

Análisis del comportamiento de escamas con el cambio de velocidad en ensayos de punzonado

Santiago Jaramillo Villa

Departamento de Ingeniería de Producción, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT

Medellín, Colombia

Resumen

Materiales y estructuras de armaduras encontrados en organismos vivos sirven como inspiración para nuevos sistemas de protección con resistencia a la penetración mejorada. Flexibilidad, bajo peso, resistencia y tenacidad son propiedades encontradas en escamas de peces teleósteos que sobreviven en todos los rincones del mundo. En este trabajo se estudia el comportamiento y la respuesta de las escamas de Arapaima y Sábalo, por ser dos peces con características interesantes que representan momentos de evolución, ritmos de vida y hábitats diferentes. Se realizaron pruebas de punzonado a diferentes velocidades con punzones de geometrías diferentes, que han sido comúnmente utilizadas para pruebas de este tipo en materiales sintéticos. Se realizaron las mismas pruebas sobre un polímero de ingeniería seleccionado por su uso común en elementos de protección, el Policarbonato (PC). El análisis dio a conocer los diferentes mecanismos que tienen los compuestos naturales (escamas) para disminuir la concentración de esfuerzos creada por geometrías de contacto agudas, parecidas a los dientes y garras de los depredadores. La resistencia de las escamas es dependiente de la velocidad de aplicación de la carga, mostrando mayor resistencia cuando las velocidades son incrementadas.

Palabras Clave – Escamas; Fallas; Bioinspiración; Energía Absorbida; Materiales compuestos; Resistencia al impacto.

1. Introducción

Las garras, colmillos y caparazones han servido a sus portadores como armas, herramientas y protección, sirviendo de inspiración para soluciones en el campo de la ingeniería e impulsando avances que van desde productos deportivos hasta desarrollos en la industria aeroespacial y de defensa. Uno de los aspectos que más ha llamado la atención de los científicos han sido los sistemas de protección que se encuentran en los animales, como los osteodermos, encontrados en armadillos y cocodrilos, caparazones en tortugas, exoesqueletos de los artrópodos e insectos y las escamas que se encuentran en mamíferos como el pangolín y más comúnmente en los peces. Estos sistemas de defensa han sido desarrollados a través de millones de años de evolución, respondiendo a la necesidad de los animales para protegerse y sobrevivir en ambientes hostiles. Hubert et al., (2016) observaron cómo un grupo de peces Carpa sin escamas, que inicialmente eran reproducidos para el consumo humano, fue introducido en el ecosistema salvaje de Madagascar y con el tiempo estos peces comenzaron a reproducirse y a recuperar en cada generación las escamas que habían perdido. Para estos autores, lo anterior se debe a, que en un ambiente salvaje con depredadores y amenazas, los peces deben estar protegidos y por esta razón sus escamas, que son su armadura, vuelven a aparecer. Es importante considerar que el sistema de protección compuesto por escamas, puede ser de diferentes tipos: placoides, cosmoides, ganoides y elasmoides. Cuerpos de peces cubiertos con cada uno de estos tipos de escamas pueden ser observados en la figura 1. De estas, las escamas ganoides y cosmoides son las más antiguas de todas (Kardong, 2008). Estos diseños han evolucionado para dar paso a las escamas elasmoides, más delgadas y con propiedades hidrodinámicas mejoradas (Zhu et al, 2012), siendo las más comunes en los peces vertebrados en la actualidad (Kardong, 2008). Para los peces con escamas elasmoides, la protección que estas proveen es flexible y permite

movimiento sin sacrificar la capacidad de protección. Las escamas están compuestas por una combinación de parte orgánica e inorgánica que corresponde a colágeno y apatita (Lin et al., 2011; Garrano et al., 2011; Zhu et al., 2012). Estos materiales son comúnmente encontrados en otros compuestos naturales como los huesos, tendones, dientes y caparazones (Lee et al., 2010; Murcia et al., 2014).

Muchos estudios se han desarrollado con el objetivo de conocer más acerca de los sistemas naturales de protección y su comportamiento mecánico, microestructura y composición. Entre ellos, el estudio sobre la resistencia a la tensión de escamas de pangolín realizado por Wang et al., (2016), el cual mostró que estas presentan un comportamiento dependiente de la velocidad de deformación y que están compuestas principalmente de Queratina y colágeno.

Es importante comprender que las escamas son materiales adaptados a un medio acuático y que sus propiedades cambian si estos materiales están hidratados o deshidratados. Otros estudios han determinado las propiedades mecánicas de escamas del pez Carpa, y mostraron que las escamas de la cabeza de esta especie resisten un 50% más que las de la cola y por lo tanto es posible aumentar la rigidez de la escama cuando ésta es deshidratada, duplicando el valor de su rigidez y su resistencia en más de 100% (Garrano et al., 2011; Murcia et al., 2014; Yang et al., 2013). En los anteriores estudios se analizaron las escamas de acuerdo a su punto de extracción: escamas extraídas de la cabeza, medio y cola, permitiendo así analizar las diferencias existentes en un mismo individuo debido a condiciones anatómicas que pueden estar relacionadas con la forma de locomoción de cada especie.

En cuanto a la microestructura, Ebenstein et al. (2015) estudiaron las escamas cosmoides del pez Cucha por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX) encontrando que la microestructura es de tipo sánduche: con dos capas externas

mineralizadas y rígidas, y una matriz cavernosa con una estructura similar a la de los osteodermos presentes en algunos mamíferos y reptiles. En contraste, algunos estudios indican que las escamas elasmoides tienen en común una capa externa altamente mineralizada, seguida de capas internas con menor nivel de mineralización formadas por fibras de colágeno en proporciones que varían según su profundidad (Meyers et al., 2014; Murcia et al., 2014; Zhu et al., 2012; Zhu et al., 2013) y rotación entre capas similar a las estructuras tipo Bouligand (Guarín-Zapata et al., 2015; Grunenfelder et al., 2014).

Lo anterior permite reconocer que existen especies con características fascinantes, donde cada una posee escamas que han sido mejoradas para sobrevivir en su hábitat. Este es el caso del Arapaima Gigas, un pez prehistórico, de locomoción lenta, que vive en el Amazonas. Este pez ha sido objeto de recientes estudios que han analizado la composición de sus escamas, encontrando que poseen alto contenido de mineral, tanto en la capa externa como en su interior, con una estructura interna compuesta por diferentes capas – láminas - de fibras de colágeno orientadas a 90° entre ellas (*cross-ply*) (Meyers et al., 2014; Lin et al., 2011; Murcia et al., 2016). Esta configuración le permite a estas escamas soportar el punzonado de objetos más duros como los dientes de las pirañas (Meyers et al., 2014), impedir el crecimiento de grietas (Lin et al., 2011) y absorber impactos (Torres et al., 2015).

Otro ejemplo de evolución adaptativa es el Sábalo, un pez moderno de aguas abiertas, donde el peligro puede aparecer sin previo aviso y de muchas formas. Estudios sobre esta especie muestran que sus escamas son menos rígidas que las de peces más antiguos (como el Arapaima), con una estructura con menos proporción mineralizada y fibras de colágeno con orientaciones que se ubican principalmente a 30° entre cada capa (Murcia et al., 2016). Otros estudios han analizado la resistencia a tensión de las escamas probadas con y sin la capa

mineral presente, encontrando que el esfuerzo máximo de éstas aumenta cuando es probada la capa de colágeno por separado, y mostrando la gran resistencia a la tensión que posee este polímero natural (Gil-Duran et al., 2016). A pesar de los estudios tendientes a comprender las características microestructurales, de composición y comportamiento mecánico de las escamas de diferentes especies de peces, es poca la información relacionada con el efecto de la velocidad de deformación sobre la respuesta mecánica de las escamas, que es una característica importante para defender al cuerpo del animal contra la acción de los depredadores.

Este trabajo tiene como objetivo identificar el efecto del cambio de la velocidad de penetración en las escamas, y su impacto en el comportamiento mecánico con relación a la estructura interna de cada una de las especies estudiadas. Para ello se realizaron estudios con escamas de Arapaima y Sábalo, especies cuyos procesos evolutivos los han dotado de composiciones y microestructuras diferentes. Al mismo tiempo, las mismas pruebas realizadas sobre las escamas se realizaron sobre el Policarbonato, un polímero sintético comúnmente utilizado para aplicaciones de protección, buscando obtener referencias de debilidades o fortalezas que tienen los materiales creados por el hombre con respecto a los naturales.

Objetivos

1.1 Objetivo general:

- Estudiar la respuesta mecánica bajo ensayos de punzonado a diferentes velocidades de penetración de las escamas de Arapaima y Sábalo en comparación con el Policarbonato.

1.2 Objetivos específicos:

- Examinar el comportamiento de las escamas de Arapaima y Sábalo cuando son sometidas a diferentes velocidades de punzonado.
- Determinar el efecto de la geometría del punzón en la respuesta de los materiales estudiados bajo diferentes velocidades de penetración.
- Analizar la capacidad de las escamas para absorber energía antes de la falla.
- Comparar los resultados de las escamas con los resultados del Policarbonato sometido a las mismas pruebas.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

Para la fase experimental de este estudio se seleccionaron escamas de dos tipos de peces que cuentan con diferencias anatómicas y evolutivas: el Sábalo y el Arapaima Gigas. Para lograr una comparación de los resultados obtenidos entre las escamas y los materiales sintéticos (comúnmente empleados para soportar cargas dinámicas o de impacto), se seleccionó un Policarbonato de nombre comercial PALSUN, con dimensiones de 1 m de ancho, 2 m de largo y 1 mm de espesor. Este material fue seccionado en probetas cuadradas de 4 mm x 4 mm, para lograr dimensiones similares al área promedio de las escamas.

2.1.1 Conservación de los compuestos naturales

Los peces fueron adquiridos de pescaderías comerciales contando con las licencias respectivas para pescar las especies y ser comercializadas para el consumo humano. Luego de ser recibidos, los pescados fueron almacenados a una temperatura de -7°C para evitar la degradación del material orgánico. Las escamas de estos fueron extraídas de un total de 4 peces: tres de ellos Sábalo y un Arapaima. La primera especie proveniente del Caribe Colombiano y la segunda del departamento del Amazonas. Los sábalo utilizados en los experimentos tuvieron un peso y una longitud promedio de 5 kg y 70 cm respectivamente, mientras que el Arapaima registró un peso de 24 kg y una longitud de 1.23 m.

Es importante mencionar que para la extracción de las escamas los peces fueron retirados y descongelados superficialmente, aplicando calor con un secador industrial durante aproximadamente 15 minutos. Una vez se logró descongelar la superficie, se hizo una incisión en la epidermis, la capa externa del cuerpo del animal que cubre la escama. Esto se hizo utilizando una cuchilla delgada, para luego remover la escama con la ayuda de pinzas de acero inoxidable. Una vez retirada la escama se procedió a una desinfección con hipoclorito. Después las escamas fueron almacenadas en contenedores plásticos con solución salina de alto desempeño (Solución balanceada de Hank, HBSS) y refrigeradas a 2°C . Los anteriores procedimientos retardaron la descomposición de la parte orgánica de las escamas, manteniéndolas en un estado aproximado al natural. Adicionalmente, cada escama fue ensayada dentro de los primeros quince días, luego de que los animales fueron extraídos de su hábitat, lo que evitó el detrimento de las propiedades provocada por la degradación del componente orgánico (Garrano et al., 2011).

Las escamas fueron extraídas de tres zonas, clasificadas en: cabeza, medio y cola. Estas zonas de extracción fueron escogidas mediante inspecciones previas de la longitud de los peces. Sin embargo, se tuvo en cuenta que la zona media tenía un mayor tamaño que las demás, como se muestra en la figura 2. En las pruebas fueron seleccionadas teniendo en cuenta que estas debían presentar un tamaño de por lo menos 30 mm de ancho. Esta dimensión es un valor de referencia que garantizó que la escama se mantuviera fija durante la realización de las pruebas.

2.2. Métodos experimentales

2.2.1. Morfología

El espesor y dimensiones de las escamas fueron medidos utilizando un calibrador. Las dimensiones fueron analizadas estadísticamente empleando un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba Tukey con un intervalo de confianza del 95% y un p-valor ≤ 0.05 para establecer diferencias y similitudes significativas.

2.2.2. Pruebas de punzonado

Puesto que el estudio se centró en conocer el comportamiento de las escamas a la penetración, se realizaron pruebas basadas en normas de punzonado aplicadas a materiales similares a las escamas, como lo son las películas de polímero delgadas y materiales reforzados de matriz polimérica (ASTM D7136/D7135 M-07 y ASTM D1709-03) (Chen et al., 2008; Lee et al., 2010). El análisis de la respuesta de los materiales con respecto a la velocidad de punzonado se logró mediante pruebas realizadas desde velocidades bajas (cuasi estáticas) de 1.7×10^{-5} m/s, hasta velocidades de impacto (dinámicas) de 3.5 m/s. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando: 1) una máquina universal de ensayos Instron 3300 equipada con una celda de carga 10 kN y una exactitud de 1%; y 2) un dispositivo para pruebas de impacto por caída

libre, que se fabricó a escala, basado en las normas anteriormente mencionadas. Este dispositivo se muestra en la figura 3. Para poder llevar a cabo las pruebas en los dos equipos, se fabricó una base de sujeción o portamuestras, que se compone de dos partes cilíndricas con una apertura en el centro de 16 mm de diámetro, permitiendo el acceso del punzón sobre las muestras. Las caras internas de los discos, las cuales están en contacto con las muestras, tienen recubrimientos elastoméricos que garantizan una mejor fijación de las probetas y previenen el deslizamiento de estas. Las dos caras de los discos son sujetadas por 4 tornillos como se muestra en la figura 4.

Para las pruebas se utilizaron punzones con 2 geometrías (e.g. aguda y hemisférica) utilizadas en otros ensayos de punzonado e impacto en polímeros (Mohagheghian et al., 2015). La geometría aguda ha sido asociada en otros estudios con la forma de los dientes del tiburón toro, uno de los principales depredadores del Sábalo (Luo et al., 2012). Además, la geometría hemisférica fue utilizada para estudiar como el aumento del área de contacto en el punzonado afecta los materiales de prueba. En la figura 5, se esquematiza la geometría y las dimensiones de los punzones.

Las puntas de los punzones, que son las que hacen contacto con los materiales, fueron fabricadas en acero inoxidable de la serie 300 con una dureza aproximada de 35 HRC. Se puede considerar que este material es infinitamente más rígido que las escamas, por esto las deformaciones generadas en él fueron despreciadas. Las tres puntas fueron unidas concéntricamente a un eje de acero AISI 1020 con 130 mm de longitud y 10 mm de diámetro.

Las escamas y las probetas de polímero fueron punzonadas con la máquina Instron, a cuatro velocidades diferentes: 1.7×10^{-5} m/s, 8.3×10^{-4} m/s, 3.3×10^{-3} m/s y 8.3×10^{-3} m/s. Un total de 5 muestras fueron ensayadas para cada velocidad y geometría de punzón tanto en las

escamas como en el Policarbonato. Los datos obtenidos de estos ensayos fueron el desplazamiento y la fuerza que registraron los materiales llevados hasta su falla total. Las fuerzas resultantes de las escamas en estos ensayos pertenecieron a la zona media de los cuerpos de los peces, puesto que las dimensiones de estas presentaban mejor sujeción y se acercaban al promedio general.

El dispositivo de punzonado por caída libre fabricado, consta de dos columnas de 1 m de altura, en las cuales se ubica y se fija una plataforma de lanzamiento a 0.66 m. La velocidad de las pruebas con este dispositivo fue de 3.5 m/s. En la ejecución de los ensayos de punzonado por impacto, los dardos fueron lanzados desde la plataforma directamente sobre la muestra en caída libre. Es importante mencionar que previo al inicio de los ensayos, se determinaron las pérdidas de energía causadas por la fricción con el aire de cada uno de los punzones. Estas pérdidas fueron calculadas siguiendo la metodología planteada por la norma, ASTM D1709-03 y los valores de pérdida por fricción encontrados pueden ser vistos en la tabla 1.

Geometría	Perdidas por fricción
Aguda	22%
Hemisférica	24%

Tabla 1. Valores encontrados de pérdidas de energía por fricción con el aire en los ensayos de punzonado por caída libre equivalentes para cada geometría.

En consecuencia, el dispositivo de punzonado por impacto (figura 3), se utilizó para medir dos variables de interés; magnitudes de fuerza de impacto y de energía asociadas al choque.

En este trabajo, la variable fuerza fue determinada midiendo la velocidad que alcanzaba el punzón directamente sobre la muestra. Esto fue realizado encontrando el tiempo que necesita el punzón para recorrer una distancia entre dos marcas ubicadas sobre la muestra, según establece la norma de ensayo. Los cálculos fueron realizados utilizando la expresión cinemática que corresponde a la ecuación $a = \frac{v_f - v_i}{t}$, donde v_f corresponde a la velocidad del punzón antes de tocar la muestra y v_i a la velocidad inicial y t el tiempo que transcurre entre estos dos puntos de medición de velocidad. De esta manera fue posible calcular la fuerza aproximada con la que golpeó la muestra y produjo el punzonado de esta manera $F = m * a$.

En cuanto a las energías, el cálculo se realizó utilizando dos métodos: 1) Para los ensayos realizados a baja velocidad, se calculó el área bajo la curva Fuerza vs Deformación que entregó la máquina de pruebas. 2) Para los ensayos a alta velocidad, la energía se calculó utilizando la altura de lanzamiento (conocida como H_1), desde la cual fue posible calcular una energía potencial $U_1 = mgH_1$. Luego de impactar la probeta, el dardo fue lanzado nuevamente hacia el aire por la respuesta elástica del material, a manera de rebote, alcanzando una altura secundaria H_2 . Con este valor fue posible calcular: $U_2 = mgH_2$. La diferencia entre estos dos valores corresponde a la energía potencial del punzón, la cual es absorbida por el material $U_{absorbida} = U_1 - U_2$.

El proceso de medición de las pruebas de punzonado por impacto se llevó a cabo utilizando una cámara de alta velocidad Photron Fastcam SA4. La cámara grababa la caída y rebote del punzón a una velocidad de 1000 fps y mediante el software de procesamiento de imágenes *Photron Fastcam viewer* se identificó el momento justo cuando el dardo alcanzaba su altura de rebote máxima después de impactar la muestra en cada ensayo.

Todos los valores de fuerza y energía calculados con la información de las pruebas fueron normalizados por los espesores de los materiales, permitiendo obtener valores de fuerza y energía, por unidad de espesor. Para el presente trabajo las unidades trabajadas fueron N/mm y J/mm. Esta normalización permitió comparar los diferentes valores de energía y fuerza entre los materiales, eliminando así la dependencia de los resultados por el espesor de las probetas.

2.2.3. Análisis de las fallas

El análisis de las fallas se hizo mediante la observación de probetas seleccionadas de cada material, realizando un proceso de montaje y pulido para cada una de las muestras examinadas. En el caso particular de las escamas fue necesario realizar un proceso de fijación previo al montaje, el cual consistió en tomar las escamas luego de ser impactadas y sumergirlas en soluciones de Alcohol y agua destilada con proporciones que iban desde 50% - 50% respectivamente, aumentando cada 10%, hasta llegar 100% alcohol. Cada escama permanecía un tiempo mínimo de 2 horas en cada solución. Luego de esto, fueron sumergidas durante 24 horas en formaldehído el cual disecó completamente la parte orgánica de las escamas y eliminó efectos posteriores de descomposición que pudieran aparecer. El proceso de deshidratación y fijación, fue necesario para que el análisis microscópico de las muestras pudiera arrojar mejores imágenes. Las muestras seleccionadas fueron cortadas, embebidas en resina y luego pulidas. Este último proceso se hizo mediante un proceso estándar de pulido, con papeles abrasivos que van desde el número 280 hasta el 1200. La parte final del proceso se hizo con paños de pulido con suspensiones de alúmina de partículas de 1 μm y 0.6 μm hasta alcanzar una superficie completamente plana y lisa.

3. Resultados y Análisis

Morfología

La Figura 6 muestra la forma y dimensiones promedio para las escamas del Sábalo (figura 6a) y el Arapaima (figura 6b). La superficie de las escamas presenta dos zonas diferentes, una que es expuesta y otra que normalmente se encuentra dentro de la dermis del animal. La parte expuesta comúnmente presenta una coloración acorde al animal, puesto que tiene un recubrimiento natural que corresponde a la epidermis (Lin et al., 2011). La superficie de las escamas es diferente para cada especie, presentado patrones irregulares particulares. En el caso del Sábalo, el estudio de Gil-Duran et al., (2016) encontró presencia de marcas superficiales en forma circular y su número aumenta con la edad del animal; por otro lado, en el Arapaima, se sabe que existe un diseño superficial de crestas, que fue registrado por Meyers et al., (2014); quienes encontraron que este diseño permite a la escama una mayor flexibilidad sin sacrificar su resistencia estructural.

La figura 7a muestra la sección transversal de la escama de Sábalo, en la cual se pueden diferenciar tres capas principales: una capa externa altamente mineralizada (o capa límite), seguida de una capa media más gruesa compuesta por fibras de colágeno embebidas en una porción de mineral (llamada Elasmódina Externa) y por último una capa de fibras ricas en colágeno (Elasmódina Interna). En contraste a estas, las escamas de Arapaima (figura 7b), presentan discontinuidades que trabajan a manera de bisagras incrementando la flexibilidad (figura 7c). La microestructura y composición de estas escamas solo presentan la capa límite y una elasmódina con un nivel de mineralización constante (Murcia , et al., 2016).

El espesor de estas microestructuras cambia a lo largo y ancho de las escamas, siendo el centro la parte más gruesa (Bigi et al., 2001; Lin et al., 2011; Gil-Duran et al., 2016). En este estudio los espesores de las escamas fueron medidos en el centro de estas, debido a que la

fuerza del punzón fue aplicada en esta zona. La figura 8 muestra los espesores promedio encontrados para cada especie, clasificadas por su zona de extracción. Estas mediciones muestran que en el Sábalo existe una diferencia con respecto a la zona de extracción de las escamas, a diferencia de los resultados en el estudio reportado por Gil-Duran et al., (2016), quienes encontraron que para el Sábalo existe una similitud entre la zona media y la cola del animal. Sin embargo, para el Sábalo, las escamas con mayor espesor fueron extraídas de la cola, seguidas por las del medio y las más delgadas de la zona cercana a la cabeza. En contraste, para el Arapaima se encontraron escamas de mayor espesor en la parte media, seguida por la zona de la cabeza y finalmente las más pequeñas están más cerca de la cola. Hasta la fecha son pocos los estudios realizados sobre el Arapaima y ninguno de ellos presentó valores de espesor en las escamas, siendo clasificadas según la zona de extracción.

Ensayos de Punzonado

Estudios sobre el daño causado por el punzonado en las escamas, como el de Zhu et al., (2012), explican que la fractura de la escama se lleva a cabo en tres etapas. En la primera, predomina la deflexión completa de la escama y aparece daño en la capa límite, marcado por una caída de la fuerza. La fractura de la capa límite marca el inicio de la segunda etapa, en la cual aparece una deflexión más profunda y el punzón alcanza la capa interna de colágeno, comenzando a producir esfuerzos en ella. Para la tercera etapa, correspondiente a la ruptura de la capa interna de colágeno de la escama (elasmódina interna) y por consiguiente de la escama completa, el crecimiento de las grietas y la delaminación entre colágeno y mineral se acelera hasta la ruptura completa. Es importante aclarar que los experimentos que dieron como resultado estos análisis fueron realizados con un punzón de geometría aguda. Lo anterior ayuda a explicar el comportamiento de los materiales en los ensayos de punzonado

realizados en este estudio. La figura 9 presenta los resultados de los ensayos de punzonado con la geometría aguda. Las figuras tienen como ejes la fuerza aplicada sobre el material por el punzón y el desplazamiento necesario para esto. Las figuras 9a y 9b corresponden a resultados seleccionados de las escamas de Sábalo y Arapaima, respectivamente. En ellas, las flechas rojas señalan el lugar correspondiente a la fractura de la capa límite. Ambas escamas presentan una respuesta luego de la ruptura de la capa límite; para el Arapaima ocurre un incremento con respecto a la fuerza de la etapa inicial, mientras que para el Sábalo la falla total ocurre inmediatamente luego de la ruptura de esta. La figura 9c muestra el comportamiento del policarbonato; este está regido por un comportamiento elástico lineal en donde el incremento de la fuerza de manera lineal ha sido reportado por diferentes estudios y se debe a la reorganización de las cadenas moleculares dentro del material. Al llegar al valor máximo de fuerza, se produce la falla y la fractura se extiende rápidamente.

Los resultados de las pruebas realizadas con el punzón hemisférico muestran que para la escama de Sábalo (figura 10a), la fractura de la capa mineralizada externa no es fácilmente apreciable como en el caso de punzón agudo. La geometría hemisférica no creó un esfuerzo tan concentrado, pero sí una deformación mayor sobre los materiales debido a su mayor área de contacto (Mohagheghian et al., 2015). La figura 10b muestra el comportamiento de las escamas de Arapaima para la geometría hemisférica, en donde su comportamiento es muy similar al mostrado por las escamas de Sábalo, pero con valores de resistencia menores. Este comportamiento es atribuible a que la escama de Arapaima al ser más rígida, debido a una mineralización mayor entre las capas de colágeno, puede deformarse menos y presentar una falla más rápida (Lee, et al., 2010). Finalmente, para el Policarbonato, su comportamiento

cambia, debido a la mayor deformación plástica producida por esta geometría, pero los valores máximos de fuerza permanecen iguales, como se puede ver en la figura 10c.

Los valores de fuerza obtenidos por las pruebas, registraron un incremento cuando la geometría del punzón presentó una mayor área de contacto en la superficie de la muestra. Es por esto que mientras que para las escamas se necesitó una fuerza de 300 N para ser atravesadas por el punzón agudo, se requirió de una fuerza de 2000 N o más para lograr lo mismo con la geometría hemisférica. Es por esto que el punzón agudo es la geometría que mayor concentración de esfuerzos genera sobre los materiales, siendo la forma que más se asemeja a los dientes de los depredadores naturales de los peces.

La figura 11 muestra como los valores de fuerza máxima registrados por los materiales, principalmente por las escamas, revelan una dependencia con respecto a la velocidad de aplicación de la carga. Puesto que cuando la velocidad aumenta, se hace necesaria más fuerza para llevar a la falla el material. La figura 11a, muestra como los materiales al ser punzonados por el dardo agudo, la fuerza de falla permanece casi constante cuando las velocidades del ensayo fueron inferiores a 0.01 m/s. En contraste, cuando la velocidad es incrementada, los valores de fuerza de los materiales crecieron más de 5 veces su valor. Además, el cambio de la geometría del punzón no fue ajeno al incremento de la fuerza de falla generado por el aumento de la velocidad de los ensayos, tanto para la geometría hemisférica como para la aguda se registraron valores de fuerza mayores conforme se aumentó la velocidad del ensayo (figura 11b).

El incremento en la resistencia de los materiales puede ser explicado por el contenido de colágeno presente en las capas internas de las escamas. Según el estudio desarrollado por Gautieri et al., (2008), quienes modelaron moléculas de tropocolágeno y realizaron pruebas

de tensión en un rango de velocidad que va desde 0.01 m/s hasta 100 m/s; encontraron que las moléculas de colágeno están compuestas por proteínas con forma de espiral cuya respuesta a los esfuerzos es dependiente de su velocidad de aplicación. Particularmente, cuando éstas son tensionadas a bajas velocidades, las cadenas tienen el tiempo suficiente para desenrollarse antes de que las uniones entre ellas se rompan, mientras que a altas velocidades, se produce la falla de las uniones antes del desenrollamiento de las cadenas, fallando pero manteniendo su forma de espiral inclusive en grandes deformaciones.

Para continuar con el análisis, la cuantificación de las energías en los ensayos tiene como objetivo estudiar la capacidad de las escamas para absorber las fuerzas del impacto generado por el punzón. El daño causado por éste puede ser manifestado de muchas formas en los materiales; ejemplos de estos modos de falla son: agrietamiento, aplastamiento, delaminaciones, entre otros. Calcular la magnitud de energía absorbida por los materiales se convierte en la manera más completa para comprender que sucede con éstos en el punzonado, puesto que no depende del modo de falla del material. La figura 12 presenta los valores de energía máximos absorbidos para cada material mientras la velocidad del ensayo era incrementada. Los resultados correspondientes a las pruebas con el dardo agudo (figura 12a), muestran una diferencia entre los valores de energía absorbida por parte del Arapaima en comparación con el Sábalo y el policarbonato. Mientras el Policarbonato y el Sábalo son estables a bajas velocidades, el Arapaima absorbe cantidades de energía de hasta 10 veces más. La figura 13 muestra la diferencia existente para absorción de energía de las escamas de Arapaima y Sábalo, la gráfica *fuerza vs deformación* muestra que la capacidad de deformarse plásticamente del Sábalo es prácticamente inexistente, puesto que una vez falla y la fuerza cae, el material no presenta oposición al paso del punzón y es atravesado

completamente. A diferencia del Sábalo, la escama de Arapaima a pesar de haber alcanzado la resistencia máxima de su capa límite, continua oponiéndose al paso del punzón, presentando una deformación que también significa un aumento de la fuerza. Todo el comportamiento plástico es quien representa esa capacidad que tiene la escama de Arapaima para absorber más energía que los demás materiales, teniendo un papel importante en este proceso su microestructura con una mineralización constante.

Con relación a lo anterior es importante mencionar que, para la zona elástica, entre las escamas de las diferentes especies también existen pequeñas diferencias. En el proceso de penetración del punzón (figura 13a), el comienzo de la aplicación de la carga sobre la escama de Arapaima, inicia cuando las secciones mineralizadas, separadas por las discontinuidades y que funcionan como bisagras, chocan y la carga comienza a ser soportada por la flexión completa de la escama y su capa límite. Es por esto que la pendiente en la gráfica que marca la zona elástica, a diferencia de la escama de Sábalo, inicia con una curva; esta puede ser vista en el punto ①. Luego de esto la escama inicia el incremento de la fuerza de manera lineal (punto ②) y la resistencia aumenta hasta llegar a la ruptura de la capa límite (punto ③). Si se retira la capacidad de la escama de Arapaima para deformarse plásticamente, dejando solo el comportamiento elástico, esta se desempeñaría de manera muy similar al de la escama de Sábalo. La figura 14 muestra que los niveles de energía absorbida por el comportamiento elástico se acercarían a aquellos alcanzados por los demás materiales.

Al igual que como ocurre con la fuerza máxima, la absorción de energía en los materiales cambia si el punzón que la transmite incrementa su área de contacto. Como puede ser visto en la figura 12b, es el Policarbonato quien registró una mayor absorción de energía,

comportamiento que se mantiene inclusive a bajas velocidades. Esto se debe a la ausencia de una capa externa rígida que evita deformaciones plásticas con bajos niveles de energía, como lo hace la capa límite en las escamas. A diferencia del polímero sintético, las escamas, absorben casi la mitad de la energía y al igual que como ocurrió con el punzón agudo, su energía absorbida es dependiente de la velocidad de ensayo.

La geometría aguda mostró un efecto interesante en la transmisión de energía durante los ensayos de punzonado, puesto que fue esta quien fue capaz de producir falla en los materiales más rápidamente; generando así mayor diferencia entre la energía absorbida por los materiales. La figura 15, muestra cómo con el aumento de la energía inicial del impacto que es producida por el dardo agudo, las escamas y el policarbonato incrementan el porcentaje de energía absorbida por ellos. Cabe aclarar que a menor energía absorbida es menor el daño producido en el material. La figura 15 es dividida en dos partes por una línea roja que simboliza el límite o umbral en el cual los materiales pierden la capacidad de producir una respuesta elástica, comenzando a absorber más energía y en iguales cantidades hasta llegar a la falla. Por debajo del valor del umbral, la proporción de energía absorbida por los materiales presenta diferencias. En este caso las escamas absorben menos energía que el policarbonato. El polímero sintético, presentó siempre valores por encima del 50%, mientras que las escamas tuvieron valores cercanos al 40% o menos. Este comportamiento es atribuible al estudiado en la etapa uno de la evolución de la falla presentado por Zhu, et al., (2012). De esta manera, el trabajo producido en las escamas es realizado por una flexión completa de esta y como resultado, la mayor cantidad de la energía es soportada por la capa límite que es altamente mineralizada y muy rígida. Una vez se fractura esta capa, al ser superada su resistencia por el incremento en la energía con la que golpea el punzón, el daño es transmitido

a las capas internas de las escamas propagando grietas y delaminaciones más rápidamente. Debido a la ausencia de ésta capa límite, el policarbonato golpeado por el dardo agudo presentó una mayor absorción de energía, seguida de la aparición de fallas a valores iniciales mucho más bajos. La figura 16 muestra las fractografías de los materiales impactados por el punzón agudo, en donde se puede observar cómo trabaja la capa mineralizada en las escamas y por qué esta evita la concentración de esfuerzos que, en el caso de Policarbonato, producen grandes deformaciones plásticas o hasta la falla total.

Se realizaron ensayos utilizando una energía inicial de 0.4 J, puesto que fue a este valor el que marcó el cambio más fuerte en las proporciones de energía absorbida por las escamas (ver fig. 15). Escamas extraídas de cada zona del cuerpo de los peces, fueron probadas por las dos geometrías de punzón. La figura 17 muestra la cantidad de energía absorbida por las escamas de Arapaima y Sábalo, en este caso, las escamas fueron clasificadas dependiendo de su zona de extracción. Para el Sábalo, el porcentaje de energía absorbida fue estadísticamente igual para las escamas extraídas del medio y la cola. Sin embargo, las escamas extraídas de la cabeza, presentaron una mayor absorción que el resto. En el caso del Arapaima, las energías fueron constantes, sin variación estadísticamente significativa con respecto a las zonas de extracción de las escamas. Los valores de energía absorbida, para el valor de energía inicial aplicada en las escamas, se mantuvieron cercanos al 50%. Esta homogeneidad en la protección del Arapaima es atribuible al desarrollo de sus escamas, las cuales deben proteger su cuerpo de ataques que pueden aparecer desde cualquier ángulo, ya que este pez se caracteriza por ser un pez de locomoción lenta, y vivir en ambientes cerrados como estanques o lagunas (Meyers et al., 2014).

La dependencia de la geometría del punzón es otro aspecto importante. Como fue mencionado en apartados anteriores, el punzón agudo puede concentrar los esfuerzos y producir mayor daño. Sin embargo, la figura 18 muestra que tanto para el Arapaima como para el Sábalo, la absorción de energía con el cambio del área no implica una variación drástica de la energía absorbida. A diferencia de esto, el Policarbonato se deforma fácilmente cuando es golpeado por la geometría aguda. La cantidad de energía absorbida es superior a la registrada por las escamas, alcanzando valores cercanos al 70%. Por otro lado, el policarbonato registró valores de energía absorbida bajos con respecto a la geometría hemisférica. La figura 18b, muestra que el daño producido por estos punzones no es visible, mientras que el daño del punzón agudo es apreciable en todos los materiales. Estudios como el de Zhu et al., (2012), explican que la falla de las escamas puede darse con una forma característica denominada *pétalos*, donde primero aparecen grietas que forman una falla con forma de cruz y conforme avanza el punzón comienzan a aparecer marcas radiales formando pétalos, finalizando con la ruptura de las capas internas. Como respuesta al daño generado por el impacto, las escamas poseen un mecanismo para resistir este tipo de esfuerzos que consiste en generar grietas que tienden a viajar por los lugares con menor resistencia, como las uniones entre las fibras, y ahí es cuando las fibras entrecruzadas de las escamas entran en acción evitando que la grieta se extienda gracias a la superposición de capas (Torres et al., 2015; Yang et al., 2013).

Escamas como arreglo escalonado para protección

La escama es parte de un sistema de protección mucho más complejo, el cual utiliza pequeños elementos capaces de soportar esfuerzos y los combina para potencializar su desempeño. En la mayoría de los casos las escamas se encuentran superpuestas, formando arreglos

escalonados de 3 o 4 escamas que cubren y protegen la misma zona (Zhu, et al., 2013). Otros estudios mostraron que la superposición de escamas incrementa la resistencia a la penetración, el aumento de esta se da de manera lineal. Dado lo anterior, al igual que como ocurre con una sola escama, se espera que al ir aumentando la velocidad del ensayo de punzonado, el arreglo de dos o más escamas incremente también su resistencia, posiblemente de una manera lineal. El estudio de la respuestas de estos arreglos de escamas se encuentra fuera del alcance de este trabajo, pero se considera un tema importante para trabajo futuro.

Conclusiones

El estudio de materiales naturales está revelando una variedad de nuevas estructuras, respuestas mecánicas y diseños que sobrepasan a sus contrapartes sintéticas. Para este trabajo, las pruebas realizadas sobre el comportamiento de las escamas de Sábalo y Arapaima, y el polímero sintético Policarbonato, comúnmente utilizado en aplicaciones de protección, se compararon y el análisis arrojó las siguientes conclusiones:

- La configuración estructural de las escamas está compuesta por una capa mineralizada externa que le permite incrementar el área de contacto de los objetos que aplican fuerzas sobre esta, disminuyendo así el esfuerzo aplicado. Así mismo, al contar con capas internas menos mineralizadas y con alto contenido de fibras de colágeno muy flexibles y resistentes a la tensión, le permite a las escamas soportar mayores valores de fuerza o energía antes de fallar completamente.
- Una comparación del comportamiento entre las escamas de las dos especies estudiadas, el Arapaima presenta valores de energía absorbida iguales, es decir que su respuesta no depende de la zona de extracción de las escamas. Para el

Sábalo existe una diferencia puesto que la cabeza absorbe más energía en comparación con los valores del medio y la cola que son iguales. El comportamiento podría ser causado por las diferencias evolutivas en la locomoción y en los depredadores que afectan a cada especie. El Arapaima es un animal de río, con poco espacio para moverse y de locomoción lenta, y por ello su estrategia de supervivencia se basa en estar protegido ante ataques desde cualquier ángulo. Para el Sábalo, un pez de aguas abiertas, su método de supervivencia es huir antes de ser atrapado y por consiguiente las partes como el cuerpo y la cola son las que más fácilmente pueden ser alcanzadas por el depredador, por eso son las más fuertes.

- En las pruebas realizadas con los punzones de diferentes geometrías, las escamas mostraron valores de energía absorbidos similares estadísticamente mientras que el policarbonato mostro que su respuesta era dependiente de la geometría del punzón. La falta de una capa rígida externa en el policarbonato lo hace débil a la concentración de esfuerzos.

Bibliografía

Browning, A., Ortiz, C., & Boyce, M. (2012). Mechanics of composite elasmoid fish scale assemblies and their bioinspired analogues. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 75-86.

Chen, P., Lin, A., Lin, Y., Seki, Y., Stokes, A., Peyras, J., . . . McKittrick, J. (2008). Structure and mechanical properties of selected biological materials. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 208-226.

- Ebenstein, D., Calderon, C., Troncoso, O., & Torres, F. (2015). Characterization of dermal plates from armored catfish *Pterygoplichthys pardalis* reveals sandwich-like nanocomposite structure. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 175-182.
- Garrano, M., La Rosa, G., Zhang, D., Niu, L.-N., Tay, F., Majd, H., & Arola, D. (2011). On the mechanical behavior of scales from *Cyprinus carpio*. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 17-29.
- Gautieri, A., Buehler, M., & Redaelli, A. (2008). Deformation rate controls elasticity and unfolding pathway of single tropocollagen molecules. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 130-137.
- Gil-Duran, S., Arola, D., & Ossa, A. (2015). Effect of chemical composition and microstructure on the mechanical behavior of fish scales from *Megalops atlanticus*. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 134-145.
- Grunenfelder, L., Suksangpanya, N., Salinas, C., Milliron, G., Yaraghi, N., Herrera, S., . . . Kisailus, D. (2014). Bio-inspired impact-resistant composites. *Acta Biomaterialia*, 3997-4008.
- Guarín-Zapata, N., Gomez, J., Yaraghi, N., Kisailus, D., & Zavattieri, P. (2015). Shear wave filtering in naturally-occurring Bouligand structures. *Acta Biomaterialia*, 11-20.
- Habegger, M. L., Motta, P. J., Huber, D. R., & Dean, M. N. (2012). Feeding biomechanics and theoretical calculations of bite force in bull sharks (*Carcharhinus leucas*) during ontogeny. *Zoology*, 115, 354-364.

- Hubert, J.-N., Allal, F., Hervet, C., Ravakarivelo, M., Jeney, Z., Vergnet, A., . . . Vandeputte, M. (2016). How could fully scaled carps appear in natural waters in Madagascar? *Royal Society Publishing*.
- Kardong, K. V. (2008). *Vertebrates: Comparative Anatomy, Function, Evolution*. New York: McGraw-Hill.
- Khayer Dastjerdi, A., & Barthelat, F. (2014). Teleostfish scales amongst the toughest collagenous materials. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 95-107.
- Lee, S., Novitskaya, E. E., Reynante, B., Vasquez, J., Urbaniak, R., Takahashi, T., . . . Mckittrick, J. (2010). Impact testing of structural biological materials . *Materials Science and Engineering*, 730-739.
- Lin, Y., Wei, C., Olevsky, E., & Meyers, M. (2011). Mechanical properties and the laminate structure of Arapaima gigas scales. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1145-1156.
- Liu, P., Zhu, D., Yao, Y., Wang, J., & Bui, T. Q. (2016). Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system. *Metaterials Design*, 201-210.
- Luo, J., Irschick, D. J., & Ault, J. S. (2012). A Comparison of Spatial and Movement Patterns between Sympatric Predators: Bull Sharks (*Carcharhinus leucas*) and Atlantic Tarpon (*Megalops atlanticus*). *PLOS ONE*, <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0045958>.
- Meyers, M. A., Lin, Y. S., Olevsky, E. A., & Chen, P. Y. (2014). Battle in the Amazon: Arapaima versus Piranha. *Advance Engineering Materials*, B279-B288.

- Mohagheghian, I., Mcshane, G. J., & Stronge, W. J. (2015). Impact perforation of monolithic polyethylene plates: Projectile nose shape dependence. *Impact Engineering* , 162-176.
- Murcia , S., Lavoie, E., Linley, T., Devaraj, A., Ossa, A., & Arola, D. (2016). The natural armors offish: A comparison of the lamination pattern and structure of scales. *Mechanical Behavior of Biomedical Materials*.
- Murcia , S., Li, G., Yahyazadehfar, M., Sasser, M., Ossa, A., & Arola, D. (2015). Effects of polar solvents on the mechanical behavior offish scales. *Materials Science and Engineering*, 23-31.
- Murcia , S., McConville, M., Li, G., Ossa, A., & Arola, D. (2014). Temperature effects on the fracture resistance of scales from *Cyprinus carpio*. *Acta Biomaterialia*, 154-163.
- Torres, F. G., Troncoso, O. P., Nakamatsu, J., Grande, C. J., & Gómez, C. M. (2008). Characterization of the nanocomposite laminate structure occurring in fish scales from *Arapaima Gigas*. *Materials Science and Engineering*, 1276-1283.
- Torres, F., Malásquez, M., & Troncoso, O. (2015). Impact and fracture analysis of fish scales from *Arapaima gigas*. *Materials Science and Engineering*, 153-157.
- Vernerey, F., & Barthelat, F. (2010). On the mechanics of fishscale structures. *Solids and Structures*, 2268--2275.
- Vernerey, F., & Barthelat, F. (2014). Skin and scales of teleost fish: Simple structure but high performance and multiple functions. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 66-76.

- Wang, B., Yang, W., Sherman, V. R., & Meyers, M. A. (2016). Pangolin armor: Overlapping, structure, and mechanical properties of the keratinous scales. *Acta Biomaterialia*, 60-74.
- 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*, 5876-5889.
- Zhu, D., Fuentes Ortega, C., Motamedi, R., Szewciw, L., Vernerey, F., & Barthelat, F. (2012). Structure and Mechanical Performance of a ‘Modern’ Fish Scale. *Advance Biomaterials*, 185-194.
- Zhu, D., Szewciw, L., Vernerey, F., & Barthelat, F. (2013). Puncture resistance of scaled skin from striped bass: Collective mechanisms and inspiration for new flexible armor designs. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 30-40.

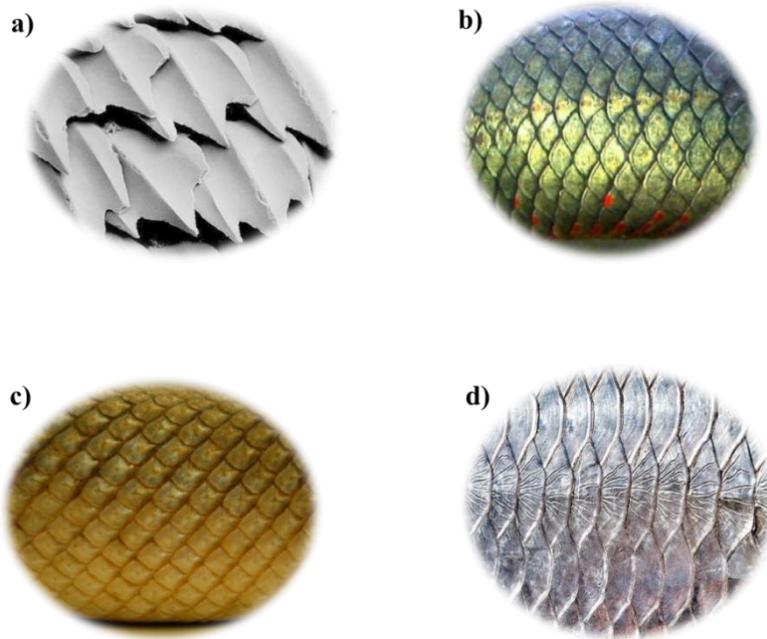


Figura 1. Tipos de escamas. a) Placoide, b) Cosmoide, c) Ganoide y d) Elasmoides.

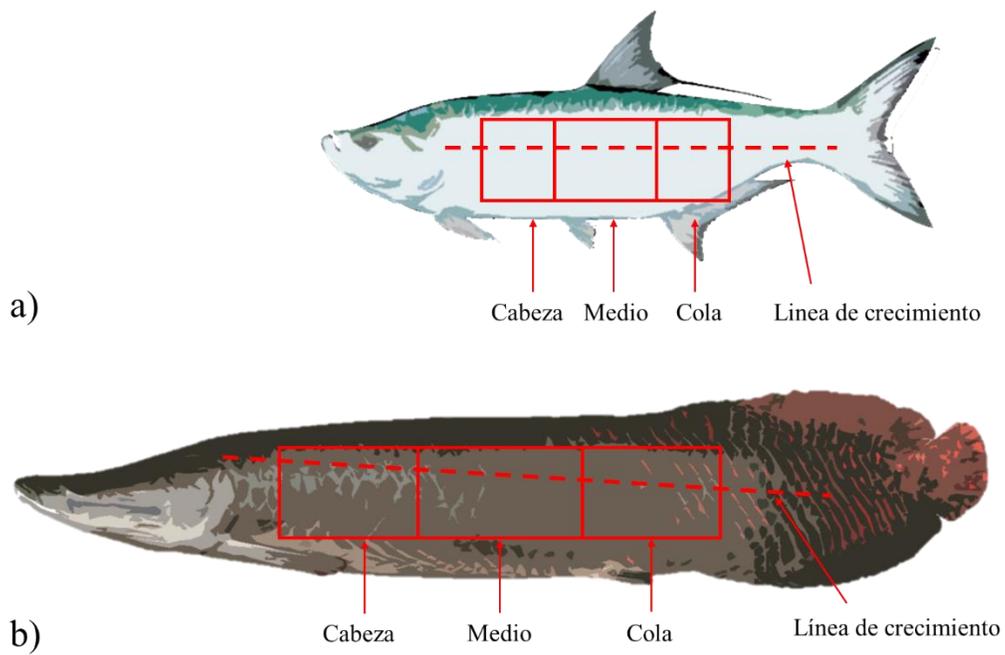


Figura 2. Zonas para la clasificación y la extracción de escamas, a) Sábalo, b) Arapaima.

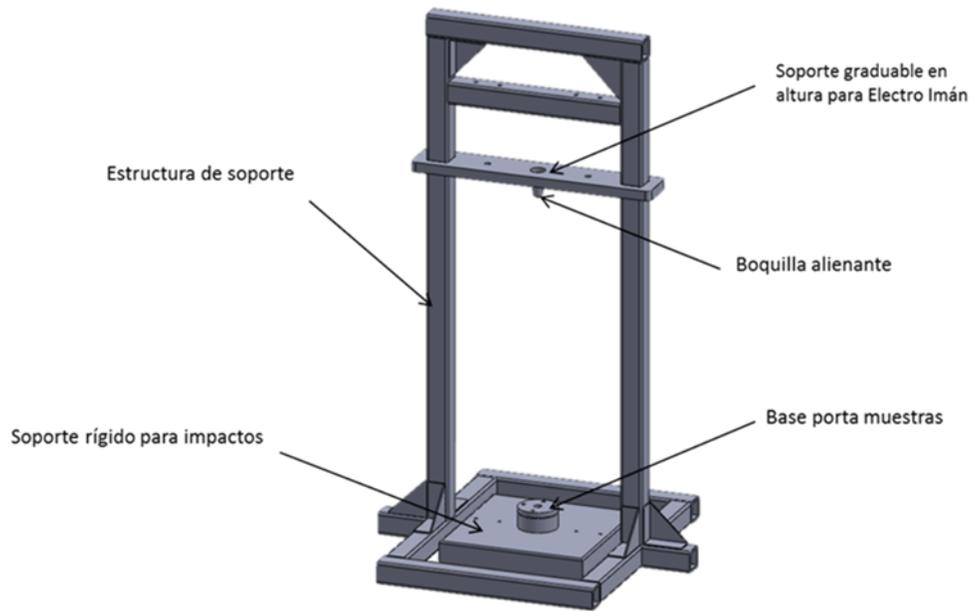


Figura 3. Esquema detallado de cada uno de los componentes funcionales del soporte para pruebas de impacto.

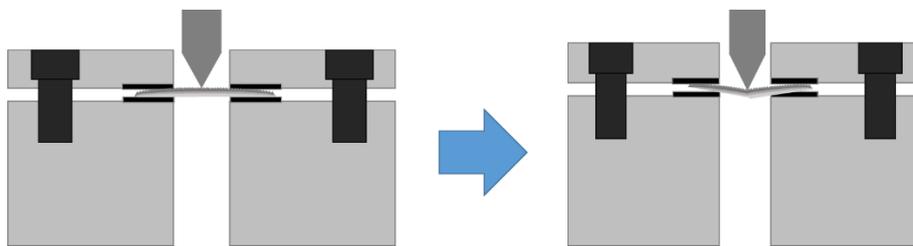


Figura 4. Vista de la sección transversal del sistema sujeción para las pruebas, la muestra queda fija completamente entre los dos discos de metal y los recubrimientos de elastómero dentro de estos.

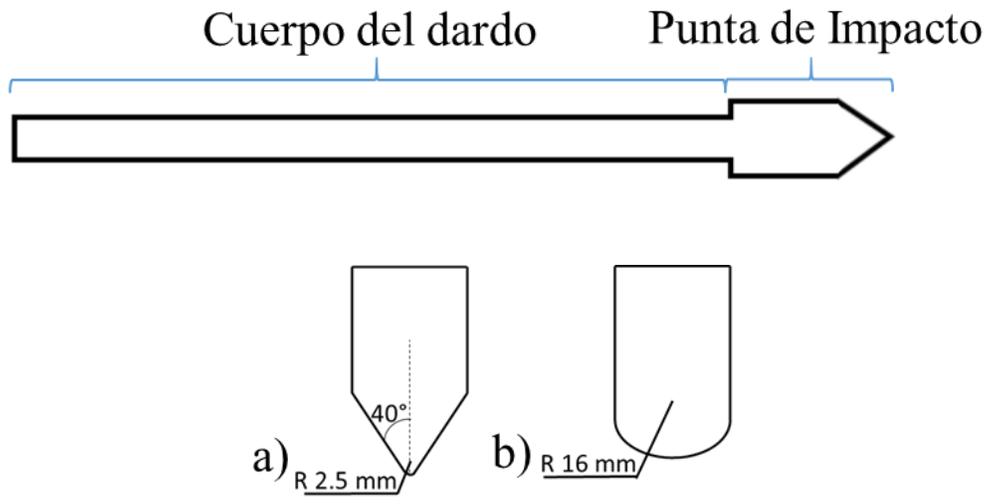


Figura 5. Dimensiones generales y geometrías de las puntas de los dardos de impacto. a) Agudo, b) Hemisférico.

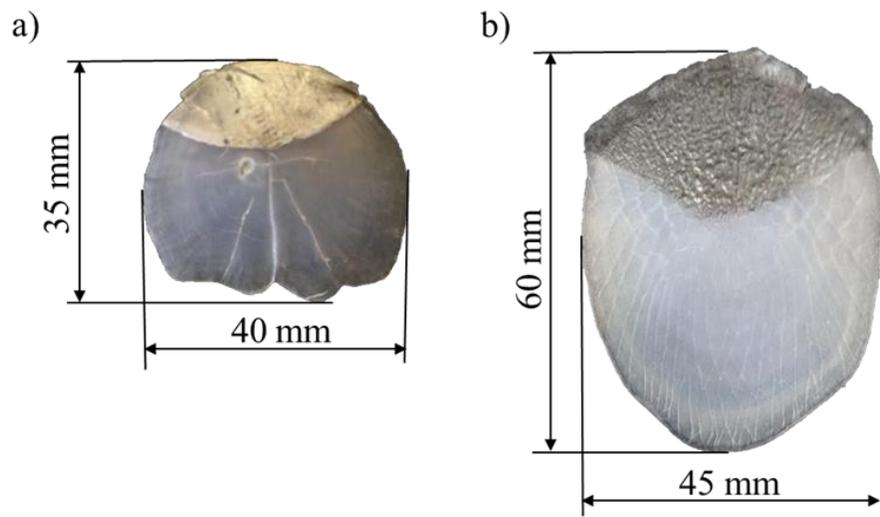


Figura 6. Medidas que corresponden al tamaño promedio de las escamas extraídas de los peces utilizados en las pruebas. a) Escama de Sábalo, b) Escama de Arapaima.

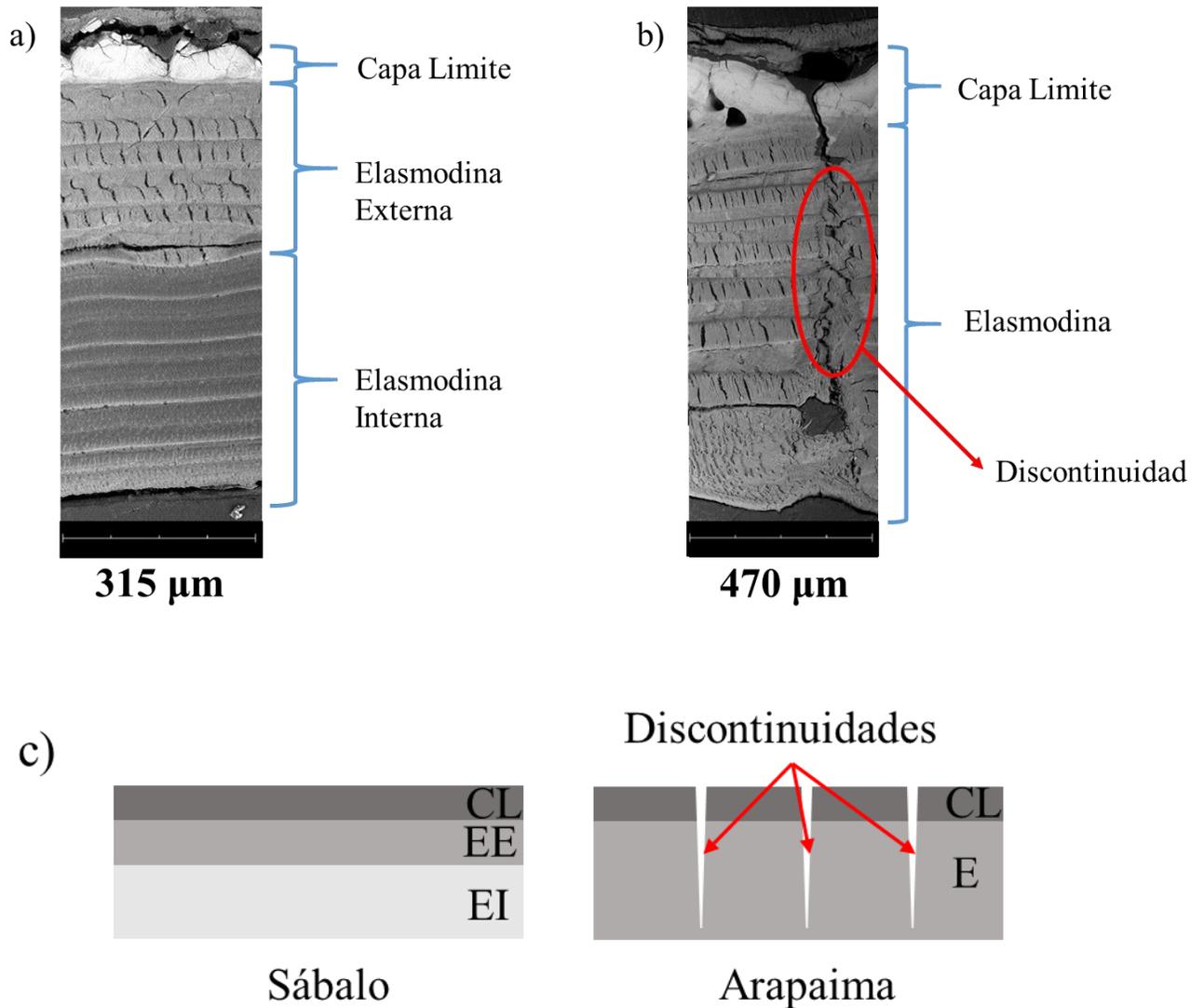


Figura 7. Microestructura de las escamas utilizando microscopía electrónica de barrido. a) Escama de Sábalo, en esta se observan tres capas fácilmente diferenciables, el contenido de minera disminuye desde la superficie hasta la parte interna de esta. b) Escama de Arapaima con un espesor mucho mayor a la del Sábalo, tiene una capa externa altamente mineralizada, su interior presenta un contenido de mineral mucho menor y constante en todo su espesor. c) Esquemas de la división y proporciones de las capas en las escamas de las dos especies, las discontinuidades en el Arapaima, aportan flexibilidad a pesar de ser una escama mucho más mineralizada.

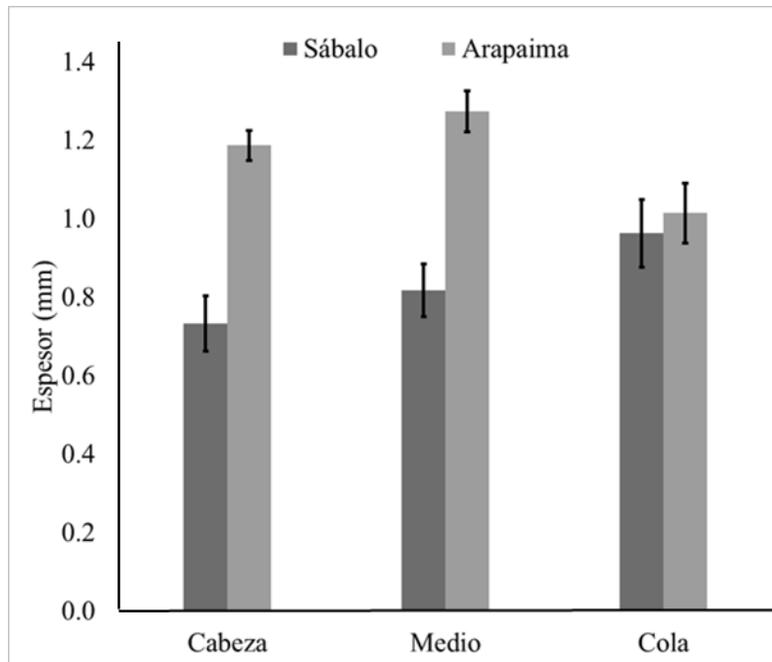


Figura 8. Espesor encontrado para cada una de las zonas de extracción de escamas en cada pez.

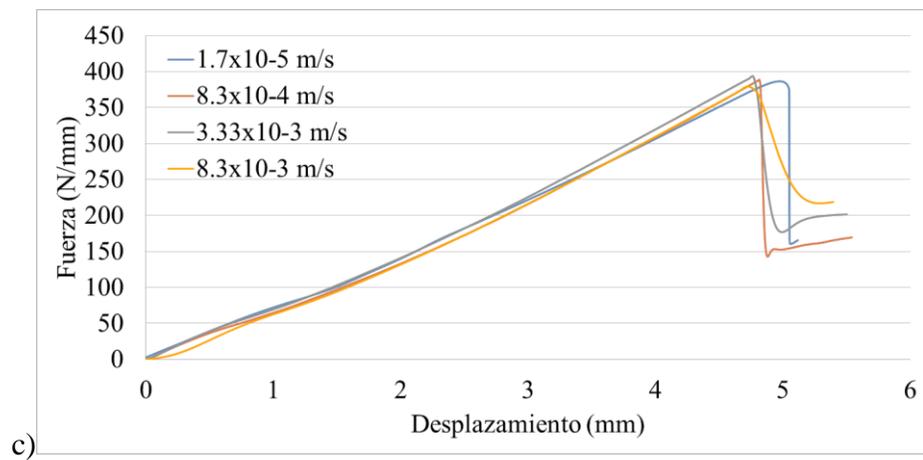
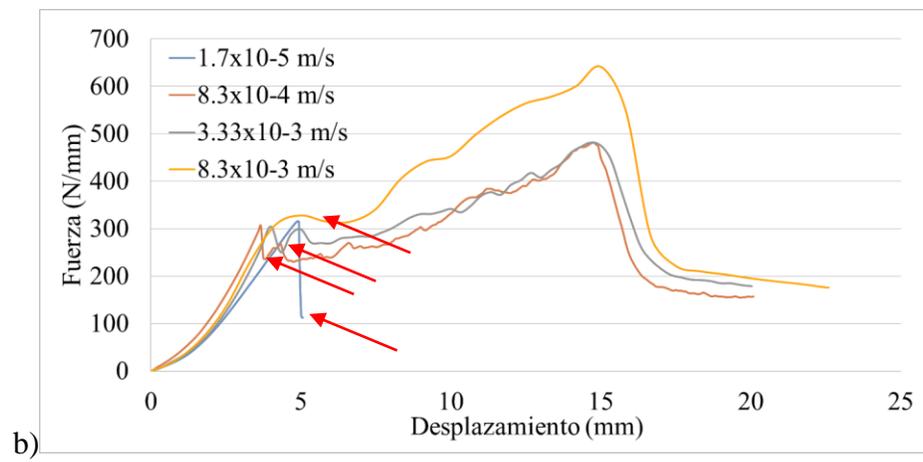
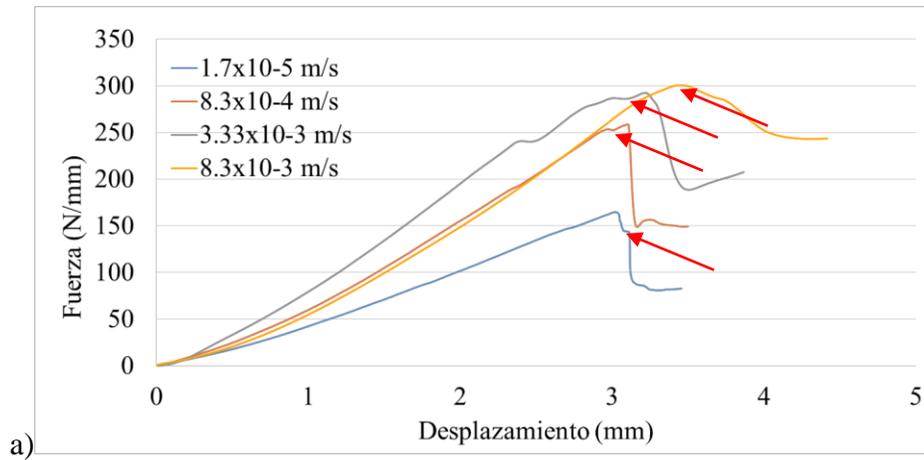


Figura 9. Resultados Fuerza vs Desplazamiento seleccionados del ensayo de punzonado con el dardo agudo realizado sobre los materiales de prueba a) Sábalo, b) Arapaima y c) Polycarbonato.

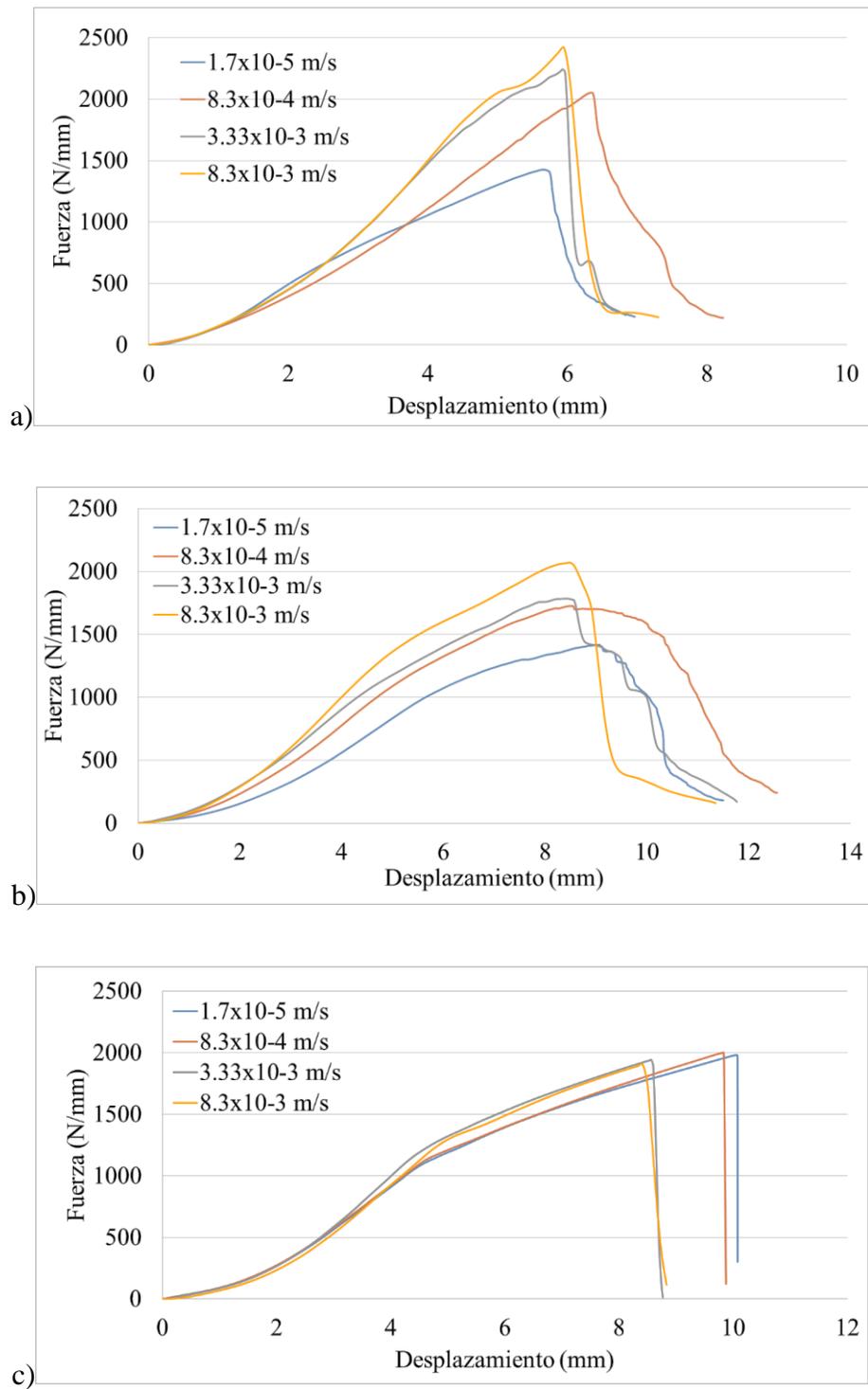


Figura 10. Resultados Fuerza vs Desplazamiento seleccionados del ensayo de punzonado realizado con el punzón hemisférico sobre los materiales de prueba a) Sábalo, b) Arapaima y c) Policarbonato.

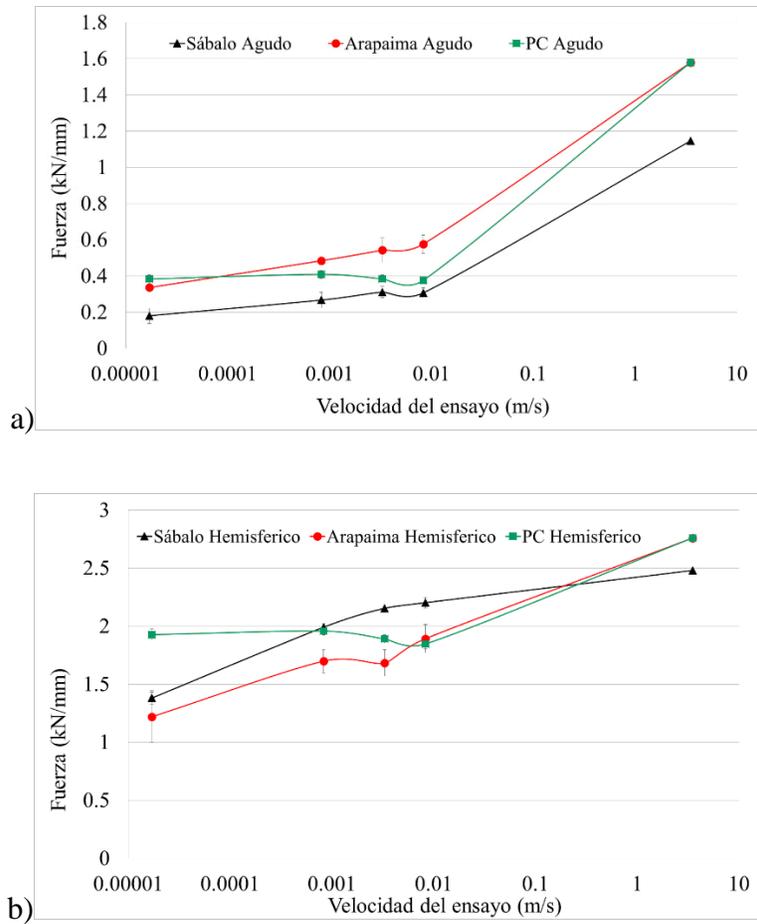


Figura 11. Comportamiento de los materiales dependiendo de la velocidad de aplicación de la carga, los valores bajos de velocidad corresponde a los ensayos de punzonado y los valores altos corresponden a las pruebas de impacto.

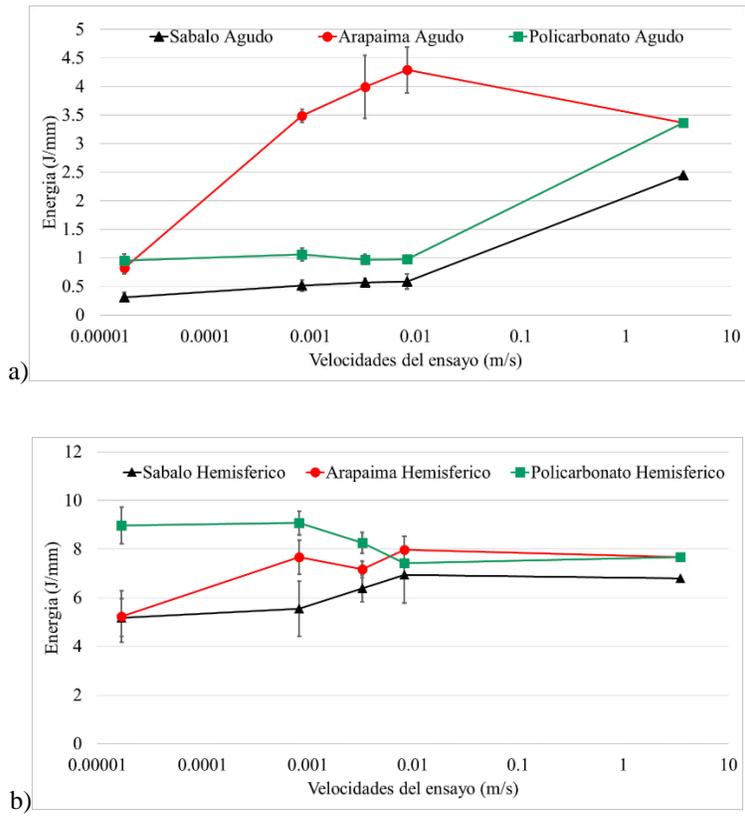


Figura 12. Energía absorbida por los materiales en los ensayos de punzonado.

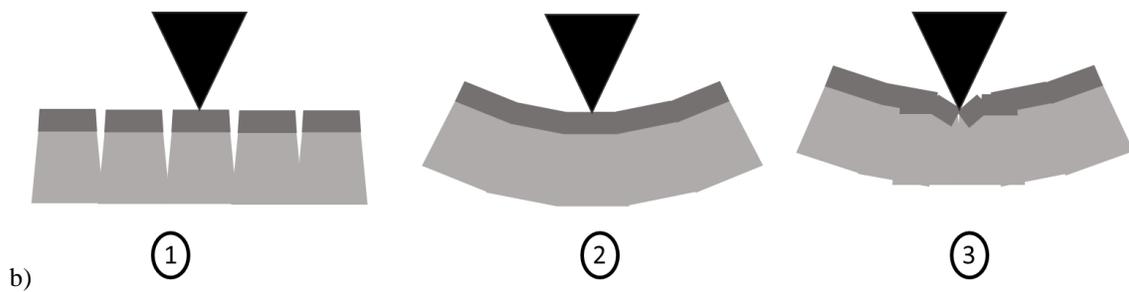
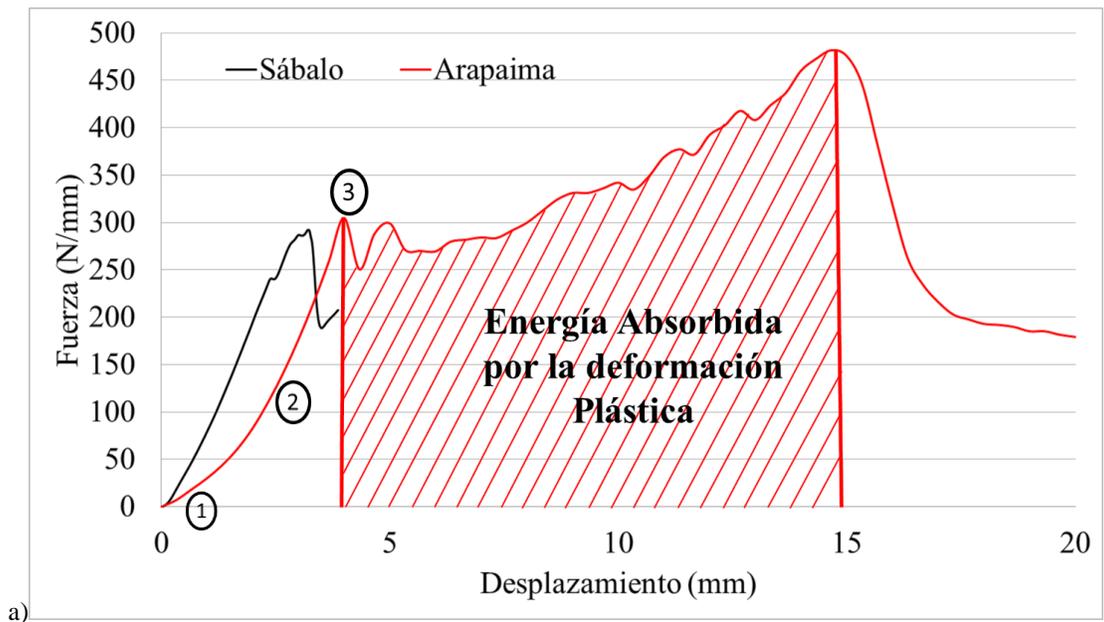


Figura 13. a) Comparación del área bajo la curva que mide la energía absorbida durante el punzonado de escamas de Sábalo y Arapaima. La capacidad del arapaima para absorber energía es mayor a la del Sábalo debido a su alto componente mineralizado en su microestructura. b) Funcionamiento de las discontinuidades en la microestructura del Arapaima, las cuales se cierran al comienzo de la curva Fuerza vs Desplazamiento.

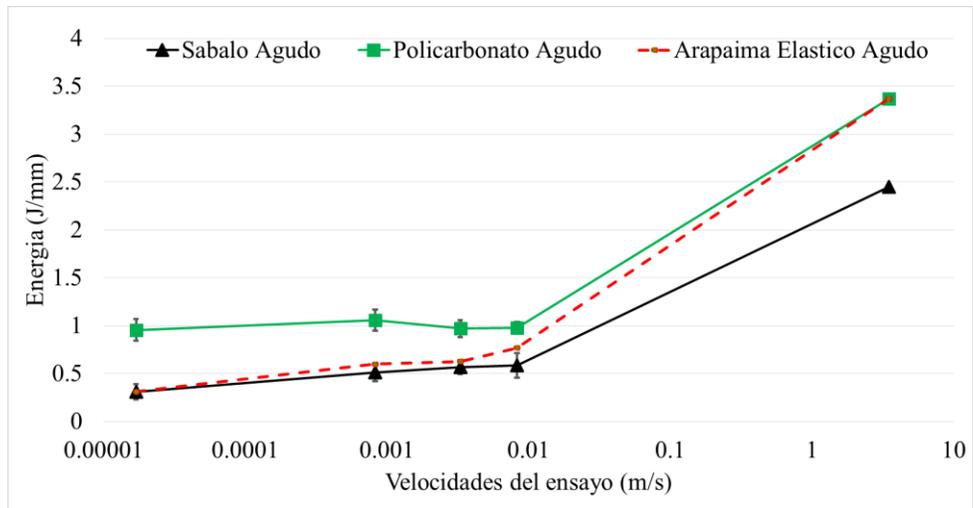


Figura 14. Energía absorbida en función de la velocidad de punzonado en la zona elástica de las muestras.

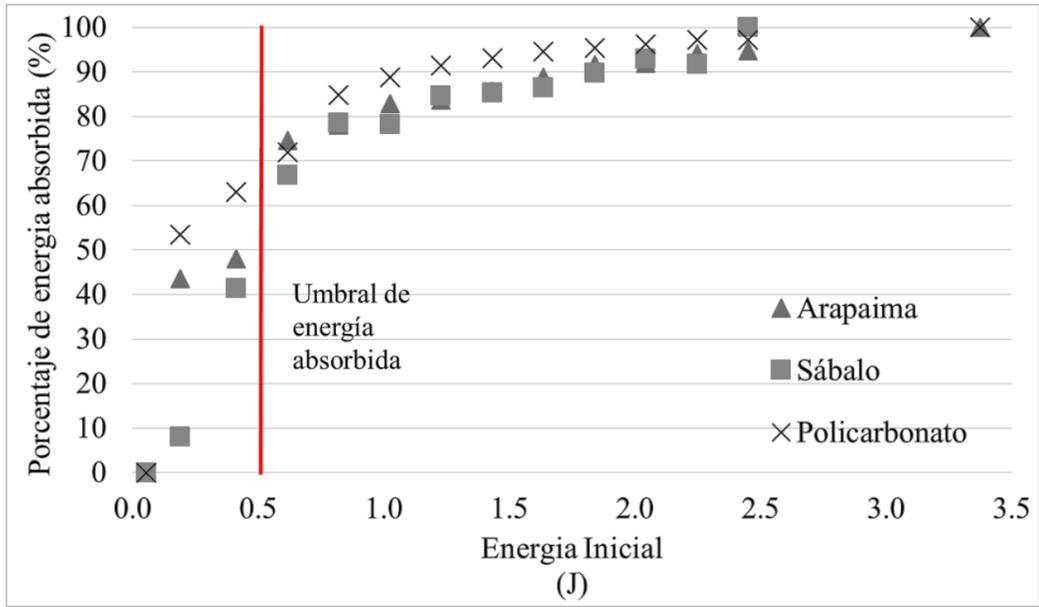


Figura 15. Energía absorbida en función de la energía inicial aplicada en cada impacto en los materiales de prueba.

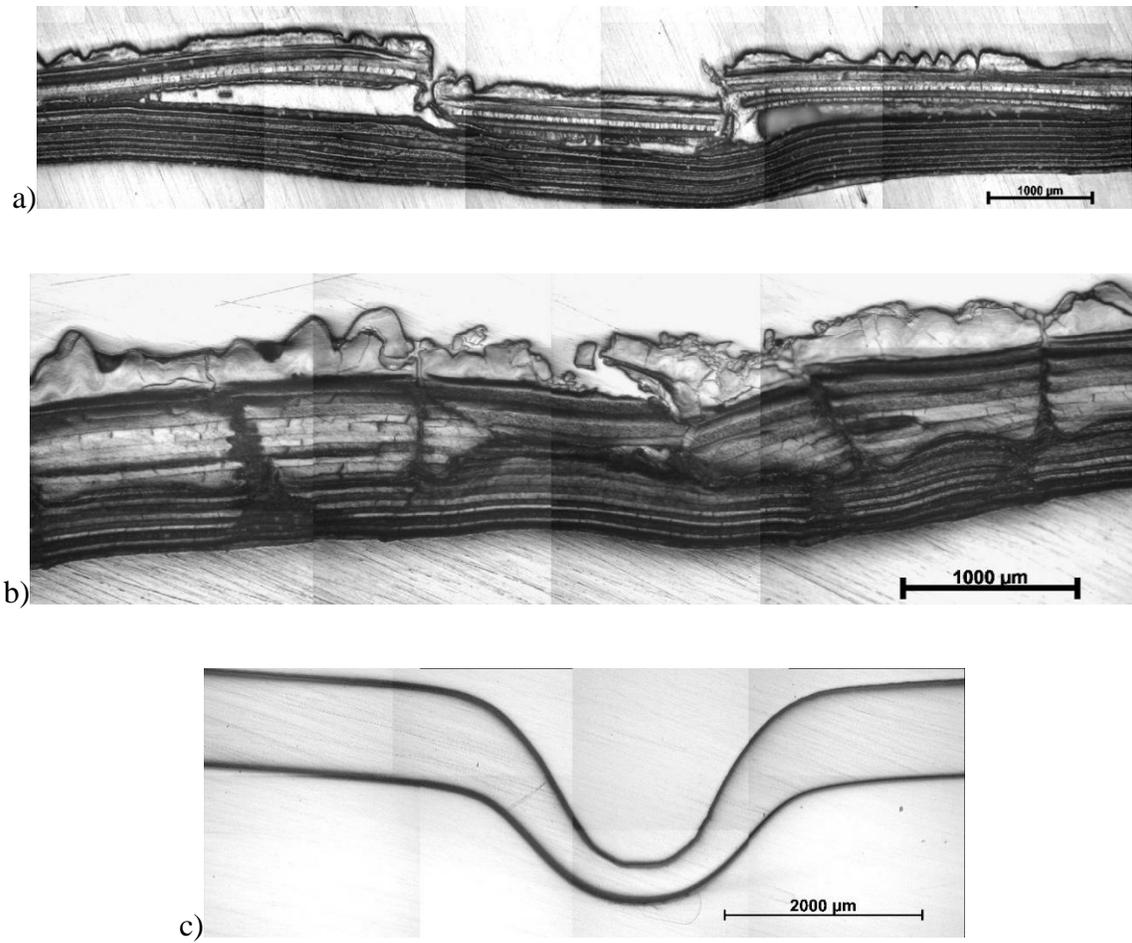


Figura 16. Fractura de la capa mineralizada presente en las escamas al ser golpeadas por el punzón agudo a una energía de 0.4 J. a) Escama de Sábalo; b) Escama de Arapaima; c) Policarbonato.

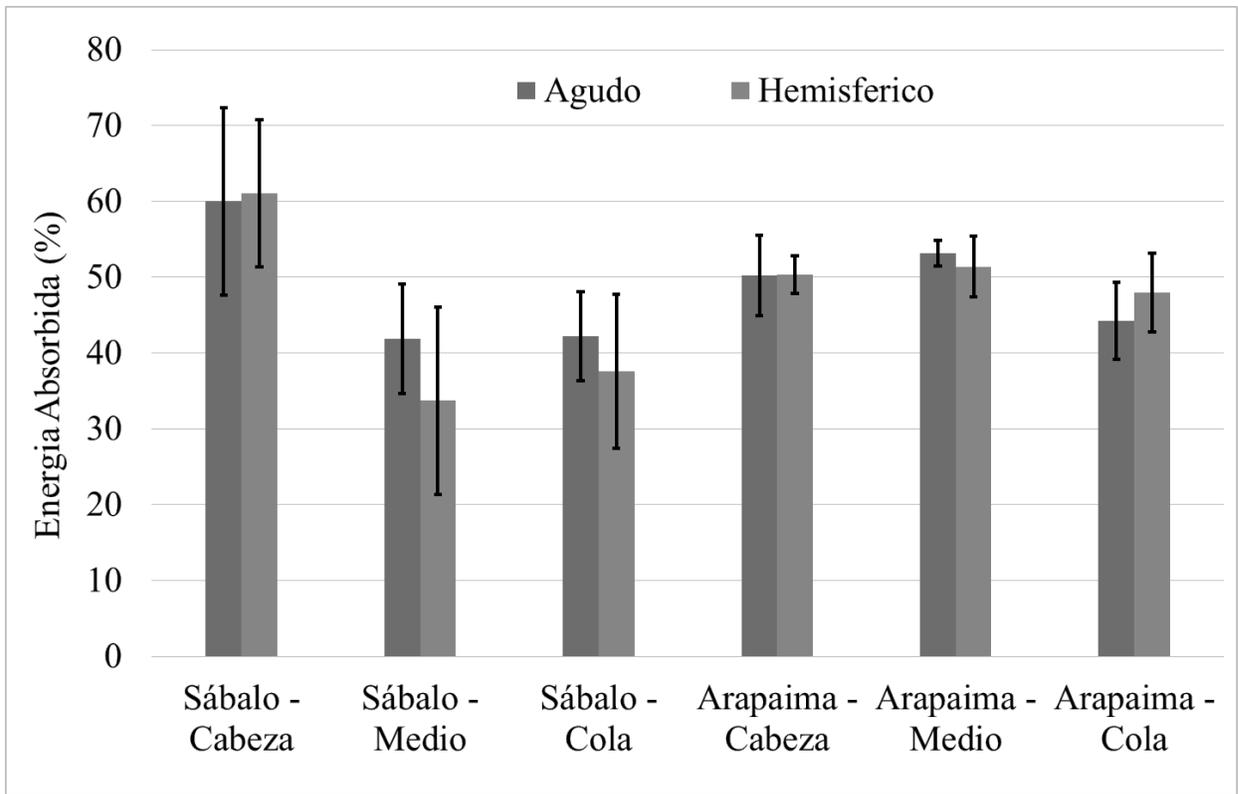


Figura 17. Porcentajes de energía absorbida para las escamas dependiendo de su zona de extracción.

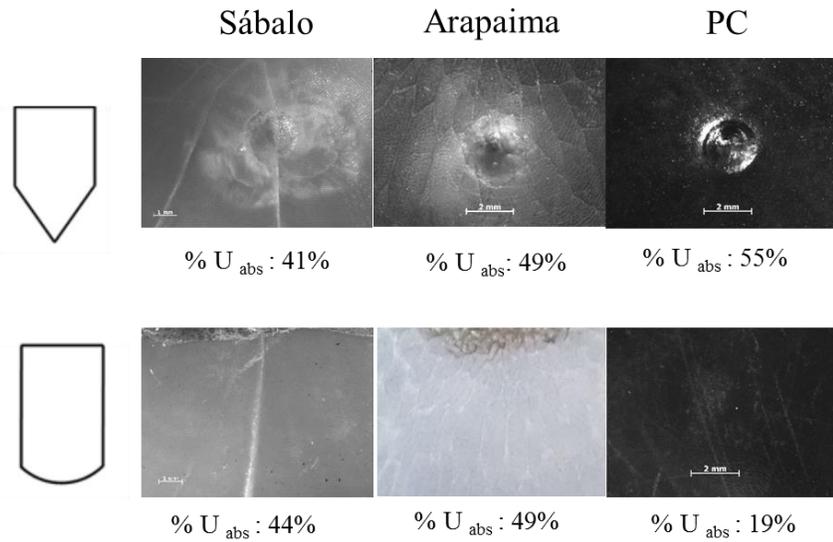
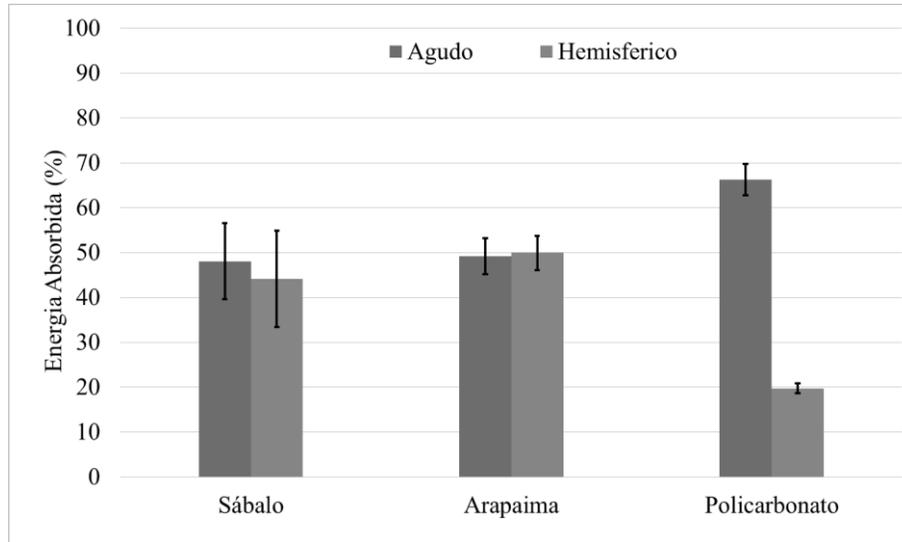


Figura 18. Energías absorbidas promedio de las escamas comparadas con el Policarbonato luego de ser impactadas por los dardos con las dos geometrías. Las Fotografías pertenecen a las fallas causadas por los dardos sobre los materiales y los porcentajes de daño a los cuales corresponde la magnitud de la energía.