



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS VETERINARIAS Y PECUARIAS
ESCUELA DE CIENCIAS VETERINARIAS Y PECUARIAS



“COMPARACIÓN ESTRUCTURAL Y DE COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL DE LA
HERRADURA TRADICIONAL DE HIERRO CON LA HERRADURA INNOVADORA DE
ALEACIÓN DE COBRE”

CAROLINA JACQUELINE CARVAJAL MENESES

Memoria para optar al Título
Profesional de Médico Veterinario
Departamento de Ciencias Clínicas

PROFESOR GUÍA: Dr. MARIO NELSON ACUÑA BRAVO

SANTIAGO, CHILE
2012



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS VETERINARIAS Y PECUARIAS
ESCUELA DE CIENCIAS VETERINARIAS Y PECUARIAS



“COMPARACIÓN ESTRUCTURAL Y DE COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL DE LA
HERRADURA TRADICIONAL DE HIERRO CON LA HERRADURA INNOVADORA DE
ALEACIÓN DE COBRE”

CAROLINA JACQUELINE CARVAJAL MENESES

Memoria para optar al Título
Profesional de Médico Veterinario
Departamento de Ciencias Clínicas

NOTA FINAL:.....

		NOTA	FIRMA
PROFESOR GUÍA	: DR. MARIO N. ACUÑA BRAVO.
PROFESOR CONSEJERO	: DR. ENRIQUE PINTO PEÑA
PROFESOR CONSEJERO	: DR. IVÁN NÚÑEZ PRADO

SANTIAGO, CHILE
2012

AGRADECIMIENTOS

Esta memoria de título se realizó gracias al apoyo de muchas personas, entre ellas, mi familia (Bernardita, Juan y Mauricio), quienes fueron protagonistas esenciales para que pudiera lograr esta tarea, ya que colaboraron en todo momento ayudándome a sobrellevar los diferentes obstáculos que se presentaron durante el periodo que duró mi carrera y a su incondicional amor, preocupación, apoyo, paciencia, entrega y dedicación durante todos estos años, y a mi pololo Cristian Hirmas, por su gran amor, apoyo y ayuda en estos últimos años.

Quisiera agradecer a mi profesor guía, el Dr. Mario Acuña, quien fue un pilar importante en el logro de esta memoria, con su inmenso apoyo, preocupación y ayuda incondicional en el desarrollo de este estudio. A los consejeros, el Dr. Ivan Nuñez y el Dr. Enrique Pinto, por su significativa ayuda y preocupación. A los miembros de la empresa Kawell, especialmente a los señores Diego Valer y Francisco Villela, quienes me ayudaron y me facilitaron todo lo necesario para la ejecución de la parte práctica de esta memoria. Y a muchas otras personas que anónimamente colaboraron para cerrar este importante ciclo de mi vida.

MEMORIA DE TÍTULO

“COMPARACIÓN ESTRUCTURAL Y DE COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL DE LA HERRADURA TRADICIONAL DE HIERRO CON LA HERRADURA INNOVADORA DE ALEACIÓN DE COBRE”

“BEHAVIORAL MATERIAL AND STRUCTURAL COMPARISON OF THE TRADITIONAL IRON HORSESHOE WITH THE INNOVATIVE COPPER ALLOY HORSESHOE”

Carolina Jacqueline Carvajal Meneses*

*Departamento de Ciencias Clínicas. Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias. Universidad de Chile. Santa Rosa 11735. La Pintana.

Financiado por Kawell

Resumen

De acuerdo al antiguo proverbio “Sin casco no hay caballo”, a lo largo de los años, el herraje sigue siendo el procedimiento fundamental para la protección del casco. El objetivo de este estudio consistió en comparar la eficacia de utilizar la herradura de hierro y aleación de cobre, evaluando su comportamiento estructural, desgaste, atenuación y transmisión de impacto, luego de un período de herraje. Se realizó un estudio práctico con 12 equinos mestizos clínicamente sanos en similares condiciones físicas y medio ambientales. Se procedió a seleccionar seis caballos al azar, para ser herrados en sus miembros del lado derecho con hierro y en sus miembros izquierdos con aleación de cobre y en disposición inversa los otros seis ejemplares. Se evaluó el porcentaje (%) de desgaste en una pesa digital (gramos), determinando la pérdida de peso de cada herradura. Se realizó la identificación y cuantificación de daños estructurales como fisuras o grietas por medio de un kit de tres aerosoles. Asimismo, se desarrolló un modelo matemático, que fue implementado en forma de animación tridimensional con la ayuda de un programa computacional, evaluando los daños producidos hasta la articulación interfalángica distal. Como resultado se obtuvo que la herradura de aleación de cobre transmite una menor fuerza de impacto (8,56%) en comparación con la herradura de hierro. Además, presenta una menor resistencia al desgaste (9,07%) en comparación al hierro (5,07%) y no se observaron daños estructurales como grietas o fisuras al interior de cada herradura, lo que demuestra que esta innovadora herradura a base de cobre, puede ser utilizada en igualdad de condiciones que el hierro.

Palabras claves: Casco, Herraje, Herraduras de hierro y aleación de cobre, Desgaste, Daño estructural, Fuerza de impacto.

Abstract

According to the old adage "No hoof no horse", along the years, the horseshoeing remains as the fundamental procedure for hoof protection. The objective of this study was to compare the efficacy of using iron and copper alloy horseshoes, evaluating structural behavior, wear attenuation and transmission of impact, after a horseshoeing period. It was made a study with 12 clinically healthy horses in similar physical and environmental conditions. Randomly were selected six horses to wear iron horseshoes in their right hooves, and copper alloy in their left hooves and an inverse disposition the other six horses. There were evaluated the percentage (%) of wear with a digital weight (grams), to determinate the weight loss of each horseshoe. It was performed the identification and quantification of structural damage such as cracks or fissures using a kit of three sprays. Also it was developed an mathematical model, in the form of three-dimensional animation with the support of a computer program, assessing the damage to the distal interphalangeal joint. The result was that the copper alloy horseshoe transmits less force of impact (8.56%) compared with the iron horseshoe. Also, has a lower wear resistance (8.52%) compared to iron (4.42%) and there was no structural damage like cracks or fissures within each horseshoe, demonstrating that this innovative horseshoe base copper can be used on equal term that the iron.

Keywords: Hoof, Horseshoeing, Iron and copper alloy horseshoes, Wear, Structural damage, Impact force.

INTRODUCCIÓN

En las condiciones actuales, en las que el equino es utilizado para el trabajo, actividades recreativas, o en diversas disciplinas deportivas, es absolutamente indispensable que el animal esté herrado (Houghton *et al.*, 2003). Muchos médicos veterinarios y personas afines a la actividad ecuestre coinciden al afirmar que “sin casco no hay caballo”, por lo cual es totalmente necesario conocer la anatomía, fisiología y biomecánica de esta estructura elemental del animal, así como los aplomos y la técnica de herraje (Baeza, 1992).

El casco del equino es una unidad anatómica altamente especializada que constituye una expresión de biomecánica, y para que pueda cumplir su función de buena forma, debe estar constantemente en óptimas condiciones, ya que debe soportar grandes presiones y esfuerzos que el caballo se ve obligado a realizar diariamente. En este sentido, el herraje tiene un rol determinante para el rendimiento, salud y vida útil de cada ejemplar (Berríos *et al.*, 1995).

El herraje de los cascos se efectúa en forma periódica, siendo un proceso que debe ser realizado por un herrador calificado y bajo la supervisión de un médico veterinario especialista cada cuatro a seis semanas para

mantener una adecuada conformación y balance de los cascos (Myers, 2005).

Anatomía y Conformación del casco

El pie del caballo es una estructura compleja compuesta por la tercera falange, la mitad de la segunda falange, el hueso sesamoideo distal, la articulación interfalángica distal, la terminación tendinosa del tendón extensor digital común y tendón flexor digital profundo, más la irrigación e inervación. A su vez, el casco se divide en el limbo, corona, pared, línea blanca, suela, almohadilla ungular, ranilla, talones y bulbo de los talones, respectivamente (O'Grady, 2008).

Herradura

La herradura es una pieza de metal con forma semicircular que se fija al casco por medio de clavos. Éstas pueden ser de diferentes materiales, como hierro, acero, aluminio, aleaciones e incluso plástico; diferenciándose en el peso, durabilidad, resistencia al desgaste, atenuación de fuerzas y en el costo (Stashak, 2004).

La herradura se divide a su vez, en ramas, talones, tablas, bordes, claveras y acanaladuras y es fundamental como medio

de protección, debido a que su principal función es proteger al casco de lesiones y del desgaste intenso al que se ve sometido. Además proporciona mayor tracción, mejora el apoyo y el balance, se utiliza como tratamiento de corrección en muchos problemas de conformación y de una condición patológica en particular (O'Grady, 2008).

La herradura debe estar adaptada tanto a la forma como al tamaño del casco, siendo lo suficientemente amplia y larga, para que el casco tenga el máximo apoyo y la máxima expansión. Sin embargo, antes de ser colocada correctamente, es necesario realizar un adecuado recorte y despalme para mantener la estructura, el ángulo y el eje de los cascos lo más cercano posible a lo normal (Houghton *et al.*, 2003). Esto tiene especial relevancia, ya que las prácticas inadecuadas de herraje pueden inducir a una mala conformación del casco y pueden ser la causa de presentación de diversas patologías músculo-esqueléticas y/o osteoartríticas, generando el acortamiento o cese de la vida útil de los equinos (Stashak, 2004).

En la actualidad, el hierro continúa siendo el metal que con mayor frecuencia se utiliza en la fabricación de herraduras, debido principalmente, a su facilidad para encontrarlo en el mercado y a su precio más

económico (Procobre, 2007¹). No obstante, presenta algunas desventajas como la poca atenuación de fuerzas que se desprenden del hierro al impactar contra el suelo en el apoyo, pudiendo afectar la integridad de las estructuras anatómicas contenidas en el interior de la cápsula del casco y otras a nivel inmediatamente superior (Back, 2001).

En los últimos años, se han realizado numerosas investigaciones que han determinado que el cobre y sus aleaciones presentan múltiples beneficios, dentro de los cuales se encuentran: poseer propiedades bactericidas y fungicidas, impidiendo la proliferación de bacterias y de hongos; y disminuir los traumas de baja intensidad, minimizando daños hacia el sistema locomotor (Procobre, 2007).

Efectos Biomecánicos del casco

La biomecánica del pie del equino se centra en los efectos provocados sobre la extremidad distal y la cápsula ungular. Durante la locomoción se desencadena un elaborado mecanismo del aparato fibroelástico del casco, que consiste en

¹ PROCOBRE es una red de instituciones latinoamericanas cuya misión es la promoción del uso del cobre, impulsando la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones y difundiendo su contribución al mejoramiento de la calidad de vida y al progreso de la sociedad.

atenuar las fuerzas que recibe éste cada vez que impacta la superficie del suelo. Este mecanismo implica que la pared dorsal, talones, almohadilla ungular y la ranilla se expanden lateralmente y hacia caudal y la suela disminuya su concavidad. Durante la fase en suspensión, las estructuras mencionadas vuelven a su posición original, debido a las características de amortiguación y a la capacidad de deformación elástica de la cápsula ungular (Thomason, 2009).

A lo largo del impacto, el miembro se somete a una fuerza de impacto externo que proviene del suelo. Este impacto se llama fuerza de reacción del suelo (GRF, “*ground reaction force*”), cuyas magnitudes y distribución de tensiones dependen de diversos factores, como la marcha, tipo y velocidad del ejercicio, equilibrio del casco, superficie del suelo y de la técnica de herraje (Back, 2001). El principal efecto de esta fuerza, es transmitirse hacia la cápsula del casco y a sus estructuras anatómicas internas, teniendo efectos potencialmente dañinos hacia los huesos y articulaciones, debido a que son las estructuras más susceptibles a estos traumas de baja intensidad y repetitivos en el tiempo, en comparación a los tejidos blandos (Clayton, 2004). No obstante, aún no existe

conocimiento de la cantidad de fuerza que atenúa cada estructura (Back, 2001).

Esta fuerza actúa en un solo punto, denominado centro de presión (CoP, “*center of pressure*”) o punto de momento cero (PZM, “*point of zero moment*”) que se encuentra cerca del vértice de la ranilla (Back, 2001). Por lo que, la aplicación en forma reiterativa de esta fuerza va a sobrecargar las extremidades, pudiendo conducir al desarrollo de futuras patologías, tales como síndrome navicular, fracturas, enfermedad degenerativa articular, entre otras, teniendo implicancias para el rendimiento y la vida útil en la actividad que desempeña el ejemplar (Clayton, 2004).

En la actualidad, no es posible determinar las funciones biomecánicas de la mayoría de las estructuras anatómicas que conforman el casco. Conocer estas funciones, es un requisito indispensable para poder llegar a comprender las causas de una lesión biomecánica y así poder prevenir este tipo de lesiones (Thomason, 2009).

Herradura de aleación de cobre

El cobre es un metal que presenta un excelente comportamiento y elasticidad; alta capacidad de adaptación; alta durabilidad, maleabilidad y capacidad de

manufacturación (Codelcoeduca, 2011²); buena resistencia a la corrosión y al desgaste (Jiménez, 2006); fácilmente reciclable; alta capacidad de aleación metálica; alta resistencia al usarlo en caliente y/o frío; con propiedades bactericida, fungicida y de atenuación de impacto. Sin embargo, el cobre puro presenta la característica de ser un metal muy blando, deformándose o rompiéndose con mayor facilidad (CEDIC, 2007). Por este motivo, en los últimos años se han desarrollado distintas aleaciones de cobre que logran mejorar las propiedades mecánicas del metal, sin disminuir sus propiedades antimicrobianas (Codelcoeduca, 2011).

En un estudio efectuado en el Laboratorio de Microbiología del Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos (INTA) de la Universidad de Chile, en conjunto con la Sección de Veterinaria del Escuadrón de Caballería de la Escuela Militar del Ejército de Chile en el año 2003, sobre la actividad antimicrobiana de la herradura de hierro y aleación de cobre ante la presencia de bacterias y hongos en el casco del equino, se demostró que el empleo

² Codelcoeduca, sitio web educativo perteneciente a CODELCO, es una empresa autónoma de propiedad del Estado chileno, cuyo negocio principal es la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado y su posterior comercialización.

de herraduras de aleación de cobre logran una drástica disminución de patologías podales al generar una constante liberación de sales de cobre, las cuales actúan sobre las bacterias aerobias y anaerobias que colonizan estas estructuras, como igualmente sobre los hongos que contribuyen al problema y que en conjunto generan un serio daño estructural que frecuentemente imposibilita al equino a desarrollar su actividad habitual (Rivas *et al.*, 2003).

Asimismo, el Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (IDIEM), dependiente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, realizó un estudio funcional mediante el análisis comparativo del comportamiento de la herradura de hierro y aleación de cobre, a través del ensayo de Impacto Charpy y del desgaste abrasivo. El resultado de este estudio demostró que el uso de una herradura a base de cobre permite mitigar las fuerzas de impacto y presenta una buena resistencia al desgaste del material. Estos resultados han mostrado antecedentes favorables del reemplazo del hierro por cobre en las herraduras de caballos, indicando una nueva oportunidad de mercado para la industria cuprífera nacional (Rivas *et al.*, 2003).

En base a esta información, el objetivo de esta memoria de título consiste en comparar la eficacia de utilizar dos tipos de herraduras, la herradura tradicional de hierro con una innovadora herradura de aleación de cobre, evaluando su comportamiento estructural y su comportamiento en términos de desgaste, atenuación y transmisión de fuerzas de impacto, luego de un período de herraje (45 días), con el propósito final de contar con una alternativa de prevención y tratamiento de procesos traumáticos que afectan los cascos y por ende, la vida útil del caballo, respectivamente.

MATERIAL Y MÉTODOS

Lugar del estudio

Los estudios de daños estructurales y del desgaste del material fueron realizados en 12 caballos mestizos, pertenecientes al Escuadrón del Centro Ecuéstre del Regimiento de Artillería N° 1 “Tacna” en la comuna de San Bernardo, Región Metropolitana. Para ello, se utilizaron herraduras a base de cobre con las siguientes aleaciones: Cobre-Zinc-Aluminio Manganeso-Hierro (83.5, 15, 1, 0.25, 0.25%, respectivamente), obteniéndose así una

optimización de las propiedades mecánicas y un aumento en la dureza (Figura 1). Este tipo de herradura fue diseñada y proporcionada por la empresa Kawell³.



Figura 1: Herraduras de aleación de cobre.

El estudio de atenuación y transmisión de impacto del material fue realizado en las dependencias del Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Chile, mediante un programa computacional.

Selección de los ejemplares clínicamente sanos

Se realizó un estudio práctico eligiendo a 12 equinos clínicamente sanos, sin distinción de sexo, que se encontraban en similares condiciones, tanto físicas como medio ambientales. Dentro de las condiciones físicas se determinó el peso, raza, contextura corporal, balance y conformación de los cascos. En cuanto a las

³ Primera Empresa de Herraduras de Aleación de Cobre en Santiago de Chile, 2011.

condiciones ambientales se determinó el tipo de suelo, infraestructura y trabajo realizado. Los equinos incluidos en la muestra presentaron un peso corporal entre 540 y 560 kilos, mestizos, con un adecuado aplomo y ejes de los cascos, estabulados sobre un suelo de cemento, con una actividad diaria sobre una superficie de tierra y pasto, utilizados para salto y adiestramiento.

Durante el estudio, se procedió a seleccionar al azar seis caballos para que fueran herrados con herraduras de hierro los cascos anterior y posterior derechos y con herraduras de aleación de cobre los cascos anterior y posterior izquierdos y en disposición inversa los otros seis ejemplares, previo recorte y despilme de los cascos. Esta desigual distribución de las herraduras a cada lado del ejemplar se realizó debido a que las mitades derecha e izquierda del animal pudieran presentar distinto peso, debido a la diferente distribución anatómica de sus órganos. Por lo cual, la finalidad de esta forma de distribución fue poder determinar el estudio en similares condiciones anatómicas.

Este estudio práctico fue realizado en un período de herraje que corresponde a 45 días, en donde se evaluó el porcentaje (%) de desgaste y se realizó la identificación y

cuantificación de daños estructurales en los dos tipos de herraduras.

Estudio estructural

El estudio estructural se llevó a cabo con el propósito de identificar y cuantificar la existencia o ausencia de posibles daños estructurales como grietas o fisuras al interior de cada herradura (hierro y aleación de cobre), una vez finalizado el período de herraje.

Para poder realizar este procedimiento, en las herraduras se efectuó un análisis macroscópico por medio de tintas penetrantes que se encuentran en un kit de tres aerosoles; un limpiador, un líquido penetrador y un agente revelador (Figura 2), desarrollándose de la siguiente manera: se realizó una limpieza de las superficies de cada herradura con el limpiador (Crick 110), para luego poder pulverizar una capa fina del penetrador (Crick 120) hasta cubrir toda la zona. Posteriormente, se dejó secar el penetrante durante 20 minutos, se eliminó con agua el exceso de producto para finalmente, aplicar una capa fina y homogénea del revelador (Crick 130), dejándolo actuar. Si este ensayo resultaba positivo, es decir, si la tinta penetraba el material de la herradura, ello era indicativo

de que la herradura presentaba algún tipo de fractura en su estructura. A continuación, se confecciono una tabla, que fue dividida en el nombre del animal, número de fracturas por miembro y posición de cada herradura.



Figura 2: Kit de tres aerosoles. Limpiador (Crick 110), penetrador (Crick 120) y revelador (Crick 130).

Con este estudio, se evaluó la resistencia a la tensión (fuerza/área), dureza y tenacidad de cada material. La tenacidad es la resistencia que opone un cuerpo a deformarse o romperse (Jiménez, 2006).

Estudio de comportamiento del material

Este estudio consistió en determinar el porcentaje (%) de desgaste y el porcentaje (%) de atenuación y transmisión de impacto, con la finalidad de evaluar las propiedades mecánicas de la herradura sobre la integridad del casco.

a) Porcentaje (%) de desgaste: la resistencia al desgaste fue determinada a

través de la pérdida de peso de cada herradura. Previo y posterior a los 45 días, se procedió a pesar cada tipo de herradura (una de aleación de cobre y una de hierro) en un instrumento de precisión, que consiste en una pesa digital, en donde se obtuvo el peso en gramos (Figura 3). Una vez obtenido el peso de las herraduras, los resultados fueron registrados en dos tablas (inicio y final periodo de herraje), indicando nombre del animal, número, peso y posición de cada herradura. Posteriormente, con el total de datos, se determinó el porcentaje (%) de desgaste, registrándose en dos tablas, una por cada tipo de herradura.



Figura 3: Pesa digital. Peso en gramos.

Con este estudio, se evaluó la resistencia al desgaste, dureza y durabilidad de cada herradura.

b) Porcentaje (%) de atenuación y transmisión de impacto: este estudio fue realizado con la finalidad de determinar la atenuación y transmisión de fuerzas que produce cada herradura durante la fase de apoyo en la superficie del suelo.

Para poder realizar este estudio, se desarrolló un modelo matemático denominado “Modelo de Impacto” (Figura 4), basado en el “Sistema Masa Resorte Amortiguador” (Anexo 1), que posteriormente fue implementado en forma de animación tridimensional con la ayuda de un programa computacional llamado "MSC. Visual Nastran 4D™⁴" (Figura 5), desarrollándose de la siguiente manera: se consideraron tres componentes principales, la herradura (X0); el casco (X1) y el resto de la masa caballar (X2). Entre X0 y X1, se encontraron dos constantes que corresponden a la rigidez de la herradura (K1) y amortiguación de la herradura (C1). Luego, entre X1 y X2 se encontraron dos constantes que pertenecen a la rigidez de la cápsula del casco y estructuras óseas (tercera falange, mitad segunda falange, hueso sesamoideo distal) (K2) y amortiguación de la cápsula del casco y estructuras óseas (C2). Cada uno de estos componentes están unidos mediante resortes y amortiguadores, transmitiendo fuerzas desde un elemento al

otro. Estas fueron cuantificadas y por lo tanto se determinó el comportamiento comparativo en forma porcentual.

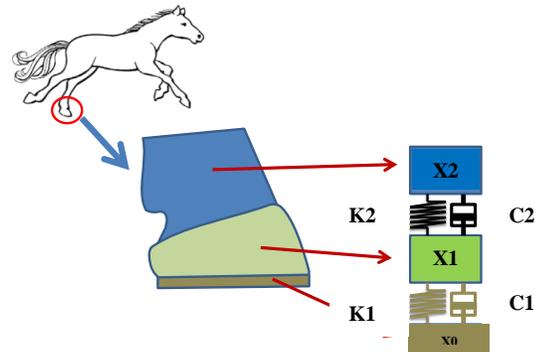


Figura 4: Modelo de Impacto. (X0) Herradura; (X1) Casco; (X2) Resto de la masa caballar. (K1) Constante de rigidez de la herradura; (K2) Constante de rigidez de la cápsula del casco y estructuras óseas. (C1) Coeficiente de amortiguación de la herradura; (C2) Coeficiente de amortiguación de la cápsula del casco y estructuras óseas.

Antes de desarrollar este estudio computacional, se debieron determinar factores mecánicos como: módulo de elasticidad, coeficiente de restitución, constantes de amortiguación y rigidez de las herraduras, cápsula del casco y estructuras óseas; y factores geométricos como: masa caballar, masa de la cápsula del casco con sus estructuras anatómicas internas (óseas), masa de cada herradura, longitud, diámetro del casco y de los huesos. Los valores de cada una de estas constantes (rigidez y amortiguación) han sido determinados a partir de los distintos factores mecánicos, los

⁴ MSC. Visual Nastran 4D™, proveniente de MSC Software. 2003, es una herramienta para el ingeniero mecánico que combina la simulación cinemática con el análisis de esfuerzos bajo un único ambiente de modelación, con el objetivo de asegurar la dinámica de sus ensamblajes antes de ser manufacturados y determinar si las piezas resistirán las condiciones operativas, sin necesidad de probar prototipos físicos.

que han sido modificados de acuerdo a su geometría (Anexo 1).

A continuación de ingresar estos datos al programa computacional, se realizó la caída de los componentes sobre una superficie rígida, y con esta acción se evaluó la respuesta al impacto entre las dos herraduras.

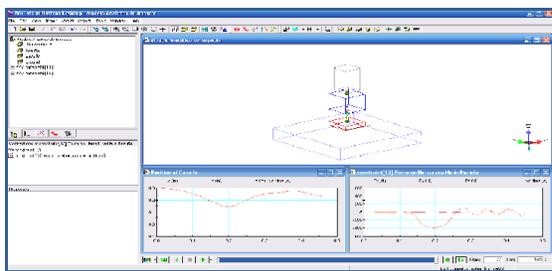


Figura 5: Programa computacional "MSC. Visual Nastran 4D™"

Una vez que el programa computacional resolvió la ecuación matemática del “Sistema Masa Resorte Amortiguador”, se registraron los resultados de este impacto en tres gráficos. Cada gráfico representa las fases de marcha del caballo, determinando el tiempo de máximo apoyo (fuerza máxima). En el gráfico llamado “Fuerza Contacto Suelo-Herradura”, se desarrollo con el objetivo de comparar el porcentaje (%) de fuerza de impacto producido entre las dos herraduras. Luego, fue desarrollado otro gráfico llamado “Fuerza Herradura-Casco”, con la finalidad de comparar el porcentaje (%) de fuerza

transmitida hacia la cápsula del casco y estructuras óseas y el porcentaje (%) de fuerza atenuada por cada herradura en estudio. Por último, mediante un gráfico llamado “Fuerza Casco- Resto Masa Caballo”, se comparó el porcentaje (%) de fuerza que se transmite hacia el resto de la masa caballar, que comprende desde la articulación interfalángica proximal hacia arriba. Cada gráfico está constituido por dos variables (fuerza/tiempo) y se visualizan dos líneas continuas que representan los dos tipos de herraduras.

Con este estudio, se cuantificó en forma comparativa el efecto estructural que produce el uso de una herradura basada en una aleación de cobre y otra de hierro, conociendo las fuerzas que se generan en ambas herraduras bajo una misma condición de movimiento.

Análisis estadístico

En el caso del porcentaje (%) de desgaste, se utilizó la Prueba de Wilcoxon, prueba estadística no paramétrica basada en el análisis de datos de dos muestras relacionadas, considerando las magnitudes relativa de las diferencias así como sus signos. Se consideró la hipótesis nula ($H_0: E(X) = E(Y)$), con un 95% de confianza, 5%

de error y nivel de significación ($P \leq 0,05$). Para ello se comparó el desgaste de cada tipo de herradura (inicio y final periodo de herraje) y la diferencia de desgaste entre ambas. Al inicio del periodo, la aleación de cobre presentó una media en gramos (329,92); mediana (331); desviación estándar (DE) (22,32) y coeficiente de variación (CV) (6,76); y el hierro, una media en gramos (289,83); mediana (285); DE (15,42) y CV (5,32). Al final del periodo, la aleación de cobre presentó una media en gramos (301,79); mediana (296); DE (18,09); CV (5,99); y el hierro una media en gramos (277); mediana (278); DE (16,01); CV (5,78), respectivamente.

RESULTADOS

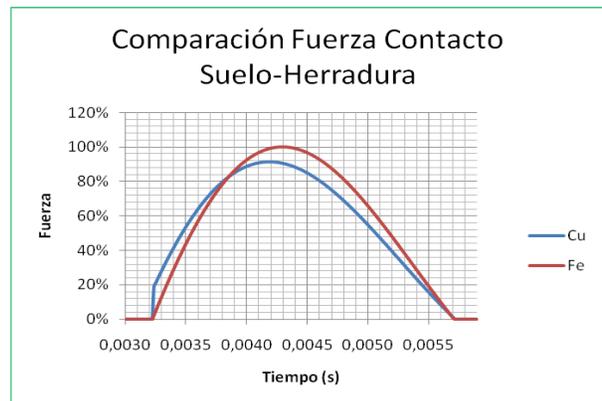
Porcentaje (%) de atenuación y transmisión de impacto

Una vez realizada la animación tridimensional en base a un modelo matemático, adaptado a las condiciones reales y con la ayuda de un programa computacional en particular, se logró establecer mediante gráficos los resultados de porcentaje (%) de atenuación y transmisión de fuerza de reacción que se generan en cada uno de los componentes en

estudio, a partir del ingreso de datos geométricos y mecánicos de las estructuras, que posteriormente fueron integrados mediante la ecuación del “Sistema Masa Resorte Amortiguador”. En primer lugar, se presentan las fuerzas de impacto entre el suelo y la herradura, en segundo lugar, entre la herradura y el casco y en tercer lugar, entre casco con el resto del caballo.

En el Gráfico 1 se puede observar que la herradura de aleación de cobre transmite una menor fuerza de impacto (GRF), 8,56%, en comparación con la herradura de hierro, debido a que esta herradura logra atenuar un 8,56% de la GRF.

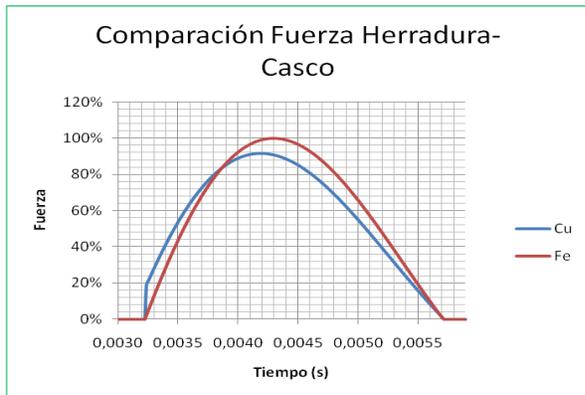
Gráfico 1: Porcentaje (%) de fuerza de reacción producido por el contacto entre el suelo y cada tipo de herradura (Cu /Fe).



En el Gráfico 2 se puede observar que la herradura de aleación de cobre transmite un menor porcentaje de fuerza hacia la cápsula del casco y estructuras anatómicas internas, debido a que presenta

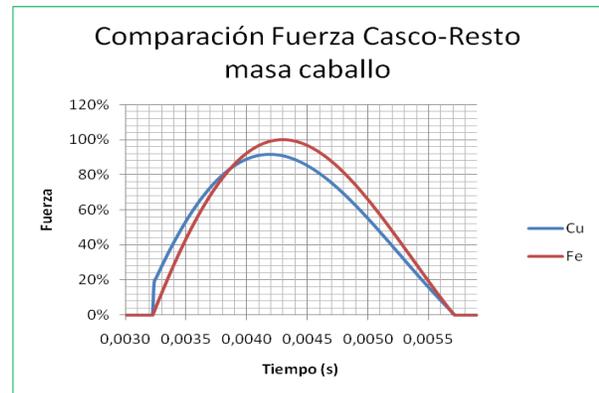
una mayor atenuación, 8,54%, en comparación con la herradura de hierro.

Gráfico 2: Porcentaje (%) de fuerza de reacción transmitida y atenuada por cada herradura (Cu/Fe).



En el Gráfico 3 se puede observar que la herradura de aleación de cobre transmite un 8,53% menos de fuerza hacia el resto de la masa caballar, correspondiendo desde la articulación interfalángica proximal hacia arriba.

Gráfico 3: Porcentaje (%) de fuerza de reacción transmitida hacia el resto de la masa caballar, por cada tipo de herradura (Cu/Fe).



En la Tabla 1, se muestra un resumen de las fuerzas máximas (tiempo de máximo apoyo) de cada herradura hacia los tres componentes del modelo.

Tabla 1: Resumen de los valores máximos obtenidos en cada una de las interacciones de los componentes.

	Suelo-Herradura	Herradura-Casco	Casco-Resto masa caballo
Fuerza máxima Cu	91,44	91,46	91,47
Fuerza máxima Fe	100	100	100
% Diferencia Fuerza Máxima	8,56%	8,54%	8,53%

Porcentaje (%) de desgaste

Luego de pesar las herraduras en un instrumento digital y obtenido los pesos en gramos, previo y finalizado el periodo de herraje de 45 días, se logro comparar el porcentaje (%) de desgaste de cada herradura (hierro y aleación de cobre) y de cada miembro (anterior y posterior) respectivamente.

En la Tabla 2 se muestran los pesos (gramos) al inicio del periodo de herraje. Se observa que la herradura de aleación de cobre pesa en promedio 40 gramos (12%) más que la de hierro.

Tabla 2: Pesos (gramos) al inicio del periodo de herraje.

Nº	Peso Cu+ MA - MP	Peso Fe+ MA - MP	Posición Cu+	Posición Fe+
1	333 - 335	310 - 310	IZQ	DER
2	323 - 326	271 - 280	IZQ	DER
3	303 - 296	285 - 276	IZQ	DER
4	348 - 350	301 - 305	IZQ	DER
5	325 - 326	282 - 279	IZQ	DER
6	344 - 345	295 - 286	IZQ	DER
7	329 - 328	285 - 278	DER	IZQ
8	361 - 364	305 - 308	DER	IZQ
9	338 - 337	295 - 294	DER	IZQ
10	304 - 305	275 - 276	DER	IZQ
11	308 - 296	282 - 272	DER	IZQ
12	360 - 357	312 - 316	DER	IZQ

MA: miembro anterior/ MP: miembro posterior.

En la Tabla 3 se muestran los pesos (Gramos) finalizado el periodo de herraje. Se observa que la herradura de aleación de cobre pesa en promedio 25 gramos (8%) más que la de hierro.

Tabla 3: Pesos (gramos) al final del periodo de herraje.

Nº	Peso Cu+ MA - MP	Peso Fe+ MA - MP	Posición Cu+	Posición Fe+
1	309 - 298	298 - 296	IZQ	DER
2	291 - 296	260 - 266	IZQ	DER
3	283 - 254	278 - 261	IZQ	DER
4	329 - 318	294 - 294	IZQ	DER
5	291 - 296	265 - 233	IZQ	DER
6	342 - 296	294 - 285	IZQ	DER
7	320 - 312	286 - 276	DER	IZQ
8	308 - 296	288 - 275	DER	IZQ
9	308 - 296	282 - 272	DER	IZQ
10	278 - 296	260 - 256	DER	IZQ
11	308 - 296	264 - 270	DER	IZQ
12	326 - 296	295 - 278	DER	IZQ

En las Tablas 4 y 5 se muestran los pesos totales de cada tipo de herradura al inicio y final del período de herraje. Se observa en la Tabla 4 (aleación de cobre) que la diferencia de peso total es de 721 gramos, que corresponden a un 9,07% de desgaste. Además, se observa que los miembros posteriores se desgastan 121 gramos (3,07%) más que los anteriores.

En cambio, en la Tabla 5 (hierro) se observa que la diferencia total de peso es de 354 gramos, que corresponden a un 5,07% de desgaste. Además, se observa que los miembros posteriores se desgastan 82 gramos (2,38%) más que los anteriores. De acuerdo al análisis estadístico, el desgaste de la herradura de aleación de cobre y hierro son significativos ($Z= 4,06$ y $3,47$; $P\leq 0,05$). Asimismo, la diferencia de desgaste (4%) entre ambas herraduras también es significativo ($Z= 3,31$ $P\leq 0,05$).

Tabla 4: Pesos totales y porcentaje (%) de desgaste de la herradura de aleación de cobre al inicio y final del periodo de herraje (24 herraduras).

Periodo Herraje	Cu+ MA	Cu+ MP	Total
Total peso (grs) Inicio	3976	3965	7941
Total peso (grs) Final	3676	3544	7220
Diferencia gramos	300	421	721
Porcentaje (%)	7,54	10,61	9,07

Tabla 5: Pesos totales y porcentaje (%) de desgaste de la herradura de hierro al inicio y final del periodo de herraje (24 herraduras).

Periodo Herraje	Fe+ MA	Fe+ MP	Total
Total peso (grs) Inicio	3499	3480	6979
Total peso (grs) Final	3363	3262	6625
Diferencia gramos	136	218	354
Porcentaje (%)	3,88	6,26	5,07

Estudio estructural

Una vez realizado el análisis macroscópico por medio del kit de tres aerosoles (limpiador, líquido penetrador y agente revelador), no se observaron daños estructurales como grietas o fisuras al interior de cada herradura (hierro y aleación de cobre), una vez finalizado el período de herraje.



Figura 6: Estudio estructural de las 48 herraduras en estudio.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La capacidad antibacteriana y antifúngica de la herradura de aleación de cobre resultó ser parte importante de las consideraciones mediante las cuales la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, certificó al cobre como el primer metal bactericida en marzo del 2008 (Procobre, 2007).

Dentro de esta aleación, el cobre (83,5%) y el zinc (15%), otorgan la característica de elasticidad, liberación de sales de cobre, resistencia al desgaste y trabajo en frío (CEDIC, 2007); el aluminio (1%) otorga la ligereza (Jiménez, 2006); el manganeso (0,25%) y hierro (0,25%), otorgan la dureza y tenacidad (Rodríguez, 2007).

El empleo de herraduras de aleación de cobre presentan la característica de poseer una mayor atenuación y menor transmisión de fuerza de impacto hacia los componentes del modelo (8,56%), en comparación con la herradura de hierro, observándose una leve disipación de la magnitud de fuerza a medida que se avanza en la unión de estos componentes (Gutiérrez, 2011).

Esta atenuación reduce significativamente los traumas de baja intensidad y repetitivos en el tiempo que se generan luego de cada impacto de la herradura contra el suelo. Esto se debe principalmente, a las mejores propiedades mecánicas que presenta, siendo fundamental la capacidad de elasticidad, amortiguación y maleabilidad del cobre y sus aleaciones, con respecto al hierro con que tradicionalmente se han confeccionado las herraduras. Estas características de la aleación de cobre logran que una gran parte de las fuerzas de reacción

que se generan luego del impacto, se mitiguen por la herradura y por lo tanto, se minimicen las fuerzas que se transmiten hacia el casco y hacia otras estructuras anatómicas del equino, logrando disminuir numerosas patologías irrecuperables que derivan en la prematura incapacidad de muchos equinos para continuar desarrollando su actividad deportiva, recreativa o laboral.

Si consideramos que el casco al ejercer el apoyo, genera una fuerza de acción y reacción sobre el suelo y dado que este movimiento debe realizarlo el caballo, al usar una herradura en base a cobre que tiene una menor magnitud de fuerza de acción y reacción sobre el casco, el caballo se estará ahorrando dicha magnitud de fuerza. Desde el punto de vista energético, si dos caballos corren a igual velocidad y tienen similares características, se obtiene que el caballo que usa herraduras en base a cobre, utiliza menos energía por cada pisada, que aquel que usa herraduras de hierro. En base a esto, al usar menor energía tendrá reservas físicas que puede utilizar para aumentar su rendimiento a largo plazo (Gutiérrez, 2011).

Este porcentaje (%) de atenuación va a ser proporcional a las condiciones físicas y ambientales en que se encuentre el ejemplar, debido a que las propiedades mecánicas de

los metales y de las estructuras anatómicas no varían (Gutiérrez, 2011).

Si bien las herraduras de aleación de cobre presentan una menor resistencia al desgaste debido a su alta elasticidad, tal desgaste no afecta su resistencia estructural, dureza y durabilidad, siendo similares a las herraduras de hierro, lo que les confiere grandes cualidades para ser utilizadas en cualquier tipo de terreno o ejemplar. Asimismo, al no presentar ningún tipo de daño estructural, queda demostrado que esta innovadora herradura a base de cobre, presenta una alta resistencia a distintas tensiones y una buena tenacidad, por lo que puede ser utilizada en igualdad de condiciones que el hierro.

Las herraduras de aleación de cobre son completamente adaptables a una condición de herraje especial o a un uso ortopédico, pudiendo de esta forma corregir problemas de conformación, manejos terapéuticos o adaptarse a la función que desempeña el ejemplar.

Dentro de las ventajas adicionales que poseen las herraduras de aleación de cobre destacan su reciclabilidad. Estas herraduras son 100% reciclables con retribución económica a la devolución, disminuyen los costos por patologías asociadas al casco, eliminan en un 99%

bacterias y hongos en el corto plazo disminuyendo el tiempo del equino fuera de su actividad deportiva, tienen la propiedad de atenuación de impacto y son una aleación única en el mundo (patentado en Chile y en el exterior) (Codelcoeduca, 2011). Además contribuye a la protección del medio ambiente, debido a que el herraje en caliente requiere una menor aplicación térmica que el hierro (450° v/s 750° C), lo que influye favorablemente en la reducción de la huella de carbono hacia el ambiente. Asimismo presenta una alta maleabilidad, flexibilidad y resistencia, por lo que pueden ser trabajadas en frío, sin que ello implique una menor resistencia estructural respecto al hierro tradicional, logrando una notable economía de tiempo con cada herraje y una notable mejoría en la calidad de éstos al permitir una mejor adaptación de la herradura al casco. Además, los cascos se vuelven más duros, con mayor consistencia y menor cantidad de humedad, por lo que facilitan el despalme y previenen futuras patologías del casco.

Todas estas características permiten que las herraduras de aleación de cobre puedan ser utilizadas en distintas disciplinas ecuestres como la hípica, enduro, rodeo, polo, mejorando las condiciones de vida de los equinos y prolongando de esta manera su vida útil (Codelcoeduca, 2011).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **ANÓN.** Medida el Coeficiente de Restitución. Departamento de Física y Química [paper]. IES Nueve Valles. España. 2006: 1-3.

- **ARDILA, W; CHAVES, J; QUINTERO, E.** Simulación de un sistema masa resorte amortiguador con circuitos electrónicos [paper]. Scientia Et Technica. 2009 Ago; 42(5): 220-225.

- **BACK, W.** The Role of the Hoof and Shoeing. **In:** Back, W; Clayton, H. Equine Locomotion. USA: W.B. Saunders, 2001. p. 135-166.

- **BAEZA, E.** Análisis descriptivo del herraje y calificación del pie de equinos fina sangre chilenos en la provincia de Ñuble [memoria de título]. Universidad de Concepción. Fac. de Cs. Agronómicas, Veterinarias y Forestales. Departamento de Med. Vet. Chillan, Chile, 1992.

- **BERRÍOS, A; MARTÍNEZ, R; PEREDO, A; BAEZA, E.** Errores técnicos en el herraje de equinos fina sangre chilenos en la provincial de Ñuble, Chile. Avances en Ciencias Veterinarias. 1995 [citado el 12 de mayo 2011]; 10(1): [alrededor de 1p.]. Disponible en: <http://www.revistas.uchile.cl/index.php/ACV/article/viewArticle/10445/10501>

- **CENTRO ESPAÑOL DE INFORMACIÓN DEL COBRE (CEDIC).** El Cobre: la elección profesional [paper]. Providencia, Santiago. 2007 Dic: 1-24.

- **CLAYTON, H.** Ground Reaction Forces. The Dinamic Horse: A Biomechanical Guide to Equine Movement and Performance. Michigan, USA: Sport Horse Publications, 2004. p. 195-216.

- **CODELCOEDUCA.CL** [Internet]. Usos del cobre. 2011 [actualizado el 12 de febrero del 2011, citado el 05 de abril del 2011]. Disponible en: <https://www.codelcoeduca.cl/cobre/ usos/ usos.asp>

- **GUTIÉRREZ, A.** Modelamiento de la Pisada de un Caballo. Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile. 2011: 1-5.

- **HOUGHTON, J; PILLINER, S; DAVIES, Z.** Routine Healthcare. **In:** Horse and Stable Management. Oxford, Australia: Blackwell Publishing, 2003. p. 48-61.

- **JIMÉNEZ, J.** Los Materiales Metálicos [paper]. 2006: 1-24.
- **MARTÍNEZ, P; AZUAGA, M.** Medición del modulo de elasticidad de Young [paper]. Laboratorio IV, Departamento de Física, UBA. 1997: 1-11.
- **MYERS, J.** Hoof care. **In:** Managing Horses on Small Properties. Oxford, Australia: Landlinks, 2005. p. 28-32.
- **O`GRADY, S.** Basic Farriery for the Performance Horse [paper]. Vet Clin Equine. 2008; 24: 203-218.
- **PÉREZ, C; MUNERA, R; RAMIREZ, D.** Medición de la constante de un resorte por el método de las oscilaciones [paper]. Laboratorio de Física, Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 2005: 1-4.
- **PROCOBRE. ORG** [Internet]. Chile: Procobre: Connects Life, Inc.; c2007-08 [actualizado el 30 de enero del 2008, citado el 14 de junio del 2011]. Disponible en: http://www.procobre.org/procobre/acerca_de_l_cobre/pu_salud_06.html
- **RIVAS, P; ACUÑA, M; FIGUEROA, A; TRONCOSO, M; RUIZ, M; FIGUEROA, G.** Estudio de la Actividad Antimicrobiana de Herraduras de Cobre en la Patología Infecciosa del Casco del Caballo. XXV Congreso Chileno de Microbiología. Antofagasta, Chile. 2003 Nov 24-28.
- **RODRÍGUEZ, B.** Propiedades del Hierro [paper]. 2007: 1-3.
- **SANCHO, X** [Internet]. Coeficiente de amortiguamiento. 2010 [actualizado el 20 de diciembre del 2010, citado el 26 de octubre del 2011].. Disponible en: http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/coeficiente_de_amortiguamiento.htm
- **STASHAK, T; HILL, C; KLIMESH, R; OVNICEK, G.** Rebajado y Herrado para el Equilibrio y Salud del Casco. **In:** Stashak, T. Adeams: Claudicación en el Caballo. 5ªed. Buenos Aires, Argentina: Inter-médica, 2004. p. 1163 – 1242.
- **THOMASON, J.** Review of Some Past, Present and Possible Future Directions in Biomechanics of the Equine Hoof [paper]. IVIS. 2009: 1- 27.

Anexo 1

Módulo de elasticidad (E): es la razón entre el incremento de presión (fuerza) y el cambio correspondiente a la deformación del material (Martínez y Azuaga, 1997).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

E = módulo de elasticidad

σ = presión (fuerza) ejercida sobre el área de sección transversal del objeto (ensayo de tracción)

ϵ = deformación unitaria

F= fuerza

S= superficie (área)

ΔL = variación de la longitud

L= longitud a determinada fuerza

Sistema masa resorte amortiguador: es el estudio del movimiento de una masa unida a un soporte a través de un resorte y de un amortiguador, para el análisis de sistemas dinámicos (Ardila *et al.*, 2009).

$$\mathbf{F} = \mathbf{kx} + \mathbf{cv} \quad \text{ó} \quad m \mathbf{x}''(t) = \mathbf{k} \mathbf{x}(t) + \mathbf{c} \mathbf{x}'(t)$$

F= fuerza de impacto

k= constante de rigidez

x= desplazamiento de coordenadas

c= coeficiente de amortiguación

v (x'(t))= velocidad

m= masa en movimiento

x''(t)= aceleración

Coefficiente de restitución: es la razón entre la velocidad relativa de alejamiento (final), y la velocidad relativa de acercamiento (inicial) del choque entre dos cuerpos, cuya diferencia es la energía absorbida (Anón, 2006).

$$e = -\frac{V_{2f} - V_{1f}}{V_{2i} - V_{1i}}$$

e= coeficiente de restitución

Vf(2,1)= velocidades de los cuerpos después del choque

Vi (2,1)= velocidades de los cuerpos antes del choque

Constante de rigidez: es la cuantificación de la rigidez de un elemento bajo una determinada fuerza, sin adquirir grandes deformaciones (Pérez *et al.*, 2005).

$$K = \frac{EA}{L}$$

K= constante de rigidez

E= módulo de elasticidad

A= diámetro

L= longitud

Constante de amortiguación: es la cuantificación de la amortiguación de un cuerpo bajo una determinada fuerza (Sancho, 2010).

$$C = 2 \sqrt{m_{red} \times k}$$

C= coeficiente de amortiguación

mred= masa reducida

k= constante de rigidez

