

Evaluación del comportamiento mecánico de una puerta alemana diseñada con resina poliéster reforzada con fibra de vidrio

Evaluation of the Mechanical Behavior of a German Door Designed With Polyester Resin Reinforced with Fiberglass

NAIRO JULIAN RODRÍGUEZ B.

Magíster en Ingeniería Mecánica
Ingeniero Electromecánico
Línea de Investigación en Análisis de falla, gestión de mantenimiento, confiabilidad de procesos y productos, mantenimiento predictivo, eficiencia energética
Grupo de Investigación Centro Minero, GICEMIN
narodriguezb@sena.edu.co

BUENAVENTURA ROJAS M.

Magíster en Geotecnia
Ingeniero en Minas UPTC
Instructor de Minería Centro Minero Morca
Grupo de Investigación Centro Minero, GICEMIN
burojasm@sena.edu.co

JOHAN ARLEY ATUESTA SICACHA

Aprendiz
Tecnólogo en supervisión de Labores Mineras - SENA
Centro Minero Morca Sogamoso Regional Boyacá
brandrey9607@gmail.com

ANGIE PAOLA RIVERA MORENO

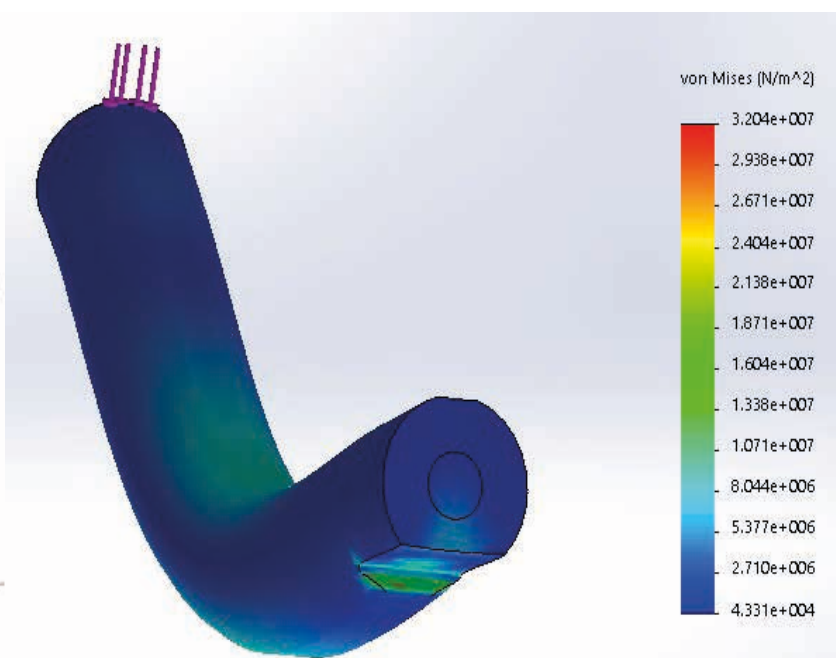
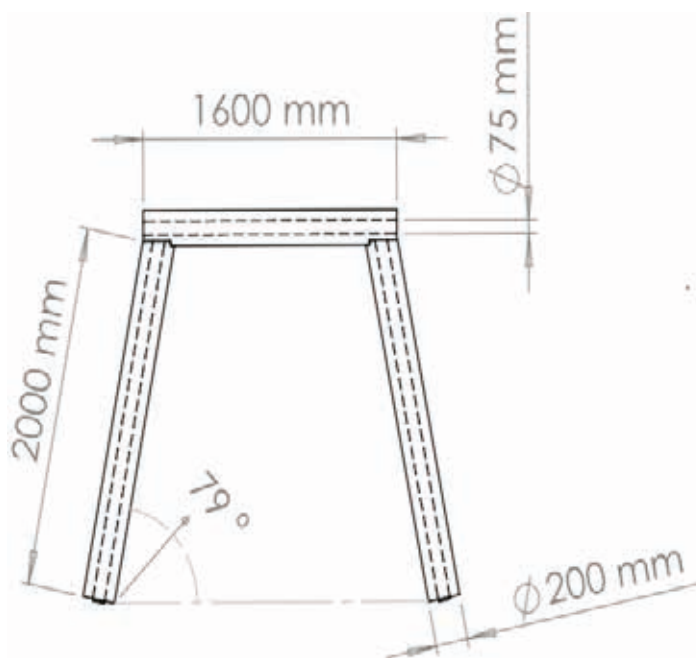
Aprendiz
Tecnólogo en supervisión de Labores Mineras - SENA
Centro Minero Morca Sogamoso Regional Boyacá
apravera34@misena.edu.co

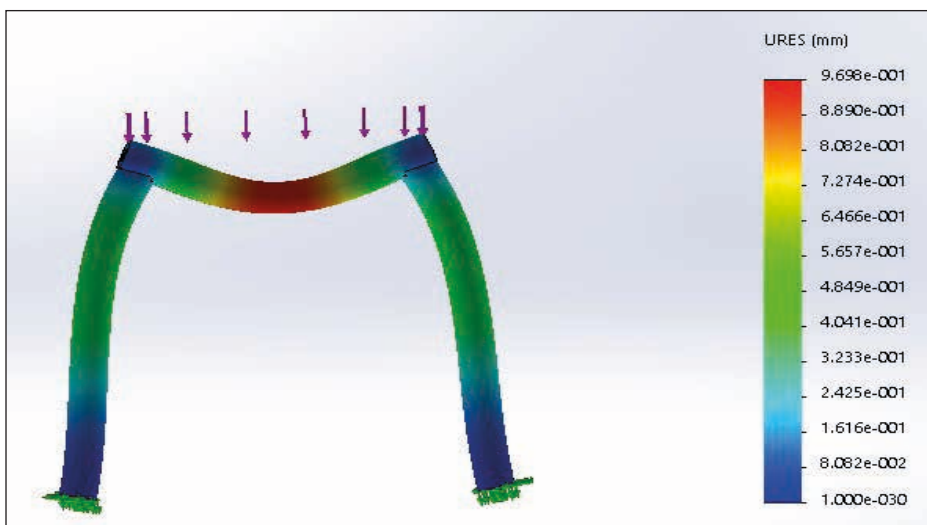
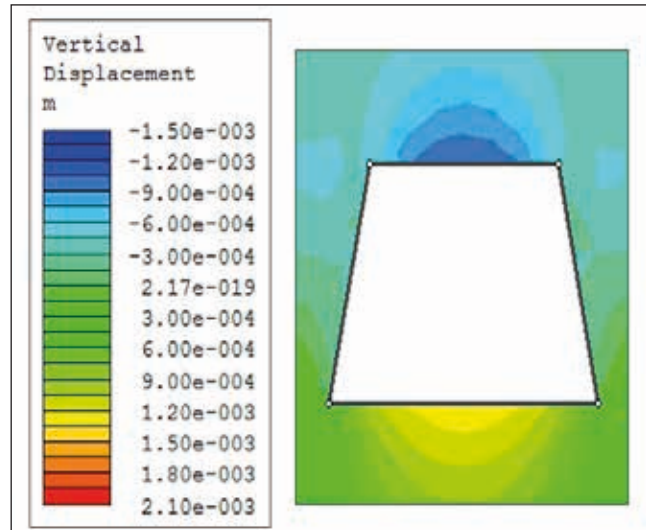
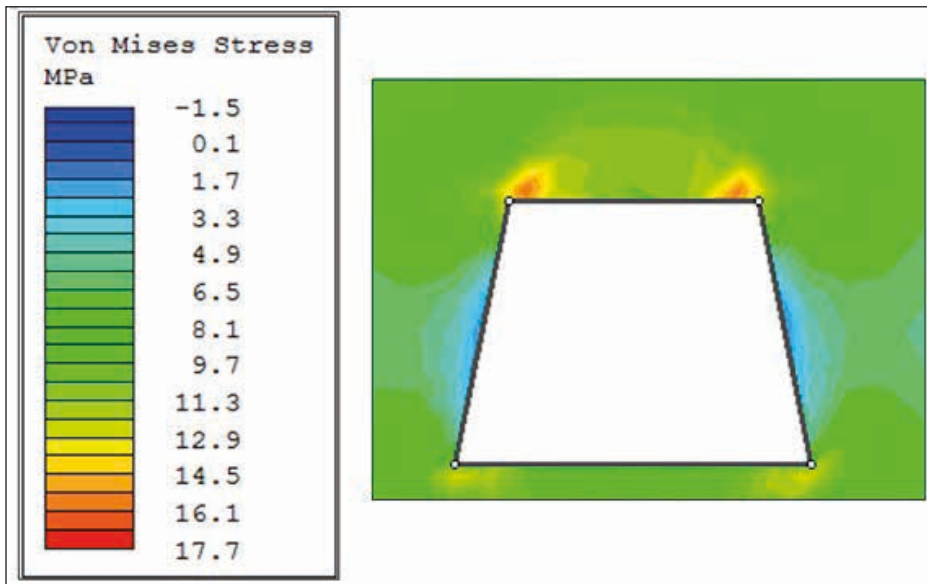
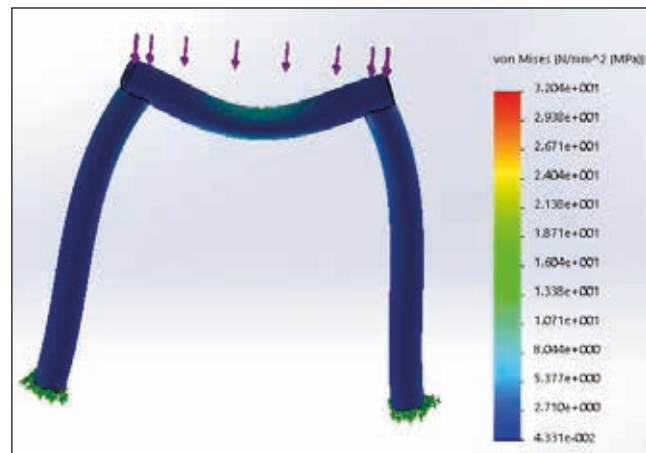
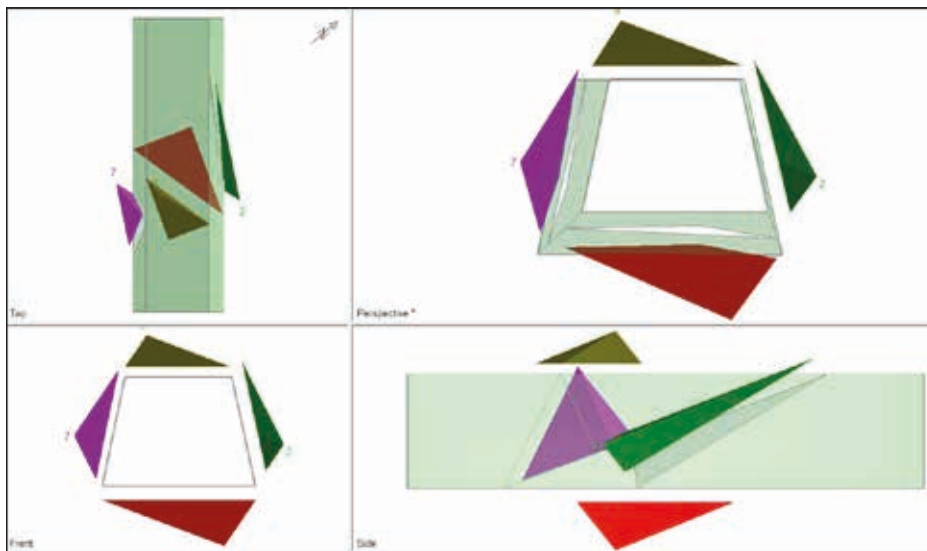
Este artículo es producto de una investigación que se encuentra en curso desde el 21 febrero de 2017, está financiado por SENNOVA y lo ejecuta GICEMIN (Grupo de Investigación del Centro Minero).

Fecha de recepción: 5 de julio de 2017

Fecha de evaluación: 3 de agosto de 2017

Fecha de aceptación: 18 de agosto de 2017





Evaluación del comportamiento mecánico de una puerta alemana diseñada con resina poliéster reforzada con fibra de vidrio

Resumen

El objetivo de esta investigación se centró en la evaluación del comportamiento mecánico de una puerta alemana diseñada a base de polímeros reforzados con fibra de vidrio para minería subterránea de carbón. Las condiciones geométricas de la puerta se limitaron según el Decreto 1886 (Ministerio de Minas y Energía, 2015) en el cual se establece que las dimensiones del sostenimiento debe garantizar un área de trabajo de 3m². Las cargas a las que se sometieron los elementos de sostenimiento se definieron bajo una caracterización geomecánica de tres estratos Arcillolita, Limolita y Carbón en la mina didáctica del Centro Minero, Regional Boyacá, la cual determino la carga de la bóveda, calculada por la teoría de Terzaghi (Muñoz & William, 2009). El material con el que se diseñó la puerta alemana fue una resina poliéster caracterizada en la base de datos del *software* de modelamiento de elementos finitos (Steven, Donaldson & Miracle, 2001). El *software* de elementos finitos permitió evaluar el comportamiento a carga y desplazamiento de los elementos de sostenimiento (capiz y palanca), se modelaron los elementos para armar un prototipo de puerta alemana con resina poliéster reforzada fibra de vidrio.

La configuración geométrica de la puerta alemana permitió analizar el comportamiento a flexión del capiz y el comportamiento a compresión de las palancas, cabe aclarar que el modelado en finitos se limitó a un análisis isotrópico de esfuerzos. El análisis de los resultados se centró en correlacionar los estudios en elementos finitos, con los ensayos a falla de las probetas del capiz de una puerta alemana, con el fin de aceptar o rechazar la siguiente hipótesis: “El comportamiento de los elementos de sostenimiento fabricados con polímeros reforzado con fibra de vidrio, es el adecuado para soportar las cargas generadas por el macizo rocoso”.

Palabras clave: sostenimiento, polímero, minería, capiz, palanca.

Abstract

The objective of this research was to evaluate the mechanical behavior of a German door designed with glass fiber reinforced polymers for underground coal mining. The

geometric conditions of the door were limited according to the decree 1886 (Ministerio de Minas y Energía, 2015) in the which states that the dimensions of the support must guarantee a work area of 3m². The loads to which the support elements were subjected were defined under a geomechanical characterization of three strata arcillolita, limolita and carbon in the didactic mine of the center regional mining company Boyacá, which determined the loading of the vault, calculated by the terzaghi theory (Muñoz, & William, 2009). The material with which the German door was designed was a polyester resin characterized in the database of finite element modeling software (Steven, Donaldson, & Miracle, 2001). The software of finite elements allowed to evaluate the behavior to load and displacement of the elements of support (capiz and lever), the elements were modeled to assemble a prototype of German door with polyester resin reinforced with steel core.

The geometric configuration of the German gate allowed the analysis of the flexural behavior of the capiz and the compression behavior of the levers, it should be clarified that the finite modeling was limited to an isotropic analysis of stresses. The analysis of the results was focused on correlating the finite element studies with the failure tests of the Capiz specimens of a German door, in order to accept or reject the following hypothesis: "The behavior of fabricated support elements with reinforced polymers is adequate to withstand the loads generated by the rocky massif".

Keywords: Sustainability Elements, Polymer, Underground Mining, Capiz, Lever, Finite Elements, German Gate.

Introducción

En el año 2015 ocurrieron 46 accidentes atendidos por el Grupo de Seguridad y Salvamento Minero de la Agencia Nacional de Minería (ANM), en los que fallecieron 60 personas. En la última década se han registrado casi 1.000 fallecimientos en 795 emergencias, con estas cifras es fácil concluir que la muerte se insta-

ló como un riesgo latente en buena parte de la actividad minera que se realiza en el país, en gran parte por falta de condiciones de seguridad, una inadecuada elección y vigilancia de los elementos de sostenimiento y otros factores relacionados a la operación minera.

Las difíciles condiciones ambientales que presentan las minas bajo tierra (humedad, altas temperaturas y presencia de elementos corrosivos), provocan en la madera un rápido estado de descomposición y putrefacción, generando gases tóxicos que incrementan los riesgos de accidentalidad para los trabajadores. Adicionalmente, la putrefacción de la madera disminuye la vida útil del sostenimiento y aumenta la frecuencia de requerimientos de renovación del mismo, incrementando los costos de producción en este tipo negocio. Otra de las problemáticas asociadas a la utilización de madera para el sostenimiento en minería, es la relacionada con el impacto ambiental ya que la zona de Boyacá prolifera el eucalipto, como principal tipo de madera utilizada para el sostenimiento, esto ha fomentado la erosión de las rocas y suelos aledaños a las labores mineras.

Debido a lo anterior, se planteó diseñar un elemento de sostenimiento basado en polímero reforzado que pueda reemplazar el uso de la madera para el sostenimiento en minería.

Existen estudios de las estructuras principales de sostenimiento usadas en la minería de carbón, en los que se han caracterizado variables geométricas de la estructura, de las cuales concluyeron que solo dos influyen en el comportamiento mecánico de la estructura, el diámetro, el ángulo y su interacción (Bolívar, Triviño & Mauricio, 2015). Sin embargo, no existe una caracterización completa del comportamiento mecánico de una puerta alemana fabricada con polímero reforzado. Por esta razón, se diseñó una estructura de sostenimiento y se identificó un material polimérico, que brinda una mejor resistencia a las presiones mineras, mejorando las condiciones de seguridad en la minería tradicional.

Metodología

Para evaluar el comportamiento mecánico de una puerta alemana diseñada con material polimérico, se acudió en primera instancia a la caracterización geomecánica de tres estratos de la mina didáctica del SENA Centro Minero, con el fin de obtener las cargas en la bóveda, luego se fabricaron unas probetas a escala del capiz de una puerta alemana con el fin de fallarlas y encontrar sus esfuerzos máximos, además se modeló en un *software* de elementos finitos la puerta alemana, bajo las condiciones de carga y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas caracterizada de los materiales.

Caracterización geomecánica

Mediante la clasificación geomecánica de roca en las áreas subterráneas de la mina, se estableció el comportamiento mecánico del macizo rocoso, lo cual permitió conocer las cargas que soporta el sostenimiento.

Para caracterizar el área donde se utiliza el sostenimiento, se estimó el valor de la presión en el aula, allí se identificaron los materiales rocosos carbón, limolita y arcillolita; a través de procedimientos en laboratorio se establecieron sus densidades (ver Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades físicas de los materiales rocosos -SENNOVA. **Fuente:** los autores.

Roca	Volumen (cm ³)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
Limolita	22	59.42	2.68
Carbón	25	35.23	1.41
Arcillolita	22	59.42	2.54

Cálculo de la presión minera en el aula

Con los resultados obtenidos de densidades, se utilizó la teoría de Terzaghi la cual plantea el arqueado y deslizamientos de los bloques sobre el techo del túnel,

donde se genera un área en forma de domo parabólico que descansa sobre las paredes laterales del túnel (ver Figura 1).

Conocida la altura la bóveda, se delimitaron dos zonas con distinto comportamiento: por encima de la parábola el terreno quedará sustentado por un “efecto arco”, mientras que el terreno situado por debajo de la parábola cargará directamente sobre el sostenimiento (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Una vez se desarrollaron los cálculos bajo la teoría de Terzaghi, se obtuvieron las cargas y presiones verticales de los materiales rocosos (ver Tabla 2).

Tabla 2. Resultado del cálculo de carga y presión vertical. **Fuente:** los autores.

Carga y presión vertical		
Roca	Carga (ton)	Presión (ton/m ²)
Limolita	17.5741	8.174
Arcillolita	14.688	6.831
Carbón	9.246	4.3

La presión y carga vertical fue definida para la bóveda con una altura específica, sin embargo, existen bloques susceptibles al desprendimiento los cuales reposan sobre los elementos de sostenimiento; para caracterizarlos se realizó un levantamiento de discontinuidades que permitió identificar las cuñas presentes en el aula.

Levantamiento de las discontinuidades

El levantamiento de discontinuidades se realizó con el fin de calcular la presión generada a la periferia de la excavación. Se realizó la toma de 71 discontinuidades, allí se identificaron tres familias con características de orientación, espaciado, persistencia, rugosidad, abertura, relleno, filtraciones y resistencia de las paredes. Algunas de estas características determinaron el comportamiento a la resistencia de los planos

de discontinuidad (De Vallejo, Ferrer & Ortuño, 2011), como la rugosidad y la orientación.

Se tomó la medida de la orientación con ayuda de una brújula, en el techo, paredes de la galería y en el aula, en los estratos de roca limolita, arcillolita y carbón, edificando los planos preferenciales (ver Tabla 3).

Tabla 3. Identificación de discontinuidades en el aula galería 1. **Fuente:** los autores.

Familia de discontinuidades	Dip	Dip Direction
J-1	76	346
J-2	70	200
J-3	22	109

El análisis estereográfico arrojó tres familias de discontinuidades que sirvieron como datos de entrada para el modelamiento de las cuñas, en el aula con dirección N50°W y una inclinación promedio de 7° (ver Figura 1).

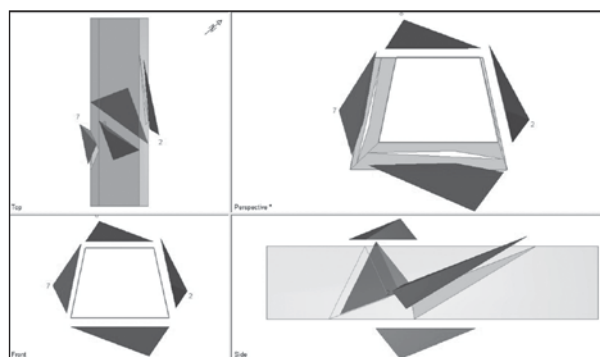


Figura 1. Análisis de las cuñas. Intercepción de planos de discontinuidad en el aula Minera. **Fuente:** los autores.

El modelamiento arrojó como resultado las características geométricas y físicas de las cuñas, registrando el valor del Factor de Seguridad FS para cada cuña (ver Tabla 4).

Tabla 4. Caracterización de las cuñas. **Fuente:** los autores.

Cuñas	Ubicación	Vol (m ³)	Peso (ton)	FS
Cuña N°8 Café	Techo	0.095	0.256	0
Cuña N°2 Verde	Pared Derecha	0.062	0.168	68.56
Cuña N°7 Morado	Pared Izquierda	0.090	0.243	28.52
Cuña N°1 Rojo	Piso	0.281	0.758	Estable

Para determinar los posibles desplazamientos y convergencias que pueda sufrir la excavación a la periferia de la misma, se realiza una modelación de la excavación a fin de determinar las áreas sometidas a tracción y compresión (Ricaurte, D. 2015). Para este análisis se resalta la forma y el área excavada en configuración trapezoidal con un área libre de 3.3 m², cumpliendo los requerimientos del Decreto 1886 del 21 de septiembre 2015.

Se identifican las áreas de desprendimiento evidenciando que el potencial de mayor convergencia o falla se encuentra ubicado en el techo de la excavación generando áreas con concentración de esfuerzos, las cuales aparecen en contorno rojo con valores hasta de 17.7 MPa (ver Figura 2).

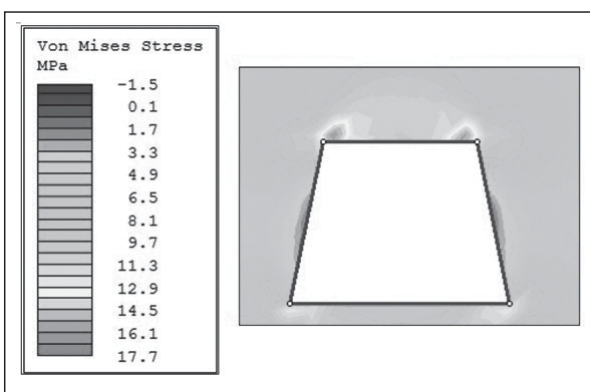


Figura 2. Análisis del esfuerzo. Mayor esfuerzo principal en la periferia de la excavación. **Fuente:** los autores.

Ensayos de flexión

Se sometieron 30 probetas a falla por flexión (ver Foto 1 y Foto 2), simulando cargas sobre el capiz por desprendimiento de cuñas y sobre carga.

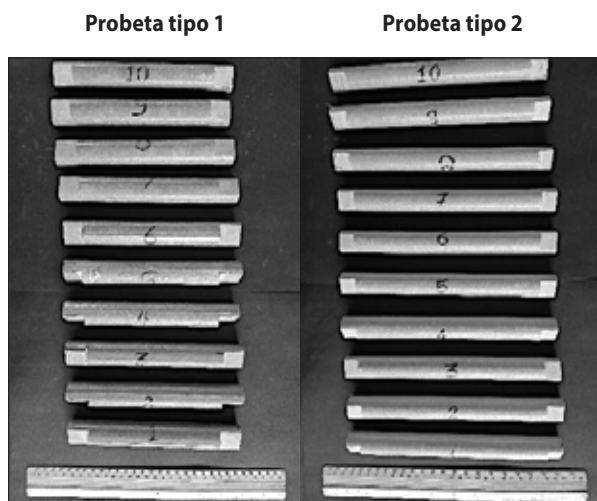


Foto 1. Probetas de capiz a escala.
Fuente: los autores.



Foto 2. Montaje de prueba a flexión. Ensayo a flexión.
Fuente: los autores.

Modelamiento en elementos finitos

Se realizó el modelamiento en elementos finitos con el fin de evaluar la resistencia mecánica de una puerta alemana utilizada en minería subterránea. Se sabe que la resistencia a la compresión y a la flexión es afectada directamente por el tipo de material con el que se fabrican los elementos de sostenimiento.

Se caracterizó un material polímero reforzado con fibra de vidrio.

El modelamiento en elementos finitos se desarrolló teniendo como base, la geometría de una puerta alemana (ver Figura 3 y Tabla 5), para controlar las variables que podrían intervenir en los resultados, se manejó una configuración fija tanto en diámetros, longitudes, tipo de empalme, ángulos, etc. La carga aplicada sobre la puerta alemana está sustentada por la caracterización geomecánica de la bóveda de carga.

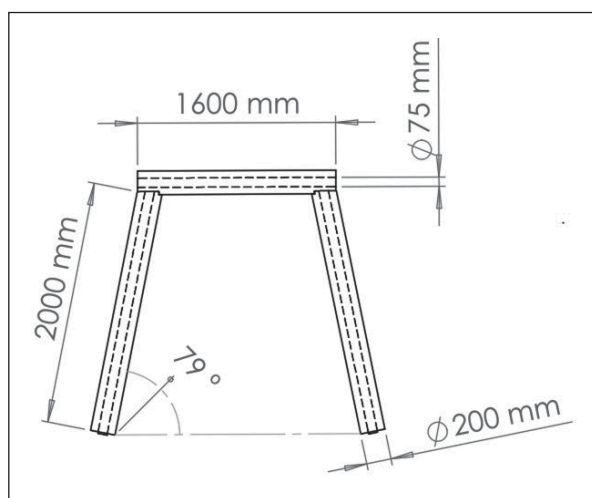


Figura 3. Geometría puerta alemana. Dimensiones Capiz, Palanca. Fuente: los autores.

Tabla 5. Propiedades geométricas de la puerta alemana.
Fuente: los autores.

Elemento de sostenimiento	Diámetro Mm	Longitud Mm	Empalme
Capiz	200	1.600	Sencillo
Palanca	200	2.000	sencillo

• *Análisis estático de esfuerzo sobre la puerta alemana*

El estudio estático se realizó en la puerta alemana, teniendo como referencia los materiales, las condiciones geométricas y la carga. La simulación se realizó sometiendo a la puerta a una carga de 10 ton.

El análisis estático se realizó teniendo en cuenta las propiedades de los materiales, en este caso la resina poliéster (ver Tabla 6).

Tabla 6. Propiedades fisicomecánicas resina poliéster.
Fuente: los autores.

RESINA POLIESTER		
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	10.200	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	0.35	N/D
Módulo cortante	2.896	N/mm ²
Densidad de masa	1.160	kg/m ³
Límite de tracción	190	N/mm ²
Límite de compresión	230	N/mm ²

Con las propiedades de los materiales asignadas a los elementos de sostenimiento, se configuraron las relaciones de contacto entre el capiz y las palancas, se aplicaron las sujeciones en las caras de soporte de las palancas, así como la carga de 10 toneladas sobre el capiz (ver Figura 4).

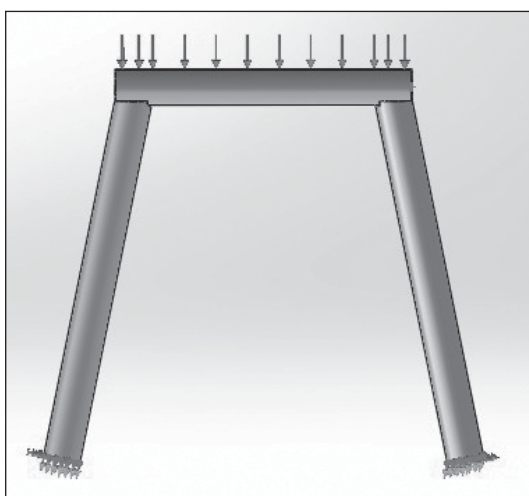


Figura 4. Condiciones de simulación.
Relaciones de contacto, sujeciones y cargas.
Fuente: los autores.

Resultados

Pruebas de falla a flexión

El comportamiento del 40% de las probetas tipo 1 poliméricas reforzadas con fibra de vidrio, presentan un comportamiento de falla similar al evidenciado en la Figura 5. En la gráfica se aprecian tres zonas de comportamiento de las probetas, en la primera zona, se observa cómo el esfuerzo aumenta de forma lineal a medida que la relación entre deformación y carga incrementa; en la segunda zona, la probeta entra en falla, sin embargo, se aprecia un comportamiento de endurecimiento del material, aumentando su capacidad de soportar más esfuerzo, llegando al punto máximo de esfuerzo; en la tercera zona, las probetas pierden su capacidad estructural y entran en estado total de falla.

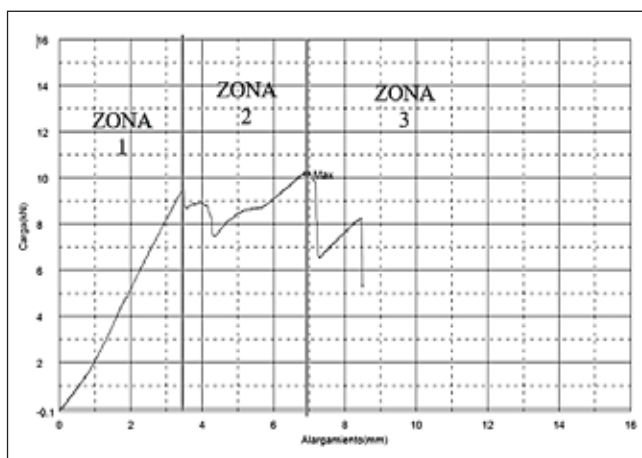


Figura 5. Comportamiento de falla del 40% de las probetas tipo 1. Tres zonas de comportamiento.
Fuente: los autores.

El 60% de las probetas tipo 1 tienen un comportamiento de falla súbito, no se registra zona de endurecimiento, pasa de la zona 1 a la zona 3 (ver Figura 6).

En la Tabla 7 se resume los resultados de esfuerzo máximo del material.

En la Figura 7 se observa que el comportamiento del valor máximo de esfuerzo está ajustado a la línea de tendencia de las pruebas, lo que da garantía de que los datos son representativos y no hay dispersión alta.

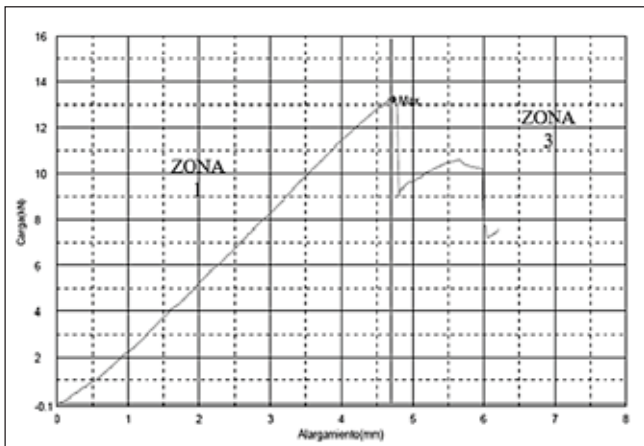


Figura 6. Comportamiento de falla del 60% las probetas tipo 1. Dos zonas de comportamiento.
Fuente: los autores.

Tabla 7. Resultado de esfuerzo máximo de flexión probetas tipo 1.
Fuente: Laboratorio de Materiales UPTC - Tunja.

Nomen.	Diam. mm	Long. mm	Car Max. KN	Esf. Max. KN/mm ²
PROBETA 1	24.77	198	10.18	33.79
PROBETA 2	24.83	200	13.56	45.12
PROBETA 3	25.10	202	13.21	42.94
PROBETA 4	24.95	199	14.20	46.34
PROBETA 5	24.30	211	15.84	56.51
PROBETA 6	24.31	199	11.57	40.83
PROBETA 7	24.59	200	13.62	46.72
PROBETA 8	24.58	200	10.17	32.72
PROBETA 9	24.72	199	11.09	37.21
PROBETA 10	25.24	201	13.15	41.87

En las probetas del material tipo 2 se presentó un comportamiento de falla súbito, en el 50% de los elementos después de alcanzar el esfuerzo máximo, pasando a la zona 3 de falla donde el elemento pierde su propiedad estructural (ver Figura 8).

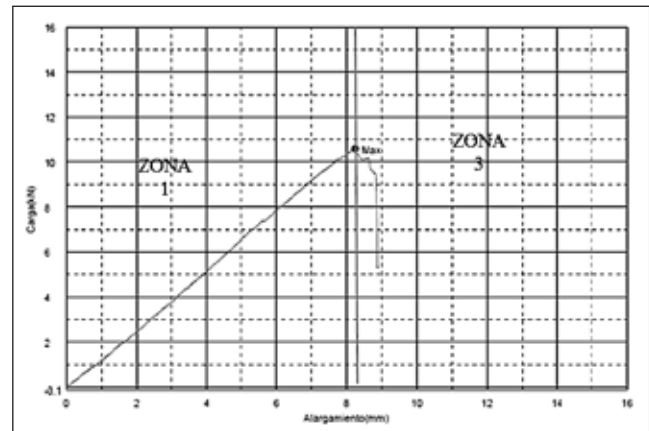


Figura 8. Comportamiento de falla del 50% de las probetas tipo 2. Dos zonas de comportamiento.
Fuente: los autores.

En el otro 50% de las probetas del material tipo 2 se presentó un comportamiento de falla progresivo después de alcanzar el punto de máximo esfuerzo, pasando a la zona 3 de falla donde el elemento pierde su propiedad estructural, pero de forma progresiva (ver Figura 9).

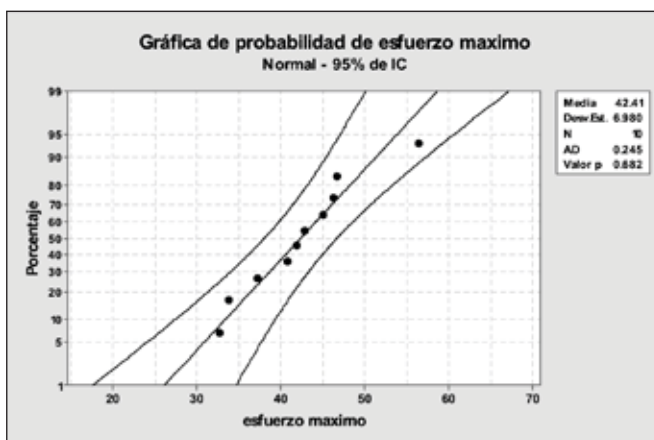


Figura 7. Normalidad de datos esfuerzo máximo, para probetas tipo 1. Baja de distorsión de datos.
Fuente: los autores.

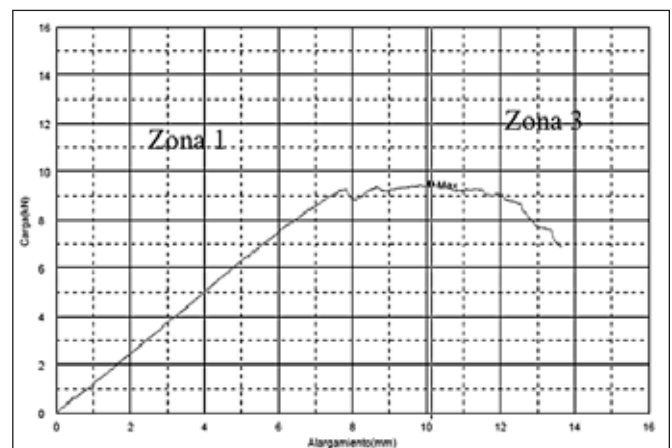


Figura 9. Comportamiento de falla del 50% las probetas tipo 2. Dos zonas de comportamiento.
Fuente: los autores.

En la Tabla 8 se resumen los resultados de esfuerzo máximo del material:

Tabla 8. Resultado de esfuerzo máximo de flexión probetas tipo 2. Resultados Pruebas a flexión.

Fuente: Laboratorio de Materiales UPTC - Tunja.

Nomen.	Diam. mm	Long. mm	Car Max. KN	Esf. Max. KN/mm ²
PROBETA 1	22.45	241	11.79	63.98
PROBETA 2	22.47	240	7.89	42.50
PROBETA 3	22.28	240	11.48	63.46
PROBETA 4	22.6	238	9.48	49.79
PROBETA 5	22.29	240	10.18	56.51
PROBETA 6	22.39	240	10.59	57.68
PROBETA 7	22.59	240	11.64	61.71
PROBETA 8	22.39	240	11.45	62.36
PROBETA 9	22.41	241	12.14	66.20
PROBETA 10	22.49	239	10.78	66.20

En la Figura 10 se observa que el comportamiento del valor máximo de esfuerzo está ajustado a la línea de tendencia de las pruebas, lo que da garantía de que los datos son representativos. Sin embargo, la dispersión de los datos es mayor que los de las probetas tipo 1.

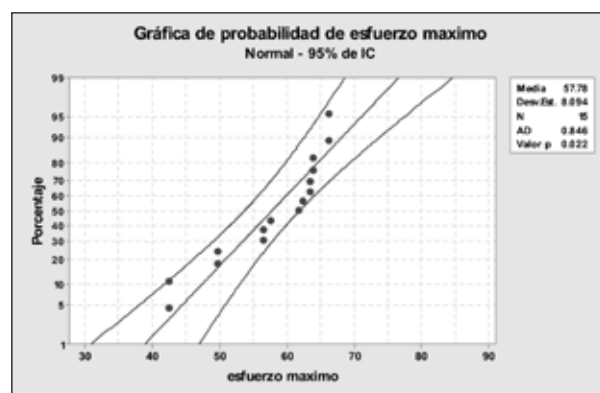


Figura 10. Normalidad de datos esfuerzo máximo, para probetas tipo 2. Dispersión de datos dentro de la normalidad.
Fuente: los autores.

Modelamiento en elementos finitos

El capiz de la Figura 11 está sometida a la acción de una carga transversal transmitida por la bóveda de carga y tiene una pretensión direccionada lateralmente debida al empalme sencillo. El pandeo del capiz bajo la carga de 10 toneladas registra un desplazamiento máximo de aproximadamente de 6 mm (ver Figura 11).



Figura 11. Desplazamiento en la puerta alemana. Máximo desplazamiento en el centro del capiz.

Fuente: los autores.

Con base a la teoría de la máxima energía de distorsión, la falla en el material polimérico ocurrirá cuando la energía de distorsión supere el límite de fluencia (Richard, Budynas & Nisbett, 2008); en la simulación se obtuvo un esfuerzo máximo de von Mises de 53,10 MPa (ver Figura 12), valor que está por debajo del límite de fluencia del polímero el cual fue calculado en los ensayos de flexión 12100 MPa.

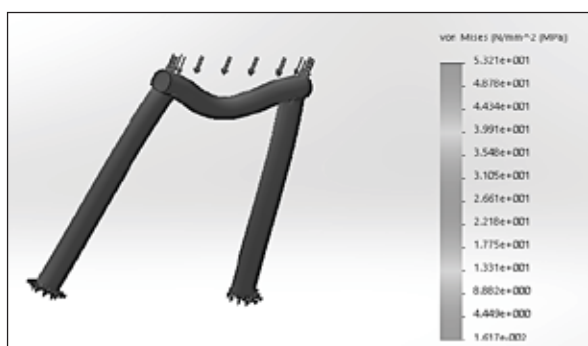


Figura 12. Esfuerzos de von Mises. Distribución de esfuerzos sobre la puerta alemana.

Fuente: los autores.

En el empalme sencillo se presentan puntos de concentración de esfuerzos, ocasionada por los cambios abruptos en la geometría del capiz (ver Figura 13).

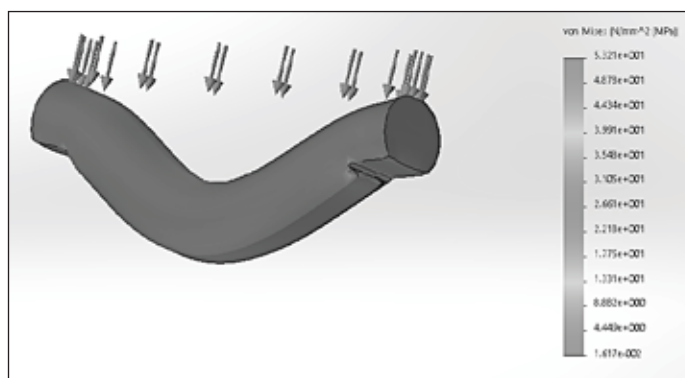


Figura 13. Concentración de esfuerzos en la cara lateral del empalme del capiz.

Fuente: los autores.

Conclusiones

Por teoría de von Mises se definió la condición de carga de la bóveda, en la cual el material sufrirá falla elástica debido a que los valores de carga pueden llegar a superar el valor de la resistencia elástica del material.

Aunque la carga de la bóveda presenta valores en un rango de 9.246 ton y 17.5741 ton, el análisis de discontinuidades identificó cuñas propensas a deslizamiento que transmitirían cargas por el orden de 1 ton, considerando que se encuentran variaciones de carga, se realizó la simulación en elementos finitos bajo una carga de 10 ton.

El comportamiento de falla de los materiales poliméricos presenta zonas fácilmente detectables, zona 1 esfuerzos correlacionados a la carga y al desplazamiento, zona 2 endurecimiento y aumento de la capacidad de resistir el esfuerzo, y la zona 3 donde el material pierde sus propiedades estructurales.

La probeta tipo 2, falla a menor carga que las de tipo 1. Sin embargo, tiene un comportamiento más elástico al registrar mayores desplazamientos.

Para el valor de carga simulado se registró un desplazamiento de aproximadamente un milímetro sobre el capiz, condición que no provocaría falla por esfuerzos estáticos en la geometría de la puerta alemana.

El registro de esfuerzos de von Mises sobre la puerta alemana registra el valor máximo de 53,10 MPa, valor por debajo del límite elástico del material polimérico reforzado fibra de vidrio, este comportamiento garantiza una buena operación de la puerta alemana, bajo condiciones de carga estática.

Los mayores esfuerzos se registraron en zona donde la geometría de la puerta presenta puntos propensos a concentración de esfuerzos, estas zonas se consideran predispuesta a fallas, se podrían realizar modificaciones en los ángulos de los empalmes para minimizar la concentración de esfuerzos.

El comportamiento mecánico de la puerta alemana, satisface las condiciones de carga estática en yacimientos planos, normalmente encontradas en minería subterránea.

Los resultados de las probetas y el modelado en elementos finitos confirman la hipótesis de que el material polimérico reforzado con fibra de vidrio es adecuado para el diseño de elementos de sostenimiento.

Con el fin de optimizar el diseño de la puerta alemana es necesario estructurar un diseño experimental que permita correlacionar variables como (diámetros, longitudes, temperaturas, materiales, rigidez) y demás factores que intervengan en el proceso del diseño.

Para evaluar totalmente el comportamiento mecánico, es necesario tener en cuenta las cargas dinámicas, temperaturas y demás variables que puedan influir directamente en dicho comportamiento, sin embargo, el estudio estático nos brinda un primer acercamiento del comportamiento de los materiales poliméricos frente a las condiciones de carga usuales en minería.

Conclusiones

Esta investigación es resultado de un trabajo interdisciplinario que ha sido posible gracias a los lineamientos pedagógicos y curriculares que ha desarrollado el SENA Centro Minero Morca, Regional Boyacá. Agradecemos a SENNOVA que junto con sus asesores y equipos de trabajo, orientaron, acompañaron y apoyaron el proceso de elaboración, discusión y publicación de este material, un merecido reconocimiento porque su gestión pedagógica y administrativa ha sido definitiva para la consecución de la meta de diseñar unas políticas acordes a la investigación productiva basadas en las necesidades de la región.

Referencias

- Bolívar, R., Triviño, N. & Mauricio, J. (2015). *Estudio técnico-ambiental de las estructuras principales de fortificación usadas en la minería de carbón de Norte de Santander*. Tunja: Facultad de Ingeniería, UPTC.
- De Vallejo, G., Ferrer, I. & Ortuño, L. (2011). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall. Pp. 127, 163, 165, 181, 241, 347 y pp. 488-498.
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Decreto 1886 21 de septiembre, Reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas en Colombia.
- Muñoz, J. & William, J. (2009). *Mecánica de rocas aplicada*. (Sogamoso, universidad pedagógica y tecnológica de Colombia).
- Ricaurte, D. (2015). *Planeamiento minero para el contrato de concesión hkn - 08071, mina La Esmeralda ubicado en los municipios de Jenesano y Tibaná, departamento de Boyacá*. Sogamoso: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería de Minas.
- Richard, G., Budynas, J. & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Octava edición, (Mexico): McGraw-Hill.
- Steven L., Donaldson, D. & Miracle B. (2001). "ASM Handbook". *Composites*, vol. 21. (Ohio).