



ALTERNATE COMPOSITE MATERIAL FOR MINING SHORING SYSTEMS CARBON OF NORTE DE SANTANDER

MATERIAL COMPUESTO ALTERNATIVO PARA SISTEMAS DE ENTIBACIÓN DE MINERÍA DE CARBÓN DE NORTE DE SANTANDER

*Triviño, N. R. *, Bolívar, R**, Parra, C.P****

**Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Ingeniería Mecánica.
Km. 1 Vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.*

E-mail: nrichardtj@unipamplona.edu.co,
rbolivarl@unipamplona.edu.co **, claudypame@gmail.com ****

Universidad de Pamplona

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 140

E-mail: {nrichardtj, rbolivarl }@unipamplona.edu.co

Abstract:

Composite materials were developed using epoxy resin system as a matrix and ceramic dust waste as reinforcement to replace the wood commonly used in the shoring systems in the Norte de Santander carbon mines. The characterization of the materials was carried out by bending tests and a laboratory mounting shoring system. The optimal sizes of columns and beam were studied by collecting field data, simulating and designing experiments of the influential variables. Reverse engineering was performed to determine the required properties of the system using the Ashby methodology. The impact of deforestation due to use of wood in the department of Norte de Santander was also determined.

Keywords: Mine Shoring, Composite material, Deforestation.

Resumen: Se desarrollaron materiales compuesto usando sistema de resinas epóxicas como matriz y desechos de polvo de cerámica como refuerzo para





reemplazar la madera usada comúnmente en los sistemas de entibación en las minas de carbón de Norte de Santander. La caracterización de los materiales se realizó mediante ensayos de flexión de y por un montaje a nivel laboratorio del sistema de entibación. Se estudiaron los tamaños óptimos de los capis mediante recolección de datos de campo, simulación y diseño de experimentos de las variables influyentes. Para determinación de las propiedades requeridas del sistema, se realizó ingeniería inversa usando la metodología de Ashby. Se determinó el impacto de la deforestación por el uso de la madera en el departamento de Norte de Santander.

Palabras clave: Entibación minera, Materiales Compuestos, Deforestación.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia se encuentra entre las cuatro economías más grandes de Latinoamérica, este crecimiento es debido entre otros factores a la minería. Los minerales que más se explotan son el carbón, oro, plata, hierro, ferroníquel y materiales para la construcción (UNAL, 2014). En el 2017 Colombia tenía el 0,5% (4881 Millones de Toneladas) de las reservas mundiales de carbón, ocupando el segundo lugar en Latinoamérica y el decimoséptimo lugar a nivel mundial (BP, 2018). Los departamentos con mayor potencial carbonífero al interior del país son siete: Antioquia, Valle del Cauca, Cauca, Boyacá, Cundinamarca, Santander y Norte de Santander (UPME, 2010, 2012, 2016, 2017a, 2017b). Norte de Santander es una región con potencial en el sector minero-energético y el departamento ha visionado este sector como polo de desarrollo de la región (Colciencias *et al.*, 2014). En el 2015 el departamento participaba con 1,6% de las reservas de carbón del país (101,53 Mt) y se ubicaba en el tercer lugar de la minería al interior del país (Colciencias *et al.*, 2014; UPME, 2012).

La explotación de carbón le brinda al departamento el 98,56% de las regalías, por encima de la explotación de materiales para la construcción, la roca fosfórica, las calizas y las arcillas (ANM, 2017; Laguado, 2016). El proceso de explotación de carbón, involucra tres etapas: el desarrollo y montaje de las vías de acceso (obras de

infraestructura y servicios de la mina); la delimitación de las áreas dentro del yacimiento (niveles y subniveles, tambores entre otros); y el arranque y producción (realizada mediante diferentes métodos y sistemas de explotación) (UPME, 2012). La explotación de carbón se realiza principalmente en la costa atlántica y en el interior del país. La minería de carbón a gran escala se realiza en la costa atlántica, mientras que en el interior predomina una minería subterránea y poco tecnificada y de baja inversión en comparación a las de cielo abierto (Cerrejón, 2018; Drummond, 2017; UPME, 2012). El soporte y la estabilidad mecánica de los socavones se realiza frecuentemente mediante sostenimiento (ANM, 2017; Colciencias *et al.*, 2014; UPME, 2012).

El sostenimiento que usan las minas de carbón de la región consiste en la colocación de un elemento estructural dentro del túnel, que brinde estabilidad al terreno que va quedando debilitado, por acción de la cavidad bajo tierra. Existen dos tipos de sostenimientos, el natural que es cuando la roca se sostiene a sí misma y el sostenimiento artificial que es creado por el hombre (las entibaciones, las fortificaciones y los sostenimientos especiales). La desventaja de estos últimos son el aumento de inversión y la necesidad de recubrimientos al trabajar en ambientes con presencia de humedad (ASOCARBON,





2004). La entibación de puesta alemana (sostenimiento con madera) es el método más usado en la región. Su conformación consiste en tres maderas rollizas que una vez ensambladas forman un trapecio con el suelo. En la parte de arriba, se ubica un capiz que sostiene el techo del socavón y se ubica de manera horizontal, actuando como viga, y dos columnas de apoyo, empotradas en el suelo conocidas como palancas, que van hasta cada extremo del cápiz. La palanca y el cápiz tienen en su extremo superior un sistema de ensamble que les permite encajar sus extremo denominado diente (ANM, 2017; ASOCARBON, 2004; Bermudez *et al.*, 2013; Juárez, 2003; Mendoza *et al.*, 2013; Valladares, 2007).

Por consideraciones de costo y de requerimientos mecánicos, la madera es la elección más común. Sin embargo, su duración es su punto desfavorable, ya que varía según las condiciones en la mina (curado, humedad, microorganismos, ventilación, entre otros), su vida útil puede estar entre 6 meses a 3 años. Las especies maderables más usadas para entibación son: el amarillón, el pino patula, el cañaguata, la teca, el cedro, el urapán, entre otros (ASOCARBON, 2004; MAE *et al.*, 2014; Minminas, 1987; Roncancio *et al.*, 1998). Legalmente, la madera debe provenir de bosques reforestados, sin embargo, esto no se cumple cabalmente, ya que la minería ilegal compra madera de bosques naturales no reforestados. La minería ilegal es del orden del 45% (Diario la Opinión, 2017). ASOCARBÓN (Asociación de Carboneros de Norte de Santander) también reconoce que la minería subterránea requiere grandes cantidades de madera que pueden generar impacto ambiental en la región (ASOCARBON, 2004). De la misma manera el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) reconoce que la minería ilegal se encuentra entre las cuatro principales causantes de la deforestación en Norte de Santander, junto con los cultivos ilícitos; la producción agrícola de pequeña escala (palma africana,

cacao, plátano y caña); y la producción del ganado bobino (IDEAM, 2016; Opinión, 2017).

Este artículo condensa la investigación de maestría (Triviño, 2017) que pretende aportar alternativas al sector minero, desarrollando un material autóctono para sistemas de entibación de galerías principales de minería de carbón y hace un aporte de la incidencia de la minería en la deforestación y está apoyado en 5 trabajos de pregrado. Se compone de cinco partes: impacto de la minería en la deforestación; caracterización mecánica de la entibación (Bermudez, 2013); selección de materiales (Méndez y Patiño, 2014); fabricación de materiales alternativos (Castrillo, 2014; Méndez y Patiño, 2014); prototipos de puerta alemana y nuevo diseño propuesto (Barrera, 2015; Velazquez, 2015).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Impacto de la minería en la deforestación

Se recolectaron datos de: a) la superficie boscosa, que se encuentran condensados en el Proyecto "Monitoreo de la deforestación mediante el procesamiento digital de imágenes" de 2012, último registro disponible en 2016 (IDEAM, 2016); b) consumo de madera en minas de carbón proporcionada por Corponor; c) producción anual de carbón en Norte de Santander obtenidos del Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) (Corponor, 2010; UPME, 2016, 2017a, 2017b) y d) consumo de madera de algunas minas en visitas de la región. Con estos datos, se estimó el número de hectáreas de bosque que deben ser cultivadas para suplir el consumo anual de madera usada por la minería (periodo 2006 y 2012) y se proyectó la superficie boscosa al 2020 y la cantidad





de hectáreas de madera que se consumirán al año 2020.

2.2. Comportamiento mecánico de la puerta alemana

Para determinar los valores de los parámetros geométricos del sistema de entibación y los procedimientos de construcción se realizaron visitas a diferentes minas de carbón de la región (mina la Hormiga, mina la Gitana, etc.) y se recolectaron los datos correspondientes (Fig. 1), así mismo se recolectó información adicional de Corponor (Mendoza *et al*, 2013; Valladares, 2007). Con los datos recolectados en campo, se determinó la influencia de las variables en el comportamiento mecánico de la estructura por medio de un diseño de experimentos 2⁵, que arrojó 32 configuraciones diferentes, con cuatro adicionales, tomando el valor del punto medio de los niveles de las variables. Estas configuraciones se simularon mecánicamente en SolidWorks 2010, usando la herramienta SolidWorks Simulation y su resultado fue el esfuerzo de Von Mises. Los resultados de la simulación se analizaron usando el software Design-Expert 8.0.7.1 (Granta Design, 2015).

Imagen 1. Toma datos de parámetros geométricos.



Fuente. Autor.

2.3. Selección de materiales según Asbhy

Una selección teórica de materiales se realizó usando la metodología Asbhy y el software CES EduPack versión 2014. Las funciones, restricciones y objetivos como lo pide la metodología fueron definidas a partir

del análisis mecánico y además el costo, peso, tipo de procesamiento, ambiente al que son expuestos (UPME, 2012, Cabello, 2011; Granta Design, 2015).

2.4. Procesamiento y caracterización de materiales compuestos

2.4.1. Fabricación de Probetas

Los compuestos de resina poliéster con polvos de arcilla se prepararon por medio de la técnica de moldeo abierto ayudado con agitación magnética (1 a 7 rpm) y temperatura (19° a 70°C) para evitar burbujas dentro de la probeta (Groover, 2007). Para la fabricación de las probetas se utilizó las resinas poliéster P2000 y Cristalan 856 (Quiminet, 2015). Como refuerzo se usaron 5 muestras diferentes de polvos de arcilla o de rechazo de productos cerámicos de las industrias cerámicas de Cúcuta. En la Tabla 1, se muestran los datos de estos polvos cerámicos, se puede encontrar información sobre el nombre del polvo, tamaño de grano, porcentaje de arenas, plasticidad y la ubicación donde se puede encontrar en Norte de Santander. Las probetas se fabricaron según lo demandado por la norma ASTM D7264M-07 y las dimensiones nominales de las probetas para ensayos de flexión correspondieron a 4x13x160 mm.

Tabla 1: Materiales usados para la fabricación de probetas.

Muestra	Tipo de material	Tamaño de grano	Formación	Ubicación	% Arenas	Textura	% Plasticidad
PDO	Arcilla	212 µm (M70)	León	Pto. Stider.	14,02	Arcilloso	25,5
	Arcilla	212 µm (M70)	Guayabo	Patios	38,00	Franco	21,0
Z6	Arcilla	212 µm (M70)	Guayabo	Zulia	16,02	Franco - arcilloso	23,5
	Desgrasante (chamota)	212 µm (M70)	Guayabo	Villa del rosario	NA	NA	NA
BLOQUE Nº5	Desgrasante (chamota)	212 µm (M70)	Guayabo	Zulia	NA	NA	NA

Fuente. Autor.

2.4.2. Caracterización mecánica de las probetas



La caracterización mecánica se realizó bajo el ensayo a flexión según la norma ASTM D 7264M-07 debido que el esfuerzo a flexión es al que está sometido el punto más crítico de la estructura. Se fabricó un molde con las dimensiones según la norma donde se moldearon los materiales fabricados. Los ensayos se realizaron en la máquina universal de ensayos SHIMADZU-UH de 600 kN. Los accesorios para las pruebas fueron construidos durante la investigación según lo demandado en la norma. Los resultados se graficaron en un diagrama esfuerzo-deflexión y se determinó el esfuerzo máximo del material es el punto de flexión, el módulo de flexión.

2.5. Diseño, fabricación y caracterización de prototipos de puertas tipo alemana y tipo arco fabricadas con el material desarrollado

Con la finalidad de establecer cuál era el mejor diseño entre una estructura puerta alemana (tradicional) y una puerta tipo arco (propuesta) se realizó simulación, construcción y caracterización de dichas estructuras.

2.5.1. Puerta tipo alemana

Se realizó la simulación de la puerta alemana en Ansys V15 donde se cargaron las propiedades del material seleccionado a partir de la caracterización mecánica con la finalidad de establecer el ángulo de inclinación de palanca más crítico, entre seis posibilidades de montaje (74°, 76°, 78°, 80°, 82° y 84°). El montaje que se seleccionó fue tipo triangular por la mayor exactitud en conexión de puntos. Se adicionaron sujeciones de geometría fija para el modelo en planta y la carga distribuida de simulación.

Se simuló la estructura y examinó el esfuerzo máximo que soporta la puerta, mirando la deflexión. Para comparar los datos obtenidos con los obtenidos mediante

ensayos a compresión que se realizan a la estructura (escala laboratorio). Se procedió a fabricar tres prototipos (escala 15:71) usando el material seleccionado para sus ensayos respectivos. El proceso de fabricación se realizó con el material CLN5-10 que mostró la mejor relación: bajo módulo de flexión, alto esfuerzo a la flexión y menor dispersión estadística. Para medir la deflexión se implementó un sistema de medición por procesamiento de imágenes. Para simular de forma correcta el túnel, se diseñó un soporte que permite que el empotramiento en la base de cada palanca y permite adecuar en el ángulo que se desee (Fig. 2). El ensayo de flexión se realizó en una máquina universal SHIMADZU UH-600 kN. La carga fue distribuida de manera uniforme en la entibación tipo puerta alemana hasta que esta falló.

Imagen 2. Montaje tipo puerta alemana.



Fuente. Autor.

2.5.2. Puerta tipo arco

Para encontrar el diseño óptimo de la puerta tipo arco se realizaron simulaciones en ANSYS V15 del comportamiento mecánico de este tipo de puertas con tres secciones transversales distintas (circular, rectangular y tipo H); Los prototipos de entibación se realizaron a escala 17:81 (Imagen 3)

Imagen3. Montaje tipo arco con sección transversal tipo redondo, cuadrada y TH.





Fuente. Autor.

El material seleccionado, el proceso de fabricación, la caracterización mecánica y la toma de datos de la deflexión fueron las mismas que las descritas para la puerta alemana (Imagen 4)

Imagen 4. Montaje tipo arco, sección redonda.



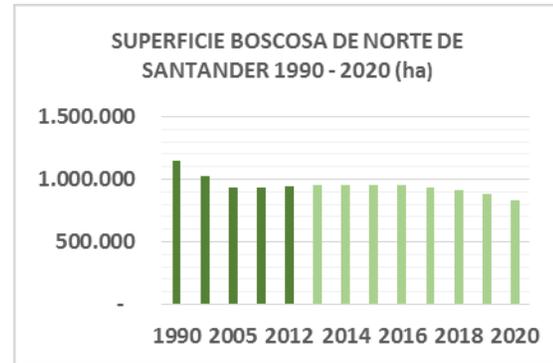
Fuente. Autor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Aporte de la minería a la pérdida de la cobertura boscosa de Norte de Santander

El cambio de la superficie boscosa del departamento entre los años 1990 y 2012, así como hacer una proyección al año 2020 (Fig. 1) se realizó a partir de los datos obtenidos.

Figura 1. Cambio de la superficie boscosa entre 1990 y 2020.



Fuente. Autor. tomado de (Corponor, 2010)

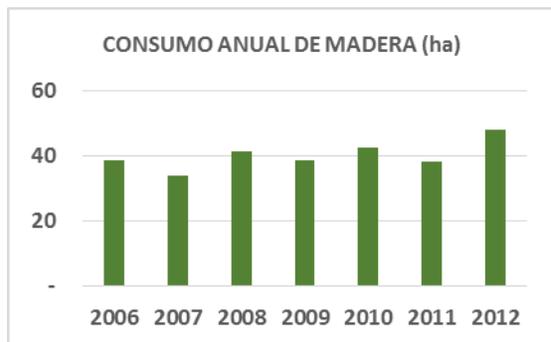
Como se observa en la figura, en el año 1990 se había cuantificado la superficie boscosa del departamento en 1.144.270 hectáreas y para el año 2012 se registró un área boscosa de 944.552 hectáreas. Lo que evidencia una pérdida de 199.717 hectáreas de la superficie boscosa en este periodo de tiempo. Esta pérdida representa el 17% respecto a la que había en 1990, que según la proyección al 2020, se reducirá a 832.000 ha, equivalentes a una pérdida del 27% del área de bosque estable registrado en 1990 (1.144.269 ha). La pérdida de bosque natural entre 1990 y 2012 se ha concentra en 20 de los 40 municipios que tiene el departamento. En un análisis a nivel departamental, Tibú, Toledo, Cúcuta, el Tarra, Chitaga y el Carmen registran alrededor del 50% de la pérdida de la superficie boscosa de todo el departamento. Según las encuestas realizadas a diferentes unidades mineras y Corponor, se estima que, para producir 1000 t al mes de carbón, las minas usan en promedio 250 palancas (cápiz y palanca). Esto indica una tasa de consumo de 0,25 palancas/t. También se encontró que para fabricar una puerta alemana se requieren tres palancas y de un árbol se pueden extraer entre 5 a 40 palancas, dependiendo del grosor del árbol, en promedio de unas 15 palancas según Corponor. Lo que indica que para fabricar una puerta se consume 0,2 árboles. De aquí se puede inferir que se usan 0,0116 árboles por tonelada de carbón producido. Además, un cultivo con densidad óptima de siembra, contiene unos 830 árboles por hectárea.





Con la información anterior y la producción anual de carbón de Norte de Santander (periodo 2006 a 2012 (UPME, 2016, 2017a), se estimó el número de hectáreas cultivadas para suplir el consumo de madera anual que requirió la minería (ver Fig. 6). Es decir, teniendo en cuenta la producción de toneladas entre 2006 (1,92 Mt) y 2012 (2,40 Mt), se estimó que se usaron unas 40 hectáreas de árboles por año (32.900 árboles/año) y en los 6 años unas 240 ha (199.200 árboles).

Figura 2. Consumo anual de madera debida a la producción de carbón.



Fuente. Autor. basado en (UPME, 2017a)

Al contrastar las 240 hectáreas consumidas en el periodo de tiempo registrado con las 11.783 hectáreas que perdió el departamento, se encuentra que la minería sólo participó en un 2% (240 ha) a la pérdida de cobertura boscosa del departamento. El otro 98% de las hectáreas perdidas se podría deber a otras causas habituales de deforestación como la colonización no planeada, la agricultura y la ganadería extensiva (IDEAM, 2015, 2016b). Para proyectar la cantidad de hectáreas de madera que se consumirán al año 2020, también se necesita proyectar la producción de carbón al 2020. Sin embargo, la tendencia de la producción es muy incierta, ya que la gran mayoría de carbón producido es exportado con fines térmicos y metalúrgicos y las últimas tendencias a nivel internacional es sustituir este tipo de material energético a fuentes renovables

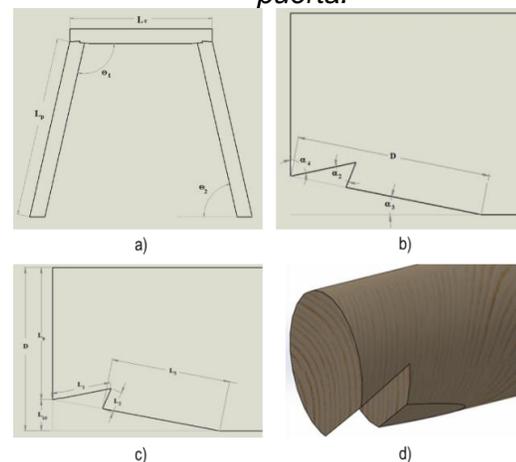
(Expansion, 2017). Con la finalidad de estimar el valor, se tomará el promedio del consumo de hectáreas de madera (40 ha/año) entre 2006 hasta 2012 y se proyectó al 2020.

Entre 2012 y 2020 se proyecta que habrá un consumo promedio de 40 ha/año. El total de hectáreas requeridas sería de 320 aproximadamente (265.600 árboles) y las hectáreas de superficie boscosa que se perderían en ese tiempo serían unas 112.500 ha. La minería sería responsable del 0,3% de la deforestación proyectada. Nuevamente, es un porcentaje muy bajo comparado con la totalidad del área perdida.

3.2. Análisis del comportamiento mecánico de la puerta alemana

Para el análisis geométrico de la estructura se identificaron 17 variables, que son 7 ángulos, 9 longitudes y 1 diámetro. En la figura 7a se muestran las variables generales de la puerta, en la 7b los ángulos y tamaños de la cuña, en la figura 7c las longitudes y en la figura 7d un isométrico de la cuña modelada.

Imagen 5. Variables de la geometría de la puerta.



Fuente. Autor.

El análisis geométrico arrojó 5 variables independientes: longitud de la cuña (L_1), inclinación de la palanca (θ_2), diámetro de la





madera (D), ángulos de la cuña (α_2) y (α_4). Los niveles máximos y mínimos de las 5 variables obtenidas se pueden apreciar en la Tabla 2.

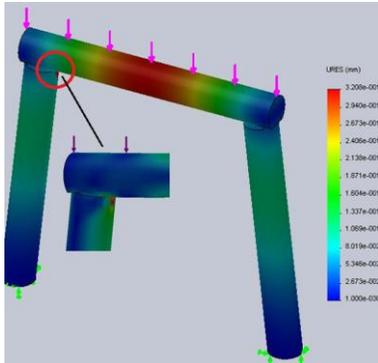
Tabla 2: Rangos de las variables independientes.

Variable	Mínimo	Máximo
L_1 = Longitud de la cuña	5.5 cm	8 cm
θ_2 = Inclinación de la palanca	74°	84°
D = diámetro	14.6 cm	18 cm
α_2 = ángulo en la cuña	66°	90°
α_4 = ángulo en la cuña	67°	90°

Fuente. Autor.

Las 32 simulaciones mostraron que los valores de las cargas de falla máxima y mínima que se obtuvieron fueron 585,4 kg y 357,4 kg, respectivamente, y que existían tres puntos críticos en la estructura, los cuales se ubican en la parte superior del centro del capiz (punto 1), en la parte inferior del centro del capiz (punto 2) y en el punto adyacente a la cuña en la palanca (imagen 6).

Imagen 6. Puntos críticos en la estructura.



Fuente. Autor.

Mediante el diseño de experimentos 2^5 y el análisis estadístico respectivo (ANOVA), se encontró que dos variables: el diámetro (A) y el ángulo de inclinación de la palanca θ_2 (B), y su interacción (AB) tenían influencia estadística en el valor del esfuerzo de Von Mises. La contribución de estas variables es mostrada en la Tabla 3, donde se aprecia que el diámetro es el factor más sensible, con una contribución al esfuerzo de Von

Mises de 76% para los puntos 1 y 2 de la estructura; pero para el punto 3 su contribución es casi la mitad, de 45%, potenciando la contribución del ángulo (θ_2) y de la interacción del diámetro con el ángulo (Diámetro* θ_2).

Tabla 3: Rangos de las variables independientes.

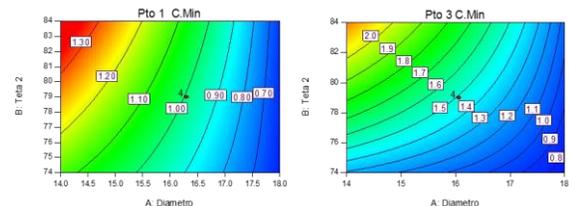
Puntos	Factor	% Contribución	
		C. Máxima	C. Mínima
Punto 1	Diámetro	77,43	77,47
	Teta 2	9,12	9,06
	Interacción	7,87	7,87
Punto 2	Diámetro	74,92	74,94
	Teta 2	11,43	11,35
	Interacción	8,84	8,91
Punto 3	Diámetro	45,02	45,09
	Teta 2	30,55	30,51
	Interacción	20,10	19,93

* Interacción de los factores Diámetro por Teta 2

Fuente. Autor.

Se calculó las ecuaciones del modelo estadístico obteniendo una ecuación potencial cubica para cada punto como se muestran en la figura 9. Los números dentro del contorno representan el esfuerzo de Von Mises y los ejes las dos variables influyentes (Ángulo de inclinación y diámetro). La variación de color hacia el rojo indica la falla inminente del capiz.

Gráfica 1. Gráficos de nivel del esfuerzo de Von Mises según las variables influyentes.



Fuente. Autor.

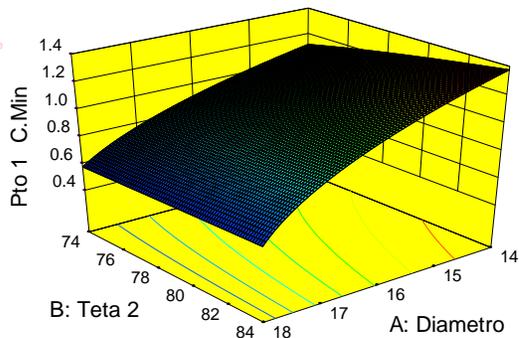
Esta gráfica puede ser usada en campo, para seleccionar el diámetro de la madera y usar un ángulo específico, donde la





formación geológica interna de la mina permita, es decir si se tienen palancas de diámetros pequeños, se debería buscar unos ángulos más agudos para asegurar un menor esfuerzo en el punto 3. Como se ve, se podrían usar diámetros de madera pequeños, de 14 cm, aunque en la práctica solo se prefieren los mayores a 17 cm por una selección empírica. El uso de estos diámetros menores tendría una gran incidencia en el tiempo de corte de los árboles. La gráfica de la superficie respuesta (Fig. 10) del punto 1 y 2 muestra que no existen máximos o mínimos en superficie, es decir que el comportamiento representado en la figura 10 es lineal.

Gráfica 2. Superficie respuesta en función de los parámetros influyentes para punto 1 y 2.



Fuente. Autor.

3.3. Materiales seleccionados usando Asbhy y análisis de disponibilidad

Para la selección de materiales se definió determinar las propiedades de la palanca y el capiz independientemente como se muestra en la Tabla 4. Los valores fueron obtenidos bien por un análisis de las condiciones internas de la mina (Temperatura máxima de servicio, ambiente al que está expuesto) y por el método de ingeniería inversa, tomando las propiedades mecánicas del eucalipto que es la madera

habitualmente usada en las minas de la región.

Tabla 4: *Parámetros de diseño para el capiz y la palanca.*

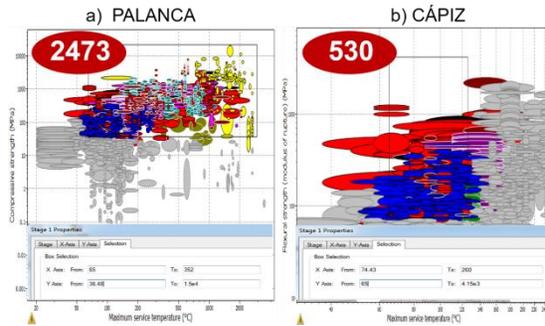
PARÁMETROS DE DISEÑO		
	CÁPIZ	PALANCA
FUNCIÓN RESTRICCIONES COMUNES	Resistir cargas a flexión: 74,43 a 174,86MPa	Resistir cargas a compresión: 36,48 a 89,73MPa
	Densidad entre 0,530 a 1,1 g/cm ³ Exposición a ambientes húmedos Temperatura máxima de servicio de 65°C	Densidad entre 0,530 a 1,1 g/cm ³ Exposición a ambientes húmedos Temperatura máxima de servicio de 65°C
	Resistencia a gases hidrocarburos Resistencia a la flama Algunos agentes patógenos Resistencia ante ácidos débiles	Resistencia a gases hidrocarburos Resistencia a la flama Algunos agentes patógenos Resistencia ante ácidos débiles
	Maximizar el desempeño Minimizar peso y densidad Minimizar costo	Maximizar el desempeño Minimizar peso y densidad Minimizar costo

Fuente. Autor.

Con estas propiedades, se procedió a determinar el material con el software CesEdupack como se muestra a continuación. Para las palancas se encontró que la lista de materiales ubicados en la región conformada por el esfuerzo de compresión de 36,48 MPa y temperatura máxima de servicio mayores de 65°C fue de 2473 materiales. Descartando materiales como vidrios y materiales naturales, los cuales no cumplían con los requisitos planteados. En el caso del capiz se encontró que la lista de materiales ubicados en la región conformada por el esfuerzo de flexión de 74,43 MPa y la temperatura máxima de servicio desde 65°C, fue de 530 materiales. Eliminando los cerámicos no técnicos y espumas y reduciendo a los demás en un gran porcentaje (ver imagen 7).

Imagen 7. Regiones que cumplen la primera restricción para las palancas y el capiz.





Fuente. Autor.

Al aplicar la restricción entre la resistencia a los ácidos débiles y la resistencia a la flama condujo a una reducción en la lista de 2158 materiales para las palancas y de 337 para el cápiz. Al graficar el índice de material para las palancas, trazando una línea con pendiente igual a 1 (columna) y realizando la restricción entre precio contra densidad (seleccionando los materiales que estuvieron por debajo de la densidad de 1.1 gr/cm³), la lista de materiales se redujo a 17 materiales. En el caso del cápiz se redujo la lista de posibles materiales a 10, eliminando en su totalidad a la familia de los metales y aleaciones, como se esperaba al restringir la selección a materiales que posean densidades menores a 1,1 gr/cm³. De estos materiales se eliminaron algunos debido a que no eran fácilmente encontrarles en la región ni tienen posibilidad de importación fácilmente, resultando aquellos referenciados en la tabla 5.

Tabla 5: Materiales seleccionados para la palanca y cápiz.

a) PALANCA		b) CÁPIZ	
Familia de materiales	Materiales seleccionados	Familia de materiales	Materiales seleccionados
Polímeros (plásticos)	Poliamida aromática	Polímeros (plásticos)	Poliamida aromática
	Resina epoxica		Resina epoxica
	Metacrilato de acrilonitrilo-butadieno-estireno		Metacrilato de metilo
	Metacrilato de metilo copolímero		Poliamida transparente
Elastómeros	Poliéster bloque amida	Elastómeros	Poliéster bloque amida(Shore 55D)
	Poliuretano termoplástico		Poliuretano termoplástico.
Composites	Compuesto de moldeo bisfenol		

Fuente. Autor.

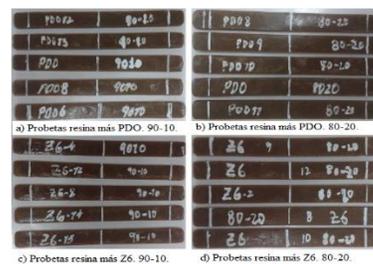
En el caso de las poliamidas transparentes y aromáticas, el Poliéter bloque amida, y Poliuretano Termoplástico no se encuentran en Colombia, por lo que debería obtenerse mediante un importador nacional (Quiminet, 2015). La resina epoxi se encuentra en la región, posee excelentes características mecánicas pero su precio es muy elevado en comparación con la resina poliéster (Granta Design, 2015). Las puertas de madera tienen un valor muy pequeño, aproximadamente 10 dólares para 2017. Debido a la anterior situación se decidió desarrollar un material compuesto, usando una resina de bajo costo (Poliéster) y reforzantes cerámicos provenientes de la industria cerámica de la región.

3.4. Fabricación y caracterización de materiales compuestos desarrollados

3.4.1. Fabricación de Probetas

Se fabricaron diez materiales compuestos con resina poliéster P2000 y dos con resina Cristalan 856. Los reforzantes fueron polvos de arcilla (cinco tipos) y molido de ladrillo y teja en configuraciones de 90% resina y 10% polvo; 80% resina y 20% polvo (Imagen 8).

Imagen 8. Probetas fabricadas.



Fuente. Autor.

Para cada material se fabricó 5 muestras para el ensayo de flexión, y adicionalmente





se hicieron 5 blancos de resina P2000, es decir en total se fabricaron 65 probetas para el ensayo de flexión.

Tabla 6: Configuraciones de las mezclas.

Fuente el autor

#	Código	% Resina	% Polvo
5	BLANCOS	100% resina poliéster P2000	---
5	PDO10	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo PDO
5	PDO20	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo PDO
5	Z610	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo Z6
5	Z620	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo Z6
5	ESP10	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo ESP
5	ESP20	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo ESP
5	LN510	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo LN5
5	LN520	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo LN5
5	TEJA10	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo TEJA
5	TEJA20	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo TEJA
5	CLN510	90% de resina poliéster cristalan 856	10% de polvo LN5
5	CLN540	60% de resina poliéster cristalan 856	40% de polvo LN5
60	TOTAL DE PROBETAS FABRICADAS		

Fuente. Autor.

3.4.2. Caracterización a flexión

Las propiedades de módulo de flexión, resistencia a la flexión y la deflexión obtenidos en el ensayo de flexión son mostradas en la Tabla 7. Estos valores corresponden al promedio: del módulo de flexión; esfuerzo máximo de flexión; y la deflexión de las muestras ensayadas.

Tabla 7: Propiedades físico-mecánicas de blancos, compuestos y algunas maderas.

Fuente el autor

CÓDIGO	% REFUERZO EN PESO	MODULO DE FLEXIÓN (Mpa)	ESFUERZO DE FLEXIÓN (MPa)	(%) DEFLEXIÓN	DENSIDAD (g/cm ³)
BLANCOS	---	2.680	139,8	7,9	1,1
PDO10	10	1.880	87,2	4,8	1,2
PDO20	20	27.800	141,7	3,7	1,2
Z610	10	34.470	170,5	5,5	1,2
Z620	20	33.520	161,9	5,5	1,2
ESP10	10	8.370	115,7	6,3	1,2
ESP20	20	11.020	168,8	5,4	1,2
LN510	10	29.630	166,1	3,3	1,2
LN520	20	48.140	291,9	3,0	1,2
TEJA10	10	7.600	90,5	5,5	1,2
TEJA20	20	7.600	100,9	3,3	1,2
CLN510	10	5.330	120,3	3,8	1,2
CLN510	40	8.667	199,5	0,9	1,2
CEDRO	--	5.200	50,1	--	0,7
TECA	--	10.450	81,4	--	0,8
PINO	--	9.770	74,4	--	0,9
EUCALIPTO	--	13.530	104,7	--	1,0

Fuente. Autor.

De los datos se puede observar que el módulo de flexión del material LN520 supera 4,9 veces el promedio de las maderas (cedro, teca, eucalipto y pino) y en todos los casos superaron el promedio del esfuerzo de flexión de las maderas (77,7 Mpa). El mayor esfuerzo de flexión lo exhibe el material LN520 con 3,8 veces más en relación con el promedio de las maderas. Sin embargo, su alta rigidez de 3 veces la de las maderas, lo hace inadecuado, debido a que se requiere que el material tenga capacidad de deformarse elásticamente para que la superficie en contacto con las paredes sea mucho más alta.

Los materiales que cumplieron los criterios determinados en la metodología Ashby y además combinaron de la mejor forma un alto esfuerzo de flexión, bajo módulo de flexión y poca dispersión estadística en las pruebas, fueron el LN510 y el CLN5-10. A estos materiales se les realizó un análisis de costos para determinar el valor del material usado con base en el volumen determinado por el área requerida para soportar los esfuerzos calculados en la viga. Para ello se compararon los diámetros utilizados comúnmente en la minería subterránea (14, 16, 18 cm) con los necesarios que deben tener los nuevos materiales para que cumplan el mismo requerimiento mecánico. En la Tabla 8 se muestra el cálculo de los radios, volúmenes





y precio de los nuevos materiales respecto a los radios de la madera del eucalipto. Se decidió seleccionar el material CLN5-10 para la fabricación de prototipos de entibación, ya que el costo de fabricación con la de la resina Cristalán 856 es 15% más bajo que con la P2000 (ver Tabla 8).

Tabla 8: Correspondencia de los nuevos materiales respecto a los radios de las maderas.

Madera	Momento Máx flector (N*m)	Radios de la madera (cm)	Material LN510		
			Radio cm	Volumen cm ³	Precio (\$)
EUCALIPTO	28.213	7	6,00	0,020	\$275.027
	42.114	8	6,86	0,027	\$359.219
	59.964	9	7,72	0,034	\$454.637
Madera	Momento Máx flector (N*m)	Radios de la madera (cm)	Material CLN5-10		
			Radio cm	Volumen cm ³	Precio (\$)
EUCALIPTO	28.213	7	6,68	0,025	\$227.327
	42.114	8	7,64	0,033	\$296.917
	59.964	9	8,59	0,042	\$375.785

Fuente. Autor.

3.5. Análisis del material en puertas tipo alemana y tipo arco a escala laboratorio.

3.5.1. Simulación a carga estática de puertas alemanas usando el material CLN510

Se cargó a la base de datos el material CLN510 con las propiedades obtenidas en los ensayos previos (esfuerzo, modulo, densidad). Se realizaron seis simulaciones en ANSYS (74°, 76°, 78°, 80°, 82° y 84°), a cada se le aplicó una carga distribuida de 5000 N sobre el cápiz (escala 15:71). La configuración con mejor comportamiento mecánico fue la de ángulo 74° con un diámetro promedio de 42mm; tuvo una deformación de 3,58 mm y soportó un esfuerzo 55Mpa. Con esta configuración se realizaron los prototipos a escala laboratorio.

3.5.2. Caracterización mecánica de las puertas tipo alemana usando el material CLN510

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de los prototipos de puerta

alemana fabricada con el material CLN510 a escala laboratorio. (Tabla 9).

Tabla 9: Resultados del ensayo a compresión de prototipo puerta alemana.

Fuente el autor

Pruebas	Máxima carga(N)	Máximo esfuerzo (Mpa)	Máxima deflexión (mm)	Máxima deflexión (%)
1	3988	2,88	4,67	1,22
2	9368	6,76	8,85	2,33
3	7392	5,33	6,74	1,77
4	8646	4,97	7,25	2,02
5	6915	5,57	6,76	1,88
Promedio	7756	5.10	6.85	1.85

Fuente. Autor.

Comparando los resultados obtenidos en las pruebas de ensayo a compresión con los datos de la simulación en ANSYS (55Mpa), se observó que el esfuerzo máximo soportado en la simulación es más de 10 veces mayor a lo resistido en los ensayos a compresión. Este resultado pudo producirse por defectos internos que actúan como concentradores de esfuerzos durante la fabricación y defectos de ensamble entre cápiz y palanca, como se observa en la imagen 9, no tienen acople perfecto, como es habitual que suceda en el montaje real en las minas. En la tabla 10, se puede observar que el desplazamiento en la simulación es muy parecido al desplazamiento del procesamiento de imágenes.

Tabla 10: Comparación de los resultados de la simulación y los ensayos a compresión

Tipo	Carga (N)	Deflexión (mm)	Máximo esfuerzo (Mpa)
Simulación ANSYS v16	5000	3,58	55
Probeta Real A Escala	6465	3,95	5

Fuente. Autor.

Imagen 9. . a) Entibación Minera tipo puerta alemana. b) ruptura de la entibación.





Fuente. Autor.

3.5.3. Simulación a carga estática de puertas tipo arco usando el material CLN510

Con el material CLN510 previamente cargado en la base de datos de ANSYS, se realizaron tres simulaciones para puertas tipo con arco (escala 17:81) con tres secciones transversales distintas (circular, rectangular y tipo H); se aplicó una carga distribuida de 5000N sobre la parte curva. La configuración que tuvo mejor comportamiento mecánico fue la de sección transversal circular. Tuvo una deformación de 1,56 mm y soportó un esfuerzo 396Mpa. Con este tipo de sección transversal se realizaron los prototipos a escala laboratorio.

3.5.4. Caracterización mecánica de las puertas tipo arco a escala laboratorio

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de los prototipos de puerta tipo arco fabricada con el material CLN510 a escala laboratorio. (Tabla 11).

Tabla 11: Resultados del ensayo a compresión de prototipo puerta tipo arco.

Probetas	Máxima carga (N)	Máximo esfuerzo (Mpa)	Máximo deflexión (mm)	Máxima deflexión (%)
1	12600	24,87	15	3,49
2	8379	16,53	7	1,71
3	16157	31,89	14	3,10
4	12369	24,41	11	2,42
5	N/A	N/A	N/A	N/A
Promedio	12376	24,42	12	2,68

Fuente. Autor.

Al comparar los resultados obtenidos en las pruebas de ensayo a compresión con los datos de la simulación en ANSYS, se observó que el esfuerzo máximo a flexión soportado en la simulación (396Mpa) es

más de 15 veces mayor a lo resistido en los ensayos a compresión (Tabla 11). Como se manifestó en la caracterización de la puerta alemana, el resultado pudo producirse por defectos internos que actúan como concentradores de esfuerzos durante la fabricación. En la tabla 12, se observa que desplazamiento en la simulación es la mitad del logrado en el procesamiento de imágenes. El punto en el que fallaron las probetas evidenció que la entibación tipo arco a escala de laboratorio sufrió falla en el mismo lugar que indicó la simulación.

Tabla 12: Comparación de los resultados de la simulación y los ensayos a compresión.

Tipo	Carga (N)	Deflexión (mm)	Máximo esfuerzo (Mpa)
Simulación ANSYS v16	5000	1,56	396,0
Probeta Real A Escala	5002	3,79	24,4

Fuente. Autor.

3.5.5. Análisis comparativo entre la puerta alemana y tipo arco fabricadas usando CLN510 a escala laboratorio

Por medio de los ensayos de compresión a las probetas de entibación tipo puerta alemana y tipo arco a escala de laboratorio, se logró validar que ambas soportan una carga aplicada de 5000N. Por otro lado, mostró que las puertas tipo arco soportan aproximadamente 5 veces más esfuerzo que las puertas tipo alemana. Si se toma como base el esfuerzo máximo soportado, se puede ver la viabilidad de este tipo de puertas para la fabricación de puertas de entibación en campo.

4. CONCLUSIONES

Se encontró que las áreas de coberturas boscosas más afectadas se ubican en Tibú, Sardinata, el Tarra, Cucutilla, Bochalema y Chinácota. Se estimó que entre 2006 y 2012 la minería de carbón del departamento sólo aportó un 2% (240 ha) a la pérdida de cobertura boscosa. Proyectando los datos de consumo de madera y hectáreas de cobertura boscosa al 2020, la minería





aportaría un 0,3% a la pérdida boscosa total.

De todos los factores considerados en el diseño de la puerta alemana, se determinó que únicamente el diámetro y el ángulo θ_2 , y su interacción tienen influencia estadística en el comportamiento mecánico de la estructura. Se encontró que es posible seleccionar las palancas de madera y construir la estructura de la puerta con diámetros tan pequeños como 14 cm en sitios donde pueda acondicionarse el ángulo θ_2 , aprovechando las palancas pequeñas que muchas veces no son usadas. Con las gráficas que se obtuvieron es posible predecir el comportamiento de las puertas ya montadas y entrenar a los mineros para que el montaje de las estructuras sea más confiable.

De la selección de materiales mediante la metodología de Ashby, se determinó que 27 materiales, pertenecientes a las familias de los polímeros (termoplásticos, termoestables) y elastómeros cumplían con los parámetros de diseño. Estos materiales fueron descartados, debido a que eran de difícil consecución, lo que conduce a una elevación de los costos de fabricación. Se optó por desarrollar un material compuesto de matriz polimérica reforzado con polvos cerámicos.

De los 5 polvos de arcilla usados, el polvo de ladrillo N°5 es el mejor reforzante y de todos los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con polvos de arcilla que se analizaron, el material que mejor combina un alto esfuerzo de flexión, un bajo módulo de flexión y poca dispersión estadística en las pruebas es el CLN510 y con este material se definió fabricar los prototipos.

Las pruebas de ensayos para valorar estructuras de entibación desde el punto de vista mecánico del material compuesto CLN5-10 (resina poliéster con polvos cerámicos de ladrillo N°5), arrojaron datos

que muestran que la entibación tipo arco fabricada con el material compuesto podría llegar a soportar hasta 5 veces más carga que las puertas tipo puerta alemana y pueden tener viabilidad para la fabricación de puertas de entibación en campo. Los comportamientos de falla en las puertas se dieron en la misma posición que en la simulación realizada en ANSYS.

5. REFERENCIAS

- ANM. (2017). *Caracterización de la actividad minera de Norte de Santander*. Retrieved from https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_norte_de_santander_23-01-2017.pdf
- ASOCARBON. (2004). *Sostenimiento, Transporte y Explosivos en Minas de Carbón* (No. 2). Cúcuta.
- Barrera Agudelo, Nicolás, Parra Medina, Claudia, Triviño Jaimes, N. R. (2015). *Aportes a la evaluación del comportamiento mecánico de la estructura de entibación minera tipo arco fabricada en resina poliéster - polvos cerámicos*. Universidad de Pamplona.
- Bermudez Bermudez, Luis Miguel, Triviño Jaimes, Neyl Richard, Bolívar León, R. (2013). *Caracterización mecánica del sistema de entibación de algunas minas tradicionales de carbón en Norte de Santander*. Universidad de Pamplona.
- BP. (2018). *Statistical Review of World Energy 2018*, 1–53. Retrieved from <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>
- Cabello, P. (2011). *Selección de materiales*. Universidad Politécnica de Puerto Cabello.
- Castrillo Caro, Dumys, Bolívar León, Rafael, Triviño Jaimes, N. R. (2014). *Comportamiento a flexión de un material compuesto de polyester con*





- polvo cerámico como posible sustituto de la viga en la entibación minera. Universidad de Pamplona.
- Cerrejón. (2018). Carbones de Cerrejón. Retrieved November 1, 2017, from <http://www.cerrejon.com>
- Colciencias, Gobernación de Norte de Santander, Universidad del Rosario, & Universidad de Pamplona. (2014). *Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación - PEDCTI 2014-2024*. Cúcuta. Retrieved from <http://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/pedcti-norte-santander.pdf>
- Corponor. (2010). *Monitoreo de la Deforestación 1990-2012*. Bogotá D.C.
- Diario la Opinión. (2017, August 25). El 45% de las minas en Norte de Santander son ilegales, p. 1. Retrieved from <https://www.laopinion.com.co/economia/el-45-de-las-minas-en-norte-de-santander-son-ilegales-138984#OP>
- Drummond. (2017). Drummond LDT. Retrieved from <http://www.drummondltd.com>
- Granta Design. (2015). Ces Edupack. Cambridge. Retrieved from <http://www.grantadesign.com/ES/education/>
- IDEAM. (2015). *Lanzamiento cifra de deforestación anual 2015*. Bogotá D.C. Retrieved from http://documentacion.ideam.gov.co/operbiblio/bvirtual/023668/infografia_tasa_deforestacion_2015.pdf
- IDEAM. (2016a). *Cuadro de Áreas del Cambio de Bosque para los periodos 1990 -2016 para el departamento de Norte de Santander*. Bogotá D.C. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/geoportal>
- IDEAM. (2016b). *Estrategia Integrada de control a la deforestación*. Bogotá D.C. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/0/Presentación+Estrategia+Integrada+de+Control+a+la+Deforestación/173f79bf-3e68-4cbc-9387-80123d09b5e2>
- Juárez Ferreras, R. (2003). *Sostenimiento de talleres en minas de carbón con entibación hidráulica individual*. España.
- Laguado, W. V. (2016). Plan de Desarrollo para Norte de Santander 2016-2019 "Un Norte Productivo Para Todos " Documento presentado para estudio y aprobación ante la Honorable Asamblea.
- MAE, (Ministerio del Ambiente del Ecuador, R. D. L. N. U. P. L. A. Y. L. A., & FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, I. (2014). Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de 93 especies forestales, 1–115.
- Méndez Sierra, F. A., & Patiño Morantes, Adrián Ricardo, Bolívar León, Rafael, Triviño Jaimes, N. R. (2014). *Selección y desarrollo de materiales para entibación minera de Norte de Santander usando la metodología Asbhy*. Universidad de Pamplona.
- Mendoza Nancy , Rueda Daniel, O. W. (2013). Desarrollo de un sistema de entibación en minería subterránea en Norte de Santande. Pamplona.
- Mikell Groover. (2007). Procesos de formado para materiales compuestos. In McGraw-Hill (Ed.), *Fundamentos de Manufactura Moderna* (Tercera Ed, pp. 319–333). México: McGraw-Hill.
- Ministerio de Minas y Energía. Norma: Sobre procedimientos de sostenimiento en las excavaciones mineras (1987). Colombia. Retrieved from http://www.simco.gov.co/simco/documentos/Seg_Minera/proced_excavaciones_mineras0001.pdf
- Pekín prohibirá el carbón en 2020. (2014). Retrieved November 21, 2017, from <https://cop23.unfccc.int/index.php/news/pekin-prohibira-el-carbon-en-2020>
- Quiminet. (2015). POLISUIN S.A. Retrieved November 26, 2017, from <https://www.quiminet.com/shr/es/polisuin-250300422/contacto.htm>
- Roncancio, D., Vega, E., & Herrera, G. (1998). Guía para plantaciones





- Forestales Comerciales. Norte de Santander.
- Triviño, N. R. (2017). *Desarrollo de un material alternativo para sistemas de entibación en galerías principales de minería de carbón*. Universidad de Pamplona, Pamplona.
- UNAL. (2014). *Simulación y evaluación del impacto de estrategias en el desarrollo del sector minero 2014 - 2032*. Medellín.
- UPME. (2010). *Indicadores de la minería en Colombia*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- UPME. (2012). *La Cadena del Carbón*. Colombia. Retrieved from <http://www.simco.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=ghcA7YSxZko%3D&tabid=96>
- UPME. (2016). Boletín Estadístico: Minas y energía 2012 – 2016, 200. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/simco/Documents/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf
- UPME. (2017a). *Producción de Carbón por Municipios*. Bogotá D.C. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/simco/Reportes_SIMCO/Paginas/MSPC6.aspx
- UPME. (2017b). Zonas carboníferas de Colombia. Retrieved from http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/areas/zonas/indice.htm#NORTE
- Valladares, H. J. (2007). *Cálculo y diseño de entibaciones para excavaciones en profundidad*. Universidad Austral de Chile. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/myaccess.library.utoronto.ca/pubmed/11720961>
- Velazquez, Nicanor, Parra Medina, Claudia, Triviño Jaimes, N. R. (2015). *Aportes a la evaluación del comportamiento mecánico de las estructuras de entibación minera tipo puerta alemana fabricada en resina poliéster- polvos cerámicos*. Universidad de Pamplona, Pamplona.
- Www.expansion.com. (n.d.). España abandonará el carbón en 2020 para reducir en un 50% sus emisiones. Retrieved November 25, 2017, from <http://www.expansion.com/empresas/energia/2017/11/15/5a0c4cce22601d05108b463d.html>

