

*Monografía*

**BIOMASA DENSIFICADA, COMBUSTIBLE  
PARA LA OBTENCIÓN LOCAL DE  
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

*Autor: Dr. Ing. Iván Machado López.*

*Dr. Cs Ing. José F. Martirena*

*Dr. Ing. Idalberto Herrera Moya.*

*Dra Ing. María Jesús Lamela- Rey*

2014

**Monografía: BIOMASA DENSIFICADA, COMBUSTIBLE PARA LA OBTENCIÓN LOCAL DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

ÍNDICE	
	Síntesis
1	Introducción 2
2	Formulación del bloque sólido combustible (BSC). 5
2.1	Caracterización de las materias primas. 6
2.1.1	Aserrín, análisis físicos- químicos y térmicos. 7
2.1.2	Material arcilloso. 10
2.1.2.1	Análisis químico, propiedades físicas y mineralógicas. 10
3	Densidad del bloque sólido combustible 13
3.1	Relación entre la densidad (DR) y las propiedades del aglomerante 15
4	Resistencia. 17
4.1	Pruebas de resistencia a compresión (RC). 18
4.2	Índice de resistencia al Impacto (IRI). 20
5	Calor específico de combustión(CEC) de los BSC 22
5.1	Razón de combustión (VR) 23
5.2	Estudios por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). 26
6	Eficiencia energética del proceso de combustión del BSC 27
7	Determinación de las tasas de las emisiones. 32
8	Conclusiones parciales. 34
9	Transformación puzolánica de la ceniza del BSC 35
9.1	Materiales y métodos 37
9.2	Diseño de experimentos 38
10	Obtención en horno experimental de cenizas puzolánicas. 41
10.1	Análisis de los resultados y su significación estadística. 45
10.2	Exceso de aire, puzolanas – productos no deseados. 43
11	Caracterización químico – física de los residuos sólidos de la combustión del BSC 47
11.1	Influencia del proceso de combustión sobre la granulometría de los residuos. 49
12	Evaluación rápida de la reactividad puzolánica. 50
12.1	Evaluación de la reactividad en pastas y morteros. 51
12.2	Variación del contenido de portlandita 52
13	Ensayos de resistencia a compresión 51
14	Conclusiones parciales 54
15	Conclusiones Generales 55
16	Referencias bibliográficas 57
	Sobre los autores

## *Monografía*

### BIOMASA DENSIFICADA, COMBUSTIBLE PARA LA OBTENCIÓN LOCAL DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

#### SÍNTESIS

El presente trabajo pretende exponer los resultados de una investigación experimental con el objetivo de obtener a partir de la energía aportada por la combustión de recursos de biomasa locales materiales de construcción, fundamentalmente ladrillos y la transformación puzolánica del material arcilloso empleado inicialmente en su función aglomerante de los residuos de biomasa, conformados en forma de briquetas con la aplicación de baja presión de compactación.

La investigación estuvo centrada en dos aspectos fundamentales: uno la obtención de un conglomerado de biomasa + material arcilloso aplicando diferentes factores tecnológicos donde se precisa la influencia de las propiedades del aglomerante, una segunda donde se estudia el proceso de combustión del conglomerado determinando su efecto sobre la obtención de ladrillos y la transformación puzolánica de los residuos.

En el trabajo se realiza la formulación o acondicionamiento del conglomerado, a partir de residuos de la industria de la madera, determinando el efecto sobre la densificación de las propiedades de tres suelos con fases arcillosas preponderantemente diferentes, caolinítica, montmorillonítica e illita en cada caso.

En relación con la actividad o cohesividad del material arcilloso se realiza la caracterización del conglomerado, especificando propiedades físico – mecánicas y físico químicas como calor específico de combustión, rendimiento y razón de combustión, la eficiencia como biocombustible se determina en relación con la leña en la obtención de ecomateriales.

Se estudian a su vez las condiciones en que ocurre la combustión del conglomerado de modo que se propicie una quema limpia y completa con un adecuado rendimiento en la transformación puzolánica de la ceniza, para esto se realiza la construcción de un horno experimental en áreas de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, analizando el proceso en función del contenido de arcilla en el conglomerado y el flujo de aire a través del horno.

Se realizan un grupo importante de mediciones experimentales (inquemados, CO, CO<sub>2</sub>, temperatura, exceso de aire, etc.), lo cual permite asociar diversos factores realizando la especificación, estimación y validación de diferentes modelos que correlacionan propiedades de los BSC, propiedades del material arcilloso, factores tecnológicos del proceso de fabricación y la obtención de la transformación puzolánica de las cenizas.

## **1- Introducción:**

La tendencia actual en la producción y consumo del cemento está caracterizada por aspectos que permitan obtener aglomerantes más económicos y con menor impacto ambiental (Aitcin Pierre-Claude, 2000)[4], a criterio del autor la aplicación creadora de nuevos paradigmas que refuercen estas tendencias son ineludibles para lograr el crecimiento sostenible de las comunidades.

Como una vía para mejorar el perfil ecológico en la producción y empleo del cemento se propone la adición del aglomerante cal-puzolana [5-7](Martirena, 2003 b, Martínez, 2003, Dopico, 2009), logrando por esta vía una significativa reducción del contenido de clínker en hormigones, lo que contribuye a una efectiva reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo las condiciones para la obtención de puzolanas artificiales procedentes de materiales arcillosos, sobre todo del material usualmente empleado para fabricar ladrillos en Cuba, no han sido aún suficientemente investigadas para lograr aplicaciones en talleres locales de producción de materiales de construcción.

La pequeña y mediana producción descentralizada de ladrillos, aglomerantes puzolánicos junto a la cal es realizada en muchos casos en condiciones que ocurre la deforestación de grandes extensiones de bosques [8](Betancourt, 2003). En ese sentido la reutilización de desechos procedentes de la biomasa es una alternativa ambientalmente compatible y acorde con las posibilidades técnicas y económicas de los productores locales de ecomateriales.

Este trabajo se concentra en el aserrín desecho de la industria de la madera, identificado como biomasa lignocelulósica dados sus componentes principales [9, 10](Villegas, 2000, Shaw, 2008). El uso de la biomasa como portador energético conlleva la solución de varios problemas científico – técnicos relacionados con su densificación y conversión en combustibles con características uniformes, el proceso disminuye los costos de transportación, disminuye las capacidades necesarias para el almacenaje, incrementa la densidad energética y las propiedades combustibles propiamente [11-14].

La combustión de la biomasa en general y de la madera y sus residuos en particular es un proceso complejo que consiste en varias reacciones de los elementos químicos constitutivos principales y un número importante de reacciones intermedias que ocurren dependiendo de las condiciones en el combustor. Con vistas a garantizar una buena reacción de combustión, deben tenerse presente los aspectos siguientes: [15-17].

- Preparación del combustible, en este trabajo se aborda todo lo relacionado con la densificación del aserrín como combustible sólido y las características que le proporcionan desde el punto de vista físico-mecánico y físico-químico la baja presión aplicada y el uso de material arcilloso como aglomerante.
- Características del horno, determinan la interacción de la mezcla del combustible y el aire, el factor o relación combustible – comburente llamado

coeficiente de exceso de aire toma para la leña valores en el intervalo de 2 – 3, este trabajo sin embargo no se propone realizar modificaciones a los diseños de los hornos actuales.

La mayoría de las desventajas que tiene el uso de la biomasa como combustible se derivan de su baja densidad física y energética. La densificación de la biomasa se puede definir como su compresión o compactación, para disminuir los espacios vacíos entre las partículas y dentro de las partículas mismas. En esta etapa se realiza la discusión sobre los aspectos que caracterizan los procesos de densificación de la biomasa lo cual implica el uso de alguna forma de presión mecánica para reducir su volumen y su conversión a una forma sólida, compacta y lo más homogénea posible, la cual es más fácil de manejar, almacenar y transportar que el material original.

Un aspecto conceptual reconocido por los especialistas en el tema de la densificación es el que define el proceso en relación al uso de baja o alta presión de compactación y de que sea o no necesaria la adición de aglomerantes externos, en función de esto se distinguen según Erickson, (1990) los siguientes tipos de densificación o briqueteado:

- Briqueteado de baja presión (< 5 MPa) con aglomerante externo.
- Briqueteado de media presión (5-100 MPa). La adición de aglomerantes externos depende del tipo de biomasa y de la prensa utilizada.
- Briqueteado de alta presión (> 100 MPa) sin aglomerante externo.

Ha sido determinado por diferentes investigadores la interrelación existente entre la fuente de biomasa, la presión aplicada, la adición de aglomerante, la densidad, la resistencia, la durabilidad y algunas otras propiedades de la briqueta tales como el poder calórico, eficiencia en la combustión, temperatura de combustión, capacidad de generar humos y su el nivel de toxicidad, características de la ceniza generada, etc. [18-21].

El análisis de la información demuestra que el tema costos hace prácticamente inviable la adquisición de los equipos de alta presión para los pequeños y medianos productores de ecomateriales, estos costosos equipos pueden estar en el mercado a precios entre 12000 y 40000 €.

Sin embargo los métodos manuales de fabricación de briquetas pueden resultar más apropiados para las poblaciones rurales y pequeños productores locales, la briqueta fabricada con pequeñas prensas manuales de baja presión se mantiene unida sobre todo por la acción del material aglutinante. Suponiendo una ventaja adicional ya que las arcillas pueden ser activadas producto de los cambios de su estructura interna como resultado de la acción del calor procedente de la

combustión de la biomasa [5, 22], como objetivo del presente trabajo se investigan las condiciones en las que ocurre la transformación puzolánica del residuo de la combustión del conglomerado biomasa + material arcilloso.

Es de considerar que el mecanismo de formación de las cenizas procedentes de la biomasa no ha sido exhaustivamente estudiado, quedando establecido que su formación depende no solo de la calidad del combustible sino del diseño del dispositivo combustor y las condiciones de combustión (suficiente temperatura, flujo de aire, correcto mezclado y tiempo de residencia) [18].

Por otro lado las propiedades aglomerantes de la arcilla están directamente relacionadas con las características estructurales de los cristales pertenecientes al constituyente principal de la misma. Las redes cristalinas se forman por el apilamiento de delgadísimas láminas dispuestas paralelamente entre sí lo que origina una estructura capaz de deslizarse en condiciones adecuadas de humedad y permite desarrollar las propiedades aglutinantes [23].

La adhesión sobre otros materiales es una propiedad fundamental de las mezclas agua – arcilla de modo de que si un cuerpo extraño se introduce en la mezcla este queda envuelto y unido a las partículas de arcilla a través de la película acuosa[24] estas propiedades aglutinantes de las arcillas están directamente relacionadas con el tipo de constituyente predominante.

Se reportan experiencias en el procesamiento de briquetas de biomasa con la adición de material arcilloso como aglomerante [8, 25, 26], sin embargo no está totalmente esclarecida la relación entre la función aglomerante de la arcilla y algunas propiedades que adquiere el conglomerado.

Se presenta como una adecuada alternativa el bloque sólido combustible (BSC) [27]( este consiste en biomasa densificada a partir de la aplicación de baja presión de compactación, con la adición de un aglomerante arcilloso y en este caso el reciclaje de desechos de la industria del procesamiento de la madera, se persigue transformar el material inicialmente suelto o disperso en un elemento compacto de adecuadas características como combustible sólido.

Es necesario estudiar las características del material arcilloso en interés de su activación como aglomerante y precursor puzolánico. En ese sentido se plantea [28] que el tratamiento térmico de materiales inorgánicos puede originar la formación de nuevas fases en el estado sólido de forma cristalina o amorfa, lo cual depende del tiempo y la temperatura a que es realizado el proceso térmico, el control del proceso es importante para favorecer la descomposición térmica de la materia orgánica y al mismo tiempo la formación de sílice amorfa.

En ese sentido la calidad puzolánica del material resultante depende igualmente de la cantidad de oxígeno actuante durante la combustión que puede favorecer o no las micro porosidades y cantidad de carbón en el producto final, estas condiciones a

criterio del autor pueden y deben ser controladas durante la combustión del BSC para obtener el mayor rendimiento en la transformación puzolánica de los materiales inorgánicos procedentes de la arcilla. Se analizan algunos de los procesos tecnológicos que permiten obtener diferentes puzolanas artificiales siendo evidente que los materiales puzolánicos se caracterizan por un alto contenido de sílice ( $\text{SiO}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), alúmina ( $\text{Al}_2$ ) y un alto grado de finura.

El código ASTM 618-92, expone “las puzolanas son materiales silíceos o aluminosos que por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero que finamente divididos y en presencia de humedad, pueden reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes”. Resulta en este sentido muy interesante la clasificación propuesta por [29], donde señala a las arcillas activadas térmicamente como puzolanas artificiales, las que precisamente son objeto de estudio del presente trabajo.

En el caso de los materiales arcillosos su activación térmica produce cambios en el área superficial específica y la relación entre la fracción soluble (amorfa) y la cristalina. La conexión resultante depende de la naturaleza inicial de los materiales y de la temperatura de calentamiento la cual provoca la extracción de las moléculas de agua combinadas en su estructura interna, fenómeno conocido como deshidroxilación o remoción de los OH proceso que rompe o modifica de forma irreversible su red cristalina formando una fase de transición cuasi-amorfa con alta reactividad.

Diversos autores reportan como temperatura óptima para obtener reactividad puzolánica en las arcillas los valores entre  $650\text{--}870^\circ\text{C}$  [22], El efecto del tratamiento térmico aplicado sobre el mineral depende entre otros factores de las características mineralógicas del material y la estructura atómica de sus cristales así como las impurezas presentes y las condiciones reales que se establecen en el dispositivo de termo conversión con lo cual se puede favorecer la ocurrencia de determinadas reacciones[16].

Consecuentemente a criterio de los autores el proceso de modificación estructural de las arcillas reactivas procedentes del BSC (ARPBSC), por la acción del calor que se produce durante la combustión de la biomasa en las condiciones de un horno, puede depender de las propiedades físico mecánicas y químicas del conglomerado, la composición químico - estructural de los minerales arcillosos y la interacción flujo de aire - combustible que provoca cambios en la atmósfera del horno, la temperatura y las propiedades de la ceniza.

## **2- Formulación de los BSC.**

El bloque sólido combustible consiste en un objeto o conglomerado de biomasa densificada, aserrín en este caso, empleando además material arcilloso como

aglomerante que posibilita el empleo de baja presión para lograr adecuadas propiedades para su transportación y almacenaje, además se requieren cualidades como combustible y potencial productor de cenizas puzolánicas.

Se prevé la obtención de los BSC con características y en condiciones tales que sea posible ejecutar la densificación al utilizar un equipamiento manual, de modo que los costos de la inversión inicial sean los mínimos, al alcance de las economías de los pequeños productores de ecomateriales.

La densificación de residuos proveniente de la biomasa es una opción atractiva para valorizar y mejorar las propiedades de muchos desechos, pues se disminuyen los costos de su manejo (transporte, almacenaje, etc.) y se mejora el poder calorífico volumétrico. [14, 30]. Sin embargo los estudios sobre la densificación de los desechos agroindustriales, como una disciplina científica, todavía está siendo desarrollada y hasta ahora, en muchos casos, no tienen métodos exactos [21].

Sobre esta base el objetivo principal de este estudio es evaluar el efecto que produce el material arcilloso añadido como aglomerante en las propiedades de calidad de las briquetas mediante la valoración de la densidad, la estabilidad dimensional, la resistencia y las propiedades combustibles, utilizando un dispositivo que permite aplicar una baja presión en el entorno de hasta 5 MPa Determinar así mismo los modelos matemáticos necesarios para describir la relación entre los diferentes factores estadísticamente influyentes.

El material arcilloso se propone como aglomerante pues resulta un material de relativa fácil adquisición y económico, se realiza la evaluación del material arcilloso procedente de diferentes fuentes y la influencia de sus propiedades sobre el proceso de densificación.

## **2.1- Caracterización de las materias primas:**

La industria de la madera aserrada en Cuba produce aproximadamente 70.000 m<sup>3</sup> de residuos anuales [31], estos residuos son utilizados irregularmente por la industria avícola y porcina pero en muchos casos no tienen una aplicación concreta bien definida y muchas veces son incinerados sin que el calor generado sea racionalmente utilizado[2].

Los estudios previos realizados en la provincia de Villa Clara para determinar la disponibilidad de residuos provenientes del tratamiento de la madera se identifican claramente como fuente mayoritaria de suministro de materia prima los aserraderos que aportan más del 75% del aserrín generado en la región[3], el resto es aportado por talleres y carpinterías locales, se han localizado importantes fuentes de aserrín y de arcilla como se muestran en la figura 1.



<b>Caracterización del aserrín</b>					
T.1 Distribución granulométrica		Tabla 1.1 Análisis de elementos químicos			
Intervalo de diámetro (mm)	Contenido %	Elementos	Contenido %	Elementos	Contenido %
$d \geq 20.4$	0.68	Cu	0.0017	SiO <sub>2</sub>	3.2
$20.4 \geq d \geq 11.1$	1.02	Ca	0.176	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.1
$11.1 \geq d \geq 7.93$	0.68	Mg	0.10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8
$7.93 \geq d \geq 5.66$	3.06	Hg	-	CaO	62.3
$5.66 \geq d \geq 4.00$	0.68	Cl	0.0023	MgO	8.4
$4.00 \geq d \geq 2.50$	8.50	Pb	0.0042	K <sub>2</sub> O	1.3
$2.50 \geq d \geq 0.84$	60.54	Mn	0.0027	Na <sub>2</sub> O	5.2
$0.84 \geq d$	24.84	Cd	-	SO <sub>3</sub>	0

**En todos los casos se analizaron tres replicas de cada muestra sometida a ensayos. Determinación de la distribución del tamaño de partícula según ASAE Standard S319.3. Fuente: [1, 35]**

En la tabla 2 se exponen los resultados del análisis elemental realizado al aserrín procedente de la fuente de estudio, es de destacar el alto contenido de volátiles, sobre el 80%, el contenido de cenizas resulta bajo en comparación con otros combustibles sólidos como la turba el lignito o carbones bituminosos.

El calor específico de combustión (CEC) es un parámetro que distingue a las diferentes sustancias empleadas como combustible, para el caso de la biomasa existen muy diversos materiales procedentes de la actividad agrícola, forestal ó inclusive los residuos sólidos urbanos (RSU) de los cuales es posible obtener reportes en la literatura internacional sobre su evaluación como potenciales combustibles.

Tabla 2 .Análisis elemental e inmediato de aserrín									
Muestras	%H	%Vv	%A	%Cf	%C (lhc)	%O (lhc)	%H (lhc)	%N (lhc)	CEC (MJ/Kg.)
Aserrín	42.0	54.0	0.2	3.7	41.82	50.59	6.34	1.25	18.15 <sup>1</sup> / 17.9 <sup>2</sup>

*H: Humedad; Vv: Volátiles;; A: Cenizas Cf: Carbono fijo; C .Carbono; O: Oxigeno H :Hidrogeno; N:Nitrog; Leyenda: lhc: libre de humedad y cenizas; \*: Determinado por diferencia.*

<sup>1</sup> Valor calculado sobre la base de la correlación propuesta por Cukeirman  
<sup>2</sup> Valor obtenido por la realización de calorimetría( Calorímetro C5003 IKA-WERKE)  
 Fuente: [36, 37]Villegas, 2005; Quiroz, 2007b.

Por ejemplo para la paja de trigo y la paja de arroz se reporta la obtención de entre 18.7 – 19.3 MJ/kg [38]. Para el aserrín, la paja de caña y el bagazo de

caña se reportan valores entre 15 – 20 MJ/Kg [33, 39, 40], para maderas como el sauce ó el pino se reportan valores entre 17 – 18.3 [17], en general estos valores están determinados por la humedad existente en el material y el mayor ó menor contenido de lignina.

El calor específico de combustión en el aserrín colectado para este trabajo tiene un valor promedio de 18.15 MJ/Kg. calculado sobre la base de los análisis químicos y la correlación propuesta [41], para verificar estos cálculos se realiza adicionalmente el análisis térmico mediante el calorímetro C5003 IKA-WERKE para determinar el CEC obteniendo un valor de 17.91 MJ/Kg. que aunque algo menor ratifica la valides de la correlación empleada

Se realiza adicionalmente el ensayo por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) del aserrín, este análisis térmico permite obtener un medida de los cambios físicos o químicos que ocurren en función de la temperatura mientras la muestra se calienta con un programa de temperaturas controlado mediante el calorímetro Mettler-Toledo DSC822 en atmósfera dinámica de oxígeno (50 ml/min) con rango de temperaturas de 25 -1.000°C a una velocidad de 10°C/min.

Como se puede observar en la figura 2, el DSC proporciona una curva que indica el intervalo óptimo de temperaturas en el que se podrá aprovechar energéticamente el recurso. La curva DSC obtenida se puede dividir en dos fases:

Una primera etapa endotérmica que alcanza hasta los 130°C, asociada al secado del agua presente en el aserrín, cantidad muy pequeña ya que no se aprecia apenas esta zona de la curva.

Una segunda fase exotérmica, en la que tendría lugar la combustión de los diferentes constituyentes del material y que sería la zona de óptimo aprovechamiento energético del aserrín y que termina según los resultados de DSC en el entorno de los 500 °C.

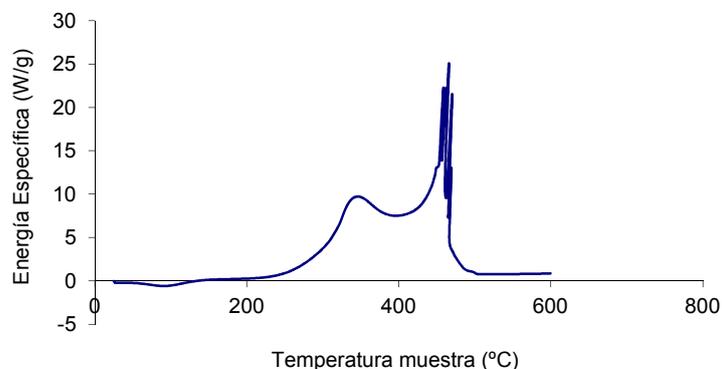


Figura 2. Curva DSC obtenida para el aserrín. Fuente: [1].

### **2.1.2- Material arcilloso;**

El material arcilloso está constituido predominantemente, por un grupo de sustancias cristalinas denominadas minerales de la arcilla, y que son, en esencia, silicatos de aluminio hidratados. La palabra arcilla se emplea con referencia a un material de grano fino, terroso, que se hace plástico al ser mezclado con agua.

El material arcilloso se propone como aglomerante para la fabricación de los bloques sólidos combustibles pues resulta económico su manejo en el entorno de la industria de los ecomateriales que a su vez son los principales clientes para el uso de este portador energético en la producción artesanal de materiales de construcción como los ladrillos, la cal ó la obtención de material cementante a partir de la activación térmica de la arcilla.

Las arcillolitas son rocas sedimentarias que representan el resultado de los procesos de meteorización y erosión que han actuado sobre materiales preexistentes y se caracterizan por la disposición geométrica regular en capas planas separadas entre sí por diversos elementos químicos. En general, las arcillas ricas en sílice, hierro e hidróxidos (esmeclitas, cloritas, vermiculitas y sus interestratificados), son mucho más reactivas que las arcillas, constituidas solamente por alúmino-silicatos pobres en hierro e hidróxidos (caolinita e illitas), [42].

La caracterización de los materiales arcillosos implica la realización de estudios para determinar sus propiedades físicas, químicas y composición mineralógica (DRx).

Se evalúan materiales arcillosos procedentes de afloramientos de diversas localidades, a saber de Manicaragua (MAM), Falcón (MFM), ambos en la región central de Villa Clara, Cuba y de la región de Oviedo (MOM) en Asturias, España.

Estos materiales arcillosos han sido seleccionados atendiendo primeramente a su cercanía con respecto a los centros de procesamiento de madera y de producción de ecomateriales pues las exigencias de la producción en condiciones locales imponen una impronta del tipo económica minimizando los recursos para su acarreo, en segundo lugar se tiene en cuenta la cercanía con respecto a los centros de investigación involucrados en el trabajo, y además lo que es no menos importante se consideran sus diversas propiedades físico – químicas que permiten evaluar su influencia sobre las propiedades del material densificado.

#### **2.1.2.1 Análisis químico, propiedades físicas y composición mineralógica.**

En la tabla 3 se muestran los resultados de la evaluación de la composición química realizada a los materiales arcillosos objetos de estudio. El análisis de de la composición química de los materiales arcillosos evaluados brinda como resultado que la suma en peso de los óxidos principales ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

supera en todos los casos el 70 % lo que puede favorecer su potencial activación térmica.

**Tabla 3 Composición química de material arcilloso evaluado.**

Elemento	Falcón <sup>1</sup>	Manicaragua <sup>2</sup>	Oviedo <sup>3</sup>
Si O <sub>2</sub>	52,7- 55,8	57.75	53,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 – 18,7	18.71	17,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,7 – 9,77	7.07	6,33
Ti O <sub>2</sub>	0.52 – 0,82	-	0,86
Ca O	2,59 – 5,35	1.85	5,41
MgO	3,77 – 5,93	1.8	2,67
SO <sub>3</sub>	-	0.02	-
Na <sub>2</sub> O	1.96– 2,89	2.68	0,30
K <sub>2</sub> O	0,62– 1,55	0.65	3,63
PPI			

**Fuentes:** <sup>1</sup>Laboratorio de la Empresa Geo - Minera de Villa Clara, <sup>2</sup>Laboratorio Escuela Politécnica Federal de Lausana, (EPFL) <sup>3</sup> Cerámica Collet S.A Cataluña, España.

En la tabla 4 se muestran los resultados de la evaluación de diversas propiedades físicas que caracterizan a los materiales arcillosos objeto de estudio, entre ellas la refractoriedad, la plasticidad, la actividad y la composición mineralógica, encontrándose que los tres materiales tienen composición mineralógica diferente y en consecuencia una actividad diferente.

Los niveles de refractoriedad, entre 850 – 1000 °C, no resultan excesivamente altos, por consiguiente a criterio del autor de este trabajo su aplicación como aglomerante no debe establecer mayores dificultades para la combustión.

Para determinar la plasticidad y otras propiedades físicas de los materiales arcillosos se utiliza el método indirecto o método de Atterberg, siguiendo la norma ASTM D 4318, en la cual se considera una pasta de arcilla y agua que se seca progresivamente pasando del estado líquido al plástico y finalmente al sólido

El material con mayor plasticidad y mayor actividad de los estudiados resulta el de Manicaragua, con una composición predominantemente montmorillonítica puede estar próximo a las conocidas buenas propiedades como aglomerantes de las bentonitas [24, 43](Duitama,2004, Serrucha,2005 ), estas estructuras permiten que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas a través de los enlaces de hidrógeno que los caracterizan lo cual determina una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad.

Tabla II.4 Características del material arcilloso empleado de acuerdo a su procedencia						
Material	Parámetros					
	Resistencia compresión	Refractoriedad	Absorción	Plasticidad IP	Actividad AA	Composición mineralógica
	KPa	°C	%	-	-	-
MAF <sup>1</sup>	0.326	958	15.36	38	2	Illita - Montmorillonita
MAM	0.343 - 315	850 - 1050	10.68 - 17.96	42.5	3.27	Montmorillonita- Caol.
MOM <sup>2</sup>	0.3- 0.306	870 - 1000	10.8 - 16.45	18	0.6	Caolinita

Fuente: Informe técnico Empresa Geominera del Centro. VC, 2005; Cerámica Collet S.A Cataluña, España; (Quiroz, 2007a). Leyenda: MAM: Material arcilloso procedente de Manicaragua, MAF: material procedente de Falcón, MAO: Material procedente de Oviedo. Caol: Caolinita.

En la figura 3 se muestra el resultado del análisis de DRx realizado al material arcilloso procedente de Manicaragua identificándose de acuerdo a las principales fases mineralógicas encontradas como un material predominantemente montmorillonítico del grupo de los minerales expandibles ó esmectitas.

La composición mineralógica de las muestras de otras procedencias que son utilizados en el desarrollo del presente estudio se identifican del siguiente modo, el material arcilloso de Oviedo como una estructura predominantemente caolinita del grupo de las kanditas [37] el material arcilloso procedente de la municipalidad de Falcón como una estructura predominantemente del tipo illita del grupo de las micas [26].

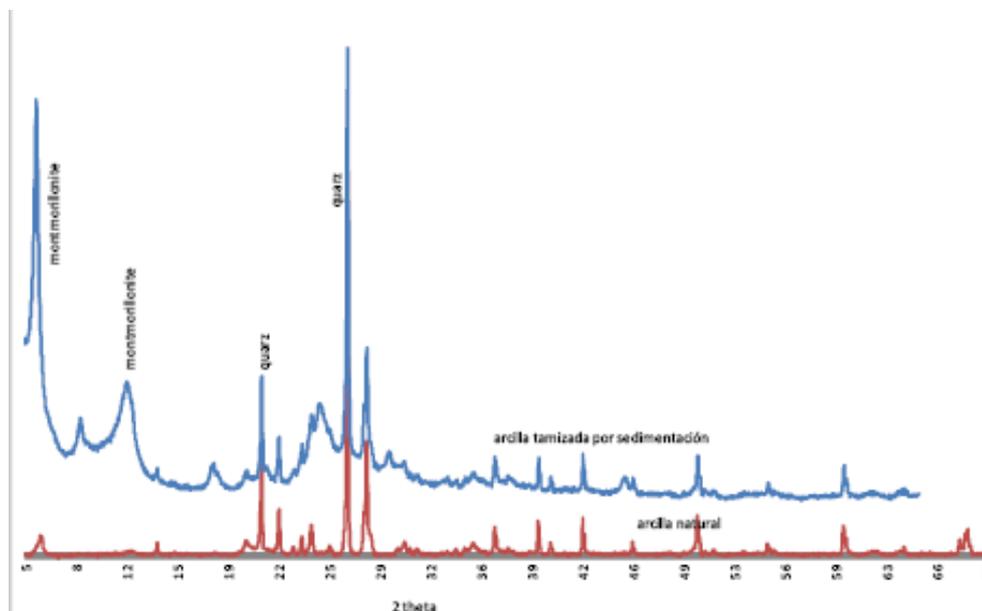


Figura 3 Resultados del análisis de DRx. Material arcilloso con estructura predominantemente montmorillonítica. Fuente: Quennoz, 2006. Empresa Geo-Minera de Villa Clara, Laboratorio Isaac del Corral Ciudad de la Habana.

### 3- Densidad del bloque sólido combustible.

Una importante característica del sólido combustible es su densidad, mayor densidad reporta ventajas desde el punto de vista técnico económico para su manejo y desde el punto de vista energético [14, 44]. En este acápite se realiza el análisis de los resultados correspondientes a la densidad relajada ó seca (DR conocida en inglés como relaxation density).

La densidad de las briquetas es calculada a partir de las mediciones promedio de sus dimensiones y de su peso (diámetro y altura con Pie de Rey y la masa con balanza electrónica digital de precisión 0.001 grs) Para la investigación de la densidad de las briquetas se han utilizado las recomendaciones de la norma ASAE S269.4. DEC

La densidad final de las briquetas depende de diversos factores entre ellos la relación entre la magnitud de la compresión y el distensionamiento ó relajamiento del material, las propias características del proceso de aglomeración (presión, tiempo, naturaleza del aglomerante y su contenido porcentual, etc.) y las propiedades físicas del material biomásico, la comprensión de estos factores es esencial en el estudio de la densificación de las briquetas y la predicción de su comportamiento como combustible en la aplicación correspondiente ó en un horno dado

El procedimiento y análisis experimental planteado permite generar y describir la información de manera organizada para evaluar las características del material densificado como alternativa energética para la producción de materiales de construcción. En la tabla 5 se muestran los factores y niveles considerados para la evaluación inicial de la influencia del contenido de aglomerante arcilloso procedente de la localidad Manicaragua junto con los demás factores evaluados.

Tabla 5 Factores y niveles considerados para la evaluación de las unidades experimentales de aserrín densificado con baja presión de compactación.				
DFC	N = 16	n =2	F = 4	
Diseño de Experimento				
Factores			Niveles	
	Denominación	U/M	Bajo (-1)	Alto (1)
H	Agua añadida	Lts H <sub>2</sub> O / Kgs Aserrín	1	2.5 - 1
P	Presión	MPa	1	5
T	Tiempo de prensado	Seg	10	60
Agl	Cantidad Aglomerante	%	10	30

Las normativas para las briquetas industriales de alta densidad establecen un

valor mínimo de densidad en el entorno de  $1 - 1.4 \text{ g. / cm}^3$ . Sin embargo diferentes reportes evalúan la densidad relajada (DR) de las briquetas fabricadas con la aplicación de baja ó moderada presión y la adición de diferentes aglomerantes en el intervalo de  $0.2 - 0.7 \text{ g./ cm}^3$ .

De igual modo briquetas fabricadas con paja de caña alcanzan una densidad de  $0.540 \text{ g./ cm}^3$  [26], por otro lado se reporta la obtención de briquetas fabricadas con tallos de la yuca con valores de densidad de entre  $0.4 - 0.7 \text{ g./ cm}^3$  [45], para desechos del tratamiento de la madera se reportan valores de densidad para las briquetas de  $0.5 - 0.6 \text{ g./ cm}^3$  [46].

Teniendo en cuenta los amplios límites que la densidad puede adoptar en función de diversos factores se establece como límite de aceptación en cuanto a la densidad relajada (DR) para las briquetas ensayadas en este trabajo el valor de  $0.450 \text{ g./ cm}^3$ .

Se emplean los métodos de análisis de asociación entre las variables para establecer la relación funcional en forma matemática, El objetivo principal en este caso es estimar los parámetros de los modelos matemáticos que permiten relacionar la densidad con los diferentes factores sobre la base de los resultados de las unidades muestrales evaluadas. Se define esta relación a partir de aplicar el nivel de significación más alto posible y se establece la simplificación de los modelos al extraer de los análisis los factores que resultan estadísticamente no significativos.

Los resultados del análisis de regresión lineal múltiple para la variable densidad donde se determina la relación con los diferentes factores (Humedad. Presión, tiempo y Aglomerante) para un nivel de confianza estimado entre el 99% y el 90% como mínimo, quedando establecido que en este caso para la densidad según las restricciones impuestas solo resultan significativos las variables presión y contenido de aglomerante.

El modelo ajustado que permite predecir los valores de densidad ( $\text{g / cm}^3$ ) dadas las condiciones especificadas para la fabricación de los bloques sólidos combustibles es el siguiente

$$DR = 0,59525+0,02025*Pr+ 0,023*\% \text{ Aglom.} \quad R^2 = 95.8 \% \quad [1]$$

Donde: Pr = presión en MPa; % Aglom = contenido porcentual de aglomerante arcilloso en la biqueta

La ecuación [1] de regresión lineal del tipo  $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$  describe con claridad y precisión la relación entre los factores densidad, presión y contenido de aglomerantes El modelo matemático investigado se corresponde con los conocimientos teóricos del proceso, la densidad esta en relación directa con el contenido de aglomerante y con la presión aplicada siendo no estadísticamente significativas la influencia de los factores tiempo de retención de la biomasa en el

dado y cantidad de agua añadida. Es de señalar que la obtención de este modelo ha sido realizada a partir de un material arcilloso de características montmorilloníticas con una actividad relativamente alta.

En el grafico de barras que se muestra en la figura 4 se identifican los valores promedio de la densidad (DR) de las muestras fabricadas según los tratamientos definidos por la relación entre los factores y los niveles involucrados. El valor promedio de densidad encontrado es 0.596 grs. / cm.<sup>3</sup>.

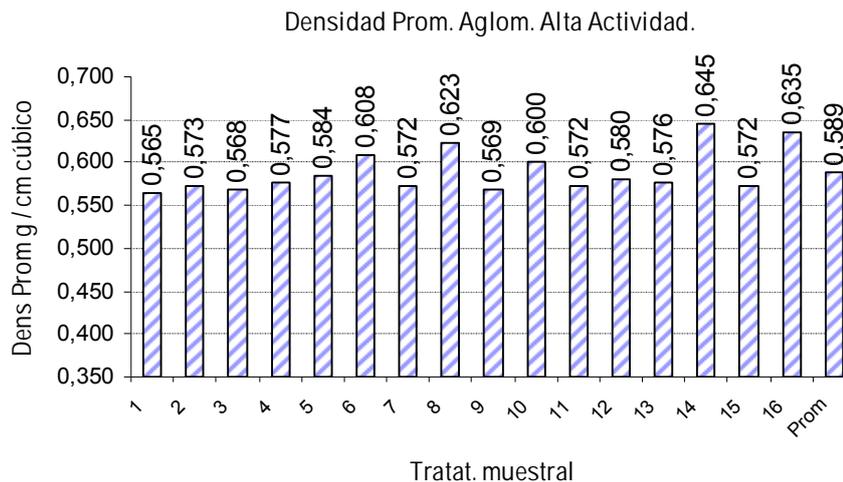


Figura 4. Valores promedio de la densidad relajada

### 3.1- Relación densidad (DR) y propiedades del aglomerante.

Las propiedades del material arcilloso que se han definido a partir del análisis bibliográfico realizado como potencialmente significativas para las cualidades del residuo biomásico densificado es la organización estructural de los filo aluminio - silicatos que conforman el material arcilloso, así como la plasticidad y la actividad [43, 47], estas propiedades por supuesto se relacionan entre sí para otorgarle a la arcilla mayores ó menores propiedades aglomerantes.

El análisis estadístico de las unidades muestrales elaboradas con materiales arcillosos de diferentes yacimientos y con índice de plasticidad entre los valores del 42.5 % y el 18 % ha demostrado que para un 95 % del nivel de confianza existen diferencias significativas entre los valores de densidad promedios de las unidades muestrales fabricadas con el material arcilloso proveniente de cada uno de los respectivos yacimientos lo cual puede estar en relación con el índice de plasticidad y la actividad de las muestras colectadas en cada fuente ó yacimiento.

En la figura 5 se muestra un resumen con la densidad promedio que alcanzan las briquetas fabricadas con aglomerantes de diferentes propiedades, se corrobora la regularidad encontrada anteriormente donde la densidad está en relación directa con el contenido de aglomerante y la presión aplicada, en este caso lo interesante resulta que un grupo de muestras no alcanza el límite de densidad trazado como

criterio de aceptación, precisamente las muestras que no cumplen el requisito son las fabricadas con el material arcilloso que posee mayor contenido de mineral caolinitico en su composición lo que está directamente relacionado con su menor actividad, no obstante se demuestra que es posible densificar de igual modo residuos de biomasa con el empleo de este material arcilloso si las muestras son fabricadas con mayor contenido de aglomerante y mayor presión.

La diferencia en la densidad entre briquetas fabricadas con un aglomerante y otro puede deberse al diferente poder cohesivo de los diferentes materiales arcillosos empleados lo que conduce a variaciones en el diámetro y la altura de las briquetas

Una vez considerada la evidencia de que existe relación entre las propiedades del material arcilloso y su potencial para ser empleado en los procesos de densificación con baja presión es posible determinar matemáticamente una relación funcional que permita predecir el comportamiento de la densidad atendiendo al efecto de las variables ó factores definidas en el diseño de experimento, presión, contenido porcentual de aglomerante y la relación con las propiedades físico mineralógicas del material representadas por la actividad que lo caracteriza.

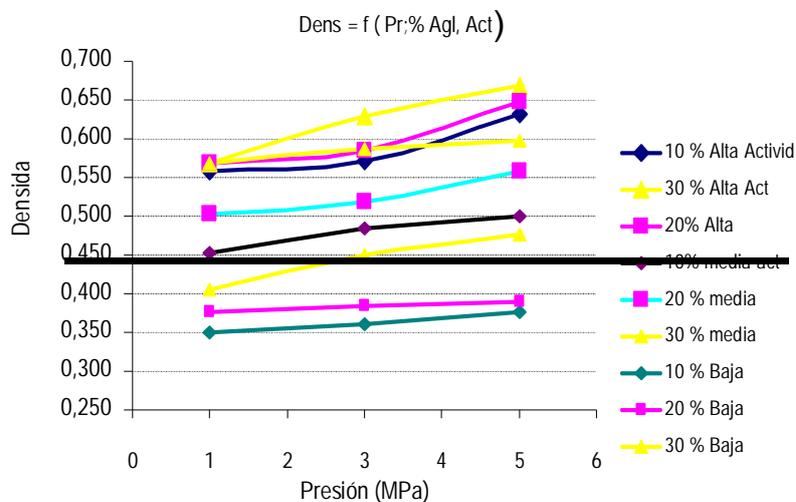


Figura 5 Densidad (DR) en función de la presión aplicada y el contenido en por ciento de aglomerante y sus propiedades

Para la mejor comprensión de la evaluación del efecto de las características físicas del aglomerante se ha determinado la ecuación de regresión múltiple que describe la relación entre la densidad y los factores acotados, la que adopta la forma siguiente:

$$\text{Densidad (DR)} = 0,504333 + 0,0282778 \cdot \text{Pr} + 0,0383889 \cdot \% \text{Aglom} + 0,1015 \cdot \text{Act} \quad [2]$$

Donde: Pr = Presión (MPa); % Aglo = Contenido en por ciento de material arcilloso añadido;

Act = % Plasticidad / % de material arcilloso con dimensión inferior a 0.002 mm

$R^2 = 92 \%$  para un nivel de significación superior al 95%

Los resultados demuestran que en el caso de la densificación del aserrín bajo la aplicación de bajas presiones (hasta 5 MPa) el resultado del proceso visto a través de los valores de densidad está altamente influenciado por el papel en primer lugar del material arcilloso añadido como aglomerante y sus propiedades físicas. Dadas las premisas planteadas para la obtención de los objetos sólidos combustibles resultan menos apropiadas para lograr su estabilidad los materiales arcillosos de menor actividad, la mayor densidad puede estar favorecida por una mayor capacidad de absorción de agua y poder cohesivo del material arcilloso.

Los resultados graficados y el análisis estadístico matemático demuestran que los bloques sólidos combustibles densificados con el uso de material arcilloso de diversas características pueden resultar de una densidad significativamente diferentes lo cual es consistente desde el punto de vista teórico dadas las características físicas, químicas y mineralógicas propias de los materiales estudiados.

Queda establecido de este modo que el material arcilloso usualmente empleado para la fabricación de artículos cerámicos (ladrillos y otros) puede ser un buen material aglomerante para convertir en un sólido las partículas sueltas de aserrín sometidas a baja presión de compactación.

#### **4- Resistencia.**

Algunas de las normativas referenciadas para la producción de peles y briquetas acotan los valores de durabilidad de los combustibles sólidos provenientes de la densificación de biomasa a partir de diversos criterios sobre ensayos mecánicos que permiten evaluar por un procedimiento u otro las pérdidas que se producen en la masa del elemento antes y después del ensayo realizado, por ejemplo la norma CS 9 (*Biocombustibili solidi Caratterizzazione del pellet a fini energetici*) clasifica los elementos de acuerdo a la durabilidad en tres grupos, a saber DU 97.7 con pérdidas en el peso inferiores al 2.3%, DU 95 con pérdidas inferiores al 90 95 % y de igual modo clasifica el DU 90, otras normativas aplican un procedimiento análogo de clasificación

Las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, abrasión e impacto) de los llamados bio combustibles están directamente relacionados con su durabilidad y las posibilidades de ser manipulados y almacenados con seguridad con un mínimo de perdidas, normativas como ASAE S269 ó ONORM M7135 (*Solid Biofuels – Methods for the determination of mechanical durability of pellets and briquettes*) establecen los métodos para evaluar estas características pero están referidas a combustibles sólidos como la hulla ó el carbón mineral y para briquetas de alta densidad fabricadas con procesos de altas presiones [12, 48].

En este trabajo se adaptan los criterios de evaluación para la resistencia de las briquetas a las condiciones del proceso de obtención de estas con baja presión y el uso de material arcilloso como aglomerante. El criterio para evaluar la durabilidad ha sido adoptado a partir de la evaluación del índice de resistencia al impacto (IRI; en ingles *Impact resistance index*) según procedimientos análogos reportados en la bibliografía consultada[12, 45] así como el análisis de la resistencia a compresión.

#### 4.1-Pruebas de resistencia a compresión (RC)

La resistencia a compresión puede ser un importante criterio sobre la durabilidad de de las briquetas pues estas deben ser sometidas durante su vida útil a diversos esfuerzos de compresión durante la transportación ó almacenamiento, los ensayos han sido realizados con una prensa universal *IBERTEST* con capacidad de 1500 KN de carga en correspondencia con ASTM D 2166-85, la carga es aplicada de forma constante a razón de 1 mm/min hasta la total rotura de las briquetas. Los ensayos se realizan ubicando en el plato de la prensa las briquetas garantizando un adecuado contacto entre las superficies horizontales como se muestra en la figura 6



Figura 6 Rotura típica de las muestras sometidas a compresión

Los resultados del ensayo de compresión realizado a las muestras fabricadas con aglomerantes de diferentes propiedades físicas (alta, media y baja actividad) y con diferentes presiones (1,3 y 5 MPa) se muestran en la tabla 6. La combinación de estos factores demuestra que la resistencia a compresión está en relación directa con la presión de fabricación de las muestras así como con el efecto aglomerante que produce el material arcilloso lo que a su vez se relaciona con la densidad (DR) que finalmente adquieren las briquetas.

La resistencia a compresión se extiende en el intervalo de 0.5 – 1.27 MPa, estos resultados son coherentes con diversos reportes de la literatura consultada, Demirbas, 2004, obtiene valores de resistencia a compresión en el intervalo de 14 ÷ 35 MPa para briquetas fabricadas de trigo y desechos de papel pero con la aplicación de presiones superiores a los 300 MPa.

Tabla 6 Resistencia a compresión							
		Pr - (MPa)					
Características Aglomerante		1	3	5			
%Aglomer	Activiad	RC (MPa) / DS					
10	Baja	0,45	0,25	0,52	0,50	0,58	0,68
20	Baja	0,5	0,5	0,6	0,30	6,8	0,44
30	Baja	0,7	0,4	0,8	0,31	0,81	0,45
10	Media	0,6	0,35	0,8	0,42	0,9	0,49
20	Media	0,7	0,45	0,8	0,36	0,9	0,64
30	Media	0,9	0,53	0,9	0,26	1,01	0,38
10	Alta	0,8	0,30	0,96	0,22	1,14	0,40
20	Alta	0,9	0,38	1,1	0,49	1,2	0,20
30	Alta	0,93	0,42	1,2	0,54	1,27	0,45

Sin embargo Jamradloedluk, 2005 demuestra la relación directa entre el contenido de aglomerante (almidón) y el aumento de la resistencia a compresión, la cual adopta valores de hasta 0.26 MPa para briquetas fabricadas de desechos de biomasa con la aplicación de bajas presiones, según este reporte la densidad máxima alcanzada es de 223 kg/m<sup>3</sup> de ahí probablemente se infiera la no muy alta resistencia a compresión.

Se reporta la obtención de briquetas fabricadas con desechos procedentes de las plantaciones de plátano con una resistencia a compresión máxima de 0.83 MPa y una relación entre la presión aplicada y la resistencia a compresión dada por la expresión del polinomio siguiente[45]:

$$RC = 0.002556P^3 - 0.065260P^2 + 0.549294P - 0.714450 \quad [2]$$

Donde: RC, es la resistencia compresión y P es la presión dados en MPa respectivamente.

A criterio del autor la expresión [2] de predicción para la resistencia a compresión tiene el inconveniente de estar solamente en función de la presión y tal vez podría ser simplificada desde el punto de vista matemático pues una misma variable es modificada por diferentes parámetros.

En esta investigación se ha determinado a través del análisis de regresión múltiple la relación entre los factores que inciden significativamente sobre la densidad y que a su vez a través del análisis de varianza ANOVA se demuestra su efecto significativo sobre la resistencia a compresión. La expresión matemática que relaciona los factores es la siguiente:

$$RC = 14,7833 + 1,93556*Pr + 1,63944*% Aglom + 3,66722*Actv \quad R^2 = 95.96 \% \quad [3]$$

Donde: Resistencia a compresión en MPa, Pr: Presión aplicada en MPa; % Aglomerante; Actividad del aglomerante

La relación funcional formulada a través de los factores que inciden sobre la resistencia a compresión demuestra al igual que en los trabajos citados que el incremento de la resistencia es proporcional al incremento de la presión y además se cumple este mismo efecto en relación con la cantidad y propiedades del aglomerante.

#### **4.2 Índice de resistencia al Impacto (IRI).**

Las normas ASTM D440-86 y la ASAE S269.3 son usualmente empleadas para el control de la resistencia de combustibles fósiles sólidos y briquetas de alta densidad [21, 49], diversos reportes han propuesto la modificación del método para determinar la durabilidad de briquetas fabricadas con la aplicación de bajas presiones y la adición de aglomerantes a través de pruebas de resistencia al impacto [19, 50].

El criterio siguiente es el que se considera, las muestras se dejan caer desde 1 metro de altura sobre un piso de hormigón a continuación se toman los grandes pedazos en que pueda dividirse pesando los pequeños desprendimientos que puedan considerarse como pérdidas, ya que dejan de formar parte del objeto sólido densificado [26, 51], la diferencia porcentual entre el peso inicial de la biqueta y las pérdidas después del impacto se adopta como índice de la resistencia al impacto (IRI).

Sin embargo a criterio del autor se puede realizar adicionalmente una evaluación de forma cualitativa de la siguiente forma, muy buena resistencia al impacto si solo se agrieta ó se parte en dos – tres pedazos grandes con pérdidas inferiores al 5 %, buena resistencia si parte en varios pedazos grandes con pérdidas inferiores al 15 %, y se considera mala ó inadecuada la resistencia si las pérdidas superan el 15 %.

En la tabla 7 se muestran los resultados de la evaluación de la durabilidad a través de la prueba de resistencia al impacto, los valores promedios que se muestran tienen un recorrido desde un índice igual a 85,6 hasta un 97.8 %, lo que según el criterio cualitativo expresado anteriormente la evaluación realizada abarca el espectro desde muy buena resistencia al impacto para las briquetas fabricadas con el aglomerante de alta actividad hasta las de resistencia inadecuadas fabricadas con el aglomerante de baja actividad.

Los resultados presentados son consistentes con la teoría y con diversos reportes de la bibliografía consultada, Gonzáles 2003 reporta pérdidas, para ensayos análogos realizados con briquetas fabricadas a partir de desechos de la industria agro azucarera, de entre el 5 y el 27 % las cuales resultan mayores que los valores encontrados en este trabajo, esto puede estar relacionado con las

propiedades iniciales del material como se demuestra en los trabajos reportados por Chin, 2000 donde las briquetas fabricadas de aserrín presentan mayor durabilidad que las elaboradas con otros residuos como la paja de arroz ó la fibra de coco, las diferencias en las pérdidas entre un proceso de densificación y otro puede estar relacionado así mismo con la presión aplicada y con las propiedades del aglomerante

INDICE DE RESISTENCIA AL IMPACTO							
		Pr - (MPa)					
Características Aglomerante		1	3	5			
%Aglomer	Actividad	IRI (%) / DS					
10	Baja	-	-	-	-	-	-
20	Baja	-	-	-	-	85,6	0,00
30	Baja	-	-	88.3,3	0,00	90,50	0,00
10	Media	90,8	0,00	92,1	0,00	93,6	0,00
20	Media	91,0	0,00	92,8	0,00	97,3	0,00
30	Media	92,4	0,00	93,4	0,00	95,45	15,20
10	Alta	95,1	0,00	95,60	0,00	95,30	0,00
20	Alta	95,8	0,00	96,2	0,00	96,8	0,00
30	Alta	96,20	0,00	97,3	0,00	97,80	0,00

Tabla: 7 Índice de resistencia al impacto en función de los factores significativos presión y características del material arcilloso. Los valores no presentados significan que no presentan resistencia al impacto cuantificable.

Olorunnisola, 2007 ha encontrado valores del IRI de entre el 96.5 – 98.5 % para briquetas fabricadas de desechos de papel que aún con densidades inferiores a 0.450 gr/cm<sup>3</sup> presentan una adecuada resistencia al impacto probablemente debido al efecto de los mecanismos de aglomeración producidos por la pasta de papel.

Dados los resultados encontrados es posible expresar la relación entre los factores que afectan significativamente en este caso el índice de resistencia al impacto a través de una relación de regresión múltiple de forma análoga a la encontrada para las pruebas de resistencia a compresión

$$IRI = 92,0444 + 4,63889*Pr + 1,43333*\% \text{ Aglom} + 0,755556*Actv \quad R^2 = 95 \% \quad [4]$$

Donde: IRI, Índice de resistencia al impacto en por ciento, Pr: Presión aplicada en MPa; % Aglomerante; Actividad del aglomerante

La expresión 4 es consistente con la teoría y con diversos trabajos reportados donde la resistencia se encuentra en relación directa con la presión y otros factores [14, 21, 49].

## 5- Calor específico de combustión (CEC) de los BSC.

Para la caracterización del aserrín se colectan de forma aleatoria los residuos generados en las instalaciones de procesamiento primario y secundario de la madera Jesús López Carmiño y Crescencio Valdés de la ciudad de Santa Clara y Manicaragua respectivamente, en los establecimientos mencionados existe la capacidad de generar  $280 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  de residuos maderables en cada uno. El valor energético de estos recursos permite evaluar aproximadamente en  $378 \text{ GJ año}^{-1}$  el potencial disponible para ser empleado en diversas aplicaciones, en este caso se proyecta fundamentalmente su empleo en la producción de ladrillos de cerámica roja ó arcillas activadas térmicamente

El método empleado para determinar la relación e influencia que ejercen los parámetros de fabricación del sólido densificado sobre el calor específico de combustión (CEC) es el análisis de regresión múltiple, se plantea realizar un diseño factorial fraccionado al no tener en consideración el tiempo de prensado que ya se ha considerado como no significativo a los efectos de las propiedades físicas del densificado, se mantiene dentro del diseño la humedad pues este es un factor de reconocida influencia en el valor calórico de la biomasa [52][

En la tabla 6 se muestran los factores y niveles considerados en este caso El cálculo del calor específico de combustión se realiza según el por ciento constitutivo de los elementos químicos obtenidos mediante el análisis elemental e inmediato caracterizando a las muestras en términos de sus contenidos de humedad, volátiles, carbono fijo, cenizas, se obtiene el CEC al aplicar la ecuación de Dulong – Berthelot [41] el valor promedio del CEC es de  $17.77 \text{ MJ/Kg}$ .

Las normativas consultadas [32] con respecto al CEC plantean para las briquetas fabricadas con altas presiones y en consecuencia de altas densidades un valor de  $18 \text{ MJ/Kg}$ . para la norma de Austria , sin embargo la norma Suiza apunta como el valor mínimo aceptable  $15 \text{ MJ/Kg}$ ., en general las normativas europeas poseen para este parámetro un rango de aceptación amplio que va desde  $15 \div 19 \text{ MJ/Kg}$ .

Las briquetas de baja densidad tienen una mayor dependencia entre el CEC que puedan poseer y los materiales y los procesos mediante el cual son elaboradas. Se reporta para briquetas fabricadas de aserrín y papel un valor del CEC en el intervalo de  $16.2 - 18.1 \text{ MJ/Kg}$ [53]. Según González ,2003 es posible obtener briquetas de paja de caña con un poder calórico de  $17.87 \text{ MJ/Kg}$ . sin embargo, Martirena, 1999 reporta un valor de  $15 \text{ MJ/Kg}$ . teniendo en cuenta la afectación que puede producir la adición de un aglomerante inorgánico.

Dados los resultados promedios encontrados para el cálculo del CEC según los diferentes condiciones de fabricación derivados de la matriz según el diseño de experimento es posible expresar la relación entre los factores que afectan significativamente el CEC a través de una relación de regresión múltiple que describe la interacción ó afectación adicional del CEC en las condiciones de la

aplicación de baja presión y la adición de un aglomerante arcilloso, consecuentemente se plantea la expresión siguiente:

$$\text{CEC} = 17,77 - 0,6625 \cdot \text{Pr} - 0,225 \cdot \text{H} \qquad \text{R} = 94 \% \qquad [5]$$

Donde: CEC, Calor específico de combustión en MJ/Kg.; Pr: Presión en MPa;

H: humedad en Lts H<sub>2</sub>O / Kg. Aserrín.

El ajuste del modelo de regresión múltiple permite describir matemáticamente la relación entre el CEC (MJ/Kg.) y las variables independientes presión y humedad, permitiendo ajustar el pronóstico sobre el cálculo realizado por la ecuación de Dulong – Berthelot a las condiciones de fabricación de los bloques sólidos combustibles. El valor promedio del poder calorífico encontrado con la realización de ensayos térmicos de calorimetría es de 15.92 MJ/Kg.[37] lo que ratifica los resultados expuestos.

Se demuestra ó confirma para los densificados obtenidos en las condiciones especificadas la disminución del CEC con el aumento de la humedad, este proceso en el cual la biomasa mezclada con el aglutinante es sometida a baja presión de compactación logra obtener valores de densidad suficientes para lograr el manejo de la biomasa como un sólido cohesionado y al mismo tiempo obtener valores del calor específico de combustión comparables con combustibles tradicionales para la obtención de ecomateriales u otra aplicación que requiera el uso de energía calorífica generada por procesos de combustión.

Por otra parte el aumento de la presión tiene relación directa con el aumento de la densidad la cual produce el aumento del poder calorífico volumétrico que teniendo en cuenta el valor promedio de la densidad y del CEC puede representar un valor de 10590 MJ / m<sup>3</sup>, no obstante la expresión [5] establece una relación inversa entre la presión y el poder calorífico lo cual es consistente con la teoría y con la práctica donde se demuestra según diversos reportes de la literatura consultada que los materiales sueltos presentan generalmente un poder calorífico superior a los densificados [17, 54] lo cual puede estar asociado a pérdidas en el contenido de lignina u otro cambio en la composición química producida durante el proceso de densificación.

### 5.1- Razón de combustión:

La razón de combustión o velocidad de reacción (VR) (*burning rates* por su designación en ingles) caracteriza la velocidad a la que suceden los diferentes fenómenos relacionados con la oxidación intensa de las sustancias combustibles (biomasa en este caso), argumentando las necesarias consideraciones para el diseño de los sistemas de combustión[46] . Este parámetro dado en gr / min relaciona la cantidad de masa por unidad de tiempo que se transforma como consecuencia de las reacciones de los compuestos combustibles sólidos y volátiles.

El tiempo de combustión puede dividirse en tiempo de secado, tiempo de combustión de las sustancias volátiles y tiempo de combustión del carbono ó parte sólida del combustible (char ó coque) aunque el tiempo de secado puede no tenerse en cuenta si los límites de la humedad de los materiales densificados que se ensayan tienen un valor equivalente, se ha demostrado que el tiempo de combustión en el caso de los densificados de biomasa leñosa esta en relación directa con la procedencia de los materiales constituyentes (especie de árbol, tronco, ramas, etc.) y de igual modo en relación directa con la densidad de los peles y briquetas [33, 54].

Para la determinación de la razón de combustión de las briquetas fabricadas de aserrín con baja presión y la adición de arcilla como aglomerante se ha realizado un experimento complementario del tipo factorial fraccionado, considerando los factores humedad y contenido de aglomerante dada sus significativas influencias sobre propiedades energéticas como el calor específico de combustión y la reconocida afectación que esos factores pueden provocar sobre el mejor desempeño de los combustibles procedentes de la biomasa.

La metodología aplicada para determinar el tiempo de combustión en este caso es el siguiente: se instrumenta con el analizador de gases tipo RBR - ECOM - SG PLUS un combustor de baja temperatura (cocina eficiente), se introducen las briquetas y se comienza a medir el tiempo a partir del momento cuando se inflaman los volátiles con una llama azul resplandeciente alrededor de toda la briqueta y desde el orificio central, confirmando a través del analizador de gases que el proceso se está desarrollando, se considera terminada la combustión cuando el sólido remanente deja de emitir el brillo rojo característico del material ardiente y consecuentemente la temperatura del flujo de gases disminuye bruscamente.

No se realiza en este caso control del contenido de oxígeno en la atmósfera de combustión, sin embargo se realiza a través del dispositivo de abertura en la chimenea el control del flujo de gases el cual es monitoreado junto con la temperatura por el analizador de gases.

En la figura 7 se muestra el gráfico de dispersión con los resultados de este ensayo, se expone el valor de la razón de combustión (VR) en gramos \* minutos<sup>-1</sup> en función de la densidad de cada tratamiento maestro fabricado según la matriz del diseño de experimento.

Los resultados mostrados evidencian la tendencia de la razón de combustión que toma valores en el intervalo desde 95 gr. \*min.<sup>-1</sup> hasta 128 gr. \*min.<sup>-1</sup>, en relación inversa con la densidad de las briquetas y esto a su vez se relaciona con el mayor contenido de aglomerante, que en este caso por ser un material en estas condiciones incombustible, puede retardar el proceso de oxidación de la biomasa (aserrín) pues puede disminuir la interacción de este con el oxígeno.

El análisis estadístico correspondiente demuestra, para las condiciones especificadas, el significativo efecto de la humedad y el contenido de aglomerante sobre la razón de combustión a través de un modelo de regresión lineal con un valor del coeficiente de correlación múltiple del 97 %. Estos resultados son consistentes con la teoría y con reportes de la literatura consultada donde se ha encontrado que la densidad puede ser un factor que incide sobre la velocidad de combustión pues los procesos de difusión e interacción del material oxidante pueden verse limitados.

En ese sentido se reporta para peles de alta densidad (en el entorno de  $1.1 \text{ gr.} \cdot \text{cm}^3$ ) fabricados de diferentes materiales leñosos valores de la relación de combustión en el intervalo de  $130 - 180 \text{ gr.} \cdot \text{min.}^{-1}$  [54], igualmente se demuestra que existe una relación lineal e inversa entre la densidad del biocombustible sólido y la razón de combustión [17].

Chin, (2002), plantea que el tiempo de combustión de las briquetas se incrementa proporcionalmente al contenido de aglomerante y al tiempo de prensado, esto en opinión del autor puede estar relacionado con el aumento de la densidad y la probable disminución de la interacción con el oxígeno y confirma los resultados que se obtienen. No obstante presentar las briquetas una densidad inferior a los peles la relación ó razón de combustión es comparable esto se debe en primer lugar, a que la estructura compacta de los densificados ayuda a una adecuada conducción del calor[44] y en opinión del autor al efecto inhibitor que aglomerantes inertes como la arcilla pueden producir sobre la combustión, permitiendo al combustible arder por un periodo de tiempo mayor favoreciendo el proceso que se esté llevando a cabo en los sistemas de combustión.

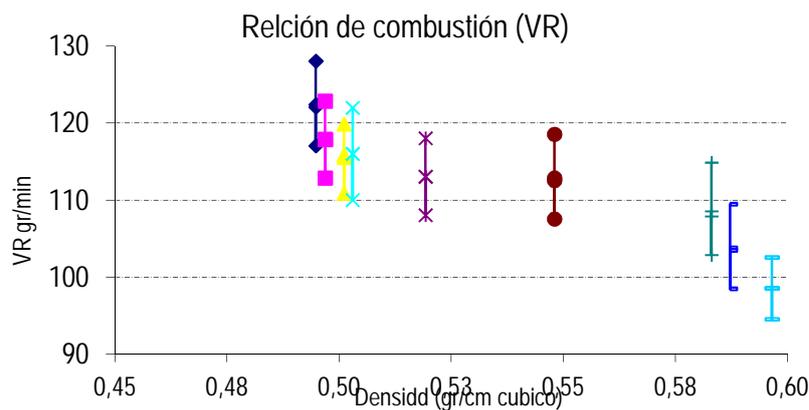


Figura 7: Determinación de la razón de combustión

## 5.2-Cinética de la combustión. Análisis térmico por Calorimetría.

Se realizan estudios adicionales de análisis térmico por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), esta es una técnica cuantitativa que brinda información termodinámica relacionada con cada paso de la descomposición térmica del

material analizado e indica el intervalo de temperaturas de óptimo aprovechamiento energético del recurso,

Para realizar los análisis mediante DSC se ha utilizado el calorímetro Mettler-Toledo DSC822, en el que se calientan las muestras en una atmósfera dinámica de oxígeno (50ml/min) barriendo un rango de temperaturas de 25-600°C a una velocidad de 10°C/min. Teniendo en cuenta los resultados anteriores y el costo de los ensayos de calorimetría se deciden ensayar diferentes tratamientos muestrales donde se tienen en cuenta los factores que se ha determinado tienen en las condiciones dadas una influencia significativa

En la figura 8 se muestra una curva típica del resultado del análisis de calorimetría diferencial de barrido realizado a un BSC, se identifica claramente una pequeña primera etapa endotérmica hasta el entorno de los 130 - 140 °C asociada a la pérdida de humedad interna de la biomasa densificada y probablemente al proceso de eliminación de la humedad intersticial dentro de las capas del material arcilloso.

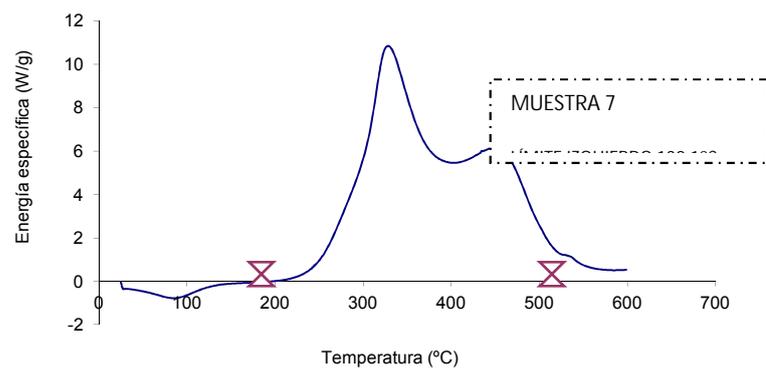


Figura: 8 Características térmicas de los BSC mediante técnicas de calorimetría

En la tabla 7 se presenta un resumen de los principales puntos de inflexión encontrados para los diferentes tratamientos ensayados incluyendo resultados de ensayos realizados a briquetas de alta densidad distribuidas comercialmente para su uso domestico e industrial.

Los resultados entre una briqueta y otra no tienen una diferencia notable, sin embargo puede señalarse que en general los materiales densificados terminan el proceso de combustión a una temperatura más alta que el aserrín suelto y en el caso de los densificados con la adición de material arcilloso como aglomerante el intervalo de la zona exotérmica es mayor que en el caso del material suelto.

Tabla: 7: Puntos característicos, ensayo DSC \* Briquetas comerciales [1]

Muestra	Zona Endotérmica	Zona Exotérmica
CARYSE*	0-183°C	183-551°C
BRIHER*	0-206°C	206 - 532°C
Aserrín	0 - 130°C	130 – 485 °C
T1	0 -188°C	188 - 593°C
T2	0 -156°C	156 - 596°C
T7	0 -138°C	138 - 585°C
T8	0 -134°C	134 - 590°C

## 6- Eficiencia energética del proceso de combustión del biocombustible.

El uso eficiente de la energía del combustible en los diferentes dispositivos de combustión está determinado por diversos factores que repercuten sobre la combustión completa del combustible y el mejor aprovechamiento del calor generado, por tanto la mejora de la eficiencia energética está asociada a la disminución de las pérdidas para con ello obtener mejoras en los índices de consumo específico de combustible y la consecuente mejora medioambiental

Como criterio de evaluación de la eficiencia energética del BSC, se realiza en una aplicación como es la quema de ladrillos su comparación con la leña, con respecto a la transformación puzolánica de los residuos no existen aun patrones de comparación. El municipio Manicaragua en la provincia Villa Clara, resulta un gran productor tradicional de ladrillos rojos cocidos, en la Cooperativa Ramón Bernal del propio municipio se encuentra ubicado el horno evaluado en el marco de este estudio, el mismo posee capacidad para 3500 - 4000 ladrillos por quema.

El cálculo teórico del consumo de energía necesario para la transformación de la arcilla en ladrillos rojos cocidos se considera 0.81 MJ/kg. [55] por lo tanto para los 3700 ladrillos de capacidad nominal del horno típico es necesario un consumo mínimo de 11089 MJ.

En la tabla 8 y tabla 8.1 se muestran los resultados del análisis inmediato por tipo de madera de las empleadas para la quema de ladrillos empleada y la composición de la carga típica de combustible

En la figura 9 se muestra gráficamente la influencia de la carga de combustible en la temperatura para diferentes quemas experimentales, así como las mediciones realizadas durante el proceso de quema empleando el bloque sólido.

Se estima como las curvas de temperatura con carga del bloque sólido alcanzan valores de pendientes más pronunciadas que en el caso del empleo de la leña, además se aprecia una trascendente diferencia en la combustión al lograr disminuirse el consumo total de combustible en la quema cuando se emplea el bloque sólido combustible

Tipo / elementos en %	Humedad	Carbono fijo	Volátiles	Cenizas
Guasima	44,5%	11,0%	43,4%	1,2%
Guanina	37,7%	10,5%	51,1%	0,7%
Marabú	35,7%	10,9%	52,5%	0,9%
BSC	9,2%	3,1%	72,9%	14,8%

Especie	%	Kg.	PCS (kJ/Kg)	PCI (kJ/Kg)	Energía disponible (MJ)
Guásima	15%	465	12.903	8.720	4.056
Guanina	25%	775	14.273	9.735	7.546
Marabú	60%	1861	14.723	10.139	18.863
Total	100	3101	14.338	9.825	30.466

De los estudios realizados a la leña empleada y al BSC se infiere que el trazado de las curvas puede estar influenciado por el contenido superior de humedad de la leña verde que implica un mayor consumo del calor generado para eliminar esta humedad.

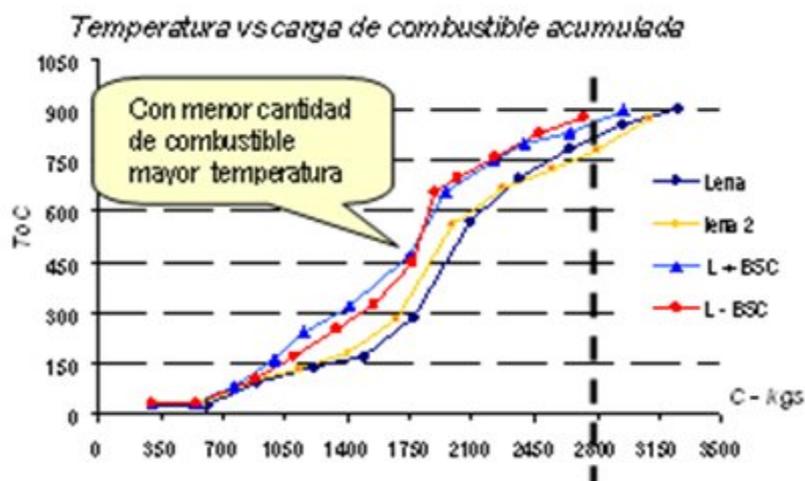


Figura: 9 Variación de la temperatura con la carga de combustible

Complementariamente esta situación puede estar también relacionada con el mayor volumen de gases generados al ser utilizados los BSC dado probablemente por los productos de las reacciones de los componentes del material arcilloso y también por el efecto retardador sobre las reacciones de combustión que produce la densidad del BSC en relación con el contenido de material arcilloso.

En la tabla 9 se comparan los resultados de diferentes quemas, en la columna "Hipotética" se muestran los cálculos del consumo de combustible necesario para alcanzar tan alto valor de eficiencia, a criterio del autor resulta imposible mejorar la eficiencia del proceso con la sola disminución del gasto de combustible.

Con el empleo de la alternativa energética propuesta es posible en promedio aumentar la relación ladrillos/kg de combustible desde 1.1 a 1.4, esto se debe a que el calor necesario para secar el combustible es menor que cuando se emplea solamente leña, acrecentando en consecuencia la cantidad relativa de energía directamente utilizada en el proceso de transformación de los ladrillos, relacionado además con el efecto retardador que produce el material arcilloso durante la combustión al disminuir la velocidad de reacción del biocombustible.

Tabla 9 Mediciones y cálculo del consumo energético específico.						
Variables		U/M	Valor			
1	Combustible	U/M	+BSC (P7)	Hipotética	Leña (P2)	
2	Consumo bruto de Combustible	kg	2728	1920	3250	
3	Consumo relativo de leña	%	59%	50	100	
4	Consumo relativo de BSC	%	41,0	50	0	
5	Energía total por quema	MJ	28997	22036	30976,25	
6	Consumo específico de combustible	kg unid / kg combust	5.21	7.2	4.21	
7	Eficiencia energética del horno	%	38%	0,50	36%	
8	Pérdidas	%	62 %	50 %	64%	
3.7 kg peso promedio de los ladrillos verdes justo antes de entrar al horno						
3.13 kg peso promedio de los ladrillos quemados.						

En cambio la mayor velocidad con que libera la energía calorífica la leña, hace que esta no sea íntegramente aprovechada en el horno, pues el coeficiente de absorción del calor del ladrillo establece límites en su difusión a través de su masa volumétrica, de igual modo el mayor volumen de gases generado durante la combustión del BSC puede producir un mejor intercambio de calor en toda la columna del horno, lo que puede disminuir la falta de isoterminia característica de este tipo de instalación[56].

En las quemas se realizan ensayos físico-mecánicos de campo al ladrillo fabricado (resistencia y sonido), así como el control visual al 100% de ladrillos correspondientes a cada quema, no existiendo ladrillos sobre quemados, al observarse que los ladrillos tienen un color rojo marrón indicación de una adecuada quema, sin agrietamientos ni deformaciones, de igual forma los ensayos de laboratorio concluidos demuestran no existir afectaciones a la calidad del ladrillo por el cambio de la fuente energética.

Se toma como referencia para la evaluación de los ladrillos fabricados en los diferentes regímenes de combustión las normas cubanas NC – 359: 2005 que define los métodos de ensayos y la NC – 360: 2005 que define los requisitos ó límites permisibles en cada caso.

Se realizan en correspondencia los ensayos para determinar las dimensiones, la resistencia a compresión y la adsorción, en cada caso se toman muestras aleatorias en la cantidad establecidas por las normas verificando a su vez que la cantidad de muestras se corresponde con la estadísticamente necesarias para garantizar un 95 por ciento de significación de las respuestas según la desviación típica encontrada.

Según el punto 5.1 de la NC – 360 la resistencia a compresión de los ladrillos macizos debe superar el valor de 10 MPa lo cual se corresponde con los resultados alcanzados, de igual forma la adsorción de agua debe encontrarse en los valores de 8 – 18 %, en este caso se consideró ensayar hasta el doble de ladrillos considerados por la norma dado la influencia que puede tener una mala cocción sobre la desviación de este parámetro encontrándose una media del 13.88 % lo que es un valor adecuado.

Los ladrillos manuales y rugosos, así como las piezas especiales, quedan exentos de cumplir las tolerancias dimensionales, (punto 5.4.2) no obstante se verificó la planicidad y otros criterios dimensionales siendo satisfactorios

En el caso de la adsorción el análisis estadístico de los resultados permite considerar los estadígrafos asimetría típica y curtosis dentro del rango -2 al 2 indican distribución normal de la función lo que permite realizar la comparación de las medias y las varianzas. De particular interés resulta el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias el cual se extiende desde -0.0459 hasta 0.9342 dado que el intervalo contiene el valor 0.0 no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95 por ciento de significación.

El mejor valor de eficiencia energética reportado para estas tecnologías del ladrillo rojo cerámico alcanza el 50 % [57], sin embargo es posible analizar diversas vías para disminuir las pérdidas que se producen por incombustión química, incombustión mecánica y otras.

Sobre la base de las mediciones de la temperatura y volumen de los gases de salida, el consumo total de combustible y su análisis inmediato, la energía total disponible, la determinación del volumen de cenizas ó residuos de la combustión y la fracción no quemada en la parrilla, es posible determinar las pérdidas por el método indirecto, lo cual permite evaluar la naturaleza de las pérdidas de energía que ocurren en el horno durante el proceso de combustión del conglomerado biomasa + material arcilloso.

Este método resulta adecuado para elaborar recomendaciones que puedan disminuir de forma concreta las pérdidas [16], precisando la fuente de la baja eficiencia en el horno ladrillero, en la tabla 10 se presentan los resultados de la determinación de las pérdidas.

**Tabla 10 Determinación de las pérdidas por el método indirecto**

<b>Pérdida de calor con los gases de salida. (q<sub>2</sub>)</b>	28,12 %
<b>Pérdida de calor por incombustión química. (q<sub>3</sub>)</b>	1,8 %
<b>Pérdida de calor por incombustión mecánica. (q<sub>4</sub>)</b>	5,2 %
<b>Pérdida de calor por radiación al medio ambiente. (q<sub>5</sub>)</b>	12,4 %
<b>Otros</b>	33,73

El análisis de los resultados expuestos evidencian que la mayor fuente de pérdidas se origina en los gases de salida y la radiación al medio ambiente, la mejora del aislamiento térmico de paredes y re inyectar los gases calientes pueden acrecentar la eficiencia del proceso.

Las pérdidas por incombustión están más relacionadas con las propiedades del combustible y el propio proceso de oxidación del mismo, estas pérdidas representan un valor relativamente bajo y podrían disminuirse aún más mejorando la interacción con el aire comburente.

Al generar la nueva fuente de calor un nivel superior de cenizas al que produce el combustible tradicional, se exige remover con mayor frecuencia los residuos en el interior de la cámara de combustión, por lo que se recomienda adecuar el diseño de las parrillas del horno para mejorar su capacidad de evacuación de las cenizas del bloque sólido, este principio unido al calentamiento inicial necesario del horno son los aspectos más cardinales que limitan en la práctica el empleo de una cantidad intensiva y relativamente mayor del BSC.

El aumento de la eficiencia energética en la producción de ladrillos de barro cocido producto del empleo del BSC, puede contribuir a disminuir la tala de bosques, potenciar el reciclaje de desechos maderables y la obtención de cenizas con potenciales propiedades puzolánicas con relevantes ventajas desde el punto

de vista ecológico que estas acciones en el sector de la obtención de los materiales de construcción pueden representar.

No obstante la relativa baja eficiencia del proceso y el valor de las pérdidas que ocurren, el consumo específico de combustible en las evaluaciones realizadas es comparable con los mejores valores reportados internacionalmente para estas tecnologías [55, 57, 58].

Según los resultados de las quemas experimentales se demuestra que es posible disminuir el consumo total de combustible (hasta un 15 -20% en peso del valor promedio habitual) con la consiguiente mejora de la eficiencia energética del horno con sustituciones relativas de la leña por la alternativa energética representada por los BSC en el entorno del 35 – 50%.

El uso de los BSC permite a partir de desechos de la elaboración de la madera contar con un combustible que puede resultar más eficiente que la madera cortada en el monte lo que puede mejorar la gestión de los productores sin afectaciones a la calidad del producto.

Adicionalmente a los aspectos discutidos el autor del presente trabajo sustenta que el uso de estos portadores supone ventajas tales como:

- El empleo de los BSC permite rellenar zonas no cubiertas por la leña en los hornos con un mejor control del fuego, disminuyendo la falta de isoterma que se produce en este tipo de instalación.
- El BSC posee una humedad interna menor que la leña usualmente utilizada en estas instalaciones disminuyendo las pérdidas que se producen para eliminar la humedad de la leña.
- El efecto retardador de la arcilla sobre la combustión puede permitir la disminución de las pérdidas de calor.
- Al parecer las reacciones que produce el tratamiento térmico sobre el material arcilloso incrementa el volumen de gases probablemente por la descomposición de los carbonatos, mejorando el intercambio de calor en el horno lo cual puede contribuir a la mejora de su eficiencia.
- El uso de los BSC implica la disminución en el empleo de la leña y con ello la disminución de la tala de los bosques, la reutilización de los desechos del tratamiento de la madera elimina el problema ambiental relacionado con su adecuado manejo.

## **7- Consideraciones medioambientales. Determinación de las tasas de emisiones.**

La investigación a partir de diversas fuentes (Estadísticas provincial, ANAP, Gobierno local) permite establecer la producción aproximada de ladrillos en 280 mil unidades / año lo que podría suponer un consumo de leña estimado en 230

toneladas en el año 2008 en el municipio Manicaragua según la información de los más importantes productores de ecomateriales en la región. [59].

Se estima que es necesario talar una hectárea de bosque para obtener 20 toneladas de leña[13], la producción artesanal anual de ladrillos en Cuba en el año 2011 está en el entorno de las 11 millones de unidades por lo que cálculos conservadores señalan la destrucción solo por este concepto de 811 ha / año de áreas boscosas[58], de ahí la importancia de reciclar los residuos ó desechos que permitan su valorización energética.

La base de datos internacional FIRE 6.25 establece factores de emisiones teniendo en cuenta aspectos tales como el dispositivo concreto donde ocurre la combustión, combustible específico empleado y su calidad así como la industria que se evalúa, por supuesto en esta extensa base de datos no aparece reflejado el caso de la producción artesanal de ladrillos, menos aún con el empleo de bloques sólidos combustibles aunque si aparece el caso del empleo de leña o desechos de la madera, densificados y sin densificar, para la producción de vapor.

El objetivo en este epígrafe es la obtención de los índices de emisiones para la combustión de los bloques sólidos combustibles en el caso de la actividad artesanal de producción de ladrillos, en la tabla 11 y 11.1 se muestra el resultado de la determinación de las tasas de emisión para el CO, NO, NO<sub>2</sub>, y SO<sub>2</sub>, estos parámetros dependen de las propiedades de la mezcla de gases de escape que se producen durante la combustión así como del flujo promedio de combustible.

**Tabla 11. Parámetros determinados para el cálculo de la dispersión de las emisiones**

Tasas de emisión.		Leña	+ BSC
Constituyente	U/M		
CO	g/s	1,19	2,92
SO <sub>2</sub>		0,000	0,000
NO <sub>2</sub>		0,00	0,00
<b>NO</b>		0,05	0,08

**Tabla 11.1: Parámetros determinados para el calculo de la dispersión de las emisiones**

Factores de emisión		Leña	+ BSC
Constituyente	U/M	Valor	Valor
CO	g/kg <sub>comb</sub>	13,28	30,82
NO		0,58	0,86
CO <sub>2</sub>	kg/kg <sub>comb</sub>	1,075	1,161
CO	g/Unidad*	11,13	25,83
NO		0,48	0,72
CO <sub>2</sub>	kg/Unidad	0,901	0,973

**\*Se refiere al valor ó cantidad de contaminante por ladrillos fabricados**

Es de señalar entre las ventajas del uso de la biomasa en general la baja emisión de gases contaminantes en relación con los combustibles fósiles responsables mayormente del calentamiento global del planeta ( $\text{CO}_2$ ) y de la lluvia ácida ( $\text{SO}_2$ ), ( $\text{NO}_x$ ).

Con el objetivo de validar el empleo de los BSC a partir de las mediciones de las emisiones gaseosas se modela la dispersión de los principales elementos contaminantes que se presentan, es empleado el Software ISCST3, este modelo se utiliza para el análisis de la dispersión de contaminantes, desarrollado por la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA) para apoyar las opciones de modelación de emisiones, es utilizado para evaluar concentraciones y/o deposiciones de flujos de una variedad amplia de fuentes asociadas a la industria y el transporte.

En el **anexo 1** se presentan los resultados de la estimación de la dispersión de los contaminantes importantes ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ), se determina un valor máximo puntual para el  $\text{NO}_x$  de  $9.38 \mu\text{g} / \text{m}^3$  muy inferior al valor límite ( $40 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ) según la NC 39: 1999. De igual modo el valor máximo encontrado para las emisiones de  $\text{CO}$  es  $336.10 \mu\text{g} / \text{m}^3$  lo que resulta muy inferior al límite máximo permisible ( $3000 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ).

En ninguna de las variantes de combustible empleado, la concentración calculada excede el valor que establece como límite la norma cubana, aunque como era de esperarse cuando se usa leña + BSC la concentración de  $\text{CO}$  es mayor dado por la mayor tasa de emisión de este contaminante al parecer por una insuficiente relación aire – combustible.

### **Conclusiones parciales**

En esta etapa se han investigado las condiciones de fabricación de los Bloques Sólidos Combustibles con el supuesto inicial principal de lograr una tecnología que implique el empleo de baja presión de compactación (menor ó igual a 5 MPa) y la adición de material arcilloso como aglomerante, como conclusiones parciales se arriba a lo siguiente:

Los residuos de aserrín son una prometedora fuente de energía no suficientemente aprovechada que de conjunto con los yacimientos arcillosos disponibles puede proveer para diferentes aplicaciones un sólido combustible de adecuadas características con un potencial energético disponible de  $378 \text{ GJ año}^{-1}$  solo en la región de estudio.

Los resultados expuestos demuestran la factibilidad técnica del empleo del material arcilloso en su función aglomerante para la densificación de aserrín en las condiciones investigadas, con la aplicación de baja presión, hasta 5 MPa, se obtiene una densidad (DR) promedio del aglomerado biomasa – arcilla de  $0.596 \text{ gr./ cm}^3$ . La relación funcional de predicción de la densidad (DR) demuestra el significativo efecto que ejercen los factores presión, humedad y contenido de

aglomerante sobre la densificación en los rangos estudiados, con una relación directa y un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) superior al 95%.

La influencia de las propiedades físico mineralógicas del material arcilloso sobre el proceso de densificación se establece a través de los ensayos de durabilidad de las briquetas, determinándose la correlación de parámetros tales como la razón de densidad (RD = 45 -17 %), la resistencia a compresión (RC= 0.5 -1.2 MPa) y el índice de resistencia al impacto (IRI = 85 -97.5 %) con la actividad del aglomerante, en consecuencia la mayor estabilidad del conglomerado y las mejores propiedades de las briquetas resultan al ser elaboradas con material arcilloso de media – alta actividad y estructura predominantemente mica - montmorillonítica.

La propuesta de densificación de los residuos investigados en este trabajo logra una solución apropiada para ser aplicada en países en desarrollo a partir de diversas fuentes de material arcilloso con un mínimo costo inicial de inversión.

El CEC calculado a partir de los análisis químicos realizados muestra un valor promedio de 17.7 MJ/Kg. valor comparable con el poder calórico de diferentes combustibles procedentes de la biomasa empleados para la obtención de energía para la producción de ecomateriales con un adecuado rendimiento.

Los estudios térmicos confirman el adecuado potencial como biocombustible del aserrín densificado con la adición de aglomerante arcilloso y la aplicación de baja presión, evidenciando que el proceso de combustión ocurre en comparación con el material suelto de una forma más lenta y se extiende hasta el entorno de un 15 - 20 por ciento de temperatura más alta.

### **9- Transformación puzolánica de la ceniza del BSC. Método experimental.**

Por su amplia variedad, disponibilidad y relativa facilidad de tratamiento los minerales arcillosos son de gran interés como adiciones puzolánicas, sin embargo en su estado natural debido a la presencia de estructuras cristalinas estables tienen baja reactividad puzolánica.

La reactividad puzolánica de los materiales arcillosos depende de diversos factores, entre ellos el volumen relativo de los minerales de la arcilla presentes en las muestras del suelo, el tamaño de partícula, la morfología y textura de la superficie del grano, la facilidad de disolución de la sílice en un ambiente alcalino y su composición química y mineralógica [22, 28].

Las arcillas son materiales que se modifican estructuralmente por la acción del calor al ser sometidas a temperaturas en el entorno de 500°C – 900°C, el proceso depende de la composición químico - estructural de los minerales y de las condiciones concretas de tratamiento térmico al que se somete el material arcilloso. [60].

El proceso de modificación térmica de arcillas puede requerir de cantidades importantes de energía lo que dependiendo de la escala podría hacer inviable el

proceso desde el punto de vista económico y ecológico, en este sentido la densificación de biomasa lignocelulósica con la aplicación de baja presión y la adición de hasta el 30 % de material arcilloso es propuesto como biocombustible en la producción de materiales de construcción y fuente de arcillas reactivas provenientes de su combustión (ARPBSC).[27]

El proceso de incineración de biomasa conjuntamente con materiales arcillosos en muflas a nivel de laboratorio ha demostrado que cuando el proceso ocurre a temperaturas en el entorno de los 900°C, con un enfriamiento brusco y la adición o no de activadores químicos logra obtener material puzolánico de alta reactividad [26, 61], este hecho abre perspectivas para la investigación de MCS sobre la base de la modificación térmica del material arcilloso a partir del esclarecimiento de las condiciones de combustión de la biomasa densificada.

Con este fin, ha sido construido un horno experimental en áreas de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas donde se pretende en función del acondicionamiento del proceso de combustión (relación combustible - atmósfera del horno) obtener una adecuada reactividad puzolánica de las cenizas.

Se utiliza el término “ combustión” para significar que una vez que se ha logrado estabilizar la combustión en el horno no se aplica ninguna otra fuente de energía que no sean los BSC, lográndose a partir del calor que desprende su oxidación intensa el entorno de alta temperatura que propicia que al ser introducidos los conglomerados de material arcilloso + biomasa se calienten, produciendo rápidamente el desprendimiento e inflamación de los volátiles hasta la total extinción del combustible en función de las condiciones del horno.

La composición y transformación de las propiedades de los residuos sólidos y gaseosos generados a partir de las condiciones en que ocurre el proceso de combustión de la biomasa están en relación directa con las propiedades físico – mecánicas y físico – químicas del combustible, así como la interacción compuestos inorgánicos volátiles - sólido volatilizado dados por el flujo de aire actuante en la atmósfera del horno. [15, 18].

Sobre esta base el objetivo es la obtención de la transformación puzolánica de la ceniza que se produce por la combustión del conglomerado de biomasa lignocelulósica mezclada y densificada conjuntamente con material arcilloso, determinando la relación del acondicionamiento del conglomerado biocombustible y la transformación puzolánica de su ceniza al ser sometido a tratamiento térmico intenso el material compuesto densificado sujeto a combustión.

En general la metodología experimental aplicada consta de los siguientes aspectos:

1<sup>o</sup>: Estudios de la influencia del contenido de aglomerante en el BSC sobre la temperatura promedio y máxima que se alcanza en la cámara del horno y a su

vez el efecto sobre la transformación puzolánica del material arcilloso componente del aglomerado.

2<sup>do</sup>: Evaluación del flujo de aire y su efecto sobre la calidad del proceso de oxidación del BSC visto a través de los productos gaseosos del proceso y la aparición de in quemados o productos perjudiciales para el rendimiento de la transformación puzolánica de los residuos.

3<sup>o</sup>: Estudio del efecto de las condiciones de combustión sobre la tendencia a obtener residuos con composición, morfología y granulometría que propicien las propiedades puzolánicas de os residuos.

4<sup>to</sup>: Especificación de modelos que expliquen la tendencia y correlación de diferentes variables dependientes e independientes que se involucran en el proceso en relación con el contenido amorfo de sílice en los residuos de la combustión del BSC.

5<sup>to</sup>: Estudio de la evolución de pastas y morteros fabricados con los residuos de la combustión, evaluando finalmente su resistencia mecánica y adicionalmente el mejoramiento de su reactividad puzolánica mediante molturación del material.

Finalmente las conclusiones sobre los resultados de los estudios realizados.

### **9.1- Materiales y métodos.**

La obtención de MCS parte del acondicionamiento del conglomerado material arcilloso + biomasa lignocelulósico y la determinación del efecto del aglomerante sobre las propiedades del BSC y su combustión para obtener la transformación puzolánica de los residuos.

Atendiendo a la tendencia de los resultados de la densidad relajada, la razón de densidad y durabilidad de los BSC fabricados con material arcilloso de baja actividad los cuales no cumplen los requisitos de calidad esperados, se evalúa la transformación puzolánica de los residuos procedentes de los BSC fabricados con material predominantemente montmorillonítico procedente de Manicaragua, lo cual garantiza su adecuado manejo como sólido combustible.

Las briquetas son fabricadas según el procedimiento descrito anteriormente para obtener un 10, 20 y 30 % de material arcilloso en su composición.

Las quemas se realizan en un horno experimental diseñado al efecto, el mismo es inicialmente calentado con leña durante 45 – 60 minutos, al lograrse una temperatura estable superior a los 300 °C se retiran las cenizas provenientes de la leña y se alimenta a intervalos de 30 – 40 minutos con grupos de 10 -15 briquetas de análoga densidad y velocidad de combustión, con igual flujo de aire, se toman mediciones de la temperatura y emisiones gaseosas lo cual permite

evaluar la calidad de la combustión y las consecuencias sobre los residuos del proceso.

En los experimentos realizados el flujo de aire es modificado mediante un dispositivo de regulación en la chimenea, estableciendo dos situaciones diferentes, con la compuerta del cenicero y el dispositivo de regulación abierto al 100 % de sus posibilidades para obtener el máximo flujo de aire, en segundo lugar con el dispositivo en posición tal que permita reducir el 50 % del flujo de aire a través del horno.

Mediante métodos de asociación estadística se determina la tendencia en la correlación de diversos factores determinando su coeficiente de correlación para el más alto nivel de significación posible lo cual permite estimar y contrastar los parámetros del modelo correspondiente dada la influencia para diversas variables respuestas de los factores contenido de aglomerante y flujo de aire.

Para la evaluación de las cenizas activadas térmicamente procedentes de la combustión de los BSC (ARPBSC) se utiliza el método unificado descrito en la literatura consultada[5], lo que requiere la realización de ensayos tales como, fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de rayos X (XRD) y evaluación rápida de la actividad puzolánica[62]. Las muestras para cada ensayo se preparan en cada caso según el material disponible y las exigencias de los instrumentos empleados.

En particular las pastas se preparan con una proporción 70: 30 en valor porcentual donde la mayor cantidad es el preparado puzolánico cal - ceniza y el valor menor corresponde al cemento Pórtland (CP: CPO); Otro aspecto de interés considerado para la fabricación de las pastas es la proporción Cal / Si amorfo que se establece 1:5, garantizando la existencia de suficiente hidróxido de calcio disponible para la reacción puzolánica.

Las pastas son directamente fabricadas con la adición del material residual de la combustión del BSC (ARPBSC) el cual es cribado a través de un tamiz de 0.25 mm, otras sin embargo se obtienen a partir de ceniza sometida a modificación de su granulometría, haciéndola pasar durante 2 horas por un molino de bolas.

Los morteros son preparados en una proporción aglomerante: arena de 1: 3 teniendo el aglomerante la misma consideración en cuanto a sus proporciones que en el caso de la preparación de las pastas.

## **9.2-Diseño de experimento.**

En esta etapa del trabajo la variable dependiente transformación puzolánica de la ceniza resultante del proceso de combustión del aglomerado biomasa lignocelulósica + material arcilloso está representada por el contenido amorfo del

material silicio, lo cual está en función de los factores a controlar para alcanzar adecuada reactividad puzolánica.

La inclusión de los factores y sus niveles correspondientes se decide sobre la base de trabajos anteriores realizados en el CIDEM por el autor en colaboración con otros investigadores [8, 40, 63] así como resultados reportados en la literatura consultada.[17, 54] .

Para el acondicionamiento del proceso se consideran 2 factores independientes de interés, a saber, el contenido de material arcilloso (CA) que favorece las propiedades físico mecánicas del BSC, y el flujo de aire (FA) que determina la interacción de la cantidad de aire que participa de una forma u otra en la regulación del proceso de combustión y probablemente en las características de las cenizas, se determinan diversas variables respuestas y la estimación de la correlación entre estas y la tendencia en el comportamiento de los factores sobre la transformación puzolánica de los residuos de la combustión.

La calidad de los densificados de biomasa viene dada en primer lugar por su PCS, su densidad, contenido en materia mineral, humedad y friabilidad [33], sin embargo en esta etapa, luego de dar por aceptadas las adecuadas propiedades físico mecánicas y físico químicas según el proceso tecnológico propuesto, se maximiza como criterio de aceptación la obtención de adecuadas propiedades puzolánicas en los residuos en función de los factores controlados. Es posible montar corridas experimentales para la determinación de la mejor combinación de los factores presentes, correlacionando la característica de calidad del BSC referida a la exigencia en cuanto a la transformación puzolánica de los residuos de la combustión.

En la tabla 12 se muestran los factores y la matriz que se deriva de la combinación de los niveles aplicados considerados para la evaluación de la transformación puzolánica de los residuos provenientes de la combustión del BSC, se decide en ese sentido utilizar un diseño factorial con 6 corridas experimentales y la aplicación de un modelo de regresión lineal del tipo  $Y = \alpha_1 + \alpha_2 X + \beta D$  [64].

Diversos autores [22, 26] señalan como factores condicionantes en la modificación de las propiedades de los residuos de la combustión provenientes de la biomasa, la composición química estructural junto a elementos no combustibles que participan en el proceso, u algunos elementos aditivos que pueden favorecer la transformación puzolánica.

Otros autores [5, 65], señalan la temperatura como variable de interés, sin embargo a criterio del autor en las condiciones experimentales propuestas la temperatura es un factor difícil de controlar dentro de rangos específicos, existiendo por otro lado relación directa entre el flujo de aire y el coeficiente de exceso de aire lo que determina la dinámica del proceso, de ahí que las variables

independientes *CA* y *FA* se han encontrado como las más importantes frente al objetivo planteado.

Se acoplan al horno instrumentos para medir emisiones gaseosas ( $CO$ ,  $CO_2$ , exceso de aire, etc.) y temperatura, puesto que las características del BSC como combustible pueden determinar el exceso de aire a utilizar, se considera en el diseño del horno variar el flujo de aire mediante una válvula reguladora, verificando como estos factores influyen en la activación térmica de la arcilla presente en los residuos de la combustión del aglomerado.

En los experimentos el flujo de aire (*FA*) es modificado mediante el dispositivo de regulación ubicado en la base de la chimenea, estableciendo dos niveles para esta variable cualitativa , alto ( $H = 1$ ) y bajo ( $L = 0$ ) dado por las situaciones siguientes, con la compuerta del cenicero y el dispositivo de regulación abierto al 100 % de sus posibilidades para obtener un máximo flujo de aire, en segundo lugar con el dispositivo en posición tal que permite reducir el 50 % del flujo de aire a través del horno.

Tabla 12 Diseño de experimento tipo factorial para considerar las condiciones de combustión de los BSC						
Factores				Matriz de combinación de los niveles de los factores		
	Material	CA	FA	Material	CA	FA
1	MAO	10	L	-1	-1	-1
2	MAO	10	H	-1	-1	1
3	MAO	20	L	-1	0	-1
4	MAO	20	H	-1	0	1
5	MAO	30	L	-1	1	-1
6	MAO	30	H	-1	1	1
7	MAF	10	L	0	-1	-1
8	MAF	10	H	0	-1	1
9	MAF	20	L	0	0	-1
10	MAF	20	H	0	0	1
11	MAF	30	L	0	1	-1
12	MAF	30	H	0	1	1
13	MAM	10	L	1	-1	-1
14	MAM	10	H	1	-1	1
15	MAM	20	L	1	0	-1
16	MAM	20	H	1	0	1
17	MAM	30	L	1	1	-1
18	MAM	30	H	1	1	1

MAO, Material arcilloso caolinitico, MAF, material arcilloso de actividad intermedia y composición Illita- montmorillonitica, MAM, material arcilloso de composición preponderantemente montmorillonitica – caolinitica.CA. Contenido de aglomerante en por ciento.FA, Flujo de aire H, alto, L, bajo.

## **10- Obtención en horno experimental de cenizas procedentes del BSC.**

El proceso térmico al que es sujeto la arcilla en los hornos para obtener ladrillos puede proveer a este material de adecuadas propiedades puzolánicas en función del grado de finura que adquiere tras su molienda, sin embargo el procedimiento desde el punto de vista económico podría ser no muy conveniente por el gasto de energía adicional necesaria para pulverizar los ladrillos.

Se reporta la experiencia acumulada en la explotación de un horno ó incinerador de baja tecnología para la obtención de ceniza con actividad puzolánica procedente de paja de caña (SCSA) en condiciones controladas de combustión (Vg. temperatura y tiempo de residencia) [66], encontrando una fuerte influencia de la intensidad del flujo de aire en la temperatura que se alcanza en diversos puntos del incinerador, pero sin determinar la relación con la preparación inicial del material que se quema, en general este dispositivo al igual que otros combustores reportados por diversos investigadores [67, 68], no han sido exitosos por problemas de diseño, costo y operación.

En ese sentido se construye un pequeño horno cuyo diseño se realiza aplicando conceptos de semejanza térmica y geométrica a partir de hornos artesanales de fabricación de ladrillos con carga térmica específica de la parrilla en el entorno de los 180 KW/m<sup>2</sup>. En la figura 10 se muestra el esquema del horno experimental construido en instalaciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Dado que el objetivo es obtener arcilla con adecuada reactividad puzolánica procedente de la combustión del BSC, es de interés abordar la relación del material arcilloso con el acondicionamiento y combustión del aglomerado resultante del proceso tecnológico propuesto.

El empleo de arcillas como puzolanas está en relación directa con las características del yacimiento del cual es extraída la materia prima y el proceso de su activación, dada la complejidad de las estructuras de las arcillas es práctica habitual particularizar y profundizar en el estudio del potencial de cada fuente, máxime si se añade su influencia sobre la densificación de la biomasa y las condiciones en un horno concreto para la combustión del BSC.

El residuo sólido que queda después de la combustión está constituido en este caso por la ceniza procedente propiamente de la biomasa, una parte de esta que no se quema y además los minerales no combustibles provenientes fundamentalmente del material arcilloso los cuales pueden resultar térmicamente modificados con potencial mejora de su reactividad puzolánica.

Los resultados anteriormente expuestos en cuanto al efecto del material arcilloso sobre las propiedades físico – mecánicas del conglomerado demuestran que resulta de adecuadas cualidades para la aglomeración de la biomasa el material arcilloso con media - alta actividad (cohesividad), la arcilla procede de la cooperativa Ramón Bernal, ubicada en el municipio Manicaragua, Villa Clara,

Cuba, a solo unos kilómetros del macizo montañoso Escambray y aproximadamente a 1 kilómetro de la margen izquierda del río Arimao, posee adecuadas cualidades en este sentido dadas por su composición mineral múltiple preponderantemente montmorillonítica caracterizada exhaustivamente en los primeros acápite del presente trabajo.

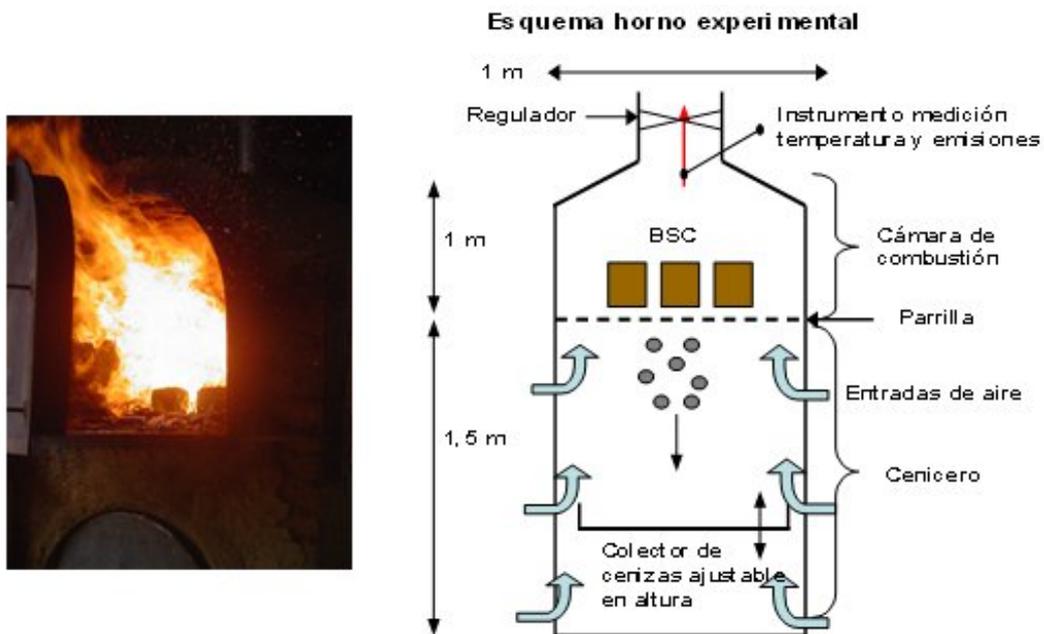


Figura 10: Horno experimental. Estudio de la transformación puzolánica del residuo de la combustión del BSC.

La obtención de MCS parte del acondicionamiento del conglomerado material arcilloso + biomasa lignocelulósica, la determinación del efecto del aglomerante sobre las propiedades físicas – mecánicas y físico - químicas del BSC y su combustión para obtener la transformación puzolánica de los residuos, como fuente de biomasa es utilizado el aserrín de pino (*Pinus Caribaea*), aleatoriamente colectado en el aserradero "Víctor Martínez" enclavado en el municipio Manicaragua en la provincia Villa Clara de la región central de Cuba.

Para establecer el efecto de las propiedades de las briquetas y su combustión sobre la transformación puzolánica de los residuos, se realizan quemas sucesivas con diferentes condiciones colectando las cenizas y determinando sus propiedades puzolánicas.

El horno es inicialmente calentado con leña durante 45 – 60 minutos, al lograrse una temperatura estable superior a los 300 °C se retiran las cenizas provenientes de la leña y se alimenta a intervalos de 30 – 40 minutos con grupos de 10 briquetas de análoga densidad y velocidad de combustión, con igual flujo de aire, se toman mediciones de las emisiones gaseosas, coeficiente de exceso de aire y

temperatura, lo cual permite evaluar la calidad de la combustión y las consecuencias sobre los residuos del proceso. [15]

El efecto de la composición de los materiales sueltos que conforman los densificados y el coeficiente de exceso de aire sobre la calidad del proceso de combustión de la biomasa ha sido demostrado por diversos autores [17, 54] poniendo de manifiesto la relación con las características de los residuos gaseosos y sólidos generados durante el proceso.

Se espera que las condiciones de la combustión de los aglomerados dadas por su densidad y velocidad de combustión junto a la variación del coeficiente de exceso de aire dado por los niveles correspondientes del flujo de aire, produzcan una combustión completa, con temperatura en el intervalo de 600 – 900 °C y consecuentemente las modificaciones químicas - estructurales producidas por la acción del calor provoquen la transformación puzolánica de la arcilla componente del BSC.

En la tabla 13 se presentan los resultados de las mediciones realizadas durante las quemas experimentales en relación a las condiciones preestablecidas para determinar su influencia sobre la transformación puzolánica de los residuos, la temperatura promedio de los gases medidos en la base de la chimenea, varía en el rango desde 480°C hasta 730°C con una relación CO/CO<sub>2</sub> en el intervalo de 0.017 – 0.045 que se corresponde con un proceso de combustión con bajo contenido de monóxido de carbono.

**Tabla: 13 Mediciones** realizadas durante quemas experimentales en relación a las condiciones preestablecidas para determinar su influencia sobre la transformación puzolánica.

Denominación	Contenido de Arcilla (CA)	Flujo de aire (FA)	Densidad	Velocidad reacción	Coeficiente de exceso de aire	Temperatura Promedio	Temperatura máxima	Cenizas	In quemados	Emisiones de CO	r = CO/CO <sub>2</sub>
	%	-	g/cm	g/min	α	°C	°C	%	%	%	-
BSC 1L	10	L	0,501	111	2,2	730	853	9.21	0,32	0,16	0,017
BSC 1H	10	H	0,501	111	3,1	600	750	8.3	2,1	0,21	0,031
BSC 2L	20	L	0,548	107	2,5	690	815	16.68	0,5	0,17	0,021
BSC 2H	20	H	0,548	107	3,6	515	698	14.58	2	0,2	0,034
BSC 3L	30	L	0,597	97	2,9	645	810	21.5	1,2	0,19	0,026
BSC 3H	30	H	0,597	97	4,1	480	675	21.8	2,6	0,23	0,045

Condiciones: H: alto flujo de aire, válvula abierta al 100 % de sus posibilidades; L: bajo flujo de aire; válvula abierta al 50 % de sus posibilidades. % de Cenizas: Calculado con respecto al peso inicial seco del BSC. % de inquemados: Calculado con respecto al contenido de cenizas.

Sin embargo los bajos valores de temperatura en el caso de mayor exceso de aire, denota peores condiciones del proceso de combustión que a pesar de alcanzar temperaturas máximas por encima de los 600°C ocasiona un incremento del contenido de CO lo que igualmente se refleja en el aumento de los in quemados sólidos.

La combustión de la madera requiere de un exceso de aire de entre el 200 – 300 % [15], lo que en el caso de los BSC se confirma con un valor promedio en ese entorno independientemente del caso analizado, no obstante se manifiesta como tendencia que la temperatura disminuye con el aumento del contenido de O<sub>2</sub>.

### 10.1- Análisis de los resultados y su significación estadística.

La significación del efecto de las variables contenido de arcilla y flujo de aire sobre la temperatura, emisiones, contenido de cenizas e in quemados se valida a través del análisis de varianza el cual se muestra en el **anexo III.1**, se discuten los modelos especificados que correlacionan estos diferentes factores, analizando los resultados en cuanto a su probable influencia sobre la transformación puzolánica de los residuos de la combustión.

El contenido de monóxido y la relación monóxido - dióxido de carbono tienen una relación significativa y directa con el contenido de arcilla en el BSC y el flujo de aire, la relación funcional se obtiene para un nivel de significación del 95 % con un coeficiente de determinación del 91 %, el análisis de varianza con un coeficiente F de Fischer igual a 14.81 y un p- valor inferior a 0.05 demuestran que existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95%. La especificación del modelo se expresa del modo siguiente:

$$CO = 0.193833 + 0.0125*CA + 0.0195*FA \quad [6]$$

El coeficiente del parámetro FA es mayor que el del CA lo que expresa un mayor nivel de influencia del flujo de aire en este caso sobre las emisiones de monóxido de carbono, la tendencia que se manifiesta probablemente esté dada porque en esas condiciones el aumento del flujo de aire provoca la disminución de las reacciones de combustión y con ello el aumento de los productos de una combustión incompleta en el flujo de gases lo que puede igualmente provocar in quemados sólidos y disminución del rendimiento en la transformación puzolánica de los residuos. Un análisis similar puede realizarse para la relación CO/CO<sub>2</sub>, detalles sobre el modelo especificado y la validez sobre la significación de los parámetros evaluados se presentan en el anexo referenciado.

Como es lógico el contenido de cenizas está en relación directa con el contenido de arcillas en el BSC sin embargo resulta interesante que en relación con los in quemados sólidos que aparecen en los residuos de la combustión el factor de

mayor influencia es el flujo de aire , está tendencia en la aparición de restos in quemados sólidos puede ser al igual que en el caso de los in quemados gaseosos resultado del enfriamiento excesivo de la llama con el aumento del coeficiente de exceso de aire lo que podría provocar la extinción de la combustión sin la oxidación total de los elementos combustibles.

De igual modo se muestra la correlación de la temperatura promedio y máxima con las variables contenido de arcilla y flujo de gases, relación en este caso inversa, por tanto con el aumento del contenido de arcilla y el flujo de aire disminuye la temperatura máxima, pudiendo estar en correspondencia con la relación inversa entre el contenido de aglomerante y el CEC, provocando el empeoramiento de las condiciones para que ocurran las reacciones de combustión y así mismo para la transformación puzolánica de la arcilla. El modelo especificado para la temperatura máxima con un nivel de confianza del 99 % y un coeficiente de determinación del 98 % es el siguiente:

$$\text{Temperatura Máxima} = 766.833 - 29.5 \cdot \text{CA} - 59.16 \cdot \text{FA} \quad [7]$$

La tendencia puesta de manifiesto en el modelo evidencia que es posible con el control de estos factores encontrar las condiciones, en cuanto a la temperatura, en que podría ocurrir la mayor ó mejor transformación puzolánica del material arcilloso multicomponente preponderantemente montmorillonítico empleado como adición aglomerante y fuente de material con reactividad puzolánica, otros detalles sobre el análisis de varianza muestran un valor del coeficiente F igual a 63.58 con un p-valor inferior a inferior a 0.01, lo que demuestra que existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

### **10.2- Exceso de aire, transformación puzolánica versus productos no deseados.**

El horno experimental ha sido instrumentado para verificar mediante el análisis de los gases de salida las condiciones existentes en la cámara del horno que determinan el proceso de combustión, esto está relacionado con el flujo de aire a través del horno y su interacción con el combustible, esto a su vez puede influir en las condiciones de formación de la ceniza y las propiedades físico químicas que pueden adquirir.

Las favorables condiciones de combustión en el horno (para el BSC), dadas entre otros factores por la interacción entre el combustible y el comburente, pueden disminuir la ocurrencia de pérdidas y con ello la formación de productos sólidos y gaseosos de reacciones incompletas como el CO, hidrogeno libre, otros compuestos orgánicos y el hollín ó el carbón que perjudican la reactividad puzolánica que se pretende lograr a partir de la activación térmica de la arcilla incorporada al proceso.

El análisis de los productos de la combustión de las muestras evidencia que los niveles promedio de emisiones de in quemados en los productos gaseosos son bajos (inferiores 0.25%) en correspondencia con valores reportados en la literatura [69] las emisiones de monóxido de carbono presentan niveles inferiores para las muestras de los BSC con menor densidad y mayor VR, sin embargo las muestras donde el proceso transcurre bajo un coeficiente de exceso de aire mayor se manifiesta un aumento de alrededor del 40 % en la cantidad de monóxido en los residuos gaseosos.

En la figura 11 y 12 se grafican las variaciones del nivel de emisiones de CO así como la variación de la temperatura y el coeficiente de exceso de aire con respecto al tiempo en función del proceso de combustión de los BSC en el horno experimental.

Como promedio se obtiene un valor de 0.017 para la relación CO/CO<sub>2</sub> y un coeficiente de exceso de aire de un 2.2 % lo que denota un proceso de combustión con bajo contenido de in quemados en los productos gaseosos lo que se corresponde a su vez con bajo contenido de compuestos carbonosos e in quemados en la ceniza.

Se evidencia que las variaciones son considerables en relación con las fases del proceso de alimentación por baches, se identifica un primer momento de menor temperatura donde ocurre la ignición, caracterizándose por mayores niveles de emisión de gases productos de una combustión incompleta, una segunda fase estable con bajo nivel de las emisiones de CO donde ocurre la mayor parte de la reacción de los volátiles y el sólido carbonoso residual(coque), en la tercera fase o de extinción ocurre el enfriamiento de la cámara del horno con el incremento de la concentración de monóxido y el coeficiente de exceso de aire.

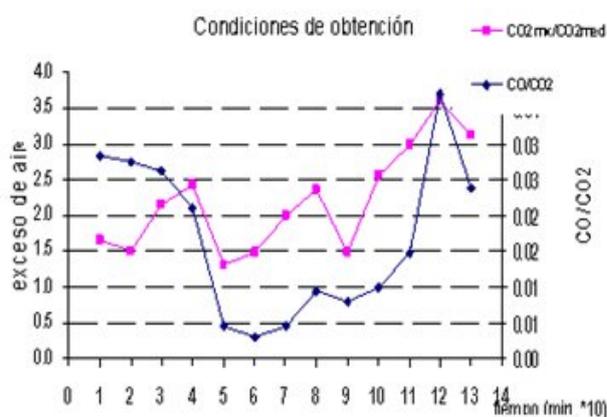


Figura: 11 Inquemados (CO) con respecto al coeficiente de exceso de aire. (BSC1L).

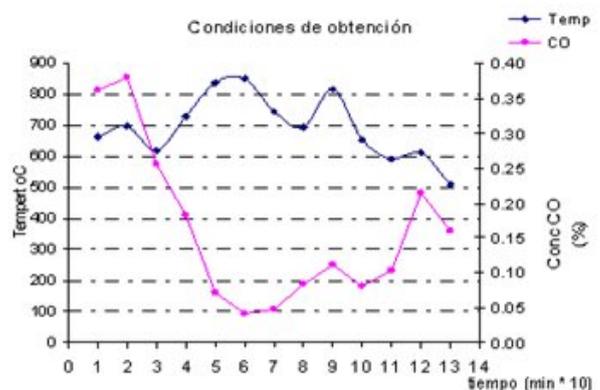


Figura: 12 Temperatura y concentración de CO con respecto al tiempo.

## 11- Caracterización químico – física de los residuos sólidos de la combustión del BSC.

Se analizan en el presente epígrafe resultados de ensayos para caracterizar los residuos sólidos de la combustión del BSC relacionando el acondicionamiento de los BSC para su combustión en el horno y la obtención de cenizas con reactividad puzolánica.

La ceniza obtenida como resultado de la combustión del BSC, por las características específicas de su procedencia, se identifican como *arcillas reactivas procedentes del bloque sólido combustible, ARPBSC*, la composición, masa y propiedades de estos residuos no son iguales a la composición y la masa de la arcilla inicialmente añadida en su función aglomerante, resultado de su transformación estructural provocada por el calor de combustión. Las características de las ARPBSC se muestran en la tabla 14.

Las cenizas son cribadas a través de un tamiz numero 0.25 centímetros para separar partículas de inquemados[70] se presentan los resultados obtenidos por el método de fluorescencia de rayos X (XRF) para determinar el por ciento de los principales compuestos de las cenizas obtenidas.

**Tabla 14 Características de la ceniza de los BSC quemado en diferentes condiciones**

Características de la ARPBSC								
ARBSC		Composición química % en peso					Densidad	CA SiO <sub>2</sub>
CA	FA	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Suma	Otros	g/cm <sup>3</sup>	
10	L	54.7	23.5	9.7	87.9	12.1	2.781	33
10	H	61.2	16.4	6.7	84.4	15.6	2.570	12
20	L	53.5	19.3	8.5	81.2	18.8	2.674	25
20	H	62.9	17.4	7.0	87.4	12.6	2.641	12
30	L	63.6	16.4	5.9	85.9	14.1	2.621	6
30	H	63.3	16.6	6.3	86.2	13.8	2.600	3

(Otros: CaO; MgO; SO<sub>3</sub>; K<sub>2</sub>O; Na<sub>2</sub>O)

CA: Contenido de arcilla (%); FA : Flujo de aire, CA SiO<sub>2</sub>: Contenido amorfo de SiO<sub>2</sub> (%)

Es de destacar el alto contenido de los compuestos SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> la suma de estos en promedio es mayor al 85%, según la norma ASTM C 618-78 la suma de estos compuestos puede ser de entre el 50 y el 70 %, el alto nivel de estos compuestos en las ARPBSC, puede suponer una adecuada reactividad puzolánica la cual se asocia a la presencia de sílice que en estado amorfo reacciona con la cal.

En la figura 13 se muestra el resultado del análisis de difracción de Rx, la fase más significativa encontrada es la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), según Betancourt (1997) la forma de presentarse el material silicio a resultas del tratamiento térmico es en forma amorfa ó en forma cristalina con muy bajo nivel de reactividad, por lo tanto es conveniente determinar la cantidad de material amorfo presente que es el que realmente posee reactividad puzolánica.

El material residual procedente de la combustión del BSC con 10 % en el contenido de arcilla y con bajo flujo de aire (ARPBSC 1L) resulta el que mayor contenido de material amorfo, presentando más de la mitad de todo el material silicio que ha sido tratado térmicamente bajo esas condiciones resulta potencialmente muy reactivo.

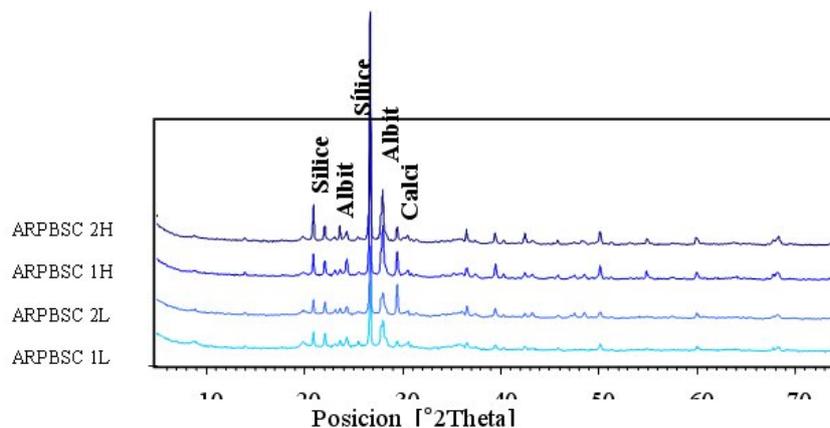


Figura: 13 Identificación de fases por XRD.

Los resultados analizados en los epígrafes anteriores evidencian una tendencia al empeoramiento de las condiciones de combustión con el aumento del contenido de aglomerante y el aumento del flujo de aire en los valores comprendidos en el estudio, el resultado de la transformación del material arcilloso sigue de igual modo esta tendencia y consecuentemente cuando mejores son las condiciones en que ocurre el proceso de combustión mayor cantidad de material con potencial reactividad puzolánica se obtiene, recuérdese que se demostró mediante el correspondiente modelo (III.2) que la temperatura disminuye con el aumento del contenido de arcilla.

El análisis de varianza para verificar estadísticamente la significación de la correlación entre las variables o factores considerados determina que dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.05, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95%, correlacionando el contenido de material amorfo en las cenizas con los diversos factores, esta variable presenta un recorrido desde el 33 % hasta el no importante valor del 3 %.

Los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal describe la relación entre el contenido amorfo en los residuos de la combustión y las variables independientes contenido de arcilla y flujo de aire, con una relación inversa con los dos factores controlados, según el modelo especificado siguiente:

$$\text{Contenido Amorfo} = 16,1667 - 7,5 * C A - 7,17 * F A \quad [8]$$

El coeficiente de determinación indica que el modelo explica un 91 % de la variabilidad en el modelo.

La tendencia al aumento del contenido de material no cristalino en el caso de un exceso de aire entre el 200 – 250 por ciento al parecer está dado por la menor pérdida de calor lo cual propicia el aumento de la temperatura de la cámara del horno y la reacción de combustión, téngase en cuenta que la temperatura promedio de los gases de salida del horno, en este caso 730 °C, se encuentra dentro del intervalo de 550 a 750 °C en el cual ocurre la desoxhidrilación de la montmorillonita mejorando sus propiedades puzolánicas, evidentemente las cenizas provenientes de los BSC con un 30 por ciento de material arcilloso no reúnen los requisitos mínimos para continuar su evaluación desde el punto de vista de la reactividad puzolánica.

### **11.1-Influencia del proceso de combustión sobre la granulometría de los residuos.**

El tratamiento térmico al que es sometido el material arcilloso puede producir fenómenos de sinterización y crecimiento de los granos afectando la capacidad de reacción puzolánica por disminución de la superficie específica incluso en el caso de existir un gran desordenamiento estructural [5, 71], este fenómeno puede afectar igualmente a la arcilla componente del BSC durante la combustión de la biomasa y el calentamiento del horno.

En la figura 14 se muestra la distribución granulométrica de los residuos procedentes de la combustión de los BSC , el análisis de la influencia del proceso de combustión de los residuos muestra que las diferentes condiciones del tratamiento térmico causan variación en la granulometría del residuo, obteniéndose en primer lugar una menor dispersión en la distribución granulométrica para el caso de las condiciones de combustión en que se combinan menor contenido de arcilla en el conglomerado, con ello menor densidad y mayor velocidad de reacción en los BSC.

Al parecer en las condiciones de una temperatura promedio entre 500 – 700°C se produce el desplazamiento de la distribución granulométrica hacia tamaños de partícula inferiores en relación directa con el aumento de la temperatura lo cual puede favorecer la reactividad puzolánica del material, probablemente la relación entre el tratamiento térmico y la granulometría dependa de algunos otros factores (velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, velocidad de enfriamiento,

dureza de los granos, etc.) que no han sido considerados en este trabajo y en los cuales podría ser de interés profundizar para precisar las relaciones existentes.

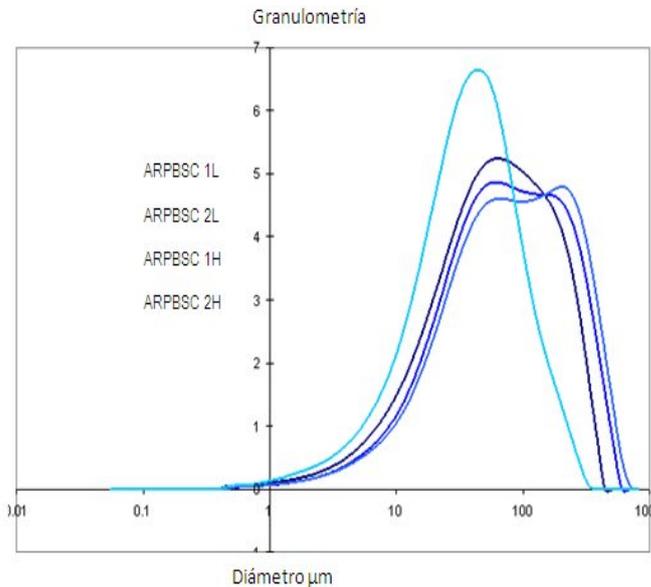


Figura: I4 Relación de la granulometría con las condiciones de transformación puzolánica ( Por orden de aparición en el grafico de arriba abajo)

ARPBSC	Distribución D <sub>50</sub> (µm)
ARPBSC 1L	33
ARPBSC 2L	82
ARPBSC 1H	60
ARPBSC 2H	70

## 12- Evaluación rápida de la transformación puzolánica en la ARPBSC.

La evaluación preliminar de la reactividad puzolánica se realiza según el método de conductometría [62], las curvas se obtienen mediante la medición de la pérdida de conductividad de una solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  donde se añade 1 gramo de ceniza por cada 75 ml de solución, la reacción que se produce entre la puzolana y la cal de la solución, provoca la disminución de los iones y con ello disminuye la conductividad que es monitoreada cada dos minutos durante 20 minutos.

En la figura 15 se muestran las curvas que describen la pérdida de conductividad de la solución lo que refleja la reacción puzolánica de las cenizas obtenidas en las diferentes condiciones.

Las curvas reflejan mayor pérdida de conductividad de la solución en proporción a una mayor reactividad para las muestras ARPBSC 1L y ARPBSC 2L, estas cenizas se producen con un menor flujo de aire (coeficiente de exceso de aire 2.2 -2.5) , ocurriendo el proceso de combustión a una temperatura promedio en la cámara del horno en el intervalo de 690 - 730 °C lo que al parecer y en correspondencia con lo planteado por la literatura consultada [72] favorece la transformación puzolánica de la arcilla montmorillonítica.

En la segunda etapa del experimento el aumento del flujo de aire y con ello el coeficiente de exceso de aire empeoran las condiciones de combustión, disminuyendo la temperatura del horno hasta un nivel en el cual no se logra

suficiente rendimiento en la modificación ó activación térmica de la arcilla obteniéndose menor pérdida de conductividad.

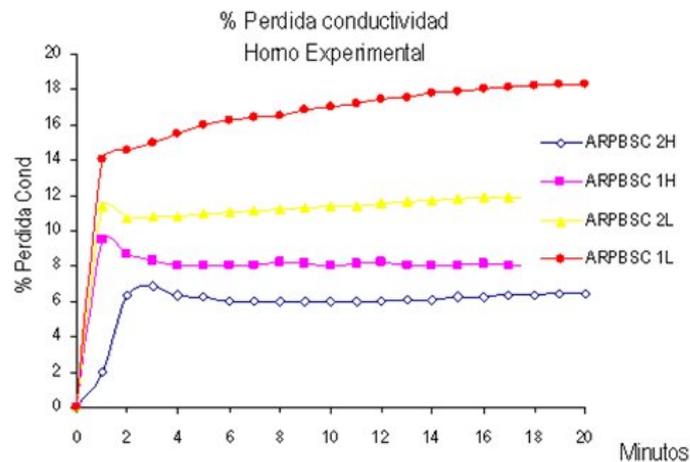


Figura: 15 Pérdida de conductividad, Examen rápido de reactividad puzolánica.

### 12.1- Evaluación de la reactividad en pastas y morteros.

La evaluación puzolánica del residuo de la combustión del aglomerado mediante la realización de ensayos en pastas y morteros fabricados con la adición cal – puzolanas + CPO se realiza primero con cenizas sin ningún tratamiento adicional, se utiliza preferentemente la ceniza ARPBSC 1L que según los resultados de los ensayos de pérdida de conductividad propuestos[62] demuestra ser la de mejores potencialidades como puzolana.

Es reconocido el efecto que el aumento de la superficie específica puede producir sobre las propiedades puzolánicas de las arcillas, la molturación puede mejorar la reactividad puzolánica del  $SiO_2$ [22], teniendo en cuenta lo expuesto se realiza adicionalmente la molienda de la ceniza en un molino de bolas, el material obtenido finamente molido (ARPBSC 1LM) es cuidadosamente mezclado con cal (62 % ceniza+ 38 % cal) y es utilizado a su vez en la fabricación de pastas y morteros para realizar su evaluación comparativa.

En la figura 16 se representan las curvas granulométricas de los materiales sueltos y del aglomerante cal – puzolana (ceniza ARPBSC 1L), como puede apreciarse se mejora la distribución del material después de la molienda, se disminuye el tamaño promedio de los granos lo que debe favorecer la reactividad. La fabricación de pastas y morteros a partir de las cenizas activadas térmicamente se ha realizado sobre la base de la experiencia acumulada en el desarrollo y aplicación de la tecnología del CP-40.

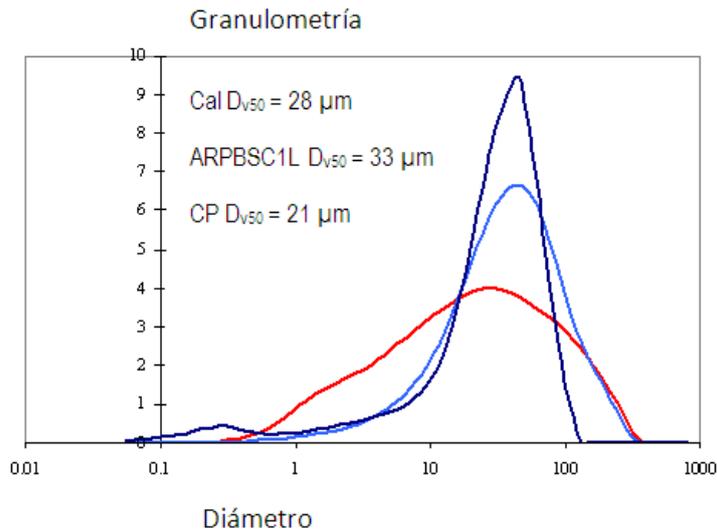


Figura: 16 Distribución granulométrica de los materiales componentes de las pastas ensavadas.

Las pastas se preparan con una proporción 70 CP / 30 CPO en valor porcentual, la cantidad de silicio en estado amorfo se determina según el análisis de XRF considerando para la fabricación de las pastas la proporción Cal / Si amorfo igual a 1:5, esta proporción se establece para asegurar la existencia de suficiente hidróxido de calcio disponible para la reacción puzolánica.

La cantidad de silicio en estado amorfo ha sido determinada anteriormente según el análisis de XRF.

Las fases más importantes encontradas en el transcurso del tiempo ( 0 – 28 días) mediante la aplicación de la técnica de XRD, son la estringita, hemicarbonato, monocarbonato, portlandita y cuarzo, no aparecen fases como la cristobalita que se forman a temperaturas superiores a los 900 °C confirmando que la temperatura máxima que se obtiene en el horno no excede los 850 °C.

Aparecen diversos picos representativos de la portlandita que disminuyen con el transcurso del tiempo en correspondencia con los fenómenos que ocurren, a edades tempranas el cemento reacciona y se produce CSH y CH, la reacción de la puzolana siempre ocurren de forma más lenta lo que se refleja en el consumo tardío de la portlandita por la reacción puzolánica.

## 12.2- Variación del contenido de Portlandita

La variación de la cantidad de portlandita (CH) en pastas fabricadas con la ceniza activada térmicamente a partir de los productos sólidos de la combustión de los BSC es posible realizarlo mediante las técnicas de termo gravimetría, la evaluación de la variación del contenido de CH se realiza para 1, 3, 7, 14 y 28 días. El equipo empleado es un calorímetro Metler Toledo TGA/SDTA851e., la variación de la temperatura es 10°C / minutos, desde 30°C hasta 900°C.

La evolución del consumo de CH en el tiempo se muestra en la figura 17, y la figura 18. Se presentan las curvas para las pastas fabricadas con el material residual reactivo sin tratamiento y el mejorado mediante molienda.

La curva que representa la pasta elaborada con la ARPBSC 1L en el primer momento crece lo que significa que la cantidad de portlandita se incrementa, esto evidencia que la velocidad con que se produce el CH por el cemento es superior a la que consume la puzolana, para la ARPBSC 1LM desde el primer momento la portlandita disminuye lo que demuestra que el consumo es mayor que el producido por la hidratación del cemento.

El gráfico presentado permite una evaluación directa de la reacción puzolánica de las pastas producidas, se presenta la evolución del consumo de la portlandita como un porcentaje de la cal agregada. Cuando la curva se presenta con valores superiores a cero significa que la reacción puzolánica consume una cantidad de hidróxido de calcio mayor que el producido por el cemento, en el tramo que la curva se proyecta por debajo del nivel cero significa que el cemento produce más portlandita que el que puede consumir la reacción puzolánica.

El estudio de la evolución de la cantidad de portlandita en las muestras de pasta demuestra la actividad puzolánica, a lo largo de la reacción en el tiempo se consume más hidróxido del calcio que el producido por la reacción del cemento.

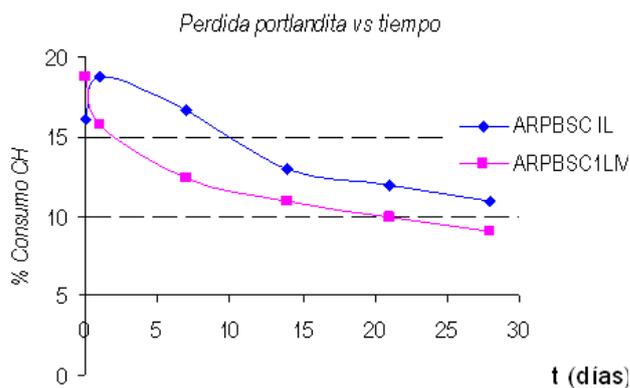


Figura: 17 Evolución de la cantidad de Portlandita.

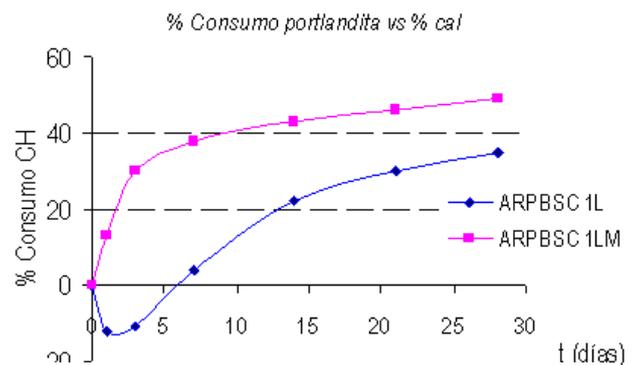


Figura: 18 Consumo CH vs Cal añadida.

Entre los factores más importantes que inciden en la actividad puzolánica están el tamaño de partícula, la morfología de la superficie del grano y su textura, [73, 74], en las curvas que se presentan se hace evidente una mayor reactividad de las pastas elaboradas con la ceniza ARPBSC 1LM sometida a molienda previa junto con la cal, aumentando la superficie específica de la puzolana y con ello la reactividad.

### 13- Ensayos de resistencia a compresión.

La resistencia mecánica es la evidencia más consistente de la ocurrencia de una reacción hidráulica cuando la cal y la puzolana son molidas íntimamente y humedecidas, para verificar la resistencia de las muestras se someten a ensayos a compresión a diferentes edades de envejecimiento. Las muestras ensayadas

deben exhibir resistencias superiores a los 2 MPa a los 7 días, y mayores que 4 MPa a los 28 días. [5, 71].

Para la elaboración de los morteros se ensayan muestras fabricadas con la arcilla reactiva procedente de la combustión del BSC identificado con mejores propiedades, (ARPBSC 1L) con la aplicación de molienda y sin molienda, son fabricados tres series de tres probetas cada una para cada edad, de dimensiones 1 x 1 x 4 cm tipo prismáticas, sometidos a compresión con una prensa universal de ensayos mecánicos ZD-40.

En la figura 19 se presentan los resultados de la evaluación promedio de la resistencia a compresión verificada a 1, 7, 14 y 28 días de elaboración del mortero. La curva que se muestra es muy explícita y refleja el comportamiento esperado de la evolución de la resistencia en el tiempo, el valor máximo encontrado a los 28 días supera ampliamente al establecido en la norma India IS 4098, la única normativa disponible que regula el empleo del aglomerante cal-puzolana para aplicaciones de albañilería, se muestra la curva obtenida en las mismas condiciones para el cemento Pórtland.

El adecuado comportamiento de la resistencia a compresión de los morteros fabricados confirma la existencia de las propiedades puzolánicas en el material sólido residual producido durante la oxidación de la biomasa densificada corroborando la posibilidad de la obtención de material puzolánico a partir de la combustión del BSC.

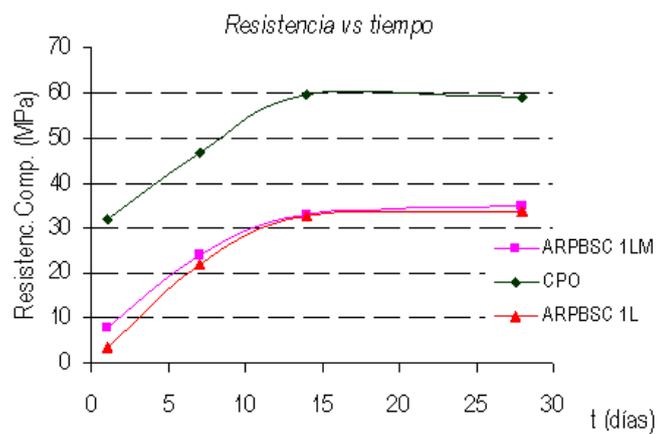


Figura: 19 Variación de la Resistencia a compresión en el tiempo

#### 14- Conclusiones parciales

Con relación al efecto de la adición de arcilla y la modificación de las propiedades combustibles de la biomasa se obtienen con respecto a la transformación puzolánica de los residuos de la combustión del conglomerado las siguientes conclusiones:

El contenido de arcilla produce variaciones en las propiedades físicas mecánicas y químicas del BSC encontrando que la temperatura promedio en el horno disminuye en relación directa con el contenido de arcilla y la velocidad de reacción, favoreciendo la aparición de inquemados con el empeoramiento de las condiciones del proceso de combustión.

El rendimiento de la transformación puzolánica dado por el contenido de  $\text{SiO}_2$  amorfo, se favorece por las condiciones en las cuales transcurre el proceso de combustión del conglomerado con un contenido de arcilla del 10 por ciento junto a un coeficiente de aire en el intervalo de 2.2 – 2.5, propiciando una temperatura máxima en el rango de 815 – 850 ° C y el refinamiento de la distribución granulométrica de la ceniza lo cual beneficia la transformación puzolánica del residuo.

El estudio de las cenizas provenientes de los BSC, a través de la evolución de la cantidad de portlandita en las pastas, las fases encontradas y la resistencia a compresión, indican una adecuada reactividad de las cenizas correlacionando el control del proceso de combustión del conglomerado con la obtención de la transformación puzolánica de los residuos.

Las consideraciones técnico económicas demuestran que la aplicación de los BSC como aplicación energética en la producción de ladrillos en hornos del tipo HVC puede resultar una importante fuente de MCS, logrando el suministro estable de material puzolánico de forma económica para diferentes aplicaciones en talleres de materiales de construcción locales.

El reciclaje de desecho biomásico como el aserrín y la homogeneización de sus propiedades mediante densificación con la adición de material arcilloso, permite la sustitución eficiente de la leña propiciando la activación térmica de las cenizas resultantes, con lo cual se abren perspectivas para la producción y uso económico de esta puzolana artificial en diversas aplicaciones constructivas.

## **15- CONCLUSIONES GENERALES:**

Los resultados que se obtienen al evaluar el efecto del material arcilloso sobre las propiedades que adquiere la biomasa densificada (BSC) dado el proceso tecnológico propuesto, relacionando el acondicionamiento del conglomerado y su efecto sobre la mejora de la eficiencia en la obtención de materiales de construcción como los ladrillos, así como su combustión en un horno en presencia de determinado flujo de aire y la transformación puzolánica de los residuos del proceso, han sido analizados en las diferentes etapas del trabajo. A continuación, se hace énfasis en aquellas conclusiones, que engloban el aporte de este trabajo al tema objeto de estudio:

1. Se demuestra la factibilidad técnica de la densificación de los residuos del procesamiento de la madera a partir de un proceso tecnológico aplicable en talleres locales de producción de materiales de construcción. El empleo del material arcilloso en su función aglomerante para la densificación de residuos lignocelulósicos maderables con la aplicación de baja presión permite su implementación en la obtención de materiales de construcción, se realiza la formulación del BSC considerando las propiedades del material arcilloso, lo que permite obtener propiedades físico mecánicas y químicas que garantizan el manejo del conglomerado como un adecuado biocombustible sólido.
2. El material arcilloso influye en las propiedades combustibles del conglomerado al disminuir la velocidad de reacción del biocombustible, cooperando en la mejora de la eficiencia del proceso de cocción del ladrillo de barro, al disminuir el consumo específico de combustible con respecto a la madera ó leña como fuente energética tradicional, proponiéndose el procedimiento para la sustitución parcial de la leña con lo que se alcanza la disminución del 15 -20% del consumo total de combustible, con notable mejora desde el punto de vista medioambiental.
3. La influencia de las propiedades físico mineralógicas del material arcilloso sobre el proceso de densificación pueden ser establecidas a través de ensayos de durabilidad de las briquetas, determinándose la correlación de parámetros como razón de densidad, resistencia a compresión, e índice de resistencia al impacto, con la actividad y contenido de aglomerante, en consecuencia la mayor estabilidad y mejores propiedades del conglomerado resultan al ser elaborado con material arcilloso de media – alta actividad.
4. Se demuestra la viabilidad para obtener material residual puzolánico procedente de la combustión del aglomerado biomasa + material arcilloso en un horno a partir del control de los factores estadísticamente significativos contenido de material arcilloso y flujo de aire, estableciéndose que el contenido de  $\text{SiO}_2$  amorfo, susceptible de formar compuestos cementantes, se encuentra en relación inversa con el contenido de arcilla y el flujo de aire, determinando las condiciones del horno para una combustión completa que conduce a la transformación puzolánica de la arcilla montmorillomítica estudiada, bajo una temperatura máxima en el rango de 815 – 850 °C.
5. El análisis de las cenizas provenientes de los BSC confirma la relación entre el acondicionamiento del proceso de su auto combustión y su reactividad puzolánica, la evolución de la cantidad de portlandita en las pastas, las fases encontradas, el refinamiento de la granulometría del residuo, la resistencia a compresión de morteros, indican que el 10% de contenido de arcilla en el densificado con un coeficiente de aire en el intervalo del 2.2 al 2.5 %, produce el tratamiento térmico que origina una

adecuada transformación puzolánica de los residuos generados en el proceso.

6. Las consideraciones económicas demuestran que la fabricación de ladrillos en hornos del tipo HVC con la aplicación de los BSC como fuente energética, puede conseguir producir una importante cantidad de ARPBS, lo cual permite establecer una estrategia efectiva para por una parte obtener energía para la producción de ladrillos y por otra el suministro estable de material puzolánico de forma económica, con lo cual se abren perspectivas para la producción y uso de esta puzolana artificial en diversas aplicaciones constructivas en talleres locales productores de materiales de construcción.
7. La determinación de los índices de emisiones gaseosas producidas durante la combustión de los BSC permite la aplicación de un moderno software que determina los valores máximos puntuales durante la dispersión de las emisiones de NOx, CO, con valores muy inferiores al límite máximo permisible, demostrando la inocuidad del biocombustible sólido desde el punto de vista medioambiental.

#### Referencias bibliográficas:

1. Quiroz, S.S., Estudio y aplicación de la biomasa densificada como alternativa energética en países en vías de desarrollo. 2007a, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón: Gijón, España.
2. Torres, C.L.R., "Investigación de las propiedades del (BSC) para la producción de Materiales de Construcción", in Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil,. 2002, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.: Santa Clara. Cuba.
3. Machado, I., Martirena, J. F. Herrera, M.I., Impacto ambiental del uso de biomasa densificada para la obtención local de materiales de construcción, CITMA, Editor. 2012: Santa Clara.
4. Aitcin Pierre-Claude, "Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow",. Cement & Concrete Research, 2000. Vol. 30(No. 9): p. 1349-1359.
5. Martirena, F., Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clinker de cemento Pórtland: el aglomerante Cal - Puzolana como adición mineral activa., in Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil. 2003 b, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara. Villa Clara. Cuba. p. 137 p.
6. Martínez, F.L., Hormigones con altos volúmenes de sustitución de cemento Portland por adiciones puzolánicas, in Facultad de Ingeniería Civil. 2003, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara.
7. Dopico, J.J., Contribución al uso de la adición mineral cal - puzolana, como sustituta parcial de altos volúmenes de cemento portland en la obtención de un hormigón estructural., in Facultad de Construcciones. 2009, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara.
8. Betancourt, S., Martirena, J.F, Machado I. Seijo, P.P. González, R. . Procedimiento para la obtención de energía y puzolanas mediante la combustión de un aglomerado de biomasa. in Conferencia Internacional MAS XXI. 2003. Santa Clara. Villa Clara. Cuba.

9. Villegas A, P.. J.. , "Aprovechamiento de residuos fibrosos de la industria azucarera mediante procesos de conversión térmica", in Departamento de Ingeniería Química. 2000, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara. Villa Clara. Cuba.
10. Shaw, M., "Feedstock and process variables influencing biomass densification", in Dept of Agricultural and Bioresource Engineering. 2008, University of Saskatchewan.: Saskatchewan. Canada.
11. Erickson, S.a.P., M. , , The Briquetting of agricultural wastes for fuel. , F.a.A.O.o.t.U. Nations, Editor. 1990., Food and Agricultural Organization of the United Nations.
12. Marcos, M.F., Nuñez M.A Biomasa forestal: fuente energética. Revista ENERGÉTICA XXI.E.T.S.I. Montes, Madrid., 2006.
13. Ortíz, L.T.A.V.A., Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte III: Producción de elementos densificados. Revista CIS-Madera 2005.
14. Bhattacharya, S.C., Biomass Energy Use and Densification in Developing Countries, in First world conference on pellets. 2002: Stockholm.
15. Norbert, S., Short Course on Masonry Heating Systems, in Fuels Expo 2000, M.S.B.L. Labs, Editor. 2000.
16. Rubio, A., Generadores de Vapor. Explotación y funcionamiento. 2000: Santa Clara. Cuba.
17. Changkook, R., Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I.Experiments-fuel type, equivalence ratio and particle size. Fuel, 2006. 85: p. 1039-1046.
18. Johansson, L.S., Characterisation of particle emissions from small scale biomass combustion, in Department of Energy Technology. 2002: Goteborg Sweden.
19. Wilaipon, P., The Effects of Moderate Die Pressure on Maize Cob Briquettes : A Case Study in Phitsanulok. 2007, Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty Naresuan University: Muang, Phitsanulok Thailand.
20. Ndiema, C.K.W., & Manga, P.N., & Rutttoh, C.R. I , . , Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass. Energy Conversion and Management. Published by Elsevier Science Ltd. , 2002. Vol 43: p. 2157-2161.
21. Dominguez, D., J, Gonzalez V. M; Munoz,H. G., Strategy to optimize the mechanical densification process of agricultural crop residues and by-products. Agro Ciencia, 2002. 36(Sept - Oct): p. 593-604.
22. Shi, C., An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans. Published on the NRC, 2001.
23. Heine, R.W., Florey, C.W., Structure of green sands AFS Transactions, 2001. Vol. 39.
24. Sertucha, J., Suárez, R., Materiales inorgánicos aplicados para la fabricación de piezas. Anuales de la Real Sociedad Española de Química, 2005. N0 17: p. Segunda Época Julio - Septiembre
25. Martirena, F., Betancourt, S, Martinez, L, Machado, I;,Gonzalez, R.: Combustion of waste biomass for manufacture of building materials. The energy efficiency at small scale production. BASIN NEWS, UK,, 1999. No. 18: p. pp 23-27.
26. Gonzáles, R., Densificación de Biomasa para la obtención de Energía y Materiales de Construcción, in Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Construcciones. 2003, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara. Villa Clara. Cuba.
27. Martirena, F., Proyecto para el reciclaje de biomasa para la producción de materiales y energía. 1998, CIDEM. Facultad de Construcciones. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara. Villa Clara. Cuba.

28. Souza, P.S.L.a.D., . C., C., Dal Molin, , "Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity." *Cement and Concrete Research*, 2005. 35(10): p. 1993-1998.
29. Massazza, F., , ed. " Pozzolana and Pozzolanic Cements",. Vol. edited by P. C. Hewlett, 4th ED. 1998, Chapter 10. in "Lea's Chemistry of Cement and Concrete",. 1053p.
30. Jamradloedluk J, P., C.. and et all, Physical properties and combustion performance of briquettes produced from two pairs of biomass species. 2005, Faculty of Engineering, Mahasarakham University Kantarawicha: Mahasarakham Thailand.
31. Curbelo, A., A. Bárbara, G M. Contribución de la biomasa no cañera a la generación de electricidad en Cuba. 2006 Septiembre 2006]; Available from: (<http://www.fao.org/docrep/T2363s0h.htm#TopOfPage>).
32. Hahn, B. Existing Guidelines and Quality Assurance for Fuel Pellets. 2004 December 2004]; Available from: [www.umbra.at](http://www.umbra.at).
33. Rodríguez, A.D., . Rosabal, P.. B.,. Martínez, P.. B.. , Teoría y práctica de los procesos de combustión. *Combustibles sólido*. 2000, La Habana: Editorial Academia
34. Villegas, P.R., AM. Esperanza, E. Valdés, V., Análisis químico elemental de combustibles orgánicos y sus aplicaciones. 2001, CEETA. UCLV: Santa Clara. Villa Clara. Cuba.
35. Castellón, L.E., UCLV, 2002.TD. , "Tecnología para la obtención de Biomasa densificada en condiciones de pequeña industria", in Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil,. 2002, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.: Santa Clara.
36. Villegas A, P. J., Quintana Puchol, R., Bucki Wasserman,, B.; Martirena, H, F. J.; Machado, López, I.; Cavalieri, A.; Camerucci, , Estudio preliminar de las transformaciones morfológicas durante la termoconversión de biomasa densificada, in Segundo Congreso Nacional y primer Congreso Iberoamericano sobre Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN '2007). 2007.
37. Quiroz, S.S., Lamela Rey M.J., Biomasa densificada como alternativa energética: el BSC. 2007b, Universitario de Tecnología de Asturias, Universidad de Oviedo. España.: Oviedo. España.
38. Demirbas, A., 'Effects of Moisture and Hydrogen Content on the Heating Value of Fuels', Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. *Energy Sources and Management* 2007. Vol 29(7): p. 649 - 655.
39. Beker, G.U., Briquetability of Lignite and Woody Wastes Composite Fuel Turkey *Energy Sources* Copyright © Taylor & Francis Inc, 2000. Vol 22: p. pp 99 - 107.
40. Villegas, A., P. J, Quintana P R, Bucki Wasserman,,B,Martirena H F. J, Machado, L I., Estudio preliminar de las transformaciones morfológicas durante la termoconversión de biomasa densificada., in Segundo Congreso Nacional y primer Congreso Iberoamericano sobre Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN '2007. 2007: Buenos Aires. Argentina.
41. Cukierman, A.L., Della Rocca P. A, Bonelli P. R.; Cassanello M. C. , On the Study of Thermo chemical Biomass Conversion. *Chemical Engineering*, 1996. 3: p. 129-144.
42. Espinosa, C.J., . Quintero, J. Rodriguez,A y Colab. . Catalogo de propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las arcillas para cerámica roja en los centros urbanos de Medellín, Ibagué y Sabana de Bogotá. 2003, Instituto Colombiano de Geodesia y Minería: Bogotá
43. Duitama, L., Espitia, C.,. Mojica J,, Quintero J, Romero F,: . Composición mineralógica y química de las arcillas empleadas para cerámica roja en las zonas de Medellín, Itagüí y Amagá. . *Revista Academica Colombiana*, 2004. Vol. 28(109): p. 555-563.

44. Grover, P.D.M., S.K. . Biomass Briquetting: Technology and Practices. 1996 Junio 2005]; Available from: [http://www.fao.org/index\\_es.htm](http://www.fao.org/index_es.htm)
45. Wilaipon, P., Density Equation of Cassava-Stalk Briquettes Under Moderate Die-Pressure. American Journal of Applied Sciences, 2010. 7(5): p. 698-701.
46. Chin, O.C., Siddiqui, K.M Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressure. Biomass and Bioenergy, 2000. Vol 18: p. 223-228. .
47. Días, d.S.P., “Tecnología para la obtención de Bloques Sólidos Combustibles (BSC) en condiciones locales”, , in Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil,. 2002, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.: Santa Clara. Cuba.
48. Giraldo, G.A.G., B. E...Magariño, V.L.. Montalvillo, S. C. . , La utilización de pelets de biomasa como producto energético. Revista Energética XXI,, 2004.
49. Demirbas, A., Briquetting Properties of Biomass Waste Materials. Turkey Energy Sources Copyright © Taylor & Francis Inc, 2004. Vol 26: p.:83-91.
50. Olorunnisola, A., “Production of Fuel Briquettes from Waste Paper and Coconut Husk Admixtures ”. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 2007. Vol. IX.
51. Martirena, F., . Machado I., Seijo P,. Gonzalez R.: , Solid Fuel Block out of waste biomass. The Cuba case. /, Small-scale urban waste management for energy production. Phase 2. Consolidated Report,. 2002, CIDEM Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara. Villa Clara. Cuba.
52. Roque, D.P., “Combustión”. 1990, Departamento de Energía. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara. Cuba.
53. Faxälv, O., . Nyström, O. , Biomass Briquettes in Malawi, in Department of Management and Engineering. 2007.
54. Christofer, R., . Marcus, O, Rolf, Grez, and et all, Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics Biomass and Bioenergy, 2006. Vol 31 p. 66-72.
55. Mayorga, E., Rodriguez, L., “Técnicas de construcción de hornos artesanales para quema de Ladrillos”. 2000, Lima. Perú: ITDG.
56. Machado, I., Martirena, J. F. Herrera, M.I, Quiroz S, Lamela R.M.J, González L.R. , Mejora de la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja a partir del empleo como biocombustible de material lignocelulósico densificad. Revista Ingeniería de Construcción, 2011. Volumen 26( N° 2).
57. Mason, K. “Ten rules for energy efficient, cost effective brick firing.”. BASIN, Building Advisory, United Kingdom 2002 Junio 2006]; Available from: <http://www.gtz.de/basin>
58. Ortiz, L., Energías Xilogeneradas. 1994: Vigo. España.
59. Martirena, j.F., Alternativas para la Producción Local de Cerámica Roja. 2009, Proyecto Habitat. Cuba Seminario Nacional Informe de resultados: Santiago de Cuba.
60. Cultrone, G., . et al., Influence of Mineralogy and firing temperatures on the porosity of bricks. Journal of the European Ceramic Society, 2004. Vol. 24 p. 547-564.
61. Villar-Cociña, E.F.M.R., Valencia E. M. and Savastano H Jr. , Study of the pozzolanic reaction kinetics in sugar cane bagasse-clay ash/calcium hydroxide system: kinetic parameters and pozzolanic activity. Advances in Cement Research, 2009. No 1.(21).
62. Paya, J, y, Colaboradores.”,, “Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. Cement & Concrete Research, 2001. Vol 31(2): p. pp: 41-49.
63. Machado, I., . Martirena, J.F.. Moya, I. , Densificación de biomasa con prensas manuales, obtención del Bloque Sólidos Combustible. , in Conferencia Internacional MAS XXI 2003: Santa Clara. Villa Clara. Cuba.

64. Guerra, C.W., . Menendez E. A y colab. , “Estadística” 2006, La Habana. Cuba: Editorial Felix Varela.
65. Alujas, A.D., Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multi componente, in Facultad de Construcciones. 2010, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara.
66. Martirena, F., Middendorf, B, Day R.L, Gehrke M, Roque, P, Martinez, L, Betancourt, S.. , Rudimentary, low tech incinerators as a means to produce reactive pozzolan out of sugar cane straw,. Cement & Concrete Research, 2006. Vol.36: p. 1056-1061.
67. Boateng, A.A., Skeete, D.A., Incineration of Rice Hull for Use as Cementitious Material. The Guyana Experience. Cement and Concrete Research, 1990. Vol. 20,: p. pp 795-802, .
68. Mehta, P.K., , Monteiro, Paulo J.M. , , “CONCRETE: Microstructure, Properties, and Materials”,. 1993 The Mc Graw Hill Companies Inc, College Custom Series Second edition.
69. Tanquero, N., , Curso de generadores de vapor. 2002: Puerto Ordaz, Venezuela.
70. Quennoz, A., Influence of clay type and burning conditions on the production of reactive pozzolan for low-cost housing. 2006, Escuela Politecnica Federal de Lausana: Lausana.
71. Day, R., Martirena Hernandez, J.F., Middendorf, B. . . Use of agricultural wastes for the production of building materials and energy. in 8th International Energy Forum. ENERGEX 2000. 2000. Las Vegas. USA.
72. Todor, D.N., Thermal Analysis of Materials. 1976, Kent, England.
73. Betancourt, R.S., Estudio teórico experimental de las propiedades puzolánicas de las cenizas de bagazo y paja de caña, in Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil. 1997, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.: Santa Clara.
74. Jauberthie, J.e.a., “Origin of the pozzolanic effect of rice husks”, . Construction and Building Materials, 2000. Vol. 13(No. 8, ): p. pp: 419-423

#### **Sobre los autores:**

Dr. Ing. Iván Machado López. Profesor Asistente e Investigador del Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas

Dr. Cs Ing. José F. Martirena Director e Investigador Titular del Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

Dr. Ing. Idalberto Herrera Moya. Profesor Asistente e Investigador del Centro de Estudios de Tecnologías Ambientales de la Facultad de Mecánica de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

Dra Ing. María Jesús Lamela- Rey Profesora Titular de la Universidad de Oviedo. Asturias. España.

#### **Agradecimientos:**

Al Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) por su colaboración a través del proyecto 0315 (Impacto ambiental del uso de residuos de biomasa densificada para la obtención de materiales de construcción).

A la Universidad de Oviedo por su colaboración a través del proyecto de fin de carrera "Estudio y aplicación de la biomasa densificada como alternativa energética en países en vías de desarrollo".

A Cooperación Suiza para el Desarrollo (COSUDE) por su colaboración a través del proyecto "La reforestación con bambú como una alternativa ecológica en la producción sostenible de materiales de construcción y viviendas (Bambú-biomasa)" y el resultado de esta etapa denominado Tecnología disponible para producir combustible alternativo y ladrillos a partir del bambú y residuos de cosecha.

A todos los estudiantes y profesores que de una forma u otra han colaborado en estos proyectos.