

ESTUDIO DE FINO DE COQUE RECICLADO AGLOMERADO Y COMPACTADO

NAREN ORLANDO MARIÑO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
TUNJA
2022

ESTUDIO DE FINO DE COQUE RECICLADO AGLOMERADO Y COMPACTADO

NAREN ORLANDO MARIÑO HERNÁNDEZ

Informe de pasantía para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Directora: Sully Segura Peña

Codirector: Juan Rodrigo Salamanca Sarmiento

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

TUNJA

2022

CONTENIDO

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN.....	5
------------------------	---

1.2. OBJETIVO GENERAL.....	7
----------------------------	---

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
-----------------------------------	---

1.3. ALCANCE.....	8
-------------------	---

2. ESTADO DEL ARTE.....	9
-------------------------	---

2.1. MARCO TEORICO.....	9
-------------------------	---

2.1.1. Las propiedades de las briquetas de polvos de coque producidas por briqueteado de carnero. Loginov, Yu. N. y Polyansky, L. I.	9
---	---

2.1.2. Obtención de briquetas a partir a partir de finos de un carbón del Valle del Cauca. Sánchez L. M. y López. D. R.	10
--	----

2.1.3. Beneficios de los finos de coque. Mora Camacho F.	10
---	----

2.1.4. Briqueteado de residuos de la siderurgia que contienen carbono para la producción de coque metalúrgico. ÁLVAREZ. R. CIMADEVILLA. J. LN.....	11
--	----

2.1.5. Aprovechamiento de partículas de ultrafinos de carbón de una planta lavadora en la producción de coque metalúrgico. Rodríguez Vera L. I. Gutiérrez Bernal J. M.	12
---	----

2.1.6. Estudio de viabilidad sobre la aglomeración de finos de carbón. Sierra Zafrán. Á. y Gómez Castellanos. G.	13
---	----

2.1.7. Influencia de las propiedades de los ligantes bituminosos en la resistencia del coque formado. Ashok. B. Sharma. K. Das. P.	13
---	----

2.1.8. Carbón no coquizable a coque: uso de mezcla basada en biomasa. Sharma. S. Choudhury. R.....	14
--	----

2.1.9. Nuevas tecnologías de utilización del carbón. Osborne. D. G. Graham. J. M. Elliot. L. K.	15
--	----

2.1.10. Obtención de dextrinas de alta solubilidad a partir de almidón industrial. Carrascal Delgado. F.....	16
--	----

2.1.11. Propiedades de una bentonita industrial nacional y su caracterización basada en absorción por difracción de rayos X. Moreira Toja. R. J.....	18
--	----

2.2. MARCO REFERENCIAL.....	21
-----------------------------	----

2.3. MARCO LEGAL	21
2.4. MARCO CONCEPTUAL.....	21
2.4.1. Análisis próximo.	22
2.4.2. Almidón.	22
2.4.3. Bentonita Sódica.	23
2.4.4. Briquetas	23
2.4.5. Carbono fijo.....	24
2.4.6. Ceniza.	24
2.4.7. Coque.....	24
2.4.8. Humedad intrínseca.	25
2.4.9. Materia volátil.	25
3. METODOLOGÍA	26
3.1. Definir la granulometría, los porcentajes de mezcla y el proceso de la brisa de coque antes de su caracterización y amalgamiento....	26
3.1.1. Actividad 1.....	26
3.1.2. Actividad 2.....	26
3.1.3. Actividad 3.....	26
3.2. Sugerir los ligantes para las mezclas amalgamadas.....	30
3.2.1. Actividad 4.....	30
3.2.2. Actividad 5.....	33
3.2.3. Actividad 6.....	33
3.3. Determinar la aglomeración y el <i>Drop Shatter Test</i> de las mezclas compactadas.....	36
3.3.1. Actividad 7.....	36
3.3.2. Actividad 8.....	38
3.3.3. Actividad 9.....	39
4. RESULTADOS	40
4.1. Briqueteado de las mezclas, temperatura y tiempo de curado.	40
4.1.1. Briquetas con bentonita al seis por ciento.....	41
4.1.2. Briquetas con bentonita al tres por ciento.	42
4.1.3. Briquetas con almidón al diez por ciento.....	44
4.1.4. Briquetas con almidón al cinco por ciento.....	45
4.2. Análisis próximos de las mezclas	46

4.3.	Drop Shatter Test.....	51
5.	CONCLUSIONES	54
6.	RECOMENDACIONES.....	56
7.	REFERENCIAS	57
8.	ANEXOS.....	62
8.1.	Método de prueba estándar en humedad para la muestra de análisis en carbón y coque.	62
8.2.	Método de prueba estándar para la ceniza en las muestras de los análisis del carbón y coque.....	63
8.3.	Método de prueba estándar para el material volátil en las muestras de análisis del carbón y coque.....	64
8.4.	Calculo de carbono fijo en carbone y coque.	65
8.5.	Divulgación científica.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura cristalina de la amilosa y la amilopectina.	16
Figura 2. Microscopía de luz del almidón de maíz por cien aumentos.	17
Figura 3. Micrografías electrónicas de barrido.....	18
Figura 4. Estructura cristalina de la bentonita sódica.	19
Figura 5. Estructura química de la arcilla.....	19
Figura 6. Micrografías electrónicas.....	20
Figura 7. Desarrollo de la actividad dos, selección del fino de coque, peso y desprendimiento de humedad extrínseca.....	28
Figura 8. Desarrollo de la actividad tres. Cuarteo, pulverizado y toma de muestra para caracterizar.....	29
Figura 9. Peso de las partículas de coque y la bentonita sódica.	30
Figura 10. Preparación de las mezclas con bentonita.	31
Figura 11. Equipos de laboratorio de calidad de la empresa German Franco.....	33
Figura 12. Preparación de las mezclas con almidón modificado de maíz.....	34
Figura 13. Crisoles del laboratorio de la empresa German Franco.	36
Figura 14. Briqueteado de las muestras.....	37
Figura 15. Temperatura y tiempo de curado de las briquetas compactas.....	38
Figura 16. Adaptación del Drop Shatter Test.....	39
Figura 17. Peso y dimensiones de las briquetas con bentonita al seis por ciento.....	41
Figura 18. Peso y dimensiones de las briquetas con bentonita al tres por ciento.....	43
Figura 19. Peso y dimensiones de las briquetas con almidón al diez por ciento.....	44
Figura 20. Peso y dimensiones de las briquetas con almidón al cinco por ciento.....	45

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Porcentajes de las mezclas.....	27
Tabla 2. Análisis próximos del fino aglomerado y compactado.....	49
Tabla 3. Desprendimiento de la humedad extrínseca por veinticuatro horas..	50
Tabla 4. Pérdida de las muestras después del Drop Shatter Test y la granulometría en porcentaje y unidad de peso.....	53

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Metodología de preparación de la bentonita.....	33
Diagrama 2. Metodología de preparación del almidón.....	36

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN.

La transición energética en Colombia es un hecho en el mediano y largo plazo. La descarbonización del territorio nacional es una realidad que conlleva retos en el diseño de nuevas estrategias y tecnologías que generen energías renovables y nuevos materiales sólidos que actúen como combustibles fósiles que suplan la demanda de aquí en adelante en los sectores industriales de fabricación de acero, generación de energía entre otras manufacturas que dependen actualmente del carbón y el coque.

Samacá se encuentra en la provincia de Hunza del departamento de Boyacá, Colombia. Este municipio colombiano se destaca por sus actividades económicas como la ganadería, la agricultura y la minería, los cultivos más importantes son la cebolla, la papa, el maíz entre otros. La minería es una actividad que extrae los recursos encontrados debajo del suelo y son explotados por medio de minas subterráneas y a cielo abierto. Hay otra labor con relación a esta explotación que recae en las industrias coquizadoras del carbón, estas transforman esta roca en coque.

La destilación a alta temperatura y en ausencia del oxígeno de las mezclas de carbones bituminosos, entrega un combustible sólido conocido como coque. En esta quema se elimina el contenido de material volátil, incrementando el carbono fijo y aumentando sus propiedades mecánicas, especiales para que sirva como materia prima en la producción de acero en altos hornos. (Rodríguez. 2000).

En la empresa Germán Franco Carbón SAS yacen tres generaciones que se han encariñado a través del tiempo por entender y trabajar el carbón. El señor Mario Franco, fue pionero en este sector industrial. La explotación minera de este combustible fósil fue su fuerte. Germán Franco, su hijo, al ser Ingeniero Metalúrgico continuo con su legado extractivista evolucionando el modelo de negocio de la compañía con la producción y comercialización de coque metalúrgico.

El ingeniero, con su intelecto, fue el iniciador en moler el carbón antes de coquizarlo en Samacá. Esta actividad reduce el tamaño de la roca minada para mejorar propiedades como su resistencia mecánica, buscando menos abrasión del producto que queda de la calcinación. Antiguamente se carbonizaba este mineral bituminoso como se extrae de las minas teniendo un material muy abrasivo y quebradizo al manipularlo. El doctor en Ingeniería de Materiales César Franco, Nieto de Mario e hijo de Germán, hoy en día continua la tradición del carbón manteniendo una compañía que se destaca por hacer innovación y las cosas diferentes a la competencia. Actualmente la planta cuenta con once trabajadores y se especializan

en la producción de dos productos: coque para la fabricación de acero y coque para fabricación de material de fricción.

Se estima que la industria coquizadora de carbón colombiana desperdicia entre el tres y el diez por ciento de polvos generados en el proceso de molienda y cribado por la producción de coque (Sierra. A, 2004). Estas partículas, en su mayoría con un tamaño de no más de veinte milésimas de pulgada se generan en la empresa Germán Franco Carbón SAS, después de procesar la totalidad del material todo uno para obtener dos tamaños de comercialización: el primero, de cero a una pulgada, y de una a tres pulgadas el segundo.

Este porcentaje representa una cantidad de energía improductiva como materia prima que se acumula a través del tiempo. Expuesta al ambiente, termina convirtiéndose en un problema medio ambiental por la dispersión de esta brisa a través del mismo aire (Sánchez. L, 2016). Y económico, porque el 10% anual de ultrafinos de coque, representa un activo estancado que no genera ninguna utilidad para la compañía al no encontrar un mercado que pueda darles valor agregado a esos residuos (Mora. F, 2015).

En la actualidad todo proceso de reaprovechamiento de cualquier residuo producido en la industria de coquización del carbón es una prioridad clave como tecnología de reutilización, teniendo como reto la reducción de los polvos generados por la producción de coque. De la industria coquizadora se pueden aprovechar los residuos finos en dos procesos asociados a las briquetas y el reciclaje de combustible.

El doctor abrió en su compañía una convocatoria para realizar una práctica universitaria, por medio de la doctora en Ingeniería de Materiales Sully Segura se invitó a la Universidad Santo Tomás seccional Tunja para que participaran estudiantes de los programas de la división de ingenierías y arquitectura en elaborar un diseño experimental que conforme un producto a partir de polvos de coque.

La propuesta que se envió junto a mi hoja de vida para participar fue escogida por ser concreta y ejecutable en cuatro meses. Procedí a leer, firmar y aceptar los términos y condiciones del contrato de aprendizaje que ofreció el gerente, luego empecé a trabajar en las responsabilidades que se me asignaron y al mismo tiempo plantear el diseño experimental que desarrollo los objetivos en el tiempo estipulado.

Para conseguir que los polvos de coque sean reutilizados y arrojen características favorables al momento de aglomerarlos y compactarlos, se ejecutó paso a paso la metodología planteada por esta investigación.

Los resultados obtenidos concretaron productos en forma de briquetas. Estas expresan el amalgamiento de las mezclas con bentonita y almidón encontrando diferentes alternativas innovadoras de obtener materiales aglomerados a partir de residuos que presenten buena relación de compactación.

1.2. OBJETIVO GENERAL.

Evaluar las características del aglomerado reciclado y compactado generado en la Empresa Germán Franco Carbón SAS.

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Definir la granulometría, los porcentajes de mezcla y el proceso de la brisa de coque antes de su caracterización y amalgamiento.

Sugerir los ligantes para las mezclas amalgamadas.

Determinar la aglomeración y el *Drop Shatter Test* de las mezclas compactadas.

Y

1.3. ALCANCE.

En este informe se llevaron a cabo dos protocolos de preparación descritos en la metodología. Esto facilitó la viabilidad de amalgamar los polvos de coque con los ligantes sugeridos, compactando los finos aglutinados por medio de la briquetación. A las briquetas se les analizaron sus propiedades intrínsecas por medio de análisis próximos (humedad, cenizas, y material volátil) y su resistencia al impacto por medio del ensayo estándar de rotura por caída.

El estudio se realizó en la Empresa Germán Franco Carbón SAS. Compañía que se ha dedicado a la coquización del carbón y comercialización de coque metalúrgico. La misma cuenta con un laboratorio y los siguientes equipos: báscula, mufla, Hoskin entre otros.

El estudio tendrá como directores los siguientes:

De la empresa Germán Franco Carbón SAS, **César German Franco Rodríguez**. Él es gerente y director del área científica de la empresa, formado como Diseñador Industrial con Maestría en Administración de Empresas y estudiante actualmente del Doctorado en Ingeniería de Materiales.

De la Universidad Santo Tomás:

Como directora del trabajo de grado, la docente del departamento de ciencias básicas e investigadora **Sully Segura Peña** formada en Física, con Maestría en Ciencias Físicas con énfasis en Materiales, actualmente estudiante del Doctorado en Ingeniería de Materiales.

De la facultad de Ingeniería Mecánica:

Como codirector de trabajo de grado el Ingeniero Metalúrgico **Juan Rodrigo Salamanca Sarmiento** con una maestría en materiales y énfasis en biopolímeros.

El tiempo de ejecución de la pasantía se realizó en cuatro meses donde se desarrollaron los tres objetivos específicos. Se estimó que alrededor de diez millones de pesos colombianos costo el desarrollo de este proyecto de investigación.

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1. MARCO TEORICO.

2.1.1. Las propiedades de las briquetas de polvos de coque producidas por briqueteado de carnero. Loginov, Yu. N. y Polyansky, L. I.

En este artículo se exponen los efectos del briqueteado de polvo de coque aglutinado en una matriz cilíndrica cerrada, como ligante se utilizó óxido de sílice. De los datos prácticos, se trazaron curvas y aproximaciones en la relación de compactación frente a la presión ejecutada. Con estos datos experimentales se pueden determinar las propiedades mecánicas de las briquetas.

El proceso de fabricación de coque para la metalurgia ferrosa deja residuos en forma de finos de coque. La acumulación de este polvo por la producción ascendió al cinco y siete por ciento. La reutilización de estos desechos es complicada por el problema de la exportación de partículas ligeras.

En este caso hubo una forma de solucionar el problema. Consistió en el procesamiento de partículas finas con aplicación en varios métodos de peletización, entre los que se destacó el método de briqueteado. Otros estudios, por ejemplo, se propusieron a utilizar los residuos de la producción de coque total de la fundición para calentar cubilotes. En este estudio incluso se produjo un efecto positivo, que consistió en el aumento del Carbono fijo, esto ocurrió por la estructura cristalina del ligante al amalgamarse con el polvo de coque.

Las partículas de coque compactadas tuvieron uso doméstico y como combustible fósil para la producción de zinc y la sinterización de minerales de níquel. El problema de la producción de briquetas que contienen coque se está resolviendo activamente en el extranjero, por ejemplo, mediante la compactación con rodillos, las briquetas compuestas por óxidos de hierro, incluso en forma de escamas.

Se propuso producir briquetas para la manufactura de las ferroaleaciones mediante extrusión. La Universidad Estatal Aeroespacial de Siberia, el Instituto de Investigación del Este, el Instituto de Química del Carbón, la sociedad anónima NKP de Tecnología y el Instituto de Metalurgia Ferroviaria de la NAS de Ucrania, son distinguidos por su experiencia en la fabricación de briquetas de combustible a partir de finos, incluido los finos de coque, mediante el prensado con rodillos y varios aglutinantes. (LOGINOV, YU. N. BABALLOV, N. A. POLYANSKY, L. I. 2017).

2.1.2. Obtención de briquetas a partir a partir de finos de un carbón del Valle del Cauca. Sánchez L. M. y López. D. R.

Este trabajo llevó a cabo la fabricación de briquetas a partir una muestra de finos de carbón procedente de la empresa Cartón en Colombia. Se dispusieron de variables como la concentración de almidón, la presión de prensado y el contenido de humedad. Estos factores influenciaron en las características de las briquetas obtenidas como la resistencia a la compresión y el impacto y un análisis energético, específicamente el poder calorífico.

Primero se hizo una amplia distribución del tamaño de partícula y se caracterizó la muestra representativa, realizando análisis de humedad intrínseca, cenizas, material volátil y poder calorífico arrojando resultados de un carbón de bajo rango, con un porcentaje de ceniza cercano al cincuenta por ciento y un bajo poder calorífico.

Posteriormente de la caracterización de la muestra se realizó la producción de las briquetas de acuerdo con los rangos establecidos, en donde se encontró que las briquetas con mejor resistencia son aquellas que tienen alto contenido de almidón y mayor presión de compactación.

Para terminar, se realizó un proceso de sinterización de las briquetas con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de acuerdo con el diseño experimental propuesto. Mediante un modelo matemático y un análisis de graficas de superficie se encontraron las condiciones que minimizan la resistencia dentro del rango de operación seleccionado. (SÁNCHEZ, L. y LÓPEZ, D. 2016).

2.1.3. Beneficios de los finos de coque. Mora Camacho F.

Este trabajo de investigación planteo alternativas para la comercialización de los finos de coque. Por medio de un subproceso se permitió dar un valor agregado a este polvo. A partir del estado de arte se definieron cuatro alternativas viables para aprovechar estas partículas de coque en las se desarrollaron y se plantearon las ventajas y desventajas de cada una de estas al ser producidas. Al final se definen las hipótesis de la investigación y se escoge la más viable en aspectos técnicos y económicos para la empresa.

Par el desarrollo de la investigación se usaron herramientas de diseño de productos y procesos, así como el planteamiento de las variables a controlar. En el proceso de diseño a partir del control estadístico se tuvo presente los parámetros de control de calidad del coque aceptados ampliamente en la industrial a nivel mundial.

Para conformar las hipótesis se plantearon 3 mezclas de carbón que se probaron a nivel industrial en una de las plantas de coquización de la compañía, los resultados

obtenidos se compararon con los estándares de la industria y también con los que viene manejando la empresa en su operación normal.

Finalmente se seleccionó la mezcla óptima desde el punto de vista de los resultados esperados por la empresa, a partir de una serie de características con las que se evaluó las cuatro alternativas. Partiendo de la mezcla óptima, su implementación en un proceso productivo dará valor agregado a los finos de coque permitiendo a la compañía mejorar su flujo de caja y solucionar los problemas que plantea la no comercialización de este producto.

También se realizaron unas mejoras técnicas en los procesos que se traducen en beneficios económicos para la compañía. El control estadístico de procesos permitirá tener bajo control los parámetros de calidad de productos y procesos, garantizando que la implementación de este nuevo proceso impacte positivamente en los indicadores de la empresa manteniendo los beneficios proyectados a partir de las pruebas industriales.

Los trabajos futuros se deben concentrar en tratar de llegar a otros productos de mayores especificaciones, usando los finos de coque y produciéndolos con bajo costos que permita a la empresa ser competitivos en los mercados del coque a nivel global. (MORA CAMACHO. F. 2015).

2.1.4. Briqueteado de residuos de la siderurgia que contienen carbono para la producción de coque metalúrgico. ÁLVAREZ. R. CIMADEVILLA. J. L.

Esta investigación se enfocó en la producción de briquetas mediante el uso de residuos de las siderúrgicas. Estos desechos tienen alto contenido de carbono y son aglutinado para coquizarlos y obtener coque metalúrgico. Uno de los objetivos de este estudio era utilizar alternativas de bajo coste, como el fino de carbón generado tras las operaciones rutinarias de limpieza en los almacenes, bandas transportadoras cribas y molinos pues es allí donde se generan y almacenan esos polvos de carbón con el fin de reducir el coste global de la fabricación de briquetas usando residuos de la misma producción de la planta.

Las briquetas de carbón con diferentes porcentajes en las formulaciones de las mezclas fueron elaboradas por una máquina de prensado de rollos. Estos productos fueron probados en un horno de pared móvil semipresencial en donde se les añadió in coque en una proporción del diez por ciento en peso. La calidad de los coques compactos producidos se evaluó midiendo su reactividad frente al dióxido de carbono y su resistencia mecánica antes y después de la gasificación con CO₂.

En general, los parámetros de calidad del coque no mostraron ningún deterioro después de aglutinarlo a la mezcla de las briquetas de carbón. Cuando la cantidad, la naturaleza del aglutinante y el tamaño de las partículas son los óptimos el briqueteado parcial de la mezcla permite producir coques de acuerdo con los requisitos específicos para el alto horno. (R. Álvarez, J. L. G. Cimadevilla, 2012).

2.1.5. Aprovechamiento de partículas de ultrafinos de carbón de una planta lavadora en la producción de coque metalúrgico. Rodríguez Vera L. I. Gutiérrez Bernal J. M.

Se estudió los beneficios de las mezclas de ultrafinos resultantes de una planta de lavado de carbón para la producción de coque con el método de briquetación, utilizando seis por ciento en peso de alquitrán de carbón como aglomerante. Se definió el material de estudio y se realizó una prueba a escala de coquización en un horno tipo Koppers.

Se determinó la calidad del coque por pruebas de análisis inmediatos, de resistencia mecánica evaluando la estabilidad Micum diez (M10) y Micum cuarenta (M40), índice de reactividad del coque al dióxido de carbono (CRI) y de resistencia después de la reacción con CO₂ (CSR). Los resultados arrojaron que la briquetación permitió obtener un coque con un CRI de diecinueve por ciento y un CSR de setenta y cinco por ciento, características requeridas en los procesos metalúrgicos, entre otros.

El lavado del carbón en la industria siderúrgica se utiliza para mejorar la calidad del mineral cuando no cumple con las especificaciones ya establecidas, reduciendo su contenido de cenizas y azufre. Las partículas en este proceso del carbón generalmente se separan y lava en tres corrientes paralelas, diferenciadas entre sí por la granulometría en gruesos, finos y ultrafinos.

Para la coquización se mezclan las partículas gruesas y las finas (tamaño superior a medio milímetro) y los ultrafinos (tamaño menor a medio milímetro) y se almacenan o desechan. Estos ultrafinos de carbón, aunque son de buena calidad debido a su misma naturaleza y procedencia no pueden utilizarse directamente en coquización porque ocasionan problemas de manejo. Sin embargo, por el alto costo del carbón coquizable es necesario buscar alternativas para su aprovechamiento en la fabricación de coque metalúrgico, y el proceso de briquetación es una buena alternativa. (MORA, W. F. RAMIREZ, J. 2011).

2.1.6. Estudio de viabilidad sobre la aglomeración de finos de carbón. Sierra Zafrán. Á. y Gómez Castellanos. G.

Al lavar los carbones se generan finos que comúnmente son utilizados en las plantas termoeléctricas como combustible para la generación de energía. Las cantidades de polvos de coque superan la demanda por lo que en esta aplicación no se consume todos estos residuos que se van acumulando en grandes pilas que contaminan el ambiente a sus alrededores. Estos desechos incluyen partículas de carbones coquizables por lo que se apilan después de ser obtenidos del carbón lavado.

Este diseño experimental evaluó la viabilidad de aglutinar los finos de carbón por medio de la briquetación preparando mezclas de estas partículas con bentonita y agua, variando estas tres variables, se fabricaron las briquetas y se sometieron a un tratamiento térmico variando el tiempo de exposición al calor en la estufa de gas. Después se estudiaron los finos de carbón compactos considerando su efecto de amalgamamiento sobre las propiedades del carbón para usarlo como combustible fósil después de evaluarle su resistencia mecánica del aglomerado compactado por medio del ensayo estándar de rotura por caída después de ser coquizadas todas las briquetas.

Estas briquetas presentaron buenas propiedades como combustible reportando un poder calorífico con un rango entre doce mil doscientos y quince mil BTU/lb, unidad británica que mide la cantidad de energía que se requiere para aumentar la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit. También aumentó las cenizas un tres por ciento y un seis, proporcional a lo añadido en la mezcla, la producción de coque se consiguió, pero esta mezcla no obtuvo valores mínimos para ser utilizado como reemplazo de coque metalúrgico tradicional tenido como principal desventaja el aumento de la ceniza entre el once y quince por ciento. (SIERRA ZAFRÁN. Á. GÓMEZ CASTELLANOS. G. 2004).

2.1.7. Influencia de las propiedades de los ligantes bituminosos en la resistencia del coque formado. Ashok. B. Sharma. K. Das. P.

El rol de las diferentes características de diversos ligantes bituminosos a base de alquitrán de hulla y petróleo como la fracción pesada del alquitrán HTC, el alquitrán LTC procesado, la brea y el asfalto, así como el ligante mixto en control de la resistencia al impacto del coque formado a partir de carbón no coquizable, lo mismo con los finos de coque que respectivamente se han analizado con mucho detalle. El objetivo fue investigar si las propiedades de estos aglutinantes bituminosos determinan la resistencia a la rotura por impacto del coque formado. Comprobando que estos ligantes cumplen aspectos importantes en el control de la resistencia mecánica del coque formado durante el curado y la carbonización. Estos parámetros de los ligantes están estrechamente relacionados con sus relaciones atómicas C/H.

A pesar de que la composición de los aglutinantes varía según su origen, ya sea alquitrán de hulla o de petróleo, la relación atómica C/H parece ser la característica más importante de los de los aglutinantes bituminosos. El escenario energético de la India en ese año fue tal que, a falta de disponibilidad de fuentes alternativas de energía para su explotación comercial en un futuro de mediano y largo plazo, junto con la escasa cantidad de recursos energéticos, el país se encontrara en una situación de crisis.

Fuentes alternativas de energía para la explotación comercial en un futuro previsible, junto con las escasas reservas autóctonas de petróleo disponibles y su continua dependencia del crudo importado para satisfacer su creciente demanda de energía, el carbón seguirá ocupando un lugar destacado en el mercado energético. El carbón seguirá ocupando el centro de la escena en las próximas décadas. En consecuencia, están haciendo todos los esfuerzos posibles no sólo para la explotación de sus limitadas reservas de carbón coquizable, sino también para la utilización más eficaz de los carbones no coquizables de calidad inferior de manera respetuosa con el medio ambiente.

Además de su uso principal en la generación de energía, el cemento y las industrias de fertilizantes, los carbones no coquizables pueden también pueden utilizarse como combustible briqueteado formado, un sustituto del coque, para fines industriales. El coque formado es, de hecho, un combustible reconstituido basado en el briqueteado de carbón, carbón vegetal o lignito, en el que las partículas se compactan con un aglutinante adecuado bajo presión. Las briquetas crudas o "verdes" así obtenidas se someten a un tratamiento isotérmico (curado) y luego de son carbonizadas con el fin de reducir los volátiles y la humedad intrínseca. El producto resultante se denomina coque formado, que tiene una resistencia suficientemente alta. (SHARMA. K. ASHOK. B. DAS. P. 2001).

2.1.8. Carbón no coquizable a coque: uso de mezcla basada en biomasa. Sharma. S. Choudhury. R.

Se investiga el efecto de la mezcla de diferentes materiales de biomasa con un carbón no coquizable de la India. El mineral no coquizable procedente de *Western Coalfields Limited (WCL), Nagpur, India*, con alto contenido en materia volátil. La idea de este trabajo fue producir un coque razonablemente bueno y adecuar sus propiedades a las normas. Se utilizó material de biomasa con bajo contenido en cenizas e hidrógeno, entre el cinco y el siete por ciento, para mezclarlo con carbón con alto contenido en cenizas (treinta y dos por ciento) y bajo contenido en hidrógeno (tres por ciento). El botón de la mezcla con el mejor número de hinchamiento se tomó para realizar pruebas a gran escala, primero en un reactor de un litro, y luego en uno de cien litros, ambos diseñados especialmente para este experimento. Los botones obtenidos se emparejaron con diferentes perfiles de número de hinchamiento que iban de cero a nueve en incrementos de un medio.

El coque obtenido se sometió a pruebas de análisis inmediatos, contenido total de azufre e índice de astillamiento. Las pruebas indicaron que el coque formado podía considerarse como coque de fundición de grado tres según las normas y especificaciones. Las pruebas preliminares de formación de coque se realizaron en un horno de mufla según los procedimientos estándar prescritos. La disminución de las reservas de carbón coquizable en la India y el aumento de las restricciones a la importación los impulsaron a buscar alternativas a éste.

Descubriendo que el carbón no coquizable daba un buen producto de coque con brea, cuyo coste era prohibitivo. Por lo tanto, se consideró la posibilidad de sustituir la brea por un material de biomasa más barato y abundante. Se descubrió que el carbón de baja calidad da briquetas sin humo con almidón, alquitrán, melaza entre otros y la aplicación de presión. La India tiene una enorme reserva de carbón, de la cual sólo el catorce por ciento es de la variedad coquizable y el ochenta y seis por ciento restante de tipo poco coquizable o no coquizable.

Por lo tanto, se consideró beneficioso utilizar este carbón para la formación de coque mezclándolo con otros materiales adecuados. Los parámetros necesarios para la coquización del carbón se refieren principalmente al análisis inmediato, al análisis final, al número de hinchamiento del crisol y al ensayo *Gray King*. (CHOULDRY. R. SHARMA. S. 2000).

2.1.9. Nuevas tecnologías de utilización del carbón. Osborne. D. G. Graham. J. M. Elliot. L. K.

El futuro a largo plazo del carbón como principal fuente de energía se basa en el desarrollo de nuevas tecnologías de utilización. Los controles medioambientales serán cada vez más rigurosos, lo que exigirá nuevas técnicas y procesos para el uso del carbón como combustible en las industrias de generación de energía y metalúrgica. Están surgiendo muchas tecnologías nuevas que mejorarán la rentabilidad y el rendimiento técnico del carbón, manteniendo su aceptabilidad medioambiental. Las empresas mineras deben comprender las implicaciones de estas tecnologías emergentes, sobre todo si exigen a los usuarios un carbón con características de calidad exigentes.

En su calidad de gran exportador de carbón, Australia está realizando un importante esfuerzo para lograr esta comprensión de la utilización de sus carbones. Este documento examina las nuevas tecnologías de utilización del carbón y los posibles requisitos de calidad del carbón de cada una de ellas. También se analizan las consideraciones económicas y medioambientales de estas nuevas tecnologías. La principal razón para invertir importantes recursos en el desarrollo de estas nuevas tecnologías de utilización es que las reservas de carbón se estiman en más de 850.000 millones de toneladas y podrían durar más de 100 años al ritmo actual de consumo. (OSBORNE. D. G. GRAHAM. J. M. ELLIOT. L. K. 1995).

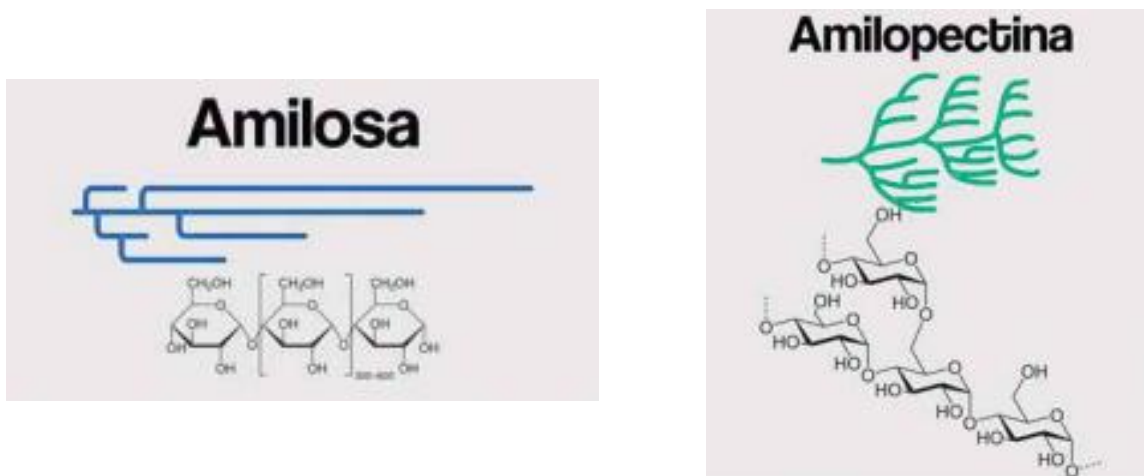
2.1.10. Obtención de dextrinas de alta solubilidad a partir de almidón industrial. Carrascal Delgado. F.

El almidón es un polímero denominado glucano, de estructura semi-cristalina. Tiene la capacidad de formar soluciones viscosas con aspecto semejantes a los geles, sucede porque las partículas del maíz si son suspendidas en el agua y sometidas al calor constante por una estufa de gas. El almidón de maíz modificado disuelto en agua desmineralizada que tiene un pH neutro, a una temperatura que puede variar entre los sesenta y cinco y setenta grados Celsius, durante treinta minutos de mezcla, se puede producir dextrinas de mínima viscosidad.

A temperaturas bajas, la solubilidad en agua varía desde cero hasta cerca del noventa por ciento. El factor más importante, aparte de la temperatura y el pH de la solución, es el tiempo de hidrólisis. Las dextrinas de almidones modificados generalmente tienen propiedades fisicoquímicas alteradas en comparación con los almidones tradicionales dependiendo del grado de sustitución y el tipo de grupos funcionales introducidos.

El almidón modificado de maíz está compuesto por dos tipos de moléculas: la amilosa y la amilopectina.

Figura 1. Estructura cristalina de la amilosa y la amilopectina.



Fuente: <https://repository.agrosavia.co/>

La amilosa es un polímero con una molécula lineal y al mismo tiempo flexible, compuesta por la unión de unidades de D-glucosa. La solubilidad de la amilosa, en agua, es del cincuenta por ciento al setenta y cinco por ciento.

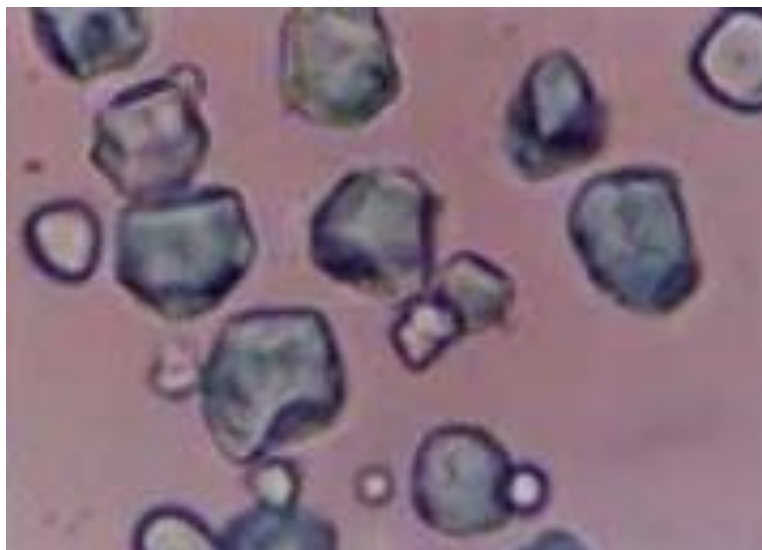
También presenta una estructura tridimensional en forma de hélice, el interior de estas partículas enlazadas en forma de ala contiene sólo átomos de hidrógeno, mientras que en el exterior están situados los grupos hidroxilos.

La amilopectina es la parte más ramificada del almidón y una de las más grandes moléculas en la naturaleza, siendo el componente primordial en la mayoría de los almidones. Es un polímero compuesto por la unión de unidades de D-glucosa, las ramas de las moléculas de amilopectina toman la forma de un racimo y se muestran como dobles hélices. Por su estructura es mucho más estable en soluciones acuosas que la amilosa.

La función del almidón en la fabricación de briquetas consiste en unificar partículas sólidas que van a formar el aglomerado, proporcionando a éste una resistencia adecuada. Se muestra que, en general, al aumentar la concentración de almidón las briquetas obtenidas presentan buena resistencia mecánica al impacto. Sin embargo, el comportamiento de la resistencia de la briketa varía con las condiciones de compactación y contenido de agua.

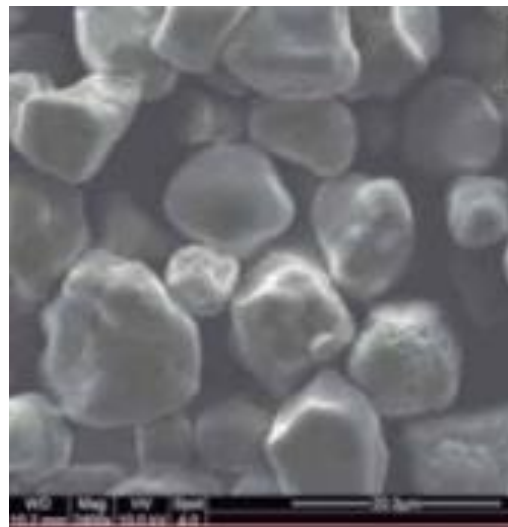
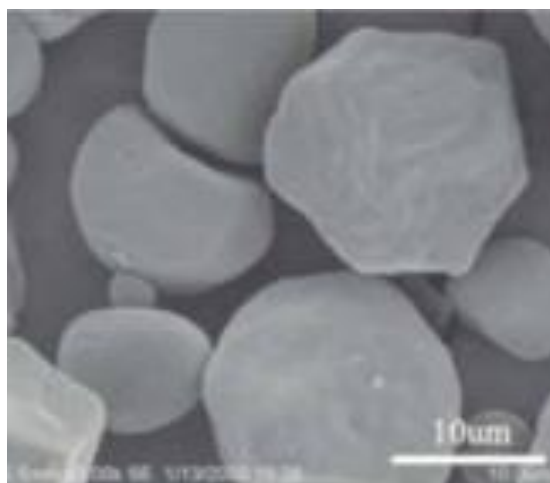
La microscopía óptica es un instrumento para la identificación de las distintas especies de almidón, en donde se aprecia la diversidad en la forma y el tamaño de los gránulos que conforman este polímero. En algunos estudios, se ha utilizado esta técnica para observar los gránulos de almidón de diferentes materias primas. Igualmente es posible medir el tamaño de los gránulos, por lo que el del maíz oscila entre tres a catorce micras en su tamaño molecular.

Figura 2. Microscopía de luz del almidón de maíz por cien aumentos.



Fuente: <https://repository.agrosavia.co/>

Figura 3. Micrografías electrónicas de barrido.



Fuente: <https://repository.agrosavia.co/>

Otra técnica para observar las propiedades morfológicas de los granos de almidón de maíz es por microscopía electrónica de barrido *SEM*. De los granos de maíz, se pueden observar formas poliédricas levemente angulares y algunas superficies porosas con diámetros que van de seis a veinte micras.

Los poros en la superficie de los granos son aberturas a los canales que proporcionan acceso al interior de la molécula. Este estudio es más detallado por los alcances del instrumento electrónico que genera una imagen clara de la morfología del almidón según los aumentos que se estén usando. (CARRASCAL DELGADO. F. 2005).

2.1.11. Propiedades de una bentonita industrial nacional y su caracterización basada en absorción por difracción de rayos X. Moreira Toja. R. J.

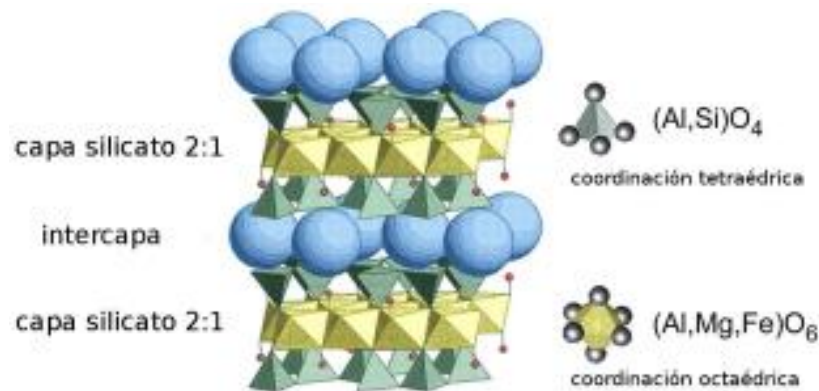
La bentonita es la composición de varios minerales en una roca. Son las esmectitas sus componentes esenciales que le confieren las propiedades características a este mineral, acompañado por otros componentes minoritarios como: cuarzo, feldespato, mica, illita y caolín.

Las bentonitas sódicas contienen principalmente sodio como catión interlamilar, estas arcillas absorber grandes cantidades de agua, dando lugar a una dispersión

de elevada viscosidad. Las bentonitas suelen ser tratadas para obtener un producto con las características deseadas, dependiendo el uso que se le dé.

En el interior de los tetraedros se alojan cuatro cationes positivos de sílice. Los hidroxilos forman capas con coordinación octaédrica y los oxígenos tetraédricos, forman parte de la capa octaédrica contigua. Los cationes octaédricos son, generalmente, Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} o Fe^{3+} y, más raramente, Li^{+} , Cr^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} o Zn^{2+} . Una capa octaédrica entre dos tetraédricas, unidas fuertemente por enlace covalente, forman la unidad estructural básica de las esmectitas.

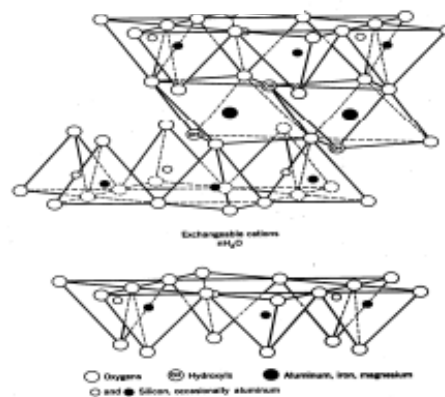
Figura 4. Estructura cristalina de la bentonita sódica.



Fuente: <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/>

La estructura de los minerales que conforman la arcilla se encuentra formada por tetraedros y octaedros con átomos centrales, coordinados por cuatro y seis átomos de oxígeno respectivamente. Entre las capas de mineral, para balancear la carga negativa neta, se acomodan iones, como sodio o calcio, que pueden ser intercambiados por otros iones o por sustancias orgánicas.

Figura 5. Estructura química de la arcilla.

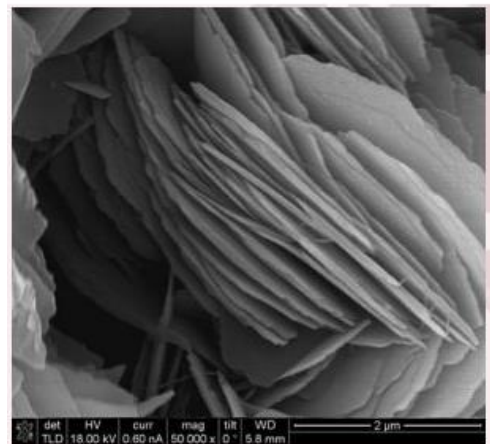
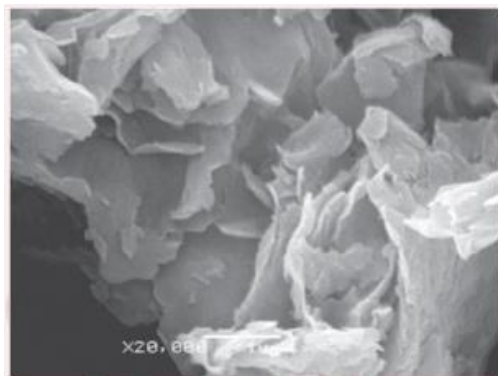
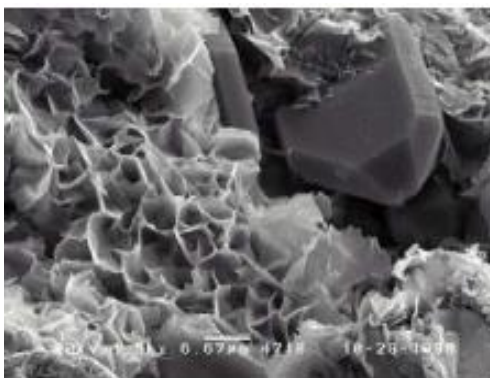


Fuente: <https://intranetua.uantof.cl/>

Las esmectitas son filosilicatos, presentando una gran diversidad composicional. Se trata, además, del único grupo de filosilicatos que aparece únicamente en las fracciones finas menores a dos micras. Como en el resto de los filosilicatos, su estructura se basa en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos.

Los oxígenos se unen formando estructuras laminares de extensión infinita con coordinación tetraédrica. Tres de cada cuatro oxígenos están compartidos con los tetraedros vecinos. (MOREIRA TOJA. R. J. 2015).

Figura 6. Micrografías electrónicas.



Fuente: <https://www.aplicacionesespeciales.com/bentonita/>

2.2. MARCO REFERENCIAL

En la industria de coquización del carbón, la ingeniería mecánica tiene como campo de acción el área de Materiales Industriales, referente al programa de la facultad.

La caracterización de las propiedades físicas y químicas del carbón y el coque se obtienen al momento de realizar análisis próximos. Estos análisis se llevan a cabo según las normas *ASTM*.

2.3. MARCO LEGAL

Resolución 909 de 2008. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

Norma *ASTM D3173*, Método de prueba estándar para humedad en la muestra de análisis de carbón y coque.

Norma *ASTM D3174*, Método de prueba estándar para ceniza en la muestra de análisis de carbón y coque de carbón.

Norma *ASTM D3175*, Método de prueba estándar para materia volátil en la muestra de análisis de carbón y coque.

Norma *ASTM D3038*, Método de prueba estándar para ensayo de caída de coque.

2.4. MARCO CONCEPTUAL.

El estudio del coque y su funcionalidad en diferente proceso involucra el conocimiento de diversas temáticas, que deben ser revisada para un mayor aprovechamiento de todos los recursos teóricos aplicables en cada uno de los objetivos propuestos.

De esta forma se debe iniciar el trabajo practico con el entendiendo de los componentes básicos de las muestras que se trabajaron.

2.4.1. Análisis próximo.

Para caracterizar una muestra de carbón y coque es necesario hacer una serie de análisis para diferenciar las variables intrínsecas que permiten clasificar la calidad de estos combustibles principalmente por carbono, hidrogeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Estos rangos se obtienen en transformaciones físicas y químicas. (STUDOCU. 2018).

Los parámetros químicos básicos del carbón y el coque están determinados por los análisis próximos que entrega información en relación con características globales del carbono mediante la estimación del contenido de humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo, a partir de métodos estandarizados. (LÓPEZ. G. 2018).

La materia mineral no es medida directamente, pero puede ser obtenida por fórmulas empíricas, ya sea a partir del rendimiento de la ceniza mineral o de información derivada del análisis último. Las variables en el análisis próximo son medidas en porcentaje en peso. (SPEIGHT. J. 2013).

2.4.2. Almidón.

El aglutinante de almidón tiene propiedades de adhesión y expansión superiores. Actúa como aglomerante natural para la fabricación de pellets, briquetas entre otros. Estas son preparadas con agua caliente formando un adhesivo de alta adherencia y mínima viscosidad que mantiene las diferentes sustancias juntas. El aglutinante de almidón es un ligante de baja inclusión y tiene un costo menor comparado con otros aglutinantes químicos. (VALIENTE. A.C. 2017).

Éteres de almidón, es decir hidroxipropilados comprende una amplia gama de productos industriales con diferentes grados de sustitución y propiedades fisicoquímicas útiles, que le otorgan la facultad de ser multipropósito, por ejemplo: empaques, imprenta, papel, textil, farmacéutica y biopolímeros, briquetas, entre otros. (MARTINEZ.G.M. 2018).

El almidón es un polímero denominado glucano, cuenta con una estructura semi-cristalina que está constituida por dos tipos de moléculas, la amilosa y la amilopectina. El desempeño del almidón en la elaboración de las briquetas consiste en favorecer la unión de las partículas sólidas que va a formar el aglomerado compactado. (SÁNCHEZ.L.M. 2016).

2.4.3. Bentonita Sódica.

Es una arcilla que está constituida principalmente por montmorillonita, un mineral que pertenece a las esmectitas diactaédricas. Desde ese punto de vista la bentonita es una roca compuesta por varios minerales. Estas arcillas también son conocidas como sódicas por su alto contenido en sodio y su capacidad de absorber agua y catódicas porque el magnesio es abundante en su estructura. (MOREIRA. R. J. 2016).

Las bentonitas son filosilicatos con estructuras laminares poco compactas entre sí. Las bentonitas cumplen con los principales requisitos para ser empleadas en aplicaciones poliméricas ya que son abundantes, económicas, prácticamente incoloras, inertes y sus partículas tienen la forma y el tamaño como para transformarlas en una opción lógica como relleno alternativo para producir materiales compuestos de bajo costo. (PASSARETTI. M.G. 2018).

El grupo de las esmectitas se forman y es estable en ambientes supergénicos, los yacimientos conocidos se formaron durante procesos volcánicos, lacustre, originándose cuencas en las cuales se depositaron sílice, sulfatos, carbonatos, sedimentos siliclásticas y piroclásticas. Las esmectitas se dividen en dos subgrupos, en función del tipo de ocupación de las posiciones octaédricas: diactaédricas y trioctaédricas. (GARCÉS. I. 2018).

2.4.4. Briquetas

Generalmente, las briquetas están hechas con material residual como papel, madera, cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos de pulpa de papel. cáscara de coco, residuos de algodón, cartón, carbón, coque etc.

Según el diccionario de la real academia de la lengua española. Briqueta es un conglomerado de partículas de carbón u otra materia en forma de ladrillo. El término briqueta es una expresión confusa puesto que las briquetas pueden estar fabricadas con uno o más materiales compactados. La materia prima de la briqueta puede ser biomasa forestal biomasa residual industrial biomasa residual urbana carbón vegetal o simplemente una mezcla de todas ellas. (GARCÍA. M. E. 2014).

Son productos renovables solidos que viene en forma de avellana, cilíndrica o de ladrillo con la capacidad de ser un combustible fósil que genera energía calorífica para los altos hornos.

2.4.5. Carbono fijo.

Es el carbono elemental encontrado en el material remanente después de que la materia volátil es expulsada. El valor del carbono fijo es obtenido al restar de cien los porcentajes del contenido de humedad, materia volátil y ceniza. (LÓPEZ. G. 2018).

Este residuo no está constituido totalmente por carbono, presenta un aspecto y una consistencia indicativa del carbón para la coquización. De forma general, puede decirse que el carbono fijo representa la porción de combustible que debe quemar en estado sólido. (SANTURIO. DÍAZ. J. 2002).

2.4.6. Ceniza.

Las cenizas del carbón y el coque son los residuos no combustibles que permanecen en el crisol después de la completa calcinación de las muestras. Específicamente la *ASTM* define las cenizas como el residuo inorgánico que se mantiene después de la quema, usualmente óxidos de metal. (SANTURIO. DÍAZ. J. 2002).

De hecho, las condiciones de incineración determinan la magnitud de los cambios en el peso y por tanto es esencial que los procedimientos estandarizados sean rigurosamente seguidos para asegurar la reproducibilidad. (SPEIGHT. J. 2013).

La ceniza es cuantitativa y cualitativamente en el carbón debido a varios cambios que ocurren, entre ellos, deshidratación de los silicatos, la pérdida de dióxido de carbono de los carbonatos, la oxidación de la pirita de hierro a óxido de hierro, y el anclaje de óxidos de azufre por medio de bases como calcio o magnesio. (LÓPEZ. G. 2018).

2.4.7. Coque.

El coque metalúrgico es un mineral de alta resistencia mecánica producto de la coquización de los carbones coquizables en hornos refractarios especiales o de tipo colmena a una temperatura entre novecientos y mil doscientos grados Celsius en un ambiente de ausencia de oxígeno.

El carbón coquizado es usado en el proceso de fundición del mineral de hierro dentro del alto horno, actuando como combustible fósil al suministrar la energía calorífica necesaria para la reacción y fusión del metal.

La producción de coque mundial en el año dos mil diez estuvo cercana a los seiscientos millones de toneladas, determinada principalmente por la producción de China con cerca de trescientos cincuenta millones de toneladas y los países miembros de la *OECD* con ciento veintidós mil millones. La calidad del coque metalúrgico depende principalmente de la calidad de los carbones que se utilicen en el proceso de coquización, una combinación de carbones metalúrgicos de alta calidad garantizan un coque metalúrgico de iguales características. (VALENCIA. A. 2014).

2.4.8. Humedad intrínseca.

Según la mina que se esté explotando, el carbón que se extrae contiene cantidades variables de humedad relativa. Primero se equilibra la humedad superficial durante veinticuatro horas en un ambiente controlado. (SANTURIO. DÍAZ. J. 2002).

La humedad intrínseca es un dato relevante en los análisis próximos del coque y el carbón. Esta característica también se le conoce como humedad inherente, se trata de la cantidad de moléculas de agua en el interior de la estructura morfológica del coque. La humedad higroscópica es la cantidad de agua dentro de las microfracturas del mineral. (LÓPEZ. G. 2018).

2.4.9. Materia volátil.

La medida del contenido en volátiles del carbón es uno de los parámetros más frecuentemente empleados en los sistemas de clasificación además la cantidad de materiales volátiles pueden darnos una idea del comportamiento del carbón frente a los procesos de combustión y coquización que pudieran ser sometidos. (SANTURIO. DÍAZ. J. 2002).

La materia volátil hace referencia a los componentes del carbón y el coque que son liberados en la calcinación de las muestras a una temperatura de no más de novecientos cincuenta grados Celsius, en ausencia de aire, por siete minutos. La pérdida de peso excluyendo la disipación debida al agua es el contenido de materia volátil y se expresa como porcentaje en peso. (LÓPEZ. G. 2018).

3. METODOLOGÍA

En este trabajo de investigación se desarrolló un protocolo para la preparación de cuatro muestras del fino reciclado, aglomerado y compactado de coque.

La metodología para las muestras del aglutinado obedece el cumplimiento de los objetivos y sus respectivas actividades. La revisión de material bibliográfico se realizó de manera constante durante los cuatro meses que duro la práctica.

3.1. Definir la granulometría, los porcentajes de mezcla y el proceso de la brisa de coque antes de su caracterización y amalgamiento.

3.1.1. Actividad 1.

Se definió la granulometría del fino de coque. El tamaño de esta partícula es menor e igual a la abertura del tamiz número treinta.

Este material de estudio se aglomero con los ligantes escogidos y consultados en los antecedentes, planteando en la *tabla uno* los porcentajes de brisa de coque, aglutinante, humedad, temperatura de preparación y el tiempo de curado que se implementaron por cuatro meses en la planta German Franco Carbón.

3.1.2. Actividad 2.

En bultos de veinticinco kilos, apilados en estivas y a la intemperie se encontraba la brisa de coque para esta investigación. En la *figura siete* se usaron cincuenta kilos de polvo, los dos sacos de fino fueron pesados en una báscula antes que fueran extendidos en un ambiente controlado sobre una superficie plana, al recogerlos después de veinticuatro horas se volvieron a pesar.

En este tiempo la humedad extrínseca fue desprendida natural y paulatinamente del material y ese valor final fue representado en unidad de masa. La capa superficial de la brisa extendida fue menor o igual a un centímetro de altura.

3.1.3. Actividad 3.

Durante diez minutos los cincuenta kilos de finos de coque fueron esparcidos en el cuarteador dividiendo el material de estudio en dos partes como lo muestra la *figura ocho*. Se removió el lado izquierdo de manera al azar, guardándolo como residuo y el fino que quedo fue cuarteado por segunda vez, generándose nuevamente dos secciones del polvo en ambas partes del equipo.

Esta vez se guardó como desecho la brisa del lado derecho y el otro lado por tercera vez fue vaciado. Esto se repitió una y otra vez hasta que la materia prima fue reducida a una porción de no más de doscientos gramos, luego se usó el pulverizador reduciendo el tamaño de partícula de la muestra y obtenido una caracterización completa de todo el bien intermedio.

Tabla 1. Porcentajes de las mezclas.

PROCENTAJES EXPERIMENTALES DE MEZCLAS (FINOS DE COQUE - AGLUTINANTES)									
MUESTRA	FINO DE COQUE	COQUE (%)	LIGANTE	%	HUMEDAD (%)	TEMPERATURA DE PREPARACIÓN (°C)	MEZCLA (KG)	TEMPERATURA DE CURADO (°C)	TIEMPO DE CURADO (min)
1	<MALLA30	89	BENTONITA	3	8	AMBIENTE	10	75	90
2	<MALLA30	82	BENTONITA	6	12	AMBIENTE	10	75	90
3	<MALLA30	80	ALMIDÓN	10	10	70	10	75	90
4	<MALLA30	90	ALMIDÓN	5	5	70	10	75	90

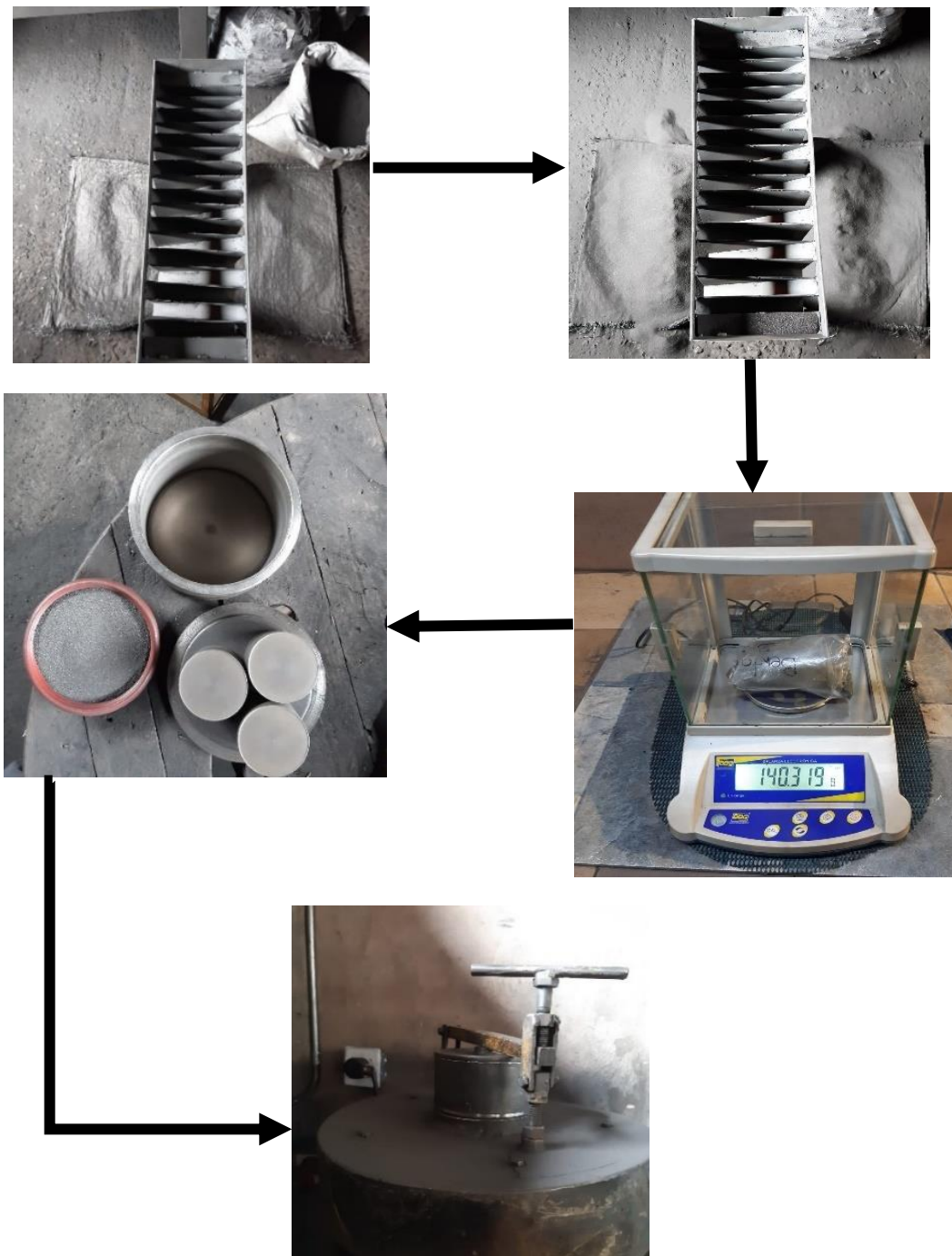
Fuente. Autor.

Figura 7. Desarrollo de la actividad dos, selección del fino de coque, peso y desprendimiento de humedad extrínseca.



Fuente. Autor.

Figura 8. Desarrollo de la actividad tres. Cuarteo, pulverizado y toma de muestra para caracterizar.



Fuente. Autor.

3.2. Sugerir los ligantes para las mezclas amalgamadas.

3.2.1. Actividad 4.

Cuando se fabricaron cada una de las muestras de la *tabla uno*, se pesaron los porcentajes y se mezclaron manualmente. En esta actividad se realizaron las mezclas uno y dos. En estas muestras, se usó una bentonita sódica que adquirió la compañía meses atrás. Para la primera muestra fueron pesadas cuatro tandas de dos kilogramos, y una de novecientos gramos de brisa de coque en una báscula de mesa electrónica, ya que una masa de ocho kilos excede la capacidad de la balanza. Después se pesaron trecientos gramos de arcilla y por último en una taza medidora la cantidad de agua desmineralizada que requirió esta mezcla.

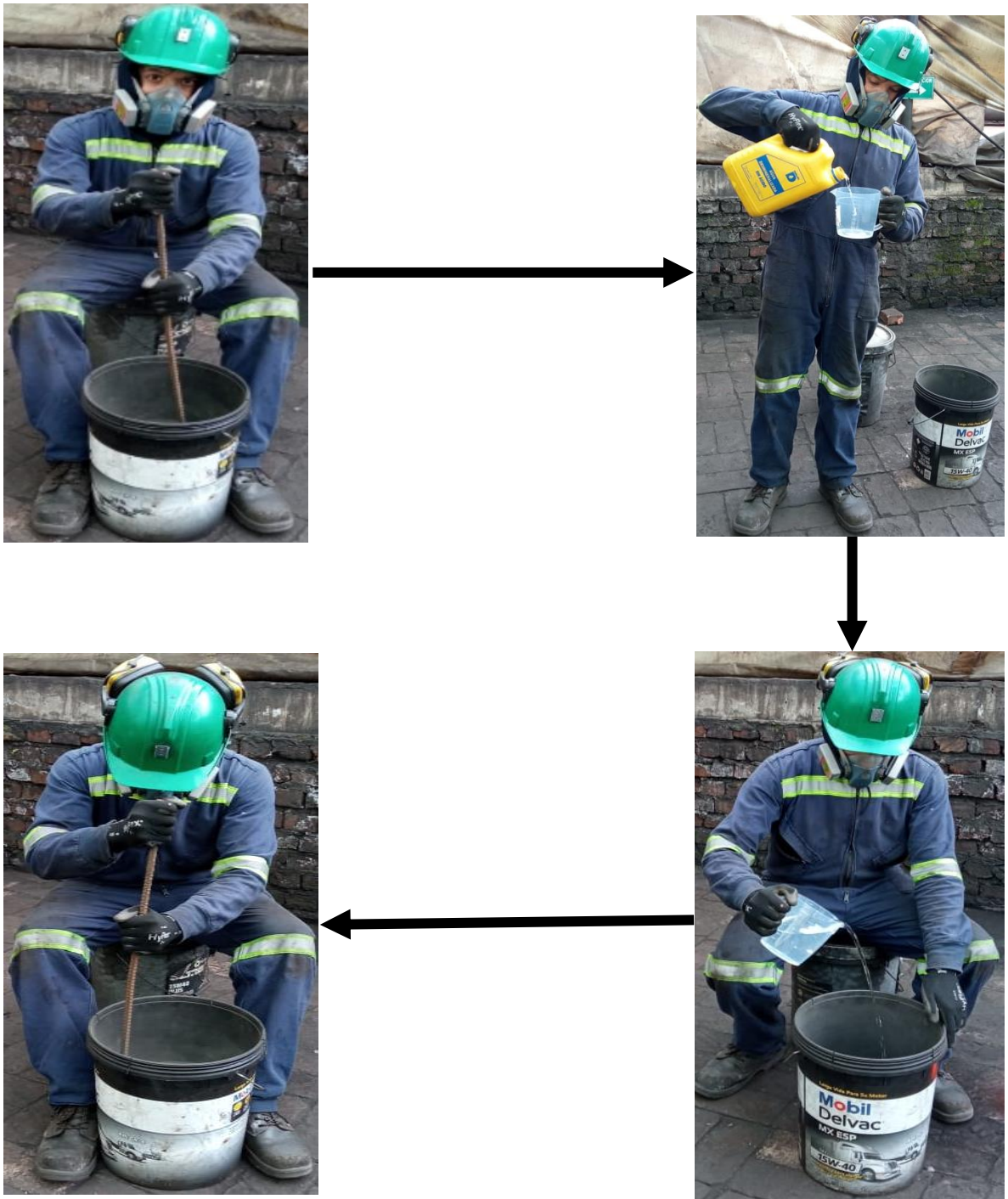
Figura 9. Peso de las partículas de coque y la bentonita sódica.



Fuente. Autor.

Una por una, las mezclas se prepararon en una caneca como se muestra en la *figura diez*, entrelazando las sustancias que las formaron. Las muestras con bentonita fueron amalgamadas con los finos de coque por quince minutos. Luego de ese tiempo se tuvo dentro del balde un tono parejo de la muestra. Después fueron vertidos los mililitros de agua desmineralizada y fue agitada manualmente esa masa por otro cuarto de hora. Cuando se realizó la elaboración de cada mezcla, el recipiente y el agitador de hierro fueron fregados para no contaminar la demás preparación.

Figura 10. Preparación de las mezclas con bentonita.



Fuente. Autor.



Fuente. Autor.

3.2.2. Actividad 5.

Las muestras tres y cuatro se fabricaron con dextrina bondstar, un almidón de maíz modificado escogido de los antecedentes. Fue cotizado y comprado en *Smartcol*, una empresa Bogotana que se encargó de proveernos ese ligante. Sus preparaciones fueron diferentes como se ve en la *figura doce* y en el *diagrama dos* a las mezclas un y dos. Primero, se pesó la cantidad de aglomerante en la balanza electrónica y en la taza medidora la cantidad de agua desmineralizada según los porcentajes de la *tabla uno*.

La sustancia se mezcló en una olla con un molinillo agitándola manualmente durante veinte minutos teniendo una consistencia a una temperatura de setenta grados Celsius, medida tomada con un termómetro TP. Las tandas de fino de coque ya estaban dentro de la caneca donde fue arrojado el almidón en estado líquido y a esa temperatura de preparación, se mezclaron con la varilla de hierro por quince minutos obteniendo una masa homogénea.

3.2.3. Actividad 6.

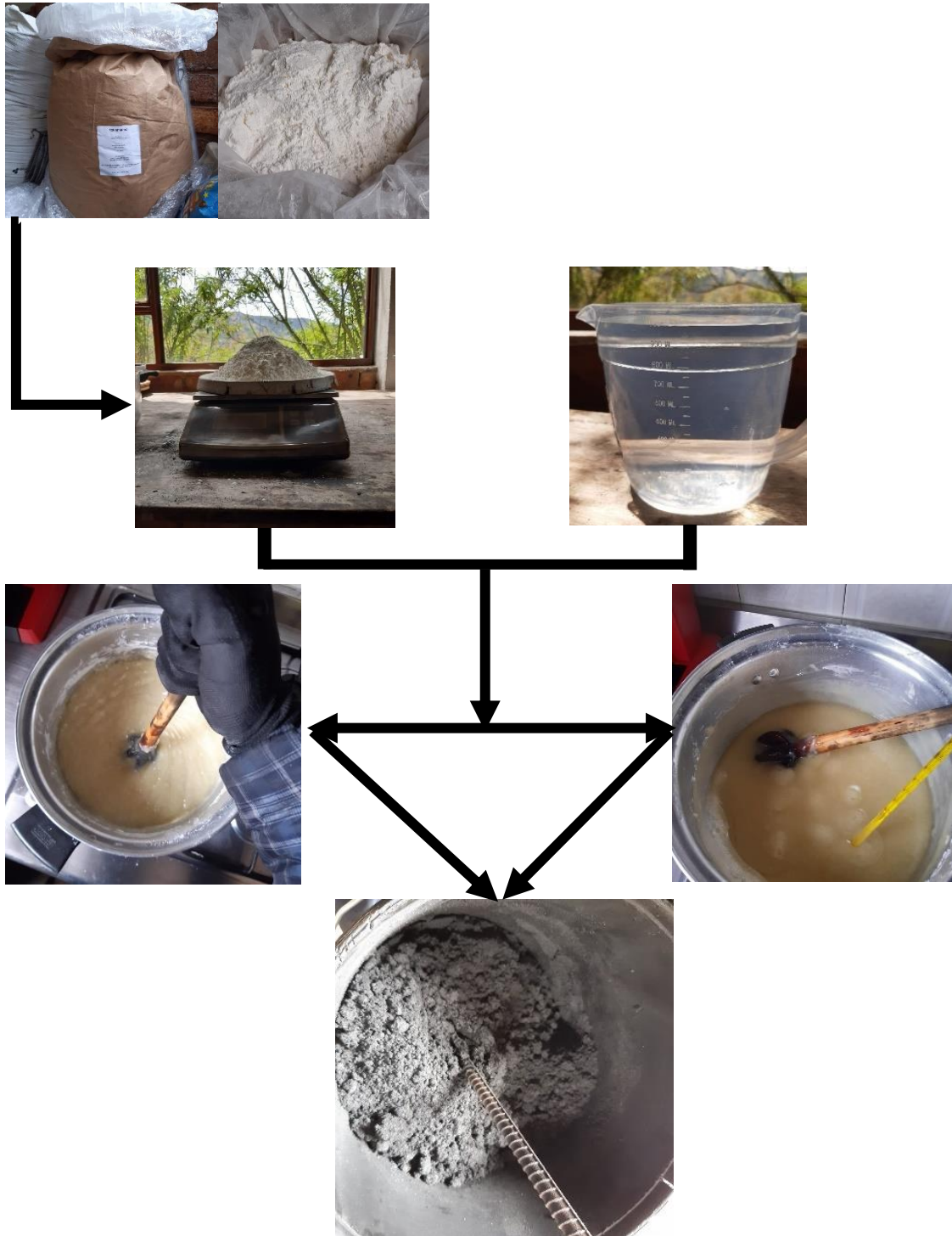
Los análisis próximos se realizaron con los equipos de la empresa German Franco. La compañía cuenta con los dispositivos necesarios para estimar la calidad de los carbones adquiridos y del coque producido. Las características intrínsecas de cada muestra estimaron los porcentajes de ceniza, material volátil y humedad de las mezclas. Las muestras y contramuestras fueron pesadas y calcinadas con los dispositivos y los crisoles disponibles en el laboratorio aplicando las normas ASTM.

Figura 11. Equipos de laboratorio de calidad de la empresa German Franco.



Fuente. Autor.

Figura 12. Preparación de las mezclas con almidón modificado de maíz.



Fuente. Autor.



Fuente. Autor.

Figura 13. Crisoles del laboratorio de la empresa German Franco.



Fuente. Autor.

Las *figuras once y trece* hacen parte de la *actividad seis* donde se resalta el uso de los equipos y los tipos de crisoles para estimar la calidad de las muestras calcinadas.

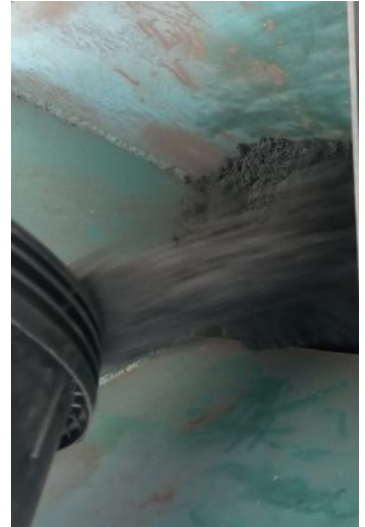
3.3. Determinar la aglomeración y el *Drop Shatter Test* de las mezclas compactadas.

3.3.1. Actividad 7.

En la *figura catorce*, las cuatro muestras fueron vertidas en la tolva de la briquetadora industrial de la empresa que aglomero los finos de coque gracias al torque producido por el motor trifásico de siete kilowatts que transmite su potencia por la polea conductora unida a la polea conducida con unas correas.

Estas transmiten por medio de un eje el movimiento a la caja de piñones que hace mover los rodillos compactadores al estar conectados por medio del eje que a su vez tiene acoplado un piñón que transfiere por medio de una cadena el movimiento a la chumacera de la banda sin fin dando salida al material que se va aglomerando y que continua como polvo.

Figura 14. Briqueteado de las muestras.



Fuente. Autor.

3.3.2. Actividad 8.

Las briquetas en verde fueron organizadas en unas bandejas, posteriormente se les extrajo la humedad adquirida por su preparación cocinando las muestras de finos de coque aglomeradas por noventa minutos a setentaicinco grados Celsius como se evidencia en la *figura quince*.

Este horno casero internamente cuenta con unas planchas de material refractario que mantiene el calor del ambiente para que el termómetro arroje lecturas de medias y altas temperaturas para poder controlarlas manualmente con los quemadores reduciendo el flujo de gas de las válvulas.

Figura 15. Temperatura y tiempo de curado de las briquetas compactas.



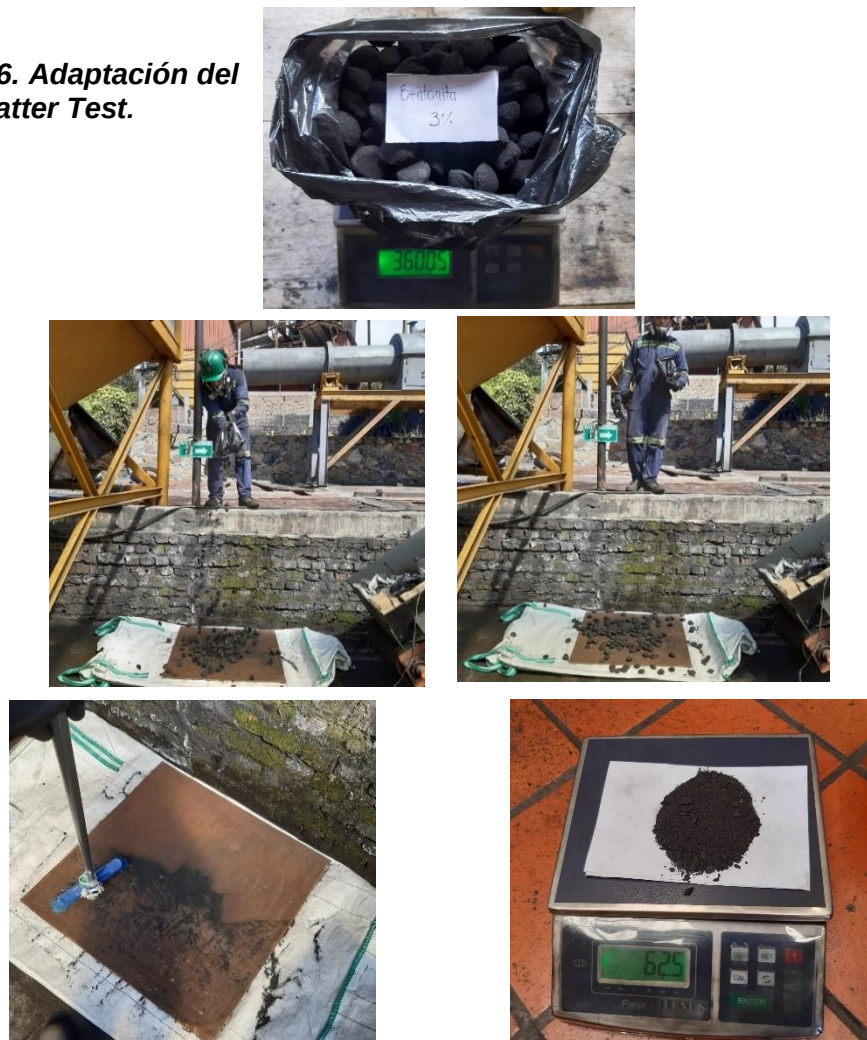
Fuente. Autor.

3.3.3. Actividad 9.

El *Drop Shatter Test* es un ensayo destructivo según la norma *ASTM D3038* donde especifica el proceso y las variables para que productos como las briquetas, el coque metalúrgico de tipo exportación se analicen estimando positivamente la resistencia mecánica a la rotura por caída.

Los estándares establecidos por la norma no se pudieron replicar tal cual, en este diseño experimental, las muestras realizadas asumieron una aproximación a este patrón como se ve en la *figura dieciséis*. El peso de las cuatro muestras aglomeradas fue de tres mil seiscientos gramos, estas se tiraron cuatro veces a una lámina de acero de seis milímetros de espesor desde de ciento ochenta y tres centímetros de altura. Luego el residuo fue recogido y pesado en la báscula, esto se repitió para todas las mezclas fabricadas.

Figura 16. Adaptación del Drop Shatter Test.



Fuente. Autor.

4. RESULTADOS

Este diseño experimental se desarrolló en la empresa German Franco Carbón SAS. Se evaluó la viabilidad de las mezclas al obtener cuatro muestras de briquetas a partir del reciclaje de finos de coque aglomerados de acuerdo con lo planteado por la metodología.

El polvo de coque provino de una producción almacenada en bultos de veinticinco kilos, esta era destinado como combustible para la fabricación de materiales de fricción.

Estos finos fueron caracterizados en el laboratorio de la empresa antes y después de mezclarlos con los ligantes. Las variables que se tuvieron en cuenta para los análisis próximos fueron: Material volátil, Humedad y Ceniza. Estas mezclas fueron fabricadas con agua desmineralizada sin acido, polvos de coque y aglomerantes.

Después de reunir en un recipiente los porcentajes establecidos de cada componente se procedió con el briqueteo. Esta briquetadora industrial compacto las mezclas y formo las briquetas, luego se expusieron en la estufa de gas a una temperatura de curado en un tiempo controlado.

Por último, se evaluó la resistencia mecánica de las briquetas fabricadas por medio del ensayo *Drop Shatter Test* (ensayo de rotura por caída), escogiendo así la muestra con menor desprendimiento de fino, mayor resistencia de impacto y mayor contenido de carbono fijo.

4.1. Briqueteado de las mezclas, temperatura y tiempo de curado.

La briquetadora industrial aglomero las mezclas preparadas compactándolas por la fuerza de rotación que ejercen el motor eléctrico en el sistema de transmisión de movimiento de la maquina y por el peso de los rodillos al girar en sentidos opuestos.

En el briqueteo de las cuatro muestras se obtuvieron productos de cada una de estas con un aspecto geométricamente ovalado y una tonalidad gris oscuro. Las briquetas en verde eran muy frágiles al manipularlas quebrándose rápidamente al aplicarles un mínimo de presión con los dedos y al punto de desintegrarse si se dejaban caer a una altura de no más de ochenta centímetros.

La humedad en las mezclas facilito la aglomeración de estas al momento de compactarlas, pero su estado sólido no duraba mucho, se desmoronaban fácilmente por la fuerza que se les ejercía. Sobre unas bandejas, cada una de las muestras fueron sometidas a una temperatura de setenta y cinco grados y un tiempo de curado de noventa minutos, estas variables fueron definidas para desprender la

humedad absorbida en la preparación de las mezclas, endureciendo las briquetas con la temperatura y teniendo un aumento en la resistencia mecánica por el aglomerante que quedo adherido a la estructura de la brisa de coque aglomerada.

4.1.1. Briquetas con bentonita al seis por ciento.

Para obtener una gran cantidad de briquetas de esta muestra y de las demás se tuvieron en cuenta dos bandejas, en la primera caía la muestra compactada y los finos que no alcanzaron aglutinarse. La segunda bandeja se utilizó para organizar los productos que parejamente se formaron reutilizando la mezcla que no se compacto vertiendo ese residuo y obteniendo más brisa de coque aglomerada y compactada.

Después se trataron térmicamente en una estufa de gas teniendo como resultado un fino de coque aglomerado medianamente resistente a la deformación manual, generando mucho desprendimiento de ultrafino al manipularlo y desintegrándose en una caída de no más de metro de altura representando una baja resistencia mecánica al impacto.

Figura 17. Peso y dimensiones de las briquetas con bentonita al seis por ciento.





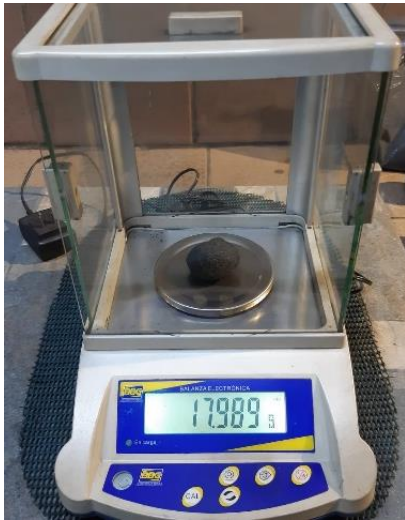
Fuente. Autor.

4.1.2. Briquetas con bentonita al tres por ciento.

Esta fue la muestra compacta más compleja de obtener, no por la preparación de su mezcla sino cuando se briqueteo. Los trecientos gramos de bentonita y los ochocientos mililitros de agua desmineralizada fueron medianamente suficientes para aglutinar ochomil novecientos gramos de fino de coque obteniendo un producto que difícilmente se aglomero de forma completa.

Aglomerar con la máquina de la empresa una arcilla sódica y polvo de coque sin humedad en forma de briqueta no se obtendría un aglutinado como resultado por la capacidad del equipo y el torque que tendría que realizar para compactar la brisa en seco. Los resultados con relación a la resistencia mecánica para esta muestra fue la más bajas de la investigación.

Figura 18. Peso y dimensiones de las briquetas con bentonita al tres por ciento.



Fuente. Autor.

4.1.3. Briquetas con almidón al diez por ciento.

En términos de preparación las muestras de almidón fueron las que más presentaron resistencia a la rotura por caída y las que se tardaron en realizar ya que se disolvía el almidón con agua desmineralizada hasta alcanzar una temperatura de setenta grados Celsius en una olla sobre una estufa de gas casera.

Este proceso se tardó alrededor de veinte minutos hasta tener una masa consistente en estado líquido que al contacto se sentía pegajosa. Se vertió a esa temperatura en la caneca donde se encontraba la brisa de coque y se mezcló por quince minutos hasta tener una masa homogénea que cuando se briqueteo no dejó tanto residuo para volver a echar y obtener más polvos de coque compactados.

Estas briquetas en verde no se deformaron fácilmente al aplicarles un mínimo de fuerza con el tacto, pero después de su tratamiento térmico, la dureza aumentó al punto de que la presión total que pude llegar aplicar con mis dedos no desfiguró una briqueta formada por completo, en la actualidad eso sigue ocurriendo. Fueron los productos que mecánicamente resultaron más resistentes al ensayo de rotura por caída conservando su geometría y cumpliendo comuna de las expectativas de esta investigación.

Figura 19. Peso y dimensiones de las briquetas con almidón al diez por ciento.





Fuente. Autor.

4.1.4. Briquetas con almidón al cinco por ciento.

La mezcla tardo en presentar un aspecto homogéneo al momento de amalgamar los porcentajes de esta en una caneca. La falta de ligante y humedad redujo la compactación y forma completa de la brisa aglomerada en la briquetadora depositando más de una vez los residuos que quedaban del briqueteo.

En términos de resistencia mecánica esta muestra se destacó de las de bentonita, pero aun así tuvieron desprendimiento de ultrafinos. Su aspecto físico fue diferente a la muestra tres de la *tabla uno*, ya que la capa superficial del producto formado no fue lisa sino porosa desprendiendo partículas finas al manipularlas.

Figura 20. Peso y dimensiones de las briquetas con almidón al cinco por ciento.





Fuente. Autor.

4.2. Análisis próximos de las mezclas

El fino de coque y las cuatro muestras fabricadas fueron caracterizadas en el laboratorio de la empresa por medio de análisis próximos que se ha venido desarrollando por más de cuarenta años en la compañía con los estándares establecidos por la ASTM (*Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*).

Para estimar el porcentaje de carbono fijo presente en las mezclas se restaron los promedios obtenidos con las quemas de las muestras y las contramuestras en los crisoles de cada uno de los análisis de ceniza, humedad y material volátil.

Este método garantizó un dato exacto por cada análisis al coincidir los porcentajes de calcinación de los pesos finales de cada uno de los crisoles. Esto se realizó estimando la calidad del polvo dispuesto para este diseño experimental antes de combinarlo con los ligantes y después de hacerlo. Se tuvieron incrementos en las cenizas y el material volátil de las mezclas producidas. En la *tabla dos* se colocaron los promedios obtenidos de los análisis próximos realizados durante los cuatro meses que duró la investigación.

Se reporto un sesenta y nueve por ciento de carbono fijo acumulado en la muestra cero después de haber restado los porcentajes de cada uno de los análisis próximos. Este fino de coque arrojo un contenido de cenizas alto. Entre menos contenido de ceniza tenga el coque su costo se incrementará y de mismo modo si las cenizas están por encima de un diecisiete por ciento, el valor del coque descende.

El dato del material volátil de la muestra cero evidencio una estructura cristalina con muy pocas ramificaciones amorfas, hubo desprendido de las moléculas que no se agruparon al obtener el coque todo uno y la humedad intrínseca fue la cantidad absorbida por más de dos años al estar apilado sobre más bultos en estibas a la intemperie.

En las mezclas con bentonita el aumento fue en todo menos en el carbono fijo, este se redujo a sesenta y cuatro por ciento en la muestra uno y en la dos a sesenta y siete por ciento, en consecuencia, esto sucedió por la presencia del ligante y la humedad en la brisa de coque. El material volátil se mantuvo en un rango de cuatro a cinco por ciento conservando después de la quema su estructura cristalina organizada. Los incrementos en la *tabla dos* fueron conforme a la cantidad de arcilla sódica y agua desmineralizada que se agregaron.

Las moléculas que componen la estructura cristalina de este ligante, al calcinarse por su exposición a una rampa de temperatura, durante cuatro horas dentro de la mufla del laboratorio, terminan en un estado de residuo por la combustión completa de las muestras en los crisoles. Este análisis consistió en pesar un gramo de ultrafino y en ausencia del aire fue destilado para estimar el porcentaje de ceniza presente en el aglomerado.

Por el efecto de la absorción la aglomeración con esta arcilla se dio positivamente pues una de sus características es la capacidad de absorber su peso en seco varias veces en agua lo que hizo que la bentonita se distribuyera en todo el fin de coque obteniendo la aglomeración, sin agua estas muestras no habrían compactado, la arcilla sódica no se hubiese activado en seco con los polvos de coque

Con las mezclas de almidón, las cenizas disminuyeron después de su quema y mantuvieron un rango entre el veintiuno por ciento y veintitrés por ciento de contenido. El carbono fijo si se redujo drásticamente, la muestra cuatro llego a sesenta y cinco por ciento, pero la tres fue la más baja de todas las muestras con sesenta y uno por ciento. Esto ocurrió por el almidón de maíz modificado, y la cantidad de agua desmineralizada.

En un Hoskin se realizó el análisis de material volátil, que consistió en introducir los crisoles de cromo níquel en el horno y por siete minutos dejar que novecientos cincuenta grados Celsius calcinen el gramo pasado del ultrafino de coque aglomerado.

Estas dos muestras son las que contiene mayor porcentaje de material volátil registraron en la *tabla dos*, la mezcla tres contiene catorce por ciento y la última nueve por ciento. Este fue el resultado de añadir una estructura amorfa al polvo de coque.

Se calentaron en un horno tostador eléctrico a ciento diez grados Celsius las cajas Petri de vidrio con mil miligramos de fino aglutinado por dos horas para desprender la humedad intrínseca que se encontraba en la estructura porosa interna de las mezclas.

En la *tabla tres* se registraron los datos del desprendimiento porcentual de la humedad extrínseca absorbida por los bultos de finos. Cuando se extendieron en los bolsones big bag sobre el suelo haciendo una superficie plana al extender el polvo a lo largo y ancho del bolsón.

La capa superficial extendida fue de menos de un centímetro de espesor con el objetivo de desprender naturalmente por veinticuatro horas las moléculas de agua presentes en la superficie externa del polvo esparcido. Se hizo lo mismo con las muestras de nomas de doscientos gramos, esta masa fue dispersada en un cajo de madera de un día para otro reduciendo esta propiedad extrínseca presentes en su superficie aglutinada.

Esta humedad en equilibrio se obtuvo al dejar estos polvos aglomerados en un ambiente controlado. Esto se realizó cuando se escogió el material de estudio de las estibas y cuando fueron preparadas las mezclas. Si se hubiesen dejado a la intemperie habrían adquirido más relente. En promedio todas las muestras presentaron un rango de diez a trece por ciento de desprendimiento.

Tabla 2. Análisis próximos del fino aglomerado y compactado.

	MEZCLA				ANÁLISIS PRÓXIMOS			
Muestra	Fino de coque (%)	Ligante	(%)	H ₂ O (%)	Cenizas (%)	Humedad Intrínseca (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fijo (%)
0	100	X	x	x	23,60%	1,30%	5,45%	69,95%
1	82	Bentonita	6	12	28,45%	1,75%	5,60%	64,20%
2	89	Bentonita	3	8	25,85%	1,65%	4,55%	67,95%
3	80	Almidón	10	10	21,50%	2,35%	14,55%	61,60%
4	90	Almidón	5	5	23,15%	1,95%	9,90%	65,00%

Fuente. Autor.

Tabla 3. Desprendimiento de la humedad extrínseca por veinticuatro horas.

		HUMEDAD EXTRÍNSECA			
			PESO DE LAS MUESTRAS		
Muestra	Aglomerante	Peso de Bolsa en Gramos	Peso de la Muestra en Gramos	Peso Después de 24 H	Humedad Desprendida
0	x	58	24,95	24,85	10,00%
		58	24,92	24,84	8,00%
1	Bentonita	4	153,52	140,32	13,20%
2	Bentonita	4	119,82	108,82	11,00%
3	Almidón	4	183,00	169,50	13,50%
4	Almidón	4	188,50	175,50	13,00%

Fuente. Autor.

4.3. Drop Shatter Test.

Según la *ASTM D3038, Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke* (Método de prueba estándar para ensayo de caída de coque). Establece dos escenarios para aplicar esta norma. El factor principal es el peso de las muestras, pues en el primer marco no debía superar los veinticinco kilos y el segundo fue hasta cincuenta kilogramos. Luego se tuvo en cuenta la granulometría del producto, los tamaños iguales o menores a cincuenta centímetros se rigieron por el primero y las escalas iguales o mayores a cincuenta centímetros se rigieron por el segundo.

Después estas muestras son lanzadas cuatro veces desde una altura de ciento ochenta y tres centímetros hacia una lámina de acero de seis milímetros de espesor determinando la resistencia al impacto que llegaron a desarrollar las muestras arrojadas. Por último, son vertidas a unos tamices donde se pesan los residuos que no pasan por cada una de las aberturas de las mallas sumando cada retención y calculado la pérdida en gramos del peso inicial, si ese cálculo supera los cien gramos el ensayo debe repetirse, pero si la suma de los residuos retenidos fue menores a cien no se reiteraría el ensayo.

En este estudio se ajustó la norma a las condiciones de las muestras fabricadas pues no teníamos ninguna mezcla compactada que cumpliera con los kilos solicitados en cada uno de los escenarios planteados por la norma. Por lo tanto, definimos un peso estándar que se ajustara a nuestro diseño experimental respetando las demás variables indicadas por la *ASTM D3038*.

Con un peso de tres mil seiscientos gramos se realizó la prueba de rotura por caída a cada una de las mezclas compactas. Esta cantidad de finos de coque compactados fueron arrojados manualmente desde la altura indicada por la norma en cuatro repeticiones consiguiendo el desprendimiento de polvos, agrietamiento y posible rotura de las briquetas. En la *tabla cuatro* los pesos de las muestras fueron registrados, cada una tiene diferentes gramajes en cada uno de los tamices.

Las muestras de bentonita fueron las que menos resistencia mecánica desarrollaron pues en las cuatro caídas se desintegraron al punto de recoger solo finos para la granulometría.

La que más se convirtió en polvo fue la mezcla de bentonita al tres por ciento, pues su peso final fue de tres mil ciento catorce gramos, registrando la pérdida más alta con cuatrocientos ochenta y cinco gramos después de pasar por los cinco tamices. La mezcla con seis por ciento de arcilla sódica también se convirtió en una de las muestras con mayor desprendimiento y baja resistencia al impacto pues registro una pérdida de trescientos treinta y dos gramos al pasar por las mallas de su peso inicial.

El almidón de maíz modificado al diez por ciento aglomerado y compactado con el fino de coque presento la más alta resistencia a la rotura por caída. La muestra después de las cuatro caídas mantuvo su geometría sin quebrarse ninguna y en los tamices tuvo una retención de más del noventa por ciento de las briquetas en la malla de cuarenta milímetros de abertura.

Fue la muestra que reporto tan solo sesenta y tres gramos de finos desprendidos, es la única brisa de coque aglomerada y compactada que supero el ensayo de caída registrando la mejor resistencia mecánica de esta investigación. La muestra con dextrina al cinco por ciento tuvo desprendimiento de finos en el ensayo de rotura por caída que resulto ser mayor a cien gramos, esta mezcla presento un mejor resultado al someterla a esfuerzos por impactos que las muestras con arcilla sódica.

Tabla 4. Perdida de las muestras después del Drop Shatter Test y la granulometría en porcentaje y unidad de peso.

PESO EN GRAMOS DE LA GRANULOMETRIA DESPUÉS DEL ENSAYO DE ROTURA POR CAÍDA										
		Abertura del tamiz en milímetros								
Mezclas	Peso inicial en gramos	Malla 40	Malla 31,50	Malla 20	Malla 10	Malla menor a 10	Peso final en gramos	Perdida en gramos	Peso final en porcentaje	Perdida en porcentaje
Bentonita al 6%	3600	-	122,50	701,50	684,50	1659,00	3167,50	432,50	87,99%	12,01%
Bentonita al 3%	3600	-	-	602,00	647,00	1985,50	3234,50	365,50	89,85%	10,15%
Almidón al 10%	3600	3511,50	-	-	-	25,50	3537,00	63,00	98,25%	1,75%
Almidón al 5%	3600	-	1618,00	789,50	269,50	750,50	3427,50	172,50	95,21%	4,79%

Fuente. Autor.

5. CONCLUSIONES

- El estudio de fino de coque reciclado, aglomerado y compactado se logró ejecutar en el tiempo establecido elaborando las mezclas, los análisis próximos y de resistencia mecánica evaluando cada una de las muestras compactas.
- Si se obtuvieron briquetas aglomeradas a partir de los ligantes sugeridos y la metodología ejecutada para estas mezclas, su aspecto es homogéneo y moldeable.
- Los dos ligantes tratados en esta investigación se consiguen fácilmente en el mercado y sus características de absorción, adhesión son activadas por medio de sustancias como el agua. En el caso del almidón requiere también de temperatura para desarrollar una mínima viscosidad que permita entrelazar las partículas de coque con el ligante.
- Para este tipo de investigaciones el contenido de agua es indispensable en la aglomeración de dos o más partículas finas. No se puede aglutinar y compactar en seco los finos de coque con dextrinas de almidón modificado y arcillas como la bentonita sódica, ya que estos ligantes depende del agua para que sus características se activen y se puedan amalgamar. El fino y los ligantes a ser partículas secas no generan ninguna interacción adhesiva, pueden llegar a mezclarse sin moléculas de agua, pero no se genera la briquetación.
- Las briquetas con dextrina de almidón modificado de maíz al diez por ciento fueron las que presentaron los mejores resultados en resistencia mecánica al impacto después de realizar el ensayo estándar de caída de coque, ya que su pérdida porcentual tan solo fue del 1.75%. Pero al mismo tiempo es la mezcla con el menor contenido de carbono fijo y mayor porcentaje de material volátil y humedad intrínseca.
- La mezcla de bentonita al seis por ciento demostró que entre más contenido de esta arcilla sódica este presente en el polvo de coque se obtendrá un aumento de las cenizas proporcional a lo añadido, desvalorizando estas briquetas para uso industrial. Esa muestra fue la que más porcentaje tuvo en ese análisis próximo y reporto una baja resistencia mecánica al impacto con una pérdida del 12,01%.
- Tanto la muestra de almidón al cinco por ciento como la de bentonita al tres por ciento presentaron una compactación baja en la briquetadora industrial de la empresa, esto fue a causa de la falta de humedad en los finos de coque

aglomerados. De las cuatro mezclas esta fue la segunda que menos desprendimiento presento con 4,79% de perdida después del *Drop Shatter Test*.

- En términos de preparación las mezclas de almidón son más complejas de obtener en comparación a las de bentonita ya que estas solo requieren de un mezclado en seco y luego con la humedad para obtener las muestras de arcilla sódica. Mientras que el almidón de maíz al ser diluido en el agua desmineralizada activa una mínima viscosidad por la temperatura de la estufa que permite aglutinar esta sustancia con las partículas ultrafinas de coque.
- Los finos de coque si son posibles de aglomerar, pero para usarlos en los sectores industriales como combustibles en la fabricación de acero se tendrían que realizar más estudios que evalúen esas estimaciones comparando el costo beneficio que le traería a la empresa producir productos con características intrincas parecidas al coque metalúrgico a partir de estos residuos.
- Las muestras de almidón registraron un aumento en análisis próximos como la humedad intrínseca y el material volátil, esto fue a causa de las proporciones que se utilizaron para cada una de estas mezclas. A su vez son las briquetas con menos contenido de carbono fijo en su estructura.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar muestras para aglomerar finos de coque que tengan alto porcentaje de concentración en ligante y humedad para obtener briquetas con respuestas favorables en la compactación evitando que por falta de estas dos variables sea tedioso aglomerar la brisa de coque.
- Trabajar con finos de coque que contengan menos porcentaje de ceniza. Tan solo al caracterizar el fino apilado en bultos de veinticinco se estimó un alto contenido en esta variable en el material.
- Continuar con futuras convocatorias para participar en prácticas en relación con lo desarrollado y que puedan durar más de cuatro meses para realizar a fondo la investigación.
- Realizar el análisis de poder calorífico a las briquetas para estimar un resultado que posicione este producto como combustible en remplazo del coque metalúrgico para la fabricación de acero
- Ejecutar un estudio donde se apliquen estas briquetas a un uso doméstico dándole salida comercial a los productos ya obtenidos si no llegan a impactar sus características químicas y mecánicas para uso industrial.
- Elaborar los análisis CRI Y CSR en las briquetas fabricadas en la pasantía y conocer la reactividad de estas muestras al dióxido de carbono y la resistencia después de la reacción al CO₂.

7. REFERENCIAS

LÓPEZ, Gustavo Armando. Predicción del análisis próximo de carbones colombianos mediante espectroscopia FTIR-DR en la región del infrarrojo medio utilizando mínimos cuadrados parciales. {En línea}. Trabajo de grado. Químico. Pereira. Universidad Nacional Abierta (UNAD). Facultad de ciencias básicas tecnológicas e ingenieras (ECBTI). Programa de química. 2018. 90 p. {15 de junio de 2022}. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/20426/9874556.pdf>

VALIENTE, Astrid Carolina. Elaboración de briquetas para aprovechamiento del residuo de arroz en beneficio del municipio de el progreso, Jutiapa. {En línea}. Tesis de grado. Ingeniera química industrial. Guatemala de la asunción. Universidad Rafael Landívar. Facultad de Ingeniería. Licenciatura en Ingeniería Industrial. 2017. 96 p. {17 de julio de 2022}. Disponible en: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrctd/2017/02/02/Valiente-Astrid.pdf>

PASSARRETTI, M. G. NINAGO, M. D. LÓPEZ, O. V. CIOLINO, A. E. VEGA, D. A. VILLAR, M. A. Efecto de la adición de bentonita sobre las propiedades ópticas de diferentes materiales compuestos poliméricos. {En línea}. 2017. {10 de julio de 2022}. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/dCtM73T9C8jbkhBDXG8YmZh/?format=pdf>

LOGINOV, Yu. BABALLOV, N. POLYANSKY, L. I. Las propiedades de las briquetas de polvos de coque producidas por briqueteado de carnero. {En línea}. 2017 {06 de febrero del 2022}. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/1.5017382>

MOREIRA Ramiro Julián. Propiedades de una bentonita industrial nacional y su caracterización estructural basada en absorción y desfacción de rayos X (XANES y DRX). {En línea}. Trabajo de grado. Químico. Buenos aires. Universidad Nacional de la plata. Facultad de Ciencias Exactas. Departamento de Química. 2016. 79 p.

{08 de junio de 2022}. Disponible en:
<https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/0c9880cd-e0b8-443b-9623-d1a8e765c4aa/content>

VALENCIA, Alejandro. Impacto de la estrategia de distribución local en calidad y costo del coque metalúrgico para exportación. {En línea}. Tesis de maestría. Diseño y gestión de procesos. Bogotá DC. Universidad de la Sabana. Facultad de Ingeniería. 2014. 121 p. {19 de julio de 2022}. Disponible en:
<https://intellectum.unisabana.edu.co/bitstream/handle/10818/21302/Alejandro%20Valencia%20Sanin%20%28tesis%29.pdf>

GARCÍA, Marcos Eduardo. Diseño de proceso y de planta piloto para la fabricación de briquetas de aserrín. {En línea}. Tesis de grado. Ingeniero Industrial y de Sistemas. Piura. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. 2014. 107p. {25 de julio de 2022}. Disponible en:
https://www.academia.edu/20194845/BRIQUETAS_DE_ACERRIN

MARTÍNEZ, G.M. El almidón de maíz. {En línea}. 2013. {27 de mayo de 2022}. Disponible en:
https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/711/81359_67228.pdf

ALVAREZ, R., CIMADEVILLA, J. L. G., DIEZ, M. A. Briquetting of carbon containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production. {En línea}. 2012. {02 de febrero del 2022}. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/>

GUTIÉRREZ, J. M. DÍAZ, J. J. MORA W. F. RODRÍGUEZ L. I. RAMÍREZ J. Aprovechamiento de partículas de ultrafino de carbón de una planta lavadora en la producción de coque metalúrgico. {En línea}. 2011. {25 de enero de 2022}. Disponible en: <https://www.researchgate.net/>

CARRASCAL, Fabián Alfredo. Obtención de dextrina de alta solubilidad y mínima retrogradación a partir de almidón industrial de yuca. {En línea}. Trabajo de grado. Químico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. 2005. {03 de junio de 2022}. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2006/121003.pdf>

TRIPATHI, S.M. BANI, P. D. Prem, S. M. T. Influence of properties of bituminous binders on the strength of formed coke. {En línea}. 2002. {02 de febrero de 2022}. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00257-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00257-0)

SHARMA, S., RATNA, C., SHEKHER, D. Non-coking coal to coke: use of biomass-based blending material. {En línea}. 2000. {02 de febrero de 2022}. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00091-3)

RODRIGUEZ, I. B. Manual de carbones y coquización. Tunja. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia UPTC, 2000.

OSBORNE, D. G. GRAHAM, J.M. ELLIOTT, L. K. New coal utilisation technologies. {En línea}. 1995. {02 de febrero de 2022}. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00005-2](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00005-2)

Disponible en internet: <https://www.studocu.com/co/document/universidad-distrital-francisco-jose-de-caldas/carbones/2analisis-proximo-de-carbon/4923317>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM D3173. 2012. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. ASTM D3174. 2012. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM D3175. 2012. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke. ASTM D3339. 1999. 5 p.

SIERRA, Alvaro y GOMEZ, Guillermo Enrique. Estudio de viabilidad sobre la aglomeración de finos de carbón. Trabajo de grado. Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga. Universidad Industrial De Santander. Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 2004. 111 p.

SÁNCHEZ, Lina Marcela y LÓPEZ, Diana Rocío. Obtención de briquetas a partir de finos de un carbón del Valle del Cauca. Trabajo de grado. Ingeniera Química. Cali. Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías. Escuela de Ingeniería Química. 2016. 67 p.

MORA, Fernando. Beneficios del coque. Tesis de especialización. Ingeniería Industrial. Bogotá DC. Universidad de La Sabana. Facultad de Ingeniería. Especialización en Gerencia de Producción y Operación. 2015. 67 p.

CARRASCAL, Fabián Alfredo. Obtención de dextrina de alta solubilidad y mínima retrogradación a partir de almidón industrial de yuca. {En línea}. Trabajo de grado. Químico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. 2005. 74 p. {03 de junio de 2022}. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2006/121003.pdf>

SPEIGHT, J.G. Coal Analysis. En: The Chemistry and Technology of Coal. Third ed. Boca Ratón, Florida. Estados Unidos. 2013. p. 225

SANTURIO, José. Corrección y mejora del análisis de humedad del carbón térmico por medios de ensayos no destructivos en tiempo real. {Em línea}. Tesis doctoral. Oviedo, España. Universidad de Oviedo. Departamento de energía. 2002. 243 p. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/11109/UOV0012.pdf>

8. ANEXOS

8.1. Método de prueba estándar en humedad para la muestra de análisis en carbón y coque.

Con este ensayo se determina la cantidad de agua que contiene una muestra de carbón y coque. En diversas industrias manufactureras y especialmente en la obtención de los metales a partir de sus minerales y tratamientos térmicos de transformación.

En todas ellas se utilizan combustibles fósiles 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.

Hay tres formas como se presenta la humedad tanto en el carbón como en el coque:

La humedad libre está adherida mecánicamente sobre la superficie, dentro de fracturas de las moléculas de estos minerales. Este porcentaje depende de las condiciones a las que se somete el carbón y el coque, molienda, almacenamiento en la intemperie, transporte entre otros.

La humedad inherente se encuentra dentro de la estructura porosa interna.

Estas moléculas de agua presentan una presión de vapor menor a la normal, y el agua de constitución, se refiere a sustancias minerales presentes en el carbón y son eliminadas a temperaturas normalmente elevadas. Dependiendo del punto de vista industrial, el contenido de humedad es favorable o no.

Los siguientes pasos son para la determinación del porcentaje de humedad según la norma *ASTM*.

- Limpiar muy bien los crisoles de vidrio antes de pesar el gramo de los finos de coque aglomerados.
- Pesar el crisol completo (base y tapa) en la balanza analítica del laboratorio.
- Pesar un gramo exacto de las muestras en el crisol.
- Introducir la caja Petri si tapa al horno tostador a ciento diez grados Celsius durante dos horas.
- Después de ese tiempo se retiran los crisoles e inmediatamente se tapan. Se dejan enfriar por doce minutos.
- Se pesa el crisol completo con la muestra en su interior y posteriormente se efectúan los cálculos del porcentaje de humedad.

FORMULA.

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

- ***P1: peso del crisol vacío con tapa en gramos.***
- ***P2: peso del crisol más un gramo de la muestra.***
- ***P3: peso de crisol después de la calcinación en gramos.***

8.2. Método de prueba estándar para la ceniza en las muestras de los análisis del carbón y coque.

Con este ensayo se cuantificaron las cenizas que vienen siendo las sustancias inorgánicas que quedan luego de la incineración del carbón, para determinar la calidad en su utilización como combustible específico. El contenido de ceniza en el carbón y el coque está relacionado con el residuo inorgánico que queda después de incinerar la muestra.

Desde el punto de vista metalúrgico 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 en 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 medio densos, cribado hidráulico y flotación.

Este análisis se realiza a condiciones estándares para lo cual existen normas relacionadas con el tema. Las rampas de temperatura para el carbón y el coque varíen en sus grados Celsius, pero no el tiempo que dura el análisis (cuatro horas). El coque en su primera etapa va aumentando de cero a quinientos grados, en la segunda hora, sube paulatinamente hasta alcanzar setecientos cincuenta, y ya en la tercera hora la temperatura alcanza novecientos cincuenta grados manteniéndose ese calor hasta el final del ensayo. El carbón tiene las mismas etapas, pero con menos temperatura ya que su rampa sube de cero a quinientos en la primera hora, en la segunda alcanza los setecientos grados y se mantiene así por las dos horas restantes.

- Limpiar muy bien los implementos para el pesaje de la muestra.
- Pesar el crisol vacío en la balanza analítica del laboratorio.
- Depositar un gramo exacto en el crisol.

- Introducir la muestra y contramuestra a temperatura ambiente la mufla y calentar paulatinamente por cuatro horas hasta novecientos cincuenta grados Celsius.
- Pesar las muestras después de la quema y calcular el porcentaje de ceniza.

FORMULA.

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

- ***P1: peso del crisol vacío en gramos.***
- ***P2: peso del crisol más un gramo de la muestra.***
- ***P3: peso de crisol después de la calcinación en gramos.***

8.3. Método de prueba estándar para el material volátil en las muestras de análisis del carbón 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 novecientos cincuenta grados Celsius según la norma *ASTM*.

Después de que transcurran siete minutos de exposición del crisol a esa temperatura según la norma, se deja enfriar por no más de veinte minutos para poder pesar el residuo de la calcinación.

Este dato se resta por el dato de la humedad de la misma muestra para así conocer el rango del carbón o el coque quemado, haciendo idea de la estructura cristalina o amorfa que pueda presentar en este ensayo. En esta quema se destilan gases como hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono entre otros. Los siguientes son los pasos generales para la determinación de materias volátiles presente en el fino de coque y las muestras.

- Limpiar los implementos antes de pesar el ramo para la quema.
- Pesar el crisol de cromo níquel con tapa.
- Pesar un gramo exacto de la muestra dentro del crisol.
- Introducir muestra y contramuestra en el horno Hoskin durante siete minutos a novecientos cincuenta grados.
- Poner a enfriar el crisol por no más de veinte minutos.

- Pesar el residuo después de la quema y realizar el cálculo del material deprendido restando la humedad.

FORMULA.

$$\% M.Volatil = \left(\frac{(P2 - P3)}{(P2 - P1)} \right) * 100 - H$$

- **P1: peso del crisol vacío en gramos.**
- **P2: peso del crisol más un gramo de la muestra.**
- **P3: peso de crisol después de la calcinación en gramos.**
- **H: dato de humedad de la muestra.**

8.4. Cálculo de carbono fijo en carbón 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 este compuesto 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:

FORMULA.

$$\text{Carbono fijo} = 100 - (\% \text{humedad} + \% \text{material volátil} + \% \text{cenizas}).$$

8.5. Divulgación científica.

El estudio de fino de coque reciclado, aglomerado y compactado tuvo participación en un evento científico en la modalidad de poster. Esta contribución fue en el primer congreso estatal de ciencia e ingeniería de materiales (CEEICIM) que se llevó a cabo del dos al seis de mayo del dos mil veintidós en la universidad nacional autónoma de México (UNAM).



Universidad Nacional
Autónoma de México

Instituto de
Investigaciones
en Materiales



EL CAPÍTULO ESTUDIANTIL DE LA SOCIEDAD MEXICANA DE MATERIALES (SMMater),
LA MATERIALS RESEARCH SOCIETY (MRS),
Y EL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES (IIM)
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

NAREN ORLANDO MERIÑO HERNÁNDEZ

POR SU PARTICIPACIÓN CON EL TRABAJO TITULADO

"ESTUDIO DE FINO DE COQUE RECICLADO AGLOMERADO Y
COMPACTADO PARA USO INDUSTRIAL"

EN EL MARCO DEL

1er CONGRESO ESTATAL DE CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES (CEECIM)
QUE SE LLEVÓ A CABO DEL 2 AL 6 DE MAYO DE 2022

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO

ERIK ULISES ROSALES ESCALANTE
PRESIDENTE DEL CAPEST IIM-SMMater-MRS

IVÁN KALEB RAMÍREZ TORRES
VICEPRESIDENTE DEL CAPEST IIM-SMMater-MRS



CAPITULOESTUDIANTIL
IIM-UNAM



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.