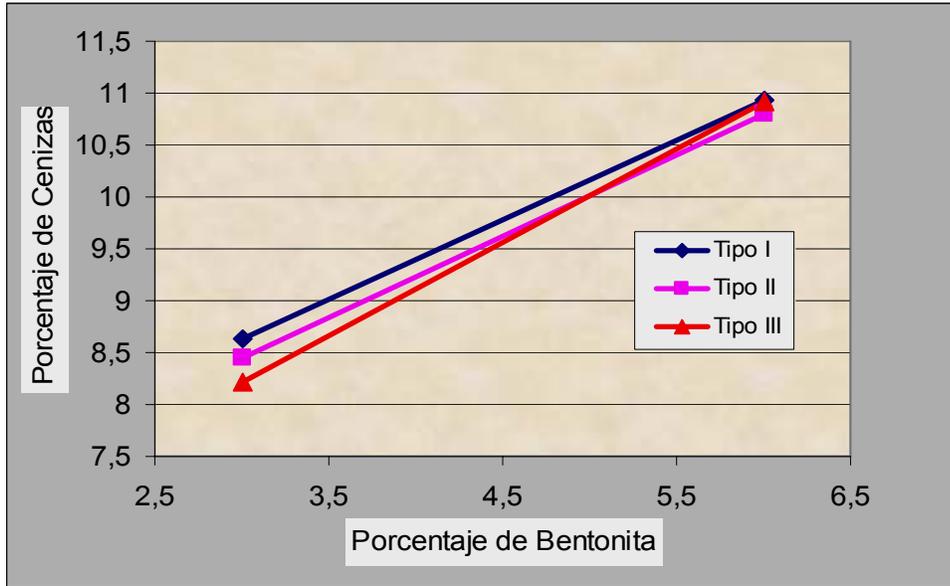
Tipo de mezcla	Humedad [% en peso]	Cenizas [% en peso]	Materia volátil [% en peso]	Azufre total [% en peso]	Poder calorífico [BTU/lb.]	Índice de hinchamiento	Carbono Fijo [%enpeso]
Tipo I B6H12 90min	1.4733	10.935	23.9037	0.5728	14365.9	9	61.7207
Tipo I B3H12 90min	1.9104	8.6275	24.3238	0.5680	14817.4	9	65.1383
Tipo II B3H12 90min	1.0642	8.4582	22.8466	0.5347	12768.6	6	67.6310
Tipo II B6H12 90min	1.4270	10.794	21.4573	0.5417	12192.3	6	66.3214
Tipo III B6H12 90min	1.4203	10.923	18.7224	0.5769	14223.3	9	68.9341
Tipo III B3H12 90min	1.2237	8.2209	20.0378	0.5754	14816.3	9	70.5176

En el Anexo D se pueden observar los valores para realizar el cálculo de porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas, porcentaje de materia volátil, poder calorífico, porcentaje de azufre total y porcentaje carbono fijo de las briquetas fabricadas.

#### **3.1.4.1 Influencia de la bentonita en el contenido de cenizas**

De la Figura 16 se observa que cuando en la briqueta hay mayor cantidad de bentonita hay un incremento bastante grande en el porcentaje de cenizas; este comportamiento es bastante similar para los tipos de carbón estudiados.

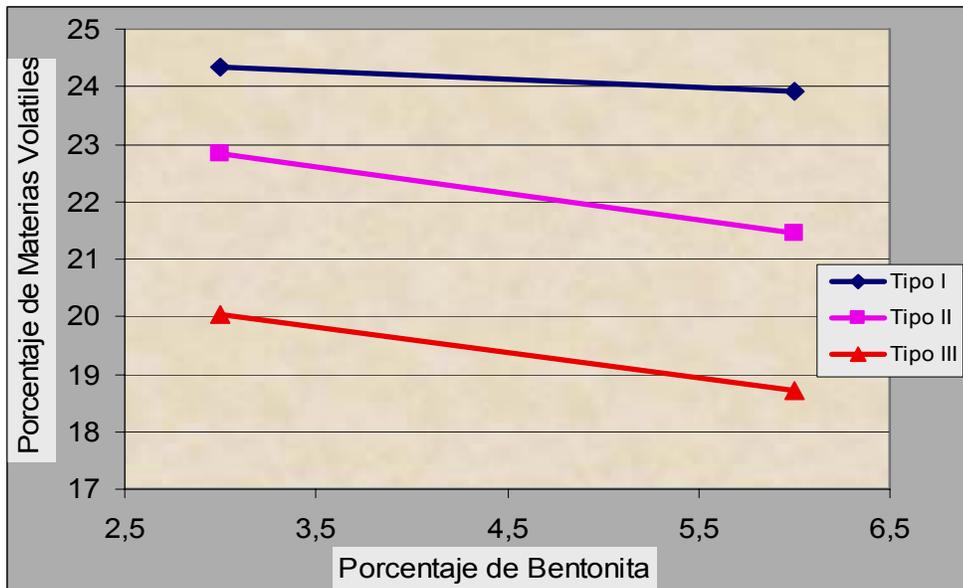
**Figura 16.** Bentonita versus cenizas



### 3.1.4.2 Influencia de la bentonita en el contenido de materia volátil

El porcentaje de materia volátil disminuye un poco cuando aumenta la cantidad de bentonita, esto ocurre en los tres tipos de carbones analizados en el presente proyecto (ver Figura 17).

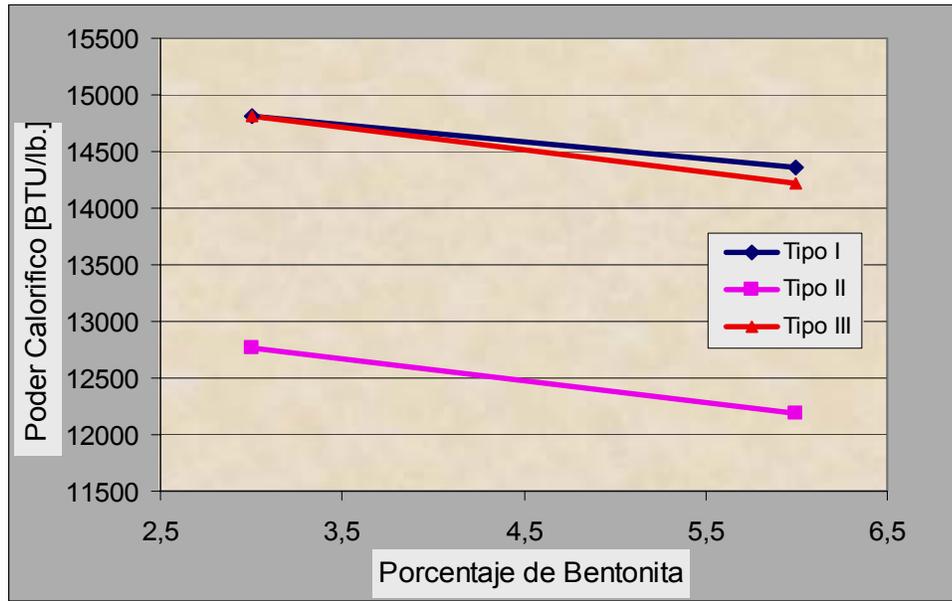
**Figura 17.** Bentonita versus materia volátil



### 3.1.4.3 Influencia de la bentonita en el poder calorífico

Observando la Figura 18 se concluye que al aumentar el porcentaje de bentonita disminuye un poco el poder calorífico en los carbones estudiados.

**Figura 18.** Bentonita versus poder calorífico



### 3.1.5 Caracterización del coque

Se coquizaron las siguientes mezclas:

- ♦ Carbón Tipo I , bentonita 6%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.
- ♦ Carbón Tipo II , bentonita 6%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.
- ♦ Carbón Tipo II , bentonita 3%, humedad 12%, temperatura 75°C, 90 min.

En las fotografías 17,18 y 19 se observan algunos ejemplos del coque obtenido y en el Anexo E se pueden observar los valores para realizar el cálculo de porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas, porcentaje de materia volátil, poder calorífico, porcentaje de azufre total y porcentaje carbono fijo del coque fabricado, información que se resume en el Cuadro 7.

**Cuadro 7.** Caracterización del coque

Tipo de Mezcla.	Humedad [% en peso]	Cenizas [% en peso]	Materia volátil [% en peso]	Poder calorífico [BTU/lb]	Azufre total [% en peso]	Carbono Fijo [% en peso]
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	1.4423	11.9188	1.8308	11245.48	0.63173	84.8081
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	1.8019	15.8102	1.7423	10600.98	0.64563	80.6456
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	2.0902	15.9883	2.2101	12838.32	0.67534	79.7114

**Fotografía17.** Productos de coquización de briquetas, mezcla de carbón Tipo I con seis por ciento de bentonita y ocho por ciento de humedad.



**Fotografía18.** Productos de coquización de briquetas, mezcla de carbón TipoIII con tres por ciento de bentonita y doce por ciento de humedad.



**Fotografía19.** Productos de coquización de briquetas, mezcla de carbón TipoII con seis por ciento de bentonita y doce por ciento de humedad.



### **3.1.6 Pruebas mecánicas al coque**

El coque obtenido fue evaluado desde el punto de vista de su resistencia mecánica mediante los ensayos de caída libre y compresión, aplicando el mismo procedimiento que se siguió para evaluar la resistencia mecánica de las briquetas en los numerales 2.3.4.2., 2.3.4.2.1. y 2.3.4.2.2., esto con el fin de relacionar de manera directa la mejora en las propiedades mecánicas de los aglomerados

#### **3.1.6.1 Ensayo de caída**

Como se observa en el Cuadro 8 la resistencia a la caída del coque aumentó a casi el doble del valor obtenido en el mismo ensayo a las briquetas.

**Cuadro 8.** Resistencia a la caída del coque.

Tipo de Mezcla	Número de caídas para rompimiento
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	9
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	13
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	12

### 3.1.6.2 Ensayo de compresión

Como se observa en el Cuadro 9 la resistencia a la compresión del coque aumentó a más del doble del valor obtenido en el mismo ensayo a las briquetas.

**Cuadro 9.** Resistencia a la compresión del coque.

Tipo de mezcla.	Resistencia a la compresión [Kg-f]
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	4,5
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	6
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	5,6

## **4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN**

El carbón que se estudió en el presente proyecto, proviene de minas de carbón ubicadas en Samacá, Boyacá. Observando los resultados del Cuadro 4 que corresponden a la caracterización del carbón, se deduce según norma ASTM D 388 de clasificación de carbones, que los carbones caracterizados son de la siguiente clase:

- ♦ Tipo I : Bituminoso medio volátil
- ♦ Tipo II : Bituminoso bajo volátil
- ♦ Tipo III: Bituminoso bajo volátil

### **4.2 PRUEBAS MECÁNICAS DE LAS BRIQUETAS**

#### **4.2.1 Resistencia a la caída**

De acuerdo con los resultados registrados, como se muestra en las figuras 4 a la 9, de número de caídas versus tiempo de estufado, en los rangos utilizados, se puede indicar que el número de caídas que resisten las briquetas aumenta proporcionalmente con el incremento de la temperatura; esto se debe a que a mayor temperatura la bentonita aumenta su poder aglomerante mas rápidamente y hace que haya una mayor fuerza aglomerante entre partículas de carbón, dando así un pequeño incremento en propiedades mecánicas de la briqueta como es la resistencia a la caída.

De estas curvas también se deduce en los rangos estudiados, que a medida que aumenta la humedad en las briquetas más caídas resisten, esto sucede por que el poder aglomerante de la bentonita se activa con el agua, ya que la bentonita tiene una estructura laminar de capas muy finas, y a medida que hay más moléculas de agua, hay mayor posibilidad de que entren en las láminas de bentonita, aumentando así la posibilidad de activar su poder aglomerante.

También se observa que el número de caídas que resisten las briquetas es mayor cuando aumenta el porcentaje de bentonita para las variables analizadas, debido a que la bentonita es un aglomerante que envuelve las partículas, y a mayor cantidad de aglomerante, mayor cantidad de partículas pueden ser cubiertas por él, es decir, mayor fuerza de unión entre partículas,

Sin embargo se debe tener en cuenta que al tener mayor cantidad de bentonita se debe adicionar suficiente agua para obtener una buena cohesión entre partículas.

Los tres tipos de carbones estudiados presentaron un comportamiento bastante similar, esto era de esperarse ya que los carbones al provenir de un proceso de lavado presentan la misma granulometría.

#### **4.2.2 Resistencia a la compresión**

En las figuras 10 a la 15 se aprecia claramente la influencia del tiempo de estufado en la resistencia a la compresión de las briquetas fabricadas analizando la influencia de variables como el porcentaje de bentonita, la temperatura de estufado y el porcentaje de humedad.

Para los rangos estudiados a medida que el tiempo de estufado es mayor, la resistencia a la compresión también aumenta al igual que cuando la briqueta es sometida a una temperatura mayor; esto se debe a que a mayor tiempo y temperatura hay mayor activación del aglomerante aumentando la fuerza de atracción entre partículas, lo que hace que sea más difícil desestabilizar la estructura de la briqueta, permitiendo con esto un aumento en la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión es más alta cuando el porcentaje de bentonita es mayor; del mismo modo que el porcentaje de humedad en los rangos analizados; sin embargo el efecto de la humedad es más significativo, es decir se presenta un aumento en la resistencia a la compresión más marcado, esto debido como ya se explicó anteriormente a que el poder aglomerante de la bentonita se activa con el agua.

### **4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS BRIQUETAS**

#### **4.3.1 Influencia de la bentonita en el contenido de cenizas**

De la Figura 16 se observa que cuando en la briqueta hay mayor cantidad de bentonita hay un incremento notorio en el porcentaje de cenizas; este comportamiento es bastante similar para los tipos de carbón estudiados.

Esto sucede por que la mayoría de la bentonita se transforma en ceniza, por lo que se debe controlar la cantidad que se adicione a la mezcla, ya que para obtener un coque de alta calidad se necesita que tenga un contenido de cenizas bajo.

#### **4.3.2 Influencia de la bentonita en el contenido de materia volátil**

De acuerdo a la Figura 17 se determinó que el porcentaje de materia volátil no disminuye de manera muy marcada cuando aumenta la cantidad de bentonita, esto sucede por que la bentonita no posee materias volátiles, y

solo introduce cenizas al carbón, lo que hace que el porcentaje de cenizas en las briquetas suba y el de materia volátil baje un poco. Esto ocurre en los tres tipos de carbones analizados en el presente proyecto.

#### **4.3.3 Influencia de la bentonita en el poder calorífico**

Observando la Figura 18 se concluye que al aumentar el porcentaje de bentonita disminuye el poder calorífico en los carbones estudiados, debido a que la bentonita tiene un comportamiento inerte al momento de la combustión, y no adiciona nada que incremente el poder calorífico, transformándose en cenizas.

#### **4.4 CARACTERIZACIÓN DEL COQUE**

Observando el Cuadro 7 se aprecia una disminución bastante alta de la materia volátil, esto se presentó por que al estar la briqueta expuesta a 1000°C durante tres horas se evaporan gran cantidad de éstas. Se aprecia un aumento significativo en el porcentaje de cenizas y el carbono fijo, debido a que al evaporarse la materia volátil de la briqueta, el porcentaje de éstas disminuye hasta casi cero, lo que aumenta el carbono fijo y el porcentaje de cenizas, según la ecuación:

$$\text{CARBONO FIJO} = 100 - (\% \text{ Humedad} + \% \text{ Cenizas} + \% \text{ Materia volátil})$$

En la humedad no se aprecia un cambio significativo.

Después de la coquización el poder calorífico disminuyó debido a que parte del carbón que aporta energía al momento de su combustión es reemplazado por bentonita, rebajando su poder calorífico como combustible.

#### **4.5 PRUEBAS MECÁNICAS DEL COQUE**

La resistencia a la caída del coque obtenido es de casi el doble del valor en el mismo ensayo para las briquetas y la resistencia a la compresión del coque aumentó a más del doble, esto se debe a que la resistencia mecánica del coque a diferencia de las briquetas no se debe a la cantidad de bentonita y agua adicionadas, sino a la estructura alcanzada durante la coquización, en este proceso de destilación, además se sinterizan los finos aglomerándolos y generando una alta porosidad en la estructura al perderse los volátiles del carbón, todo esto proporciona un gran aumento en la capacidad para absorber golpes y para soportar cargas antes de la ruptura. Aparte de esto no se puede efectuar ninguna comparación en cuanto a resistencia mecánica con coques industriales debido a que las normas ASTM que miden estos factores en el coque son aplicables para cantidades mínimas de 17 en Kg. en el ensayo Tumbler y de 23 Kg en el ensayo de caída, y en el presente proyecto las cantidades de coque producidas no exceden los 400 g, imposibilitando su realización.

## 5. CONCLUSIONES

- Mediante el proceso de aglomeración de finos de carbón, con bentonita, técnica seleccionada en este trabajo, se logró la fabricación de briquetas de carbón de buen aspecto superficial, uniformidad y acabado.
- Los aglomerados obtenidos poseen buenas propiedades como combustible con un poder calorífico entre 12200 y 14800 BTU/ lb., y pueden ser utilizados como reemplazo de la leña y el carbón vegetal en utilidades como chimeneas, encendido de hornos de fabricación de ladrillos, en la industria panelera, como combustible alternativo en cocinas portátiles y estacionarias, unidades de calentamiento de agua, estufas y equipos generadores de vapor.
- La bentonita sódica, que fue el aglomerante utilizado en el presente proyecto, ocasionó un aumento en el contenido de cenizas del 3.1% adicionando 3% y 5.7% adicionando 6% de bentonita, efecto presente tanto en las briquetas como en el coque.
- Utilizando un proceso de coquización de aglomerados de carbón, se logró la fabricación de coque, con buena porosidad y brillo metálico.
- El coque fabricado presentó una calidad muy baja desde el punto de vista de combustible generador de energía, debido al alto contenido de cenizas con valores del 11 al 15%, y bajo carbono fijo del 79 al 84%, esto lo imposibilita para ser utilizado en el alto horno en la fabricación de arrabio o en cubilotes para la fabricación de fundición gris o blanca.

- El coque obtenido presenta un incremento en la resistencia mecánica significativo aumentando a casi dos veces los valores encontrados en las briquetas en los ensayos de caída y compresión.
- Desde el punto de vista de agente contaminante se logró la fabricación a partir de materiales de desecho de un combustible alternativo para la sustitución de pequeñas cantidades, mas no en su totalidad, del coque utilizado entre cargas en procesos como el alto horno o en cubilotes, con el fin de disminuir la cantidad de humos emanados por estos hornos ya que el combustible fabricado en este trabajo produce una cantidad muy pequeña de humos y se logran dos mejorías principalmente, la primera sería desde el punto de vista de reglamentación ambiental y la segunda es la prolongación de los equipos utilizados en los hornos en el tratamiento de estos humos.
- La cantidad de bentonita utilizada en el proceso de aglomeración debe escogerse teniendo en cuenta que a mayor cantidad su poder aglomerante aumenta, mejorando las propiedades mecánicas de los aglomerados, pero esto conlleva al aumento del porcentaje de cenizas, por lo que la cantidad de bentonita seleccionada debe basarse en estos dos aspectos.
- La fabricación de coque a partir de aglomerados de finos de carbón se logró, aunque se obtuviera coque de baja calidad, se debe reconocer que se parte de materiales de desecho que lo único que hacen es contaminar el ambiente debido a que las minas y empresas generadoras de estos finos, manejan estos materiales de tal forma que solo contaminan los sectores aledaños a dichas minas y empresas.

- Se concluye que la mezcla estudiada mas apropiada para ser utilizada con fines coquizables es aquella con 3% de bentonita y un 8% de humedad con carbón tipo I, debido a que es aquella mezcla que presenta menor aumento de cenizas al carbón.
- La mezcla mas apropiada para ser utilizada con fines de combustible casero es aquella con 6% de bentonita y un 12% de humedad con carbón tipo I o tipo III, ya que para este uso se necesita buenas propiedades mecánicas y las cenizas no presentan mayor problema.
- Como conclusión final del trabajo es viable obtener aglomerados de carbón fino con propiedades mecánicas que permiten su manipulación sin deteriorarse, y buen desempeño como combustible.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda un estudio desde el punto de vista económico que enfrente los costos de elaborar un combustible desde materiales de desecho como el elaborado en este trabajo con combustibles del mismo tipo que se encuentran en el mercado local.
- Analizar la posibilidad de utilizar aglomerantes como el silicato de sodio que no presentan el problema de aumentar significativamente el porcentaje de cenizas en el coque o como la hulla del carbón, claro que este último presenta problemas de salud ocupacional.
- Incentivar investigaciones que fomenten el trabajo con esta clase de materiales que causan problemas y son relegados a enormes pilas en las empresas, pero que con solo un poco de ingenio se pueden transformar en productos útiles a la industria.
- Se recomienda un estudio sobre la utilización del combustible fabricado en este trabajo como reemplazo de pequeñas cantidades de coque en el cubilote, para mejorar la calidad de los humos emanados por este horno.
- Se recomienda realizar posteriores investigaciones para conseguir mejores resultados en la coquización fabricando mezclas con porcentajes de bentonita menores al tres por ciento, con la ayuda de una briqueteadora que proporcione mayor presión y con un sistema donde las briquetas no caigan y se rompan.

- Se recomienda un estudio sobre la utilización de los finos de carbón, en otras aplicaciones, tales como la fabricación de carbón activado.

## BIBLIOGRAFÍA

1. [www.colciencias.gov.co](http://www.colciencias.gov.co)
2. [www.univalle.edu.co](http://www.univalle.edu.co)
3. [www.industriassanfelipecom](http://www.industriassanfelipecom)
4. [www.itdg.org.pe](http://www.itdg.org.pe)
5. [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co)
6. [www.pucp.edu.pe](http://www.pucp.edu.pe)
7. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS. Producción de briquetas de carbón. Bogotá D.E, Marzo de 1980, 271 p. (Biblioteca Universidad Industrial de Santander).
8. [www.ingemmet.gob.pe](http://www.ingemmet.gob.pe)
9. Standard Test Method for Moisture in the Análisis of Coal and Coke. ASTM D 3173-00.
10. Standard Test Method for Ash in the Análisis Sample of Coal and Coke from Coal. ASTM D 3174-00.
11. Standard Test Method for Volatile Matter in the Análisis Sample of Coal and Coke. ASTM D 3175-01.
12. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM D 5865-02.
13. Standard Test Methods for Total Sulfur in the Análisis Sample of Coal and Coke. ASTM D 3177-89(Reapproved 2002).
14. Maldonado A., Aguirre L.O., Manual de Laboratorio de Metalurgia Extractiva I, Departamento de Ingenieria Metalurgica. Bucaramanga 1982. Paginas 6-23.
15. Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis. ASTM D 2013-01.

16. PROGRAMA PROYECTOS PARA EL DESARROLLO. Briquetización del carbón. Bogotá D.E, Agosto de 1980, 124 p. (Biblioteca Universidad Industrial de Santander).
17. CALVACHI, M. y AREVALO P. Briquetas de carbón una alternativa ante la crisis energética. Tunja, 1979, 228 p. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería.
18. Ciaschi R. Parámetros de Calidad de Carbones, Páginas 156-232.
19. HERNANDEZ, H. Trabajo en carbones. Bucaramanga, 1983, 46 p. Centro de Investigaciones Mineras. Universidad Industrial de Santander.
20. BRYCZKOWSKI, A. Cooling of briquets by coal fines in the manufacture of smokeless fuel. Fuel and Energy Abstracts, Volume 43, Issue 4, July 2002, Page 239.
21. LURY, V. G. y TARENTIEV, Y. I. Manufacture of fuel briquets. Fuel and Energy Abstracts, Volume 38, Issue 3, May 1997, Page 138.
22. IWAMA, H. Formed coal briquets. Fuel and Energy Abstracts, Volume 37, Issue 5, September 1996, Page 333.
23. Additives for coal-based fuel briquets and manufacture of the fuel briquets. Fuel and Energy Abstracts, Volume 42, Issue 1, January 2001, Page 7.

## **ANEXO A**

### **CARACTERIZACIÓN DE CARBONES Y COQUE.<sup>[14]</sup>**

#### **DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD EN CARBONES Y COQUE.**

Con este ensayo se determina la cantidad de agua libre que contiene una muestra de carbón (más no la humedad inherente y agua de constitución que se elimina a temperaturas más altas).

En diversas actividades industriales y especialmente en la obtención de los metales a partir de sus minerales y tratamientos posteriores de transformación, en todas ellas se utilizan combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, siendo importante la selección de un combustible que proporcione mayores rendimientos y costos aceptables como el carbón vegetal las hullas y el coque metalúrgico.

La humedad en los carbones puede estar presente de tres maneras:

**Humedad Libre:**

Esta se adhiere mecánicamente sobre la superficie, dentro de fracturas, capilares. Este porcentaje de humedad depende de las varias operaciones a que es sometido el carbón (minería, transporte, lavado, molienda, almacenamiento al aire libre.).

**Humedad inherente:**

Se encuentra dentro de la estructura porosa interna. Esta agua presenta una presión de vapor menor que la normal. (110°C).

**Agua de constitución:**

Se refiere a las sustancias minerales presentes en el carbón, esta se elimina a temperaturas más altas de lo normal.

El contenido de humedad en el carbón depende de varios factores, la mayoría de los cuales son extraños a la naturaleza del carbón. Para tener datos que reflejen más esta naturaleza, muy a menudo es conveniente referir los resultados de los análisis a un peso de la muestra de carbón del cual se ha deducido el contenido de humedad.

Este análisis se realiza a condiciones estándares para lo cual existen normas relacionadas con el tema.

Dependiendo del punto de vista industrial, el contenido de humedad es favorable o no.

El contenido de agua afecta los costos de transporte, pero en el proceso de molienda y manipulación es favorable por los polvos, también facilita la coquización y poder calorífico.

En la coquización:

Afecta la densidad de carga y el rendimiento del coque.

Alarga el proceso.

Previene pérdidas de polvo de carbón.

### **Procedimiento**

Los siguientes son los pasos generales para la determinación de porcentaje de humedad:

- Lavar y secar muy bien todos los implementos.
- Introducir el crisol en el desecador.
- Pesarse el crisol seco con y sin su tapa en la balanza analítica.
- Pesarse  $\pm$  un gramo de carbón en el crisol.
- Colocar el crisol sin tapa en la estufa y calentar a 110°C durante 1 hora.
- Retirar los crisoles de la estufa. Tapar, dejar enfriar en una placa y luego en el desecador.
- Pesarlos íntegramente y efectuar los cálculos respectivos de porcentaje de humedad.

### **Cálculos**

Los cálculos de porcentaje de humedad se realizan por vía gravimétrica:

$$\%Humedad = \left( \frac{(P2 - P3)}{(P2 - P1)} \right) * 100$$

Donde:

P1 = Peso del crisol vacío sin tapa (gr).

P2 = Peso del crisol y carbón antes del secado (gr).

P3 = Peso del Crisol y carbón después del secado (gr).

## **DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE CENIZAS EN CARBONES Y COQUE.**

Con este ensayo se cuantificaron las cenizas (Sustancias inorgánicas) que quedan luego de la incineración del carbón, para determinar la calidad en la utilización como combustible específico.

El contenido de ceniza en un carbón está relacionado con el residuo inorgánico que queda después de incinerarlo.

Al incinerar el carbón, este sufre varias transformaciones químicas como son:

Pérdida de agua de complejos hidratos.

Pérdida de CO<sub>2</sub> de los carbones.

Oxidación del hierro pirítico a sulfuro de hierro y a óxido de hierro.

Fijación de óxidos de azufre por bases como los óxidos de calcio y de magnesio.

Volatilización y descomposición de cloruros de metales alcalinos.

Desde el punto de vista metalúrgico (Siderurgia) la determinación de las cenizas del carbón es de fundamental importancia, pues de ella se puede prever el contenido de ceniza que se presenta en el coque y así su utilidad e el alto horno.

El porcentaje de cenizas en el carbón depende ampliamente de los procedimientos de extracción y de las operaciones en la mina. Para carbones con demasiadas cenizas, es obligatorio adaptar tratamientos de lavado, que pueden ser por medios densos, cribado hidráulico y flotación.

El contenido de humedad y cenizas en el carbón depende de varios factores, la mayoría de los cuales son extraños a la naturaleza del carbón. Para tener datos que reflejen más esta naturaleza, muy a menudo es conveniente referir los resultados de los análisis a un peso de la muestra de carbón del cual se ha deducido el contenido de humedad y de ceniza.

Este análisis se realiza a condiciones estándares para lo cual existen normas relacionadas con el tema.

El contenido de cenizas en el carbón depende de varios factores, la mayoría de los cuales son extraños a la naturaleza del carbón. Para tener datos que reflejen más esta naturaleza, muy a menudo es conveniente referir los resultados de los análisis a un peso de la muestra de carbón del cual se ha deducido el contenido de ceniza.

Este análisis se realiza a condiciones estándares para lo cual existen normas relacionadas con el tema.

## Procedimiento

Los siguientes son los pasos generales para la determinación de porcentaje de cenizas:

- Lavar y secar muy bien todos los implementos.
- Introducir el crisol en el desecador.
- Pesar el crisol seco con y sin su tapa en la balanza analítica.
- Pesar ± un gramo de carbón en el crisol.
- Colocar el crisol sin tapa a temperatura ambiente la mufla y calentar lentamente hasta 700°C, y mantener durante 1 hora.
- Retirar los crisoles de la estufa. Tapar, dejar enfriar en una placa y luego en el desecador.
- Pesarlos íntegramente y efectuar los cálculos respectivos de porcentaje de cenizas.

## Cálculos

Los cálculos de porcentaje de cenizas se realizan por vía gravimétrica:

$$\%Cenizas = \left( \frac{(P3 - P1)}{(P2 - P1)} \right) * 100$$

Donde:

P1 = Peso del crisol vacío sin tapa (gr).

P2 = Peso del crisol y carbón antes del secado (gr).

P3 = Peso del Crisol y carbón después del secado (gr).

## DETERMINACION DE LA MATERIA VOLATIL EN LAS MUESTRAS DE CARBONES Y COQUE.

El contenido de materia volátil es definido como la pérdida en peso, corregida por la humedad, que ocurre cuando se calienta el carbón fuera del contacto del aire, bajo condiciones estándar.

La muestra se calienta hasta 950°C según la norma ASTM.

Las materias volátiles en el carbón consisten de:  
Gases combustibles: hidrógeno, monóxido de carbono, metano.  
Vapores combustibles: brea.  
Gases y vapores incombustibles: CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

El contenido de materia volátil indica si el carbón es o no coquizable, además, también indica el rango del carbón.

### Procedimiento

Los siguientes son los pasos generales para la determinación de materias volátiles.

- Calentar a 900°C ± 10°C por 7 minutos con su tapa. Enfriarlo sobre una placa metálica y luego en el desecador.
- Pesar el crisol vacío con tapa. Luego pesar rápidamente 1 gramo -1.01 gramo de muestra.
- Colocar la tapa y golpearlo suavemente sobre una superficie dura y limpia hasta formar una capa de espesor constante. Si es coque añadir de dos a 4 gotas de benceno.
- Poner el crisol en la mufla ± 10°C por 10 minutos. Enfriar el crisol y pesar.

### Cálculos:

Porcentaje de materia volátil "air- dried":

$$\%MVad = \left( \frac{(m2 - m3)}{(m2 - m1)} \right) * 100 - M1$$

Porcentaje de materia volátil "Dry- ash":

$$\%MVd,af = \%MVad * \left( \frac{100}{(100 - (M1 + A))} \right)$$

Donde:

- m1 = crisol vacío.
- m2 = crisol mas muestra
- m3 = crisol mas muestra devolatilizada.
- M1 = Humedad del carbón.
- A = Porcentaje de cenizas.

## **DETERMINACION DEL INDICE DE HINCHAMIENTO DE CARBON**

Indica las propiedades aglutinantes del carbón, industrialmente realizar este ensayo es indispensable, ya que realiza un control rápido de posibles variaciones de la calidad del carbón de las coquerías.

Los carbones con un FSI menor que cuatro no son aptos para la producción de coque metalúrgico.

El FSI debe ser mayor de 4.5 para que sea considerado como un posible candidato al proceso de coquización.

El hinchamiento del carbón durante la coquización está muy relacionado con la resistencia y la granulometría del coque.

El índice cero es relativo a carbones no aglomerantes.

El índice 1 indica carbones carentes de hinchamiento.

Índices entre 1.5 y 9 indican carbones de bajo, medio o alto hinchamiento.

### **Procedimiento**

Los siguientes son los pasos generales para la determinación del índice de hinchamiento del carbón:

- Pesar 1 gramo de carbón en crisol frío, nivelarlo golpeándolo suavemente el crisol sobre una superficie sólida y rotándolo entre un golpe y otro.
- Poner el crisol sobre el soporte triangular y directamente sobre la llama del mechero. Calentar a la velocidad con que se calentó el equipo, hasta cuando no se observe más liberación de materia volátil, pero en todo caso no menos de 2 1/2 min.
- Extraer cuidadosamente del crisol el botón del coque y el carbón
- Hacer de la misma manera tres botones de coque para cada muestra de carbón.

## **DETERMINACION DEL PODER CALORIFICO DE CARBONES Y COQUE.**

### **Poder calorífico**

El poder calorífico del carbón expresa su valor como combustible. Se puede considerar como la suma de los calores de combustión de los materiales combustibles; es decir de carbono, del hidrogeno y de azufre, menos el calor de descomposición de los materiales carbonáceos y más o menos calores de reacción menores que pueden ocurrir entre las impurezas presentes.

La materia mineral y la humedad se pueden considerar inertes y su presencia en el carbón reduce el poder calorífico en proporción directa a su contenido, también sirve para la clasificación de los carbones para sus múltiples usos.

En los valores de poder calorífico, es muy importante considerar la base del cálculo, que puede ser "as received", "air-dried", "dry" ó "dry mineras matter free".

El poder calorífico sobre la base "d,mmf" se correlaciona directamente con la composición del carbón y con su rango. El poder calorífico "dmmf" sirve para la clasificación de los carbones de rango más bajo, no distinguibles por las materias volátiles. Los poderes caloríficos "dmmf", dan del orden de 23-30 Kj/Kg para los lignitos, 30-36Kj/Kg para los bituminosos y 36-37 Kj/Kg para los semibituminosos y antracitas.

El poder calorífico se determina quemando una muestra de carbón, normalmente "air-ried". En exceso de oxígeno en una bomba calorimétrica en condiciones standard y calculando el valor total liberado después que el sistema a regresado cerca de la temperatura ambiente. El volumen así medido es el poder calorífico bruto a volumen constante. El poder calorífico neto a volumen constante; y el poder calorífico a presión constante se definen a continuación.

### **Poder calorífico lordo a volumen constante**

El calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de carbón, en presencio de un O<sub>2</sub>, dentro de una bomba calorimétrica a volumen constante y condiciones Standard después que todos los productos de la combustión han regresado de la temperatura ambiente.

Los productos finales determinados serán bióxido de carbono, oxigeno, bióxido de azufre y nitrógeno como gases, agua líquida (en equivalente con su vapor y saturación de bióxido de carbono), cenizas y sólidos.

### **Poder calorífico neto a Volumen constante**

El calor que se producirá en el procedimiento anterior a volumen constante; pero el residuo sería: bióxido de carbono, nitrógeno, vapor de agua, cenizas; todo a 25°C.

### **Poder calorífico neto a Presión constante**

El calor que se produciría si una cantidad unitaria de combustible fuera quemada en O<sub>2</sub> a presión constante (atmosférica), obteniendo como residuos oxígeno, bióxido de carbono, bióxido de azufre, nitrógeno, vapores de agua, cenizas, todo a 25°C.

### **Capacidad térmica efectiva**

Calor requerido para alcanzar 1 grado la temperatura del sistema calorimétrico a las condiciones de la determinación calorimétrica.

### **Procedimiento**

Los siguientes son los pasos generales para la determinación del poder calorífico.

- Pesar 1 gramo de carbón.
- Ensamblar la bomba.
- Lavar la bomba con agua destilada y poner el crisol sobre el apósito soporte de la bomba.
- Cerrar la bomba y cargarla con una presión de 30 atm de Oxígeno.
- Poner en el recipiente calorimétrico 2.25 litros de agua.
- Prender el agitador, esperar 5 minutos hasta equilibrio. Leer la temperatura "Ta".
- Provocar la ignición de la muestra.
- Después de la ignición tomar lecturas de temperaturas cada 30 segundos por 5 minutos.
- La temperatura "Tc" leída después de "C" minutos es la primera lectura después de que la variación del cambio térmico es uniforme.

- Remover la bomba y dejar salir los gases.
- Lavar el crisol con agua destilada y metil naranja hasta terminar la reacción ácida.
- Poner el líquido de lavado en un Beaker de 250 ml.
- Titular con solución estándar de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> para la corrección ácida.
- Remover y medir los pedazos de alambre fusible que no se quemaron.

### **Cálculos**

Para encontrar el valor del poder calorífico bruto a volumen constante se utiliza la formula:

$$Q = \frac{(\Delta T * C - e_1 - e_2 - e_3)}{m}$$

Q = Poder calorífico. [Btu/lb.]

ΔT = incremento de la Temperatura (Tc-Ta). [°C]

C = capacidad térmica del calorímetro. (5088,366 [(Btu/lb.) g/°C])

M = peso de la muestra. [gr.]

e<sub>1</sub> = calor de combustión del algodón (0)

e<sub>2</sub> = calor de combustión del alambre fusible Ni –Cr. (0,41\* alambre quemado, [mm (Btu/lb.) gr])

e<sub>3</sub> = calor de formación del ácido sulfúrico. (10.0 \*ml de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (0,394 N) usado [(Btu /lb.) gr])

### **DETERMINACION DE AZUFRE TOTAL EN CARBONES Y COQUE.**

La determinación del azufre total en carbones es importante, puesto que el azufre se presenta en la mayoría de carbones, desde trazas hasta aproximadamente el 4%.

El azufre en el carbón se encuentra como azufre pirítico, azufre orgánico y sulfatos.

El porcentaje de azufre presente en el carbón es un dato muy importante en la práctica industrial, pues podemos predecir el contenido de coque y consecutivamente la utilidad en el alto horno. Este azufre se requiere que sea lo más bajo posible en el coque metalúrgico para minimizar la absorción por el arrabio en el alto horno.

Las leyes aceptables de azufre en el coque varían de país a país, pero normalmente están en el intervalo 0.6-1.2%, excepciones se pueden hacer cuando hay secases de materia prima de buena calidad.

El contenido de azufre en el coque producido de u cierto carbón, depende de la cantidad y de las formas del azufre en el carbón cargado en el horno de coquización. Los compuestos de azufre orgánico y sulfático son generalmente estables a la temperatura de un horno de coquización y entonces quedan casi totalmente en le coque. Las piritas se descomponen parcialmente formando sulfuros ferrosos y azufre libre, una parte de la cual es removido del horno por el escape de materias volátiles.

La pérdida de materias volátiles durante la carbonización produce el defecto de concentrar las impurezas, como el azufre en el coque. Teniendo en cuenta esto y una parte del azufre pirítico, el azufre en el coque puede variar entre el 90-120% de azufre del carbón cargado en el horno.

Existen varios métodos para la determinación de este porcentaje de azufre, como son:

Método ESCHKA

Método de lavado de la bomba.

Método de combustión a alta temperatura.

En este proyecto se determino con el Método de lavado de la bomba

### **Procedimiento**

Los siguientes son los pasos generales para la determinación de azufre total.

- Pesar 1 gramo de carbón en un crisol.
- Ignición (PC)
- Lavar la bomba con agua destilada, dejando adherida a las paredes 1ml de H<sub>2</sub>O.
- Transferir la muestra a la bomba, conectar el fusible y cerrar.
- Poner en la bomba oxígeno a 30 atm.
- Cerrar el circuito de PC
- Dejar escapar lentamente los gases residuos de la bomba.
- Lavar el crisol y la parte interna de la bomba con solución hasta terminar la reacción ácida.

- Llevar las aguas de lavado aun Beaker de 250 ml.
- Titular con solución estándar de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .
- Adicionar 1 ml de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (1:9).
- Calentar hasta ebullición y filtrar sobre papel cualitativo.
- Lavar el residuo 5 o 6 veces con agua caliente.
- Al filtrado (250 ml) adicionar agua saturada de bromo ligeramente acidificada con HCl.
- Hervir para eliminar el bromo liberado.
- Neutralizar con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , usando metil naranja como indicador.
- Adicionar 1 ml de HCl (1:9).
- Hervir otra vez y adicionar 10 ml o más de  $\text{BaCl}_2$ .
- Continuar con la ebullición por 15 minutos y dejaren reposo por 2 horas.
- Filtrar y lavar el  $\text{BaSO}_4$  con agua caliente.
- Poner el filtro mojado con el  $\text{BaSO}_4$  en un crisol prepesado.
- Secar e incinerar el papel sin producir llama
- Subir la T a  $925^\circ\text{C}$  y dejar media hora.

Enfriar y pesar.

### **DETERMINACIÓN DE CARBONO FIJO EN CARBONES Y COQUE.**

El contenido de carbono fijo representa la porción combustible que queda después de la remoción de la humedad, ceniza y material volátil, y, aunque consiste sobre todo de carbono, incluye también hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno.

El contenido de carbono fijo del carbón se calcula por diferencia después de las determinaciones de la humedad en la muestra, de la ceniza y de la

materia volátil; obviamente todos los resultados se deben considerar con la misma base, es decir:

$$\text{CARBONO FIJO} = 100 - (\% \text{ Humedad} + \% \text{ Cenizas} + \% \text{ Materia volátil}).^{(14)}$$

## ANEXO B

**Cuadro 10.** Resultados de humedad

Tipo de carbón	Pesos de los crisoles [gr.]			HUMEDAD [% en peso]	HUMEDAD PROMEDIO [% en peso]
	P1	P2	P3		
Carbón Tipo I	15.19692	16.19859	16.09913	0,94442	0,964218
	13.29200	14.29580	14.19990	0,98625	
	16.11409	17.12035	17.02167	0,96197	
Carbón Tipo II	13.85596	14.86689	14.73301	0,94764	0,919729
	14.74445	15.76173	15.62751	0,90633	
	14.08550	15.08748	14.95440	0,90520	
Carbón Tipo III	18.79963	19.79666	19.71943	0,92575	0,932404
	18.65184	19.65324	19.58208	0,91471	
	18.81372	19.83071	19.75684	0,95674	

**Cuadro 11.** Resultados de cenizas

Tipo de carbón	Pesos de los crisoles [gr.]			CENIZAS [% en peso]	CENIZAS PROMEDIO [% en peso]
	P1	P2	P3		
Carbón Tipo I	16.10994	17.10986	16.15874	4.88039043	<b>5.12436</b>
	13.2861	14.2766	13.3388	5.32054518	
	14.73995	15.73644	14.79149	5.17215426	
Carbón Tipo II	15.19448	16.19336	15.24188	4.74531475	<b>5.01619</b>
	13.8508	14.85297	13.90423	5.3314308	
	18.64698	19.65305	18.697	4.97182105	
Carbón Tipo III	18.79197	19.78566	18.84745	5.58323018	<b>5.33956</b>
	16.10994	17.10986	16.15874	4.88039043	
	13.2861	14.2766	13.3388	5.32054518	

**Cuadro 12. Resultados de materia volátil**

Tipo de carbón	Pesos de los crisoles [gr.]				MATERIA VOLATIL [% en peso]	MATERIA VOLÁTIL PROMEDIO [% en peso]
	m1	m2	m3	M1		
Carbón Tipo I	16.10994	17.10986	16.15874	9.76324	25.55987	<b>24.95354</b>
	13.2861	14.2766	13.3388	9.76324	24.91632	
	14.73995	15.73644	14.79149	9.76324	24.38442	
Carbón Tipo II	15.19448	16.19336	15.24188	13.2396	18.52030	<b>18.62549</b>
	13.8508	14.85297	13.90423	13.2396	18.26061	
	18.64698	19.65305	18.697	13.2396	19.09557	
Carbón Tipo III	18.79197	19.78566	18.84745	7.37188	13.99783	<b>13.85863</b>
	14.08345	15.09065	14.13726	7.37188	14.02732	
	18.81182	19.81419	18.86287	7.37188	13.55073	

**Cuadro 13. Resultados de poder calorífico**

Tipo de carbón	Carbón Tipo I			Carbón Tipo II			Carbón Tipo III		
Ta [°C]	26.73	26.36	26.50	26.57	26.68	25.67	27.58	27.57	28.17
Tc [°C]	29.73	29.37	29.44	29.13	29.23	28.29	30.61	30.66	31.24
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> [ml]	4.60	4.20	4.45	4.45	4.80	3.90	4.20	4.40	4.75
Alambre	6.5	12.5	11.0	5.5	8.0	12.5	4.0	3.5	7.5
e <sub>2</sub>	29.41	18.72	21.39	31.19	26.74	18.72	33.87	34.76	27.63
e <sub>3</sub>	46.0	42.0	44.5	44.5	48.0	39.0	42.0	44.0	47.5
Peso muestra [gr]	1.00023	1.00036	1.00030	1.00026	0.99982	1.0001	0.9999	1.00009	1.00001
ΔT [°C]	3.00	3.01	2.94	2.56	2.55	2.62	3.03	3.09	3.07
Poder calorífico [BTU/lb.]	15186.2	15249.7	14889.4	12947.1	12902.9	13272.3	15343.4	15642.9	15545.9
Poder calorífico Prom. [BTU/lb.]	<b>15108.4</b>			<b>13040.8</b>			<b>15510.7</b>		

**Cuadro 14.** Resultados de azufre

Tipo de carbón	Pesos de los crisoles [gr.]			AZUFRE TOTAL4 [% en peso]	AZUFRE TOTAL PROMEDIO [% en peso]
	Crisol + BaSO <sub>4</sub>	Crisol Vacío	Peso muestra		
Carbón Tipo I	16.15485	16.11492	1.00023	0.5399	<b>0.5433</b>
	18.6912	18.65016	1.00036	0.5550	
	18.83564	18.79605	1.0003	0.5351	
Carbón Tipo II	16.11542	16.0782	1.00026	0.5026	<b>0.5142</b>
	25.73598	25.69568	0.99982	0.5452	
	13.89213	13.85548	1.00011	0.4949	
Carbón Tipo III	15.23671	15.19601	0.9999	0.5506	<b>0.5481</b>
	21.36358	21.32303	1.00009	0.5484	
	14.12542	14.08511	1.00001	0.5452	

**Cuadro 15.** Resultados de índice de Hinchamiento

TIPO DE CARBÓN	INDICE DE HINCHAMIENTO
Carbón Tipo I	9
Carbón Tipo II	6
Carbón Tipo III	9

## ANEXO C

**Cuadro 16.** Resistencia a la compresión de carbón Tipo I a 65°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Resistencia a la compresión [Kg-f]
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>1,8</b>
	60	<b>1,85</b>
	90	<b>1,9</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>2,4</b>
	60	<b>2,5</b>
	90	<b>2,8</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>1,5</b>
	60	<b>1,7</b>
	90	<b>1,75</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>2</b>
	60	<b>2,1</b>
	90	<b>2,3</b>

**Cuadro 17.** Resistencia a la compresión de carbón Tipo II a 65°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Resistencia a la compresión [Kg-f]
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>1,7</b>
	60	<b>1,8</b>
	90	<b>1,8</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>2,4</b>
	60	<b>2,5</b>
	90	<b>2,7</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>1,6</b>
	60	<b>1,7</b>
	90	<b>1,7</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>2,1</b>
	60	<b>2,4</b>
	90	<b>2,7</b>

**Cuadro 18.** Resistencia a la compresión de carbón TipoIII a 65°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Resistencia a la compresión [Kg-f]
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>1,7</b>
	60	<b>1,7</b>
	90	<b>1,7</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>2,4</b>
	60	<b>2,5</b>
	90	<b>2,7</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>1.5</b>
	60	<b>1.6</b>
	90	<b>1.6</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>2,1</b>
	60	<b>2,2</b>
	90	<b>2,6</b>

**Cuadro 19.** Resistencia a la compresión de carbón Tipo I a 75°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Resistencia a la compresión [Kg-f]
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>2.1</b>
	60	<b>2.1</b>
	90	<b>2.2</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>2,6</b>
	60	<b>2,9</b>
	90	<b>3</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>1.8</b>
	60	<b>1.9</b>
	90	<b>1.9</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>2,2</b>
	60	<b>2,3</b>
	90	<b>2,5</b>

**Cuadro 20.** Resistencia a la compresión de carbón Tipo II a 75°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Resistencia a la compresión [Kg-f]
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>2.2</b>
	60	<b>2.2</b>
	90	<b>2.3</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>2,6</b>
	60	<b>2,8</b>
	90	<b>3</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>1.8</b>
	60	<b>1.9</b>
	90	<b>1.9</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>2,2</b>
	60	<b>2,3</b>
	90	<b>2,7</b>

**Cuadro 21.** Resistencia a la compresión de carbón Tipo III a 75°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Resistencia a la compresión [Kg-f]
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>1.9</b>
	60	<b>1.9</b>
	90	<b>1.9</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>2,5</b>
	60	<b>2,7</b>
	90	<b>2,9</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>1.7</b>
	60	<b>1.8</b>
	90	<b>1.8</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>2,2</b>
	60	<b>2,3</b>
	90	<b>2,5</b>

**Cuadro 22.** Resistencia a la caída de carbón Tipo I a 65°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Número de caídas para rompimiento
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>3</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>4</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>5</b>
	60	<b>5</b>
	90	<b>6</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>2</b>
	60	<b>2</b>
	90	<b>2</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>3</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>5</b>

**Cuadro 23.** Resistencia a la caída de carbón Tipo II a 65°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Número de caídas para rompimiento
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>3</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>3</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>4</b>
	60	<b>5</b>
	90	<b>5</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>2</b>
	60	<b>2</b>
	90	<b>3</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>2</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>3</b>

**Cuadro 24.** Resistencia a la caída de carbón Tipo III a 65°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Número de caídas para rompimiento
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>3</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>3</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>5</b>
	60	<b>5</b>
	90	<b>5</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>2</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>3</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>3</b>
	60	<b>4</b>
	90	<b>4</b>

**Cuadro 25.** Resistencia a la caída de carbón Tipo I a 75°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Número de caídas para rompimiento
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>4</b>
	60	<b>4</b>
	90	<b>4</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>5</b>
	60	<b>5</b>
	90	<b>6</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>2</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>3</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>4</b>
	60	<b>4</b>
	90	<b>5</b>

**Cuadro 26.** Resistencia a la caída de carbón Tipo II a 75°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Número de caídas para rompimiento
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>4</b>
	60	<b>4</b>
	90	<b>4</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>4</b>
	60	<b>5</b>
	90	<b>6</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>2</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>3</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>3</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>4</b>

**Cuadro 27.** Resistencia a la caída de carbón Tipo III a 75°C

Composición mezcla [% en peso]	Tiempo en el horno [minutos]	Número de caídas para rompimiento
Bentonita 6% Humedad 8%	30	<b>4</b>
	60	<b>4</b>
	90	<b>4</b>
Bentonita 6% Humedad 12%	30	<b>5</b>
	60	<b>5</b>
	90	<b>6</b>
Bentonita 3% Humedad 8%	30	<b>3</b>
	60	<b>4</b>
	90	<b>4</b>
Bentonita 3% Humedad 12%	30	<b>3</b>
	60	<b>3</b>
	90	<b>5</b>

## ANEXO D

**Cuadro 28.** Resultados de humedad en briquetas a 75°C

Tipo de mezcla	Pesos de los crisoles [gr.]			HUMEDAD [% en peso]	HUMEDAD PROMEDIO [% en peso]
	P1	P2	P3		
Tipo I B6H12 90 min 75°C	23.56754	24.56641	24.5525	1.39257	<b>1.4733</b>
	16.11752	17.11267	17.09791	1.48319	
	16.0782	17.07607	17.06066	1.54428	
Tipo I B3H12 90 min. 75°C	14.08634	15.08711	15.06882	1.82759	<b>1.9104</b>
	14.74635	15.74699	15.72536	2.16161	
	16.11759	17.11693	17.09952	1.74214	
Tipo II B3H12 90min. 75°C	14.08627	15.08716	15.07522	1.19293	<b>1.0642</b>
	25.69664	26.69746	26.68775	0.97020	
	18.81303	19.81921	19.80885	1.02963	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	25.12131	26.12612	26.11112	1.49281	<b>1.4270</b>
	14.74633	15.7606	15.74518	1.52030	
	13.85695	14.86646	14.85366	1.26794	
Tipo III B6H12 90 min. 75°C	25.69675	26.69592	26.68145	1.44820	<b>1.4203</b>
	18.81316	19.81383	19.80002	1.38007	
	16.07831	17.07856	17.06423	1.43264	
Tipo III B3H12 90 min. 75°C	25.12133	26.12145	26.10932	1.21285	<b>1.2237</b>
	23.56761	24.56801	24.55623	1.17752	
	13.85682	14.85693	14.84412	1.28085	

**Cuadro 29.** Resultados de cenizas en briquetas a 75°C

Tipo de mezcla	Pesos de los crisoles [gr.]			CENIZAS [% en peso]	CENIZAS PROMEDIO [% en peso]
	P1	P2	P3		
Tipo I B6H12 90 min 75°C	23.56754	24.56641	23.67625	10.8832	<b>10.9352</b>
	16.11752	17.11267	16.22686	10.9872	
	16.0782	17.07607	16.18732	10.9352	
Tipo I B3H12 90 min. 75°C	14.08634	15.08711	14.17325	8.6843	<b>8.6275</b>
	14.74635	15.74699	14.83214	8.5735	
	16.11759	17.11693	16.20378	8.6246	
Tipo II B3H12 90min. 75°C	14.08627	15.08716	14.17042	8.4075	<b>8.4582</b>
	25.69664	26.69746	25.78086	8.4150	
	18.81303	19.81921	18.89908	8.5521	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	25.12131	26.12612	25.22827	10.6447	<b>10.7943</b>
	14.74633	15.7606	14.85528	10.7417	
	13.85695	14.86646	13.96796	10.9964	
Tipo III B6H12 90 min. 75°C	25.69675	26.69592	25.80426	10.7599	<b>10.9232</b>
	18.81316	19.81383	18.92378	11.0545	
	16.07831	17.07856	16.18789	10.9552	
Tipo III B3H12 90 min. 75°C	25.12133	26.12145	25.20326	8.1920	<b>8.2209</b>
	23.56761	24.56801	23.64923	8.1587	
	13.85682	14.85693	13.93995	8.3120	

**Cuadro 30. Resultados de materia volátil en briquetas**

Tipo de mezcla	Pesos de los crisoles [gr.]				MATERIA VOLATIL [% en peso]	MATERIA VOLATIL PROMEDIO [% en peso]
	m1	m2	m3	M1		
Tipo I B6H12 90 min 75°C	26.38956	27.38956	27,13652	1.4733	23,8307	<b>23.9037</b>
	28.65428	29.65442	29,40045	1.4733	23,9201	
	27.02487	28.0241	27,76996	1.4733	23,9602839	
Tipo I B3H12 90 min. 75°C	32.51598	33.51584	33.25647	1.9104	24.03023	<b>24.3238</b>
	39.43927	40.43895	40.17456	1.9104	24.53706	
	38.21429	39.21446	38.95127	1.9104	24.40412	
Tipo II B3H12 90min. 75°C	27.02001	28.02011	27.788	1.0642	22.14447	<b>22.8466</b>
	29.94235	30.94264	30.69995	1.0642	23.19770	
	32.51423	33.51419	33.27158	1.0642	23.19777	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	39.43706	40.437	40.206	1.4270	21.67438	<b>21.4573</b>
	38.21365	39.21342	38.98245	1.4270	21.67531	
	32.52442	33.52453	33.30002	1.4270	21.02153	
Tipo III B6H12 90 min. 75°C	28.65492	29.65412	29.45262	1.4203	18.74583	<b>18.7224</b>
	29.95627	30.95635	30.75489	1.4203	18.72408	
	32.51397	33.51975	33.31741	1.4203	18.69741	
Tipo III B3H12 90 min. 75°C	39.43824	40.43869	40.2252	1.2237	20.11569	<b>20.0378</b>
	28.65487	29.65482	29.44102	1.2237	20.15736	
	27.02546	28.02584	27.81512	1.2237	19.84029	

**Cuadro 31. Resultados poder calorífico en briquetas a 75°C**

Tipo de mezcla	Ta [°C]	Tc [°C]	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> [ml]	Alambre.	e2	e3	Muestra [gr.]	ΔT [°C]	Poder calorífico [BTU/lb.]
Tipo I B6H12 90min 75°C	28.49	31.32	4.6	7	28.5217391	46	0.9998	2.83	<b>14328.419</b>
	29.14	31.98	4.7	15	14.2608696	47	1.00014	2.84	<b>14387.684</b>
	29.05	31.89	4.65	11	21.3913043	46.5	1.00009	2.84	<b>14381.773</b>
Tipo I B3H12 90min 75°C	29.61	32.53	4.5	10	23.173913	45	1.00038	2.92	<b>14784.236</b>
	30.1	33.03	4.6	8	26.7391304	46	1.00024	2.93	<b>14832.613</b>
	29.82	32.75	4.8	9.5	24.0652174	48	1.00009	2.93	<b>14835.512</b>
Tipo II B3H12 90min 75°C	29.8	32.32	4.5	12	19.6086957	45	1.00007	2.52	<b>12757.180</b>
	29.43	31.96	4.3	8	26.7391304	43	1.00016	2.53	<b>12801.778</b>
	30.51	33.03	4.4	6	30.3043478	44	1.00011	2.52	<b>12746.975</b>
Tipo II B6H12 90min 75°C	29.46	31.88	4.8	8	26.7391304	48	0.99991	2.42	<b>12240.208</b>
	28.52	30.92	4.9	10	23.173913	49	1.00011	2.4	<b>12138.569</b>
	29.69	32.1	4.65	13	17.826087	46.5	1.00005	2.41	<b>12198.026</b>
Tipo III B6H12 90min 75°C	29.12	31,94	4.4	7	28.5217391	44	0.99993	2,82	14277,669
	28.23	31,04	4.7	9	24.9565217	47	0.99993	2,81	14227,347
	30.44	33,24	4.9	10	23.173913	49	1.0001	2,8	14173,833
Tipo III B3H12 90min 75°C	29.76	32.68	4.3	16	12.4782609	43	1.00003	2.92	<b>14802.106</b>
	29.47	32.4	4.6	5	32.0869565	46	1.00135	2.93	<b>14810.830</b>
	29.52	32.45	4.7	9	24.9565217	47	1.00007	2.93	<b>14835.917</b>

**Cuadro 32. Continuación resultados poder calorífico en briquetas**

Tipo de mezcla	PODER CALORIFICO PROMEDIO (BTU/lb.)
Tipo I B6H12 90min 75°C	<b>14365.9</b>
Tipo I B3H12 90min 75°C	<b>14817.4</b>
Tipo II B3H12 90min 75°C	<b>12768.6</b>
Tipo II B6H12 90min 75°C	<b>12192.3</b>
Tipo III B6H12 90min 75°C	<b>14223.3</b>
Tipo III B3H12 90min 75°C	<b>14816.3</b>

**Cuadro 33.** Resultados de azufre total en briquetas

Tipo de carbón	Pesos de los crisoles [gr.]			AZUFRE TOTAL [% en peso]	AZUFRE TOTAL PROMEDIO [% en peso]
	Crisol + BaSO <sub>4</sub>	Crisol Vacío	Peso muestra		
Tipo I B6H12 90min 75°C	15.238241	15.19624	0.9998	0.56855094	<b>0.57288</b>
	18.838741	18.79601	1.00014	0.57838499	
	13.897654	13.85541	1.00009	0.5717241	
Tipo I B3H12 90min 75°C	16.156324	16.11491	1.00038	0.56016016	<b>0.56802</b>
	15.238654	15.19628	1.00024	0.57342388	
	18.838245	18.79609	1.00009	0.57050153	
Tipo II B3H12 90min 75°C	16.154214	16.11488	1.00007	0.53176076	<b>0.53477</b>
	16.118056	16.07891	1.00016	0.52913058	
	25.735845	25.69566	1.00011	0.54342924	
Tipo II B6H12 90min 75°C	18.690123	18.65023	0.99991	0.53952608	<b>0.54175</b>
	21.363452	21.32314	1.00011	0.54517377	
	14.125124	14.08515	1.00005	0.54056327	
Tipo III B6H12 90min 75°C	18.692456	18.65014	0.99993	0.57280479	<b>0.57692</b>
	21.365987	21.32311	0.99993	0.58051235	
	14.127852	14.08519	1.0001	0.5774603	
Tipo III B3H12 90min 75°C	16.120942	16.07894	1.00003	0.56843391	<b>0.57547</b>
	25.738012	25.69564	1.00135	0.5727608	
	13.898354	13.85548	1.00007	0.5803899	

## ANEXO E

**Cuadro 34.** Resultados de humedad en coque 75°C

Tipo de mezcla	Pesos de los crisoles [gr.]			HUMEDAD [% en peso]	HUMEDAD PROMEDIO [% en peso]
	P1	P2	P3		
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	18.81356	19.81325	19.7925	2.07564345	<b>2.0902</b>
	25.69684	26.69621	26.67541	2.08131123	
	14.08623	15.08635	15.06521	2.11374635	
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	23.56741	24.56732	24.55323	1.40912682	<b>1.4423</b>
	18.81335	19.81374	19.79882	1.49141835	
	25.69699	26.69682	26.68256	1.42624246	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	14.08602	15.08482	15.06744	1.74008811	<b>1.8019</b>
	25.12146	26.12189	26.10448	1.74025169	
	16.1152	17.11547	17.09621	1.92548012	

**Cuadro 35.** Resultados de cenizas en coque 75°C

Tipo de mezcla	Pesos de los crisoles [gr.]			CENIZAS [% en peso]	CENIZAS PROMEDIO [% en peso]
	P1	P2	P3		
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	18.81356	19.81325	18.97323	15.9719513	<b>15.9883</b>
	25.69684	26.69621	25.85847	16.1731891	
	14.08623	15.08635	14.24445	15.8201016	
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	23.56741	24.56732	23.68814	12.0740867	<b>11.9188</b>
	18.81335	19.81374	18.93265	11.9253491	
	25.69699	26.69682	25.81454	11.7569987	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	14.08602	15.08482	14.24281	15.6978374	<b>15.8102</b>
	25.12146	26.12189	25.28065	15.9121578	
	16.1152	17.11547	16.27345	15.8207284	

**Cuadro 36. Resultados de materia volátil en coque 75°C**

Tipo de mezcla	Pesos de los crisoles [gr.]				MATERIA VOLATIL [% en peso]	MATERIA VOLATIL PROMEDIO [% en peso]
	m1	m2	m3	M1		
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	26.11796	27.11811	27.07524	2.0902	2.19615705	<b>2.2101</b>
	33.56803	34.56845	34.52541	2.0902	2.21199308	
	23.85708	24.85726	24.81413	2.0902	2.2220238	
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	24.08602	25.08482	25.05221	1.4423	1.8226179	<b>1.8308</b>
	26.07841	27.0781	27.04562	1.4423	1.80670719	
	24.74728	25.74747	25.71441	1.4423	1.86307198	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	26.02158	27.02138	26.98588	1.8019	1.74881014	<b>1.7423</b>
	35.69669	36.69675	36.66142	1.8019	1.73088803	
	28.81346	29.81402	29.77851	1.8019	1.74711255	

**Cuadro 37. Resultados poder calorífico en coque 75°C**

Tipo de mezcla	Ta [°C]	Tc [°C]	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> [ml]	Alambre	e2	E3	Muestra [gr.]	ΔT [°C]	Poder calorífico [BTU/lb.]
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	28.36	30.9	4.6	7	28.5217391	46	0.99987	2.54	<b>12851.598</b>
	29.12	31.66	4.7	9	24.9565217	47	0.9999	2.54	<b>12853.778</b>
	28.26	30.79	4.4	10	23.173913	44	0.99975	2.53	<b>12809.594</b>
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	28.03	30.25	4.4	10	23.173913	44	0.99985	2.22	<b>11230.683</b>
	28.33	30.56	4.4	11	21.3913043	44	1.00008	2.23	<b>11280.762</b>
	28.45	30.67	4.4	9	24.9565217	44	1.00014	2.22	<b>11225.644</b>
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	28.46	30.57	4.6	12	19.6086957	46	0.99974	2.11	<b>10673.618</b>
	29.62	31.71	4.5	12	19.6086957	45	1.00021	2.09	<b>10567.857</b>
	29.93	32.02	4.3	8	26.7391304	43	1.00033	2.09	<b>10561.460</b>

**Cuadro 38.** Continuación resultados poder calorífico en coque

Tipo de mezcla	PODER CALORIFICO PROMEDIO [BTU/lb.]
Tipo I B6H12 90min 75°C	<b>12838.32</b>
Tipo II B3H12 90min 75°C	<b>11245.48</b>
Tipo II B6H12 90min 75°C	<b>10600.98</b>

**Cuadro 39.** Resultados de azufre en coque

Tipo de carbón	Pesos de los crisoles [gr.]			AZUFRE TOTAL [% en peso]	AZUFRE TOTAL PROMEDIO [% en peso]
	Crisol + BaSO <sub>4</sub>	Crisol Vacío	Peso muestra		
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	16.168254	16.118062	0.99987	0.68105372	<b>0.67534</b>
	25.784852	25.735842	0.9999	0.66479335	
	18.740251	18.690129	0.99975	0.68017357	
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	21.412235	21.365984	0.99985	0.62691776	<b>0.63173</b>
	14.174214	14.127841	1.00008	0.62844949	
	16.168126	16.120922	1.00014	0.63982646	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	13.945654	13.897634	0.99974	0.65129558	<b>0.64563</b>
	16.204354	16.15632	1.00021	0.65118183	
	15.285461	15.238642	1.00033	0.63441755	

**Cuadro 40.** Resistencia a la caída del coque.

Composición mezcla	Número de caídas para rompimiento	PROMEDIO
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	13	<b>12</b>
	10	
	12	
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	10	<b>9</b>
	10	
	8	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	14	<b>13</b>
	11	
	13	

**Cuadro 41. Resistencia a la compresión del coque.**

Composición mezcla	Resistencia a la compresión [Kg-f]	PROMEDIO
Tipo I B6H12 90 min. 75°C	5.8	<b>5.6</b>
	6	
	5	
Tipo II B3H12 90 min. 75°C	4.3	<b>4.5</b>
	4.6	
	4.6	
Tipo II B6H12 90 min. 75°C	6.5	<b>6</b>
	5.8	
	5.7	