

Modelos de compresión aplicados al proceso de densificación de combustibles sólidos binarios carbón-madera

Constitutive models applied during densification of coal-wood binary solid biofuels

Carlos Andrés Forero-Núñez

Ph. D. Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales
Bogota, Colombia
cforero@eccci.edu.co

Gabriel Camargo-Vargas

M. Sc. Universidad Libre de Colombia
Bogota, Colombia
gabrielcamargov@unilibrebog.edu.co

Fabio Emiro Sierra-Vargas

Ph. D. Universidad Nacional de Colombia
Bogota, Colombia
fesierrav@unal.edu.co

Resumen— Una de las alternativas para el aprovechamiento de la biomasa es a través de los biocombustibles sólidos generados mediante procesos de densificación de mezclas carbón-aserrín; sin embargo, la densidad final y el grado de cohesión de estos sólidos varían dependiendo de características tales como cantidad de carbón en la mezcla y presión de compresión. El presente trabajo busca evaluar la aplicabilidad que poseen los modelos de compresión existentes, elaborados para combustibles a partir de residuos agrícolas cuando se utilizan en mezclas carbón-aserrín de tamaño de partícula uniforme a diferentes presiones. A diferencia de los modelos Walker y Heckel, el modelo de Kawakita dio los mejores resultados para las mezclas binarias con factores de correlación lineal superiores a 0,95. Esto permite analizar las diferentes presiones que se deben manejar para alcanzar valores de densidad superiores a 900kgm^{-3} , beneficiando la etapa de diseño de los sistemas de manufactura.

Palabras claves— Biomasa, carbón, densificación, energía renovable, modelos constitutivos, pellets.

Abstract— An alternative to harness biomass resources for energy production is by producing solid biofuels. The final density and the durability of solid biofuels made of coal-sawdust mixtures vary depending upon characteristics such as the coal mass ratio in the mixture and the applied pressure. This work aims to evaluate the applicability that existing constitutive models, obtained from biofuels based on agricultural residues, have when using binary coal-sawdust mixtures of uniform particle size at different pressures. Unlike the Walker and Heckel model, the Kawakita model exhibited the best results fitting a coefficient of determination R^2 greater than 0.95.

This model allows to analyze the different pressures that should be employed to achieve solids with final densities above 900kgm^{-3} , improving the design stage of manufacturing systems.

Keywords— Biomass, coal, constitutive models, densification, pellets, renewable energy.

1. INTRODUCCIÓN

El uso indiscriminado de combustibles fósiles como fuente principal de energía térmica y eléctrica ha generado diversos problemas ambientales, sociales y económicos. Dentro de estos, el calentamiento global es quizá el de mayor impacto, puesto que el aumento progresivo en la temperatura promedio del planeta ha provocado cambios notables en el clima afectando el modo de vida de los seres humanos. A través de los años, este fenómeno ha sido cada vez más visible por el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero tales como el Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Vapor de Agua (H_2O), Óxido de Nitrógeno (NO_x), entre otros. La mayoría de estos compuestos se obtienen como productos del proceso de combustión de fuentes fósiles. Por ejemplo, las emisiones globales de CO_2 aumentaron de 15 a 30 Gt por año entre 1971 y 2010, siendo el sector energético la principal fuente de generación con

el 41% del total, seguido por el sector transporte e industrial con el 22 y 21% respectivamente [1].

Con base en estos problemas y la necesidad de mitigar el impacto ambiental causado por el sector energético, distintos países alrededor del mundo han incentivado el uso de sistemas de energía que aprovechen fuentes más limpias, renovables y sostenibles. Entre el año 2004 y 2012, la nueva inversión en proyectos de energías renovables pasó de 40 a 244 miles de millones de dólares por año [2], resultando en una capacidad de generación instalada cercana a 1470GW capaz de cubrir cerca del 21,7% de la generación de energía eléctrica mundial al final de 2012.

Cerca del 67% de esta capacidad instalada corresponde a los grandes sistemas hidroeléctricos, mientras que la restante 33% equivale a todas las otras diversas tecnologías de energías renovables existentes, tales como: paneles fotovoltaicos, concentradores solares térmicos, pequeñas centrales hidroeléctricas, turbinas eólicas, bombas de calor, sistemas geotérmicos de transformación de energía mareomotriz y/o de aprovechamiento de biomasa. La biomasa es en la actualidad una de las fuentes de energía más empleadas después de los combustibles fósiles, sistemas hídricos o turbinas eólicas. Para 2011, la biomasa ocupó el tercer recurso renovable con mayor capacidad eléctrica instalada, cerca de 54GWe, y el primero para generación de energía térmica con 270GWth aproximadamente [3]. Adicionalmente, aún se considera la biomasa tradicional como una de las principales fuentes de energía primaria, especialmente empleada en sistemas de calefacción y cocinas ubicadas en zonas rurales.

Como biomasa se puede entender todo aquel material orgánico que debido a su composición química, principalmente lignina, celulosa y hemicelulosa, posee potencial para generar energía térmica mediante un proceso de combustión[4]; asimismo, es capaz de transformarse en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos mediante diversos procesos químicos y/o biológicos [5]; Debido a estos, son múltiples los materiales considerados como biomasa, entre los cuales se encuentran aquellos provenientes de residuos forestales o de la industria de la madera, residuos agrícolas, residuos de animales e inclusive residuos sólidos municipales. Con base en esta amplia diversidad de posibles productos, las tecnologías existentes

para su aprovechamiento son distintas dependiendo de las propiedades físico-químicas de las materias primas. Por ejemplo, es posible generar biocombustibles líquidos tales como: biodiesel o bioetanol a partir de procesos de transesterificación y fermentación respectivamente empleando materiales sólidos con contenidos de ácidos grasos o almidones; biocombustibles gaseosos como biogas o gas de síntesis mediante el proceso de biodigestión anaerobia o gasificación de residuos orgánicos o lignocelulósicos[6]. De estos últimos combustibles gaseosos es posible, a su vez, obtener biometano e hidrógeno, útiles para remplazar parte de los combustibles fósiles empleados en motores de combustión interna y calderas mediante sistemas duales [7]-[9].

La biomasa posee diversas ventajas como fuente de energía alternativa, entre las cuales cabe mencionar que: 1) es un recurso de bajo costo especialmente cuando se emplean residuos de la industria o municipales; 2) es un recurso limpio con bajos contenidos de azufre y nitrógeno evitando la alta generación de SO_x y NO_x; 3) en la mayoría de los casos el CO₂ generado del proceso es equivalente al absorbido durante el crecimiento de la planta mediante la reacción de fotosíntesis; 4) gran diversidad y distribución descentralizada que permite su aprovechamiento en sistemas de pequeña escala; y 5) generación de empleo no capacitado durante las etapas de recolección y clasificación. Sin embargo, a pesar de estos beneficios, tiene asociados algunos inconvenientes. Generalmente son materiales con altos contenidos de humedad que poseen baja densidad y poca uniformidad en su tamaño, causando dificultades en el proceso de almacenamiento, transporte y aprovechamiento en su forma original [10].

Debido a estos factores, se hace necesario realizar el pretratamiento de estos materiales mediante procesos de densificación o aglomeración buscando generar sólidos de tamaños establecidos, formas definidas y mayores densidades, conocidos como pellets o briquetas; dentro de las principales ventajas que ofrecen estos se encuentran: 1) un almacenamiento más eficiente; 2) combustión controlada y uniforme disminuyendo la generación de gases contaminantes; 3) bajo contenido de humedad; 4) sistemas de alimentación más sencillos; 5) facilidad de transporte

y almacenamiento [11]. Como consecuencia de esto, diversos sistemas de transformación aprovechan los pellets para la generación de energía térmica que puede ser posteriormente convertida en energía eléctrica a tal punto que la industria de producción de pellets ha aumentado exponencialmente de 1,5 a 22,4 millones de toneladas en el periodo comprendido entre 2000 y 2012 [2]. Algunas de las tecnologías para el uso de pellets han sido evaluadas variando el material constitutivo de los mismos. Sistemas de gasificación de pellets de aserrín, de madera o de bagazo de caña han sido analizados [12]-[14]; así como sistemas de combustión para calentamiento residencial o generación de energía, demostrando ser factibles para el uso de estos combustibles sólidos [15],[16].

En general estos resultados han mostrado que independientemente del proceso empleado para el aprovechamiento de estos combustibles sólidos, las propiedades fisicoquímicas que poseen estos materiales son determinantes en el comportamiento del sistema y en el impacto ambiental del mismo, motivo por el cual diversas investigaciones se enfocan en analizar propiedades como la densidad, contenido de humedad, volátiles y cenizas –análisis próximo-, análisis elemental, poder calorífico y propiedades mecánicas de dureza y resistencia, tanto para productos elaborados a partir de aserrín como de otros residuos agrícolas, tales como las fibras y cáscaras de coco, cáscaras de arroz o cuesco de Palma, pastos o incluso mezclas de aserrín con carbón [17]-[21].

Las propiedades fisicoquímicas de los pellets dependen de parámetros como composición química de los materiales, procesos de acondicionamiento, equipo de densificación, entre otros; estos parámetros inciden en el proceso de densificación. Este proceso es un fenómeno complejo en el cual a medida que aumenta la presión las partículas sólidas comienzan a reorganizarse disminuyendo su porosidad sin variar su estructura. Después de este momento, dichas estructuras comienzan a sufrir de algunos efectos mecánicos a causa de la deformación elástica y plástica, así como el efecto de fuerzas químicas intermoleculares como la atracción fuerzas Van der Waals y/o formación de puentes sólidos[22]. Varios han sido los modelos empleados para describir este comportamiento, algunos de ellos son reológicos,

racionales o constitutivos [23]. Estos últimos buscan predecir propiedades de los sólidos a partir de mediciones empíricas y análisis estadísticos de resultados. Entre los modelos constitutivos existentes está el propuesto por Jones, Kawakita, Hekel, Walker, y Cooper Eaton [23], [24]. El presente trabajo pretende evaluar la aplicabilidad de varios de estos modelos, establecidos a partir pellets de residuos agrícolas, en sólidos generados a partir de mezclas binarias de Carbón mineral con Aserrín a diferentes relaciones másicas, así como analizar algunas propiedades fisicoquímicas de los combustibles sólidos generados mediante un proceso de compresión a distintas presiones. Esto permite identificar las condiciones de operación más adecuadas para la producción de combustibles sólidos que posean una densidad final acorde con la normatividad internacional.

2. METODOLOGÍA

La recolección del aserrín se llevó a cabo en el taller de mantenimiento de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, mientras que el carbón mineral se recogió de los residuos sólidos que posee el laboratorio de Carbones de INGEO-MINAS. A cada una de las muestras se les llevó a cabo una serie de ensayos para identificar algunas propiedades fisicoquímicas de interés.

Se determinó la densidad a granel del material mediante la norma ASTM E873 – 82 por la cual el material se introduce en un recipiente de volumen conocido, posteriormente se pesa la cantidad de material que se puede almacenar en el recipiente sin ejercer presión alguna sobre la muestra de tal forma que está en su estado natural sin compresión. Asimismo, se efectuaron algunas pruebas para realizar el análisis próximo de las muestras, dichos ensayos consistieron en evaluar el contenido de humedad norma ASTM E 871 – 82, contenido de material volátil, contenido de cenizas ASTM E1755 – 01 y carbón fijo ASTM 1756 – 08.

Posteriormente, se realizó un análisis último de las muestras -determinación de contenido de azufre, carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno- mediante la norma ASTM D5373 empleando el método semiautomático en un analizador de HCN Truspec ubicado en el laboratorio de Carbones de INGEO-MINAS. Posterior a este análisis, se determinó el poder calorífico empleando una bomba

calorimétrica. El carbón fue molido y tamizado con el fin de utilizar únicamente el material recogido en la malla No. 20, cuyo diámetro es superior a 0.853 mm e inferior a 1 mm.

Una vez se caracterizaron las muestras, se procedió a realizar las mezclas de las mismas a diferentes relaciones másicas, para lo cual se emplearon cinco grupos: aserrín 0% - carbón 100% (A(0)Ca(100)), aserrín 15% - carbón 85% (A(15)Ca(85)), aserrín 30% - carbón 70% (A(30)Ca(70)), aserrín 50% - carbón 50% (A(50)Ca(50)), aserrín 100% - carbón 0% (A(100)Ca(0)). Estas muestras fueron comprimidas empleando una prensa hidráulica ubicada en el laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables de la Universidad Nacional de Colombia mencionada en un artículo anterior[19], variando la presión de compresión entre 67 y 180 MPa. Posteriormente, se midieron las dimensiones, diámetros y alturas de los sólidos obtenidos; el volumen se determinó tomando como base su forma cilíndrica, y su peso; de tal forma que es posible calcular la densidad del material final. Estos valores se emplean para evaluar la aplicabilidad de los modelos de compresión existentes disponibles en literatura [23],[24]. El modelo Walker busca relacionar la relación de volumen (V_R) como una función de la presión aplicada (P).

$$V_R = m * \ln P + b \quad (1)$$

$$V_R = \frac{V}{V_S} \quad (2)$$

Donde V equivale al volumen final y V_S al volumen inicial antes de la compresión. El modelo Heckel relaciona el proceso de compresión con la cinética de una reacción donde se tienen en cuenta las fracciones másicas de los componentes presentes en el proceso de densificación (x_i), así como la densidad final (ρ_f), la inicial de cada componente (ρ_i) y la densidad inicial de la mezcla (ρ_0).

$$\ln \frac{1}{1 - \rho_f} = mP + bb = \ln \left(\frac{1}{1 - \rho_0} \right) \quad (3)$$

$$\rho_f = \frac{\rho}{\rho_1 * x_1 + \rho_2 * x_2} \quad (4)$$

Finalmente el modelo Kawakita relaciona la presión (P) con la deformación de ingeniería del material en términos del cambio del volumen (C), definido como una función del volumen final (V) y el volumen inicial (V_0). Así mismo los valores de a y

1/b se atribuyen a la porosidad y al esfuerzo límite antes de la fractura del material.

$$\frac{P}{C} = \frac{1}{ab} + \frac{P}{a} \quad (5)$$

$$C = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad (6)$$

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos del análisis próximo son recopilados en la Tabla I e indican las diferencias importantes entre el residuo fósil y la biomasa.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE CARBÓN Y ASERRÍN EMPLEADAS

Propiedad	Unidad	Carbón	Aserrín
Densidad a granel	kg/m ³	779.248	197.227
Análisis Próximo	% m.h		
Humedad		3,85	10,01
Material Volátil		36,86	73,4
Carbón Fijo		52,44	13,71
Cenizas		6,85	2,88
Análisis Último	% m. s.		
Carbono		70,9	50,26
Hidrógeno		6,91	8,74
Nitrógeno		1,39	1,04
Oxígeno		13,1	36,86
Azufre		0,85	0,22
Poder Calorífico	MJ/kg	28.616	14.81

El carbón se caracteriza por su alto contenido de carbón fijo (52,44 %wt), baja humedad (3,85%) y alto contenido de cenizas (6,85%); mientras que los materiales lignocelulósicos como el aserrín se caracterizan por tener un mayor contenido de material volátil (73,4%) y humedad (10,01%).

Estas características influyen en el comportamiento de los materiales durante los procesos de combustión; elevadas cantidades de humedad en el material generan mayores pérdidas de energía en la etapa de secado previa a la pirólisis y por ende un menor poder calorífico neto. El material volátil presente en el material permite iniciar procesos de combustión a menores temperaturas, puesto que dichas sustancias son liberadas durante la pirólisis generando llama. Es por esto que la combustión de carbón requiere mayores canti-

dades de energía y no es igual de rápida la formación de la llama, en comparación con la combustión del aserrín; sin embargo, es el contenido de carbón fijo el que le da el mayor aporte energético al combustible posterior a la reacción de combustión. Finalmente, el análisis próximo permite identificar que la adición de aserrín a mezclas de biocombustibles hechos con carbón ayuda a disminuir la cantidad de cenizas generadas. Estos son compuestos ricos en minerales que generalmente salen en los gases de combustión como cenizas volantes o quedan en los equipos causando problemas de taponamiento.

Asimismo, se observa que las densidades difieren considerablemente a pesar de que ambos compuestos tienen el mismo tamaño de partícula; el carbón posee una densidad a granel cercana a los 779 kgm^{-3} , que es aproximadamente tres veces mayor que la densidad del aserrín (197 kgm^{-3}). Esto se da principalmente debido a la menor cantidad de espacio intersticial existente en el carbón, el cual, debido a su proceso de formación a altas presiones, temperaturas y millones de años, es un compuesto cristalino mucho más rígido, con sus átomos y estructuras más cercanos entre sí. Por otro lado, el aserrín es un compuesto lignocelulósico que posee lignina, celulosa, y hemicelulosa; sustancias poliméricas con enlaces que poseen más espacio intersticial. De igual forma, este material orgánico es fibroso permitiendo una mayor cantidad de aire en sus poros.

Los resultados del análisis último indican la composición porcentual con base en el contenido de C, H₂, N₂, O₂ y S₂. Al comparar los valores obtenidos se puede apreciar la menor relación

atómica H/C y O/C existente en el carbón en comparación con la del aserrín, típica característica de este tipo de compuestos que identifica a su vez el comportamiento del poder calorífico de acuerdo con el diagrama de Van Krevelen [26]. Igualmente, es importante identificar que la adición de aserrín en las mezclas resulta en una menor cantidad de azufre presente en el combustible, teniendo en cuenta que el carbón posee cerca del 0,85%, ligeramente superior al 0,22% dado en el material lignocelulósico. Esto a su vez ocasiona un menor impacto ambiental derivado de la formación de óxidos de azufre.

Los valores finales de la densidad para cada una de las muestra se presentan en la Tabla II.

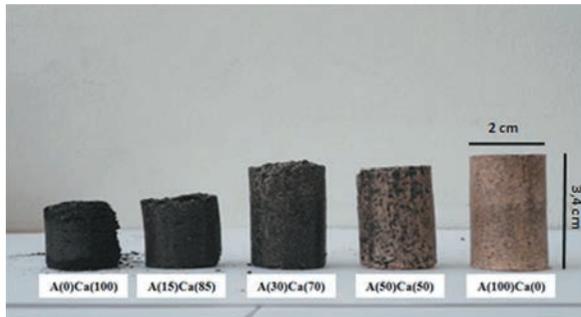
Se observa que a medida que aumenta el contenido de aserrín, el combustible sólido final posee mayor densidad. Si se compara el valor inicial de la densidad de la muestra A(100)Ca(0) con el final a una presión baja (67 MPa) se puede ver que el aumento es del orden de 5.25 veces, mientras que para la muestra A(0)Ca(100) el aumento en dicha propiedad no es mayor a 0.98 veces. Esto indica la influencia de factores en la estructura cristalina de la biomasa, tales como las cadenas de lignina y la presencia de diversos compuestos que no existen en el Carbón y que permiten la deformación del material a presiones bajas. Debido a que el aserrín es un material fibroso con compuestos lignocelulósicos, aporta propiedades plásticas y visco-elásticas a la mezcla, las cuales permiten una mayor deformación durante el proceso de prensado [10], [22]. Por tal motivo, aquellos sólidos hechos con mayores cantidades de aserrín alcanzaron densidades superiores a los 800 kgm^{-3} .

TABLA II
DENSIDAD FINAL DEL SÓLIDO DESPUÉS DEL PROCESO DE DENSIFICACIÓN A DIFERENTES PRESIONES

Muestra	Presión (MPa)				
	Inicial (kgm^{-3})	67	89	133	178
A(0)Ca(100)	779.25	791.59	817.54	945.52	958.52
A(15)Ca(85)	691.95	784.91	852.18	865.53	869.27
A(30)Ca(70)	604.64	832.71	865.00	883.24	891.48
A(50)Ca(50)	488.24	904.14	915.13	949.13	988.15
A(100)Ca(0)	197.23	1035.06	1037.40	1068.50	1094.67

De igual forma, se observa que al adicionar 30% de aserrín es posible obtener biocombustibles sólidos con una forma más definida y uniforme, esto teniendo en cuenta que si bien los sólidos con contenidos de carbón mayores a 70% eran cilíndricos, estos poseían una baja resistencia al impacto, por lo que durante el transporte y almacenamiento sufrirían fracturas que dañarían su forma. Como se puede ver en la Fig. 1, los sólidos hechos a partir de mezclas con contenidos de carbón mayores a 70% poseen en las paredes microfisuras y bordes menos acabados. Estos compuestos no son capaces de densificarse de manera adecuada a bajas presiones y sin el uso de agentes aglomerantes debido a que la fricción causada entre las paredes del molde y las partículas es mayor, lo cual no permite el desarrollo de las etapas posteriores del mecanismo de densificación, etapas como formación de enlaces, deformación plástica, puentes sólidos, entre otros. A diferencia de los anteriores, se aprecia cómo aquellos pellets hechos con mezclas 50-50 poseen una mejor resistencia, menores microfisuras en sus superficies externas y bordes rectos, indicando la poca pérdida de material durante su manipulación, una mayor resistencia mecánica y durabilidad.

Fig.1 SÓLIDOS OBTENIDOS A PARTIR DEL PROCESO DE COMPRESIÓN A 20 BAR

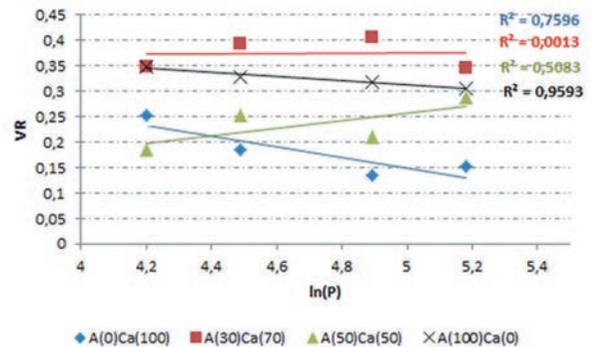


Fuente: autores.

Al relacionar los resultados obtenidos y graficar el volumen reducido V_R con el logaritmo natural de la presión según el modelo Walker, se debería obtener una línea recta. Los resultados se indican en la Fig. 2. Para las muestras evaluadas este modelo únicamente es aplicable cuando se emplea aserrín sin mezclar, donde se alcanzan valores de correlación (R^2) superiores a 0,95. Lo cual indica la poca aplicabilidad que tiene este modelo para sólidos binarios y la baja flexibilidad

de este modelo constitutivo para materiales no lignocelulósicos.

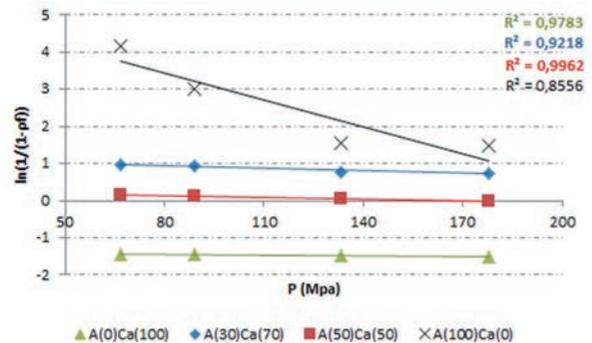
Fig. 2. APLICACIÓN DEL MODELO DE COMPRESIÓN WALKER A COMBUSTIBLES SÓLIDOS DE ASERRÍN Y CARBÓN MINERAL



Fuente: autores.

Los resultados de la aplicación del modelo Heckel se encuentran en la Fig. 3. Según los resultados obtenidos, la tendencia lineal se mantiene para las muestras que poseen un contenido de Carbón menor al 50%. Las líneas de tendencia aplicadas a los resultados obtenidos para las mezclas binarias carbón-aserrín 0/100 y 50/50 tienen factores de correlación superiores a 0,95. Si bien es cierto la linealidad se da para la muestra A(30)C(70) su factor de correlación (R^2) es cercano a 0,92 indicando una mayor divergencia del comportamiento lineal. Así, el modelo Heckel puede ser aplicado para compuestos binarios de carbón-aserrín, donde el contenido del primero no supere el 50%.

Fig.3. APLICACIÓN DEL MODELO DE COMPRESIÓN HECKEL A LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS A PARTIR DE MEZCLAS ASERRÍN - CARBÓN MINERAL

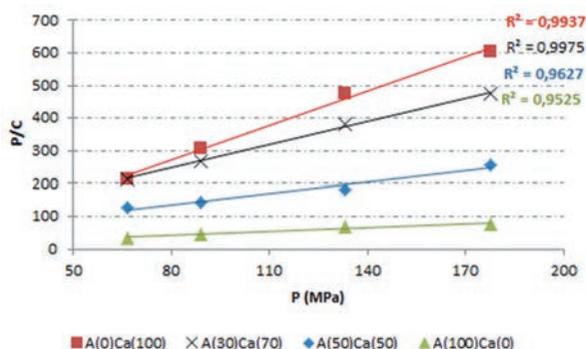


Fuente: autores.

Por último, la Fig. 4 presenta los resultados de la aplicación del modelo Kawakita. Este tiene en cuenta la deformación mecánica del material durante su proceso de compresión, lo cual resulta

en un mejor ajuste de los datos. Esto teniendo en cuenta la linealidad existente en todos los casos, donde los factores de correlación obtenidos son mayores a 0,95. El modelo de Kawakita indica de manera cualitativa una relación existente entre la pendiente de la línea recta con el inverso de la porosidad final del sólido. Como se puede ver en la Figura 4, las líneas con mayor pendiente son aquellas en que el contenido de carbón es mayor, lo que indica una menor porosidad en comparación con los sólidos hechos con aserrín. De la misma manera, se ve la incidencia del aserrín en la deformación del material, los valores de la ordenada vertical indican la relación entre la presión aplicada y la deformación del compuesto. Cuando esta relación es menor, mayor es la deformación comparando mezclas a igual presión. Como se mencionó con anterioridad, una de las ventajas del uso de aserrín en la producción de combustibles sólidos es la posibilidad de densificarlos mediante la aplicación de fuerzas mecánicas para lograr mayores densidades, compuestos resistentes y de menores dimensiones.

Fig.4. APLICACIÓN DEL MODELO DE KAWAKITA PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS A PARTIR DE MEZCLAS DE CARBÓN ASERRÍN



Fuente: autores.

4. CONCLUSIONES

Los modelos de compresión propuestos para la densificación de mezclas de aserrín y carbón son de utilidad cuando se desea predecir el comportamiento de la densidad y el volumen con la presión aplicada. El modelo Heckel resultó acertado para mezclas cuyo contenido de carbón no exceda el 70% en peso, mientras el de Kawakita es aplicable a las diferentes mezclas y relaciona adecuadamente la deformación de los materiales en función de la presión aplicada. La predicción de algunas de las propiedades de los pellets, en

especial la densidad final alcanzada, permite hacer mejores análisis de las características y requerimientos que deben tener los sistemas de densificación mediante compresión.

Los valores finales de las densidades, la resistencia y la forma uniforme de los pellets indican que es posible generar combustibles sólidos de mezclas de aserrín y carbón mineral a partir del proceso de compactación a bajas presiones; es posible teniendo en cuenta los valores finales de las densidades, la resistencia que poseen, así como la forma uniforme de los mismos. Estos combustibles son una buena alternativa para mitigar los efectos causados por el uso de Carbón mineral como combustible en procesos de generación de energía, aunque el poder calorífico no sea el mismo, las emisiones de CO_2 y de SO_x disminuyen.

Mediante procesos de densificación a bajas presiones es posible producir combustibles a partir de residuos sólidos que no poseen valor actualmente, generando un ingreso adicional a la industria maderera. Sin embargo, es de interés para futuras investigaciones analizar algunas otras variables que influyen en las características del producto, tales como el tamaño de la partícula empleada, la humedad y temperatura inicial de las materias primas, basándose en el hecho de que parte de las etapas que componen el mecanismo de densificación, así como la formación de enlaces y puentes sólidos depende en gran medida de otras propiedades diferentes a la presión aplicada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del personal de la red internacional para la promoción de la investigación y docencia en energización rural para el desarrollo agroindustrial sostenible (red PRIDERAS), y el aporte económico dado por la dirección de investigación de sede mediante el proyecto código 12651.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, "CO2 emissions from fuel combustion 'Highlights'," Paris: International Energy Agency, Online Report, 2012.
- [2] REN21, "Renewables 2013 Global Status Report," Paris: Ren21 Secretariat, 2013.

- [3] REN21, "Renewables 2012 Global Status Report," Paris: Ren21 Secretariat, 2012.
- [4] C. A. Forero, C. A. Guerrero and F. E. Sierra, "Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: un revisión a los modelos del proceso de gasificación," *Revista Iteckne*, vol. 9, No. 1, pp. 21-30, 2012.
- [5] Z. Zhao and H. Yan, "Assessment of the biomass power generation industry in China," *Renewable Energy*, vol. 37, pp. 53-60, 2012.
- [6] C. A. Forero, J. U. Castellanos and F. E. Sierra, "Control de una planta prototipo de gasificación de biomasa mediante redes neuronales," *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, vol. 4, pp. 161-168, 2013.
- [7] N. N. Mustafi, R. R. Raine and S. Verhelst, "Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels," *Fuel*, vol. 109, pp. 669 – 678, 2013.
- [8] J. E. Arango, F. E. Sierra and V. Silva, "Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogas," *Revista Tecnura*, vol. 18, pp. 152 – 164, 2014,
- [9] B.B. Sahoo, N. Sahoo and U.K. Saha, "Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines - A critical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1151 – 1184, , 2009.
- [10] N. Kaliyan and R. Vance, "Factors affecting strength and durability of densified biomass products," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, pp. 337-359, 2009.
- [11] C. Erlich and T. H. Fransson, "Downdraft gasification of pellets made of wood, palm oil residues bagasse: Experimental study," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 899-908, 2011.
- [12] K.N. Finney, V.N. Sharifi, and J. Swithenbank, "Combustion of sent mushroom compost and coal tailing pellets in a fluidised-bed," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 860-868, 2009.
- [13] C. Mandl, I. Obernberger, and F. Biedermann, "Modelling of an updraft fixed-bed gasifier operated with softwood pellets," *Fuel*, vol. 89, pp. 3795 – 3806, 2010.
- [14] Catharina Erlich, Emilia Björnbom, David Bolado, Marin Giner, and Torsten H. Fransson, "Pyrolysis and gasification of pellets from sugar cane bagasse and wood ," *Fuel*, vol. 85, pp. 1535 – 1540, 2006.
- [15] M. Olsson, J. Kjällstrand, and G. Petersson, "Specific chimney emissions and biofuel characteristics of softwood pellets for residential heating in Sweden," *Biomass and Bioenergy*, vol. 24, pp. 51-57, 2003.
- [16] C. Gilbe, M. Öhman, E. Lindström, D. Boström, R. Backman, R. Samuelsson and Jan Burvall, "Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets," *Energy & Fuels*, vol. 22, pp. 3536-3543, 2008.
- [17] Ingwald Obernberger and Gerold Thek, "Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour," *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, pp. 653 – 669, 2004.
- [18] S. Mani, L. G. Tabil and Shahab Sokhansanj, "Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, pp. 648-654, 2006.
- [19] C. A. Forero, J. Jochum and F. E. Sierra, "Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut and oil palm residues, regarding European standards," *Environmental Biotechnology*, vol. 8, no. 2, pp. 67-76, 2012.
- [20] C. Telmo and J. Lousada, "Heating values of wood pellets from different species," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, pp. 2634-2639, 2011.
- [21] Z. Liu, A. Quek, and R. Balasubramanian, "Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1315-1322, 2014.
- [22] W. Stelte, JK. Holm, AR Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt, U. Henriksen, "A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, pp. 910-918, 2011.
- [23] N. Kaliyan and R. Vance, "Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass," *Biosystems engineering*, vol. 104, pp. 47-63, 2009.
- [24] P. Adapa, L. Tabil, and G. Schoenau, "Compression Characteristics of Selected Ground Agricultural Biomass," *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, vol. 11, p. Manuscript 1347, 2009.
- [25] P.J. Denny, "Compaction equations: a comparison of the heckel and Kawakita equatoins ," *Powder Technology*, vol. 127, pp. 162-172, 2002.
- [26] I. Janajreh and M. Al Sharah, "Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of wood chips," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 783-792, 2013.