



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN
DE INGENIEROS EN LA
ERA DIGITAL



DESARROLLO DE PROTECCIÓN FLEXIBLE BIOINSPIRADA

Susana M. Estrada, Alexander Ossa

**Universidad EAFIT
Medellín, Colombia**

Resumen

Los animales utilizan diferentes estrategias para protegerse de depredadores. Entre ellas se destaca el desarrollo de sistemas de protección dérmicos y flexibles, los cuales consisten en unidades altamente mineralizadas como osteodermos o escamas, unidas por sustratos orgánicos flexibles como la piel. Este tipo de arreglos logran alcanzar una alta flexibilidad sin una reducción significativa de la resistencia mecánica cuando son comparados con estructuras de protección monolíticas. Estas características pueden ser extremadamente valiosas en el diseño de sistemas de protección sintéticos. Este proyecto doctoral busca comprender los atributos de los sistemas de protección flexible de diferentes animales (peces, mamíferos, reptiles, etc.) y comparar sus características en relación con las herramientas de caza (dientes y garras) de sus respectivos depredadores. A partir de esto, se propone una nueva metodología para el desarrollo de sistemas de protección flexible sintética, donde se incluye un modelo simplificado para calcular su resistencia y flexibilidad, además de un proceso de manufactura simple y económico. El modelo ha sido puesto a prueba utilizando ensayos mecánicos, validando así su capacidad de predicción de respuesta del material ante impactos. Por último, la metodología propuesta se utiliza para diseñar sistemas de protección flexibles donde se incluyen un chaleco antibalas y unas polainas de protección contra mordida de serpientes, evaluando así dos límites extremos de velocidad (energía) de impacto. Los resultados de este trabajo pueden contribuir en el desarrollo de una nueva generación de materiales de protección bioinspirados de alto desempeño.

Palabras clave: biomimética; protección; impacto

Abstract

Animals use different strategies to protect themselves from predators. These include the development of dermal flexible protection systems, which consist of highly mineralized units such as osteoderms or scales, joined together by flexible organic substrates such as skin. This type of arrangement achieves high flexibility without a significant reduction in mechanical strength when compared to monolithic protective structures. These features can be extremely valuable in the design of synthetic protection systems. This doctoral project seeks to understand the attributes of the flexible protection systems of different animals (fish, mammals, reptiles, etc.) to compare their mechanical and geometrical characteristics in relation to the hunting tools (teeth and claws) of their respective predators. Based on this, a new methodology is proposed to develop synthetic flexible protection systems, including a simplified model to calculate their strength and flexibility, as well as a simple and economical manufacturing process. The model has been tested using mechanical tests, thus validating its ability to predict the response to impacts of the bioinspired system. Finally, the proposed methodology is used to design flexible protection systems including a bulletproof vest and snake bite protection gaiters, thus evaluating two extreme limits of impact velocity (energy). The results of this work can contribute to the development of a new generation of high performance bioinspired protection materials.

Keywords: biomimetics; protection; impact

1. Introducción

Los materiales para la protección personal contra impactos puntuales deben ser lo suficientemente duros para evitar la penetración, pero flexibles para permitir la locomoción (Yang et al., 2013). Este conflicto entre propiedades aparentemente contradictorias ya ha sido resuelto en la naturaleza.

Los sistemas de protección naturales oscilan entre pieles delgadas y flexibles en mamíferos (Yang et al., 2013) hasta conchas gruesas y altamente mineralizadas en moluscos (Suksangpanya et al., 2017). La solución intermedia, que es común entre una gran variedad de especies animales, incluyendo peces (Murcia et al., 2017; Yang, et al., 2013), reptiles (Chen, Yang, & Meyers, 2014, 2015) y mamíferos (Chen et al., 2011; Wang et al., 2016) consiste en unidades duras (escamas u osteoderms) unidas con fibras flexibles (piel). Numerosos estudios han comprobado que este tipo de arreglos logran mayores niveles de flexibilidad en comparación con sistemas monolíticos homólogos, sin una reducción significativa de su resistencia mecánica. En consecuencia, dada su extraordinaria combinación de propiedades, la protección natural segmentada ha recibido mucha atención de científicos e ingenieros durante la última década.

La protección natural segmentada despliega un rico conjunto de mecanismos de deformación y fractura. Estos mecanismos pueden ser activados por diferentes características de las escamas (osteoderms) como la forma o el tamaño, además de otros atributos del sistema de protección como las propiedades del material o el arreglo de las escamas.

Esta variedad de atributos geométricos y de composición ha llevado a diversos desarrollos de sistemas de protección bioinspirados utilizando diferentes procesos de fabricación. Entre estos se incluyen estructuras cerámicas impresas en 3D (Sherman et al., 2017), polímeros impresos en 3D (Porter et al., 2017), cerámicos grabados con láser (Mirkhalaf, Tanguay, & Barthelat, 2016) y métodos de estiramiento y liberación para generar solapamientos (Martini & Barthelat, 2016). La mayoría de estas estrategias de fabricación no cumplen aún con los requisitos para el escalamiento industrial debido a su elevado costo de producción; además, ninguno de estos estudios proporciona una guía clara para transferir los principios constructivos de la protección natural a sistemas artificiales de protección.

Las pruebas de punción se han utilizado ampliamente para evaluar el desempeño de la protección segmentada -tanto natural como bioinspirada- (Porter et al., 2017; Martini & Barthelat, 2016). Esto se debe a que esta estrategia permite emular fenómenos como la penetración de un colmillo o una garra a través de un sistema de escamas. Aunque hay algunas excepciones (Mirkhalaf et al., 2016), este tipo de pruebas se realizan a bajas velocidades de deformación, lo cual no se corresponde con las amenazas típicas dentro de los escenarios reales de impacto.

En este trabajo presentamos una nueva estrategia de fabricación de sistemas bioinspirados de protección, que consisten en laminados de fibras unidireccionales grabadas con patrones bioinspirados. Con la intención de evaluar el efecto de la geometría del grabado sobre la flexibilidad y la resistencia al impacto de los laminados, diferentes especímenes fueron fabricados y probados bajo cargas de impacto. Estos ensayos mecánicos se complementaron con un modelo simplificado que predice el efecto mecánico de los grabados, ofreciendo una herramienta fiable para guiar el diseño de sistemas de protección flexibles. Una de las ventajas de esta propuesta es que es fácilmente escalable a niveles industriales por sus reducidos costos de producción, permitiendo su fácil transferencia a la industria de la protección contra impactos.

2. Protección flexible en la naturaleza

Como se describió brevemente en la sección anterior, muchos animales han desarrollado sistemas de protección natural segmentada, los cuales consisten en la unión de elementos rígidos altamente mineralizados a través de fibras flexibles de colágeno. Estos sistemas permiten la distribución de cargas puntuales sobre áreas mayores, reduciendo la concentración de esfuerzos en el tejido subyacente. Por otro lado, se ha demostrado que esta configuración permite mayor flexibilidad sin una reducción significativa de la resistencia (Yang et al., 2013).

Las escamas de los peces son un buen ejemplo de un sistema de protección natural segmentado. Estas son unidades mineralizadas dispuestas en arreglos superpuestos, que son lo suficientemente ligeras como para permitir la movilidad, pero rígidas para proporcionar protección contra los depredadores. Su disposición superpuesta puede reducir el arrastre en el agua para los animales acuáticos.

Las escamas de los peces se clasifican en cuatro grupos: placoide, ganoide, cosmoide y elasmoides. Esta división se establece según su configuración interna y su composición. Los

Pangolines son los únicos mamíferos que tienen escamas superpuestas. Están compuestas de queratina y ofrecen una gran protección cuando el animal se enrolla sobre sí mismo (Wang et al., 2016).

Los Pirarucú y los Pejelagartos son animales acuáticos cubiertos de escamas. Los primeros están cubiertos de delgadas escamas elasmoides circulares (Murcia et al., 2017), mientras que los segundos tienen escamas gruesas y romboidales de tipo ganoide (Yang et al., 2013). La configuración de estos dos tipos de escama varía, mientras que las escamas elasmoides del Pirarucú consiste en fibras unidireccionales apiladas en bloques a 90° que se mineralizan hacia el exterior de la escama (Murcia et al., 2017), las escamas ganoideas del pejelagarto consisten en una capa exterior de ganoína y una capa interior gruesa compuesta de hueso.

Los osteodermos son la contraparte de las escamas de los peces en reptiles y mamíferos. Estos son placas óseas cubiertas de piel conectadas en arreglos yuxtapuestos (Yang et al., 2013). Generalmente los osteodermos tienen una estructura tipo sándwich, donde las capas más externas son más densas que el centro poroso. Otra característica de los osteodermos es que son vascularizados, y por tanto pueden facilitar la termorregulación de algunas especies.

Los caimanes y tortugas laúd son especies de reptiles cubiertos con osteodermos. Mientras que los caimanes tienen escamas en forma de disco con bordes suavizados (Chen, Yang & Meyers, 2014), las tortugas laúd tienen osteodermos poligonales con bordes aserrados conectados por medio de suturas (Chen, Yang & Meyers, 2015). Por otro lado, los armadillos son mamíferos recubiertos de osteodermos hexagonales y triangulares, que de manera similar a la del pangolín, ofrecen una buena protección cuando el animal se enrolla sobre sí mismo (Chen et al., 2011). En la tabla 1 se resumen las principales características geométricas y de composición de los sistemas de protección aquí descritos.

Tabla 1. Principales atributos de las escamas y osteodermos de los animales descritos en la sección 2.

Animal			Escama - osteodermo				
Nombre	Imagen	Longitud (m)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Composición	Módulo Elástico (GPa)	Imagen
Pirarucú		2 – 2,5	40 – 120	1,5 - 2	Colágeno y minerales	1,2 ± 0,2	
Pejelagarto		2,4 – 3	10 – 40	4,5 – 5	Ganoína y hueso	3,5 – 5,2	
Pangolín		0,4 – 1	24 – 30	1,5	Queratina	1,0	
Caimán		4	31 – 43	3 – 4,5	Hueso	0,5	
Tortuga Laúd		1,8 – 2,2	50 – 80	2 – 2,5	Hueso	1,6	
Armadillo		0,5 – 1	5 – 12	2,6	Hueso	0,43	

3. Diseño de protección bioinspirada

Una de las estrategias con las que las escamas se flexibilizan consiste en la inclusión de relieves superficiales. Esto se ha documentado en el caso de las escamas de pirarucú, donde la presencia de altos y bajos relieves en la superficie mineralizada puede reducir los esfuerzos de tensión debido a cargas de flexión (Yang et al., 2013). Con esta idea en mente, se propuso imitar esta estrategia de flexibilización grabando la superficie de placas de blindaje con patrones teselados bioinspirados.

Para lograr esto, primero se hace un análisis de los sistemas de protección de los animales descritos en la sección 2, para simplificar sus características constructivas a una geometría básica teselable. Esto es, una figura regular simplificada que recubre por completo una superficie.

En la figura 1 se muestra gráficamente y en un ejemplo concreto cómo es el proceso de simplificación. La figura 1a muestra el sistema de escamas romboidales superpuestas del pejelagarto, las cuales miden entre 1 y 4 cm de longitud y 4,5 mm de espesor. La figura 1b muestra la figura regular simplificada para las escamas de este pez, la cual es un cuadrado de 2,5 cm de lado y 4,5 mm de espesor. La figura 1c muestra la superficie teselada a partir de la figura simplificada de la escama del pejelagarto.

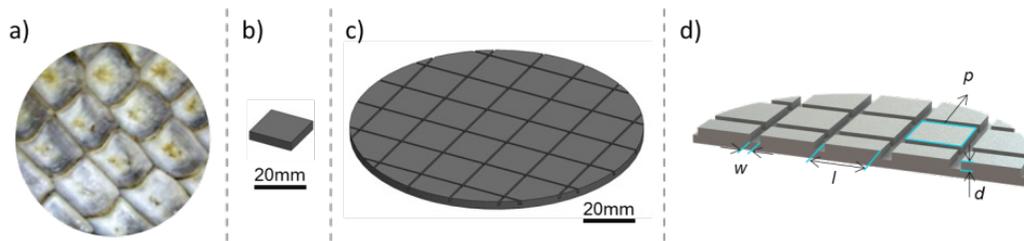


Figura 1. Proceso de simplificación de los sistemas de protección naturales a grabados teselados y bioinspirados. 1a) escamas de pejelagarto, 1b) figura básica simplificada, 1c) teselado bioinspirado, 1d) parámetros del grabado.

Al repetir este proceso de simplificación con los seis animales descritos en la sección anterior, se obtuvieron seis tipos diferentes de teselados dando lugar a seis sistemas de protección inspirados directamente de la naturaleza. Una de las virtudes de esta simplificación es que reduce la amplia variabilidad de los sistemas de protección naturales a patrones geométricos simples que pueden ser parametrizados fácilmente, dado que estos patrones de grabado pueden ser descritos por sólo 5 parámetros: forma (s), perímetro (p), longitud del lado (l), profundidad (d) y ancho del grabado (w), los cuales se muestran gráficamente en la figura 1d.

4. Modelo simplificado

Los parámetros geométricos del grabado son el insumo principal del modelo simplificado que aquí se propone. Este modelo es una modificación de la ley de mezclas aplicada en la predicción del comportamiento mecánico de placas de espesor constante sometidas a cargas de punción. La hipótesis del modelo consiste en que la resistencia del material será inversamente proporcional a la cantidad de material retirado por efecto del grabado.

El objetivo concreto del modelo consiste en predecir la energía absorbida (U) y la flexibilidad – *flexural compliance*– (C_f) de las placas teseladas sometidas a cargas de punción, analizando estas dos variables como una función de características de la placa y los estímulos externos a los que está sometida. Estas características son: carga (P), radio de la placa (a) espesor de la placa (t), relación de Poisson (ν), módulo elástico (E), y fracción volumétrica de material (f_p). La fracción volumétrica de material (f_p) fue definida como la fracción entre el volumen de una placa grabada sobre una placa no grabada con igual espesor y diámetro. Este último parámetro está a su vez en función de los parámetros geométricos del grabado descritos en la sección 3 –*perímetro, longitud de lado, profundidad y ancho del grabado* –.

El modelo permite entre otras cosas predecir la energía y la flexibilidad de placas grabadas, sirviendo como una herramienta de guía para direccionar el diseño de sistemas de protección flexible. La figura 2 muestra una gráfica donde se compara la energía y flexibilidad estimada por el modelo de los seis sistemas de protección inspirados directamente de la naturaleza descritos en la sección anterior. Aquí se evidencia, por ejemplo, que el modelo asocia altos niveles de flexibilidad con animales que pueden enrollarse sobre sí mismos (pangolines y armadillos), y en cambio altos niveles de protección, con animales de grandes osteodermos (tortugas y caimanes) o escamas gruesas y mineralizadas (pejelagartos).

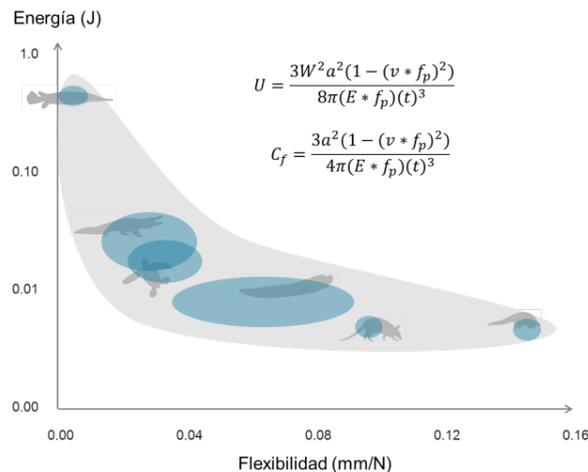


Figura 2. Comparación de energía y flexibilidad de los sistemas de protección inspirados directamente de la naturaleza.

5. Fabricación y pruebas

Con la intención de poner a prueba experimentalmente el modelo simplificado, se comparó la estimación de energía y flexibilidad que proporciona el modelo con la respuesta experimental de placas de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) grabadas y sometidas a cargas de punción. Placas de 3mm de HDPE fueron grabadas con patrones bioinspirados en una máquina de corte láser y sometidas a punción en un equipo de pruebas dinámicas. Para cada tipo de probeta se fabricaron 5 especímenes para tener repetición en la respuesta. La figura 3 muestra imágenes de las probetas de HDPE y del dispositivo de pruebas de punción donde las probetas son fijadas

periféricamente y la carga del punzón se concentra en el centro de la probeta. La figura 3a muestra una probeta sin grabados que se usa de control, la figura 3b muestra una probeta con grabados hexagonales y la figura 3c muestra el montaje de la probeta en el dispositivo de pruebas.

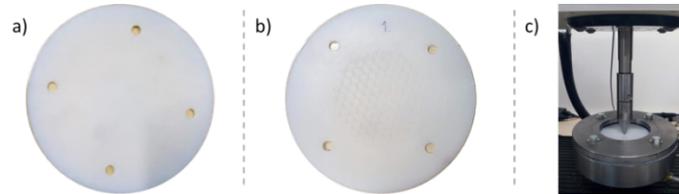


Figura 3. Probetas de HDPE y dispositivo de pruebas de punción.

Los resultados de las pruebas aquí reportadas son pruebas realizadas a bajas velocidades de deformación (10 mm/min), donde se buscó medir experimentalmente la energía y la flexibilidad de las probetas dentro del régimen elástico. Estos resultados fueron comparados con las estimaciones del modelo para validar su capacidad de predicción. Se encontró que el modelo predice el comportamiento de las placas grabadas y no grabadas con gran precisión, pues se encontraron diferencias no mayores al 7% entre la estimación y la medida experimental. Por otro lado, la introducción de los grabados bioinspirados incrementó la flexibilidad de las placas un 16%. Estos resultados se muestran gráficamente en la figura 4a, donde se ven en verde las medidas tomadas experimentalmente y en azul la predicción del modelo. Para los datos experimentales, un punto verde oscuro muestra el promedio de la medida y en una zona clara que da cuenta de la variación estándar de la muestra.

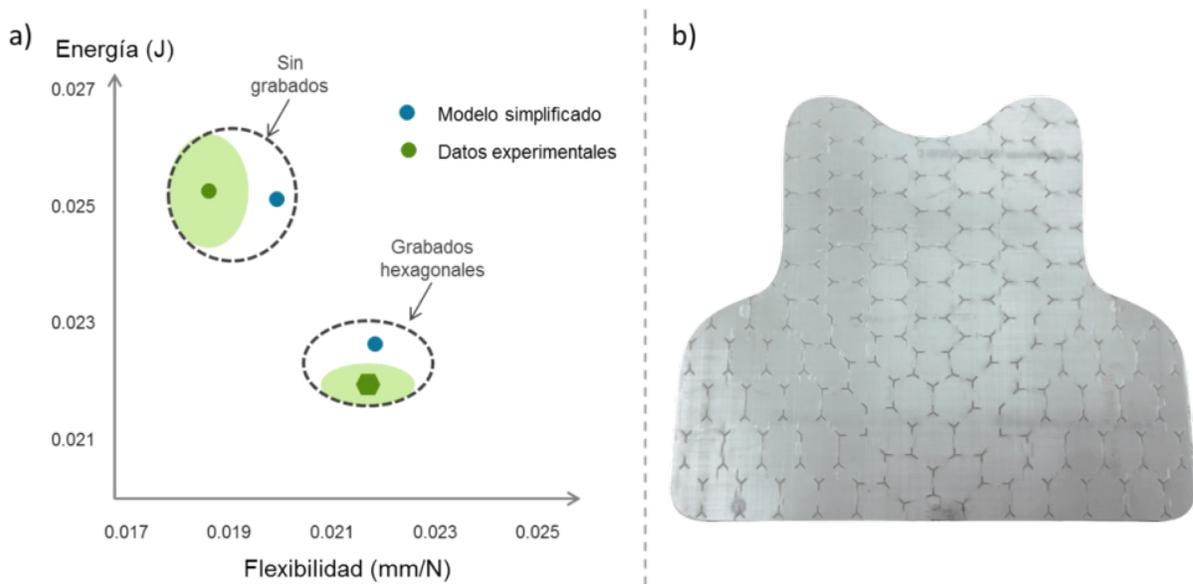


Figura 4. a) comparación de energía y flexibilidad de los sistemas de protección bioinspirados, b) ejemplo de chaleco antibalas con grabados bioinspirados.

Para complementar este trabajo experimental se realizarán ensayos a velocidades cercanas a los 2 m/s sobre placas de HDPE y sobre laminados de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE), que es un material ampliamente utilizado en el diseño de blindaje contra balística y explosivos.

6. Conclusiones

El modelo simplificado que se propone aquí logra predecir con gran precisión el comportamiento mecánico de placas con grabados superficiales, pues se encontraron diferencias entre el modelo y los datos experimentales no mayores al 7%. Se evidencia además que la introducción de grabados en la superficie puede ser una estrategia viable para aumentar la flexibilidad de un sistema de protección.

Por otro lado, esta estrategia de flexibilización puede ser fácilmente escalable a nivel industrial dados sus bajos tiempos de manufactura al compararlo con otras estrategias como la impresión 3D. Esta estrategia permite además el ajuste de la flexibilidad y la protección priorizadas en el sistema de protección personal. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 4b, donde se muestra un chaleco antibalas con grabados orientados verticalmente en los costados que permiten el ajuste de esta área sobre el torso, y grabados orientados horizontalmente en el pecho para facilitar movimientos de encorvamiento por parte del usuario.

7. Referencias

- Chen, I. H., Kiang, J. H., Correa, V., Lopez, M. I., Chen, P.-Y., McKittrick, J., & Meyers, M. a. (2011). Armadillo armor: mechanical testing and micro-structural evaluation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol 4, No 5, pp 713–22.
- Chen, I. H., Yang, W., & Meyers, M. A. (2014). Alligator osteoderms: Mechanical behavior and hierarchical structure. *Materials Science and Engineering C*, Vol 35, No, 1, pp 441–448.
- Chen, I. H., Yang, W., & Meyers, M. A. (2015). Leatherback sea turtle shell: A tough and flexible biological design. *Acta Biomaterialia*, Vol 28, pp 2–12.
- Martini, R., & Barthelat, F. (2016). Stretch-and-release fabrication , testing and optimization of a flexible ceramic armor inspired from fish scales. *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol 11.
- Mirkhalaf, M., Tanguay, J., & Barthelat, F. (2016). Carving 3D architectures within glass: Exploring new strategies to transform the mechanics and performance of materials. *Extreme Mechanics Letters*, Vol 7, pp 104–113.
- Murcia, S., Lavoie, E., Linley, T., Devaraj, A., Ossa, E. A., & Arola, D. (2017). The natural armors of fish: A comparison of the lamination pattern and structure of scales. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol 73 , pp 17–27.
- Porter, M. M., Ravikumar, N., Barthelat, F., & Martini, R. (2017). 3D-printing and mechanics of bio-inspired articulated and multi-material structures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol 73, pp 114–126.

- Sherman, V. R., Quan, H., Yang, W., Ritchie, R. O., & Meyers, M. A. (2017). A comparative study of piscine defense: The scales of *Arapaima gigas*, *Latimeria chalumnae* and *Atractosteus spatula*. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol 73, pp 1–16.
- Suksangpanya, N., Yaraghi, N. A., Kisailus, D., & Zavattieri, P. (2017). Twisting cracks in Bouligand structures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol 76, pp 38–57.
- Wang, B., Yang, W., Sherman, V. R., & Meyers, M. A. (2016). Pangolin armor: Overlapping, structure, and mechanical properties of the keratinous scales. *Acta Biomaterialia*, Vol 41, pp 60–74.
- Yang, W., Chen, I. H., Gludovatz, B., Zimmermann, E. a, Ritchie, R. O., & Meyers, M. a. (2013). Natural flexible dermal armor. *Advanced Materials*, Vol 25, No 1, pp 31–48.
- Yang, W., Gludovatz, B., Zimmermann, E. A., Bale, H. A., Ritchie, R. O., & Meyers, M. A. (2013). Structure and fracture resistance of alligator gar (*Atractosteus spatula*) armored fish scales. *Acta Biomaterialia*, Vol 9, No 4, pp 5876–5889.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)