

**Comparación de dos diseños de perfil de amortiguación
subsuperficial en superficies ecuestres de arena y césped:
influencia en las propiedades funcionales.**

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

María Alejandra Blanco

Ingeniera Agrónoma- Universidad de Buenos Aires-1993

Lugar de trabajo: Grass & Horses y Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias.
Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA)



FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano



Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis:

Michael “Mick” Leroy Peterson

B.S. Mechanical Engineering, General Motors Institute.
M.S. Theoretical and Applied Mechanics, Northwestern University.
Ph.D. Theoretical and Applied Mechanics, Northwestern University.

Consejero:

Miguel Angel Taboada

Ingeniero Agrónomo. Universidad de Buenos Aires
Magister Scientiae en Ciencias del Suelo. Universidad de Buenos Aires.
Doctor en Eco y Agrosistemas. Institut National Polytechnique de Toulouse

JURADO DE TESIS

Filipe Behrends Kraemer

Ingeniero Agrónomo. Universidad de Buenos Aires
Doctor en Ciencias Agropecuarias. Universidad de Buenos Aires.

Silvia del Carmen Imhoff

Ingeniera Agrónoma. Universidad Nacional del Litoral
Ph.D. en Suelos y Nutrición de Plantas. Universidad de Sao Paulo

Pablo Ignacio Trigo

Médico Veterinario. Universidad Nacional de La Plata
Doctor en Medicina y Sanidad Animal. Universidad de Córdoba, España.

Fecha de defensa de la tesis:

22/11/2024

DEDICATORIA

A los nobles compañeros de cuatro patas, los caballos y a los dedicados cuidadores que, con amor y esfuerzo, hacen posible su grandeza. Esta tesis está dedicada a ustedes, seres extraordinarios que han sido mi fuente de inspiración a lo largo de este viaje académico.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Juan, mi compañero de vida y a mi hija Clara, quienes a través de su constante aliento, comprensión e inspiración me ayudaron a perseguir mis metas.

A Mick que generosamente me mostró el camino para darle forma a mis ideas, gracias por inspirarme y apoyarme para alcanzar nuevas perspectivas.

Un reconocimiento especial se dirige a Miguel Taboada, cuya destacada habilidad para adaptarse a nuevas áreas del conocimiento merece especial mención. Su valioso respaldo ha sido fundamental en la orientación y abordaje de cada fase en mi camino como tesista en la EPG. Agradezco sinceramente su apoyo constante y su enfoque experto en este proceso académico.

Al Dr. Marcelo Soria por su colaboración durante la pandemia.

Agradezco al Dr. Pablo Cipriotti por su inestimable contribución en metodología estadística, fortaleciendo este trabajo y beneficiando futuros artículos. Su entusiasmo y dedicación en la enseñanza han enriquecido mi desarrollo académico.

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

María Alejandra Blanco

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Blanco, M.A., Hourquebie, R., Dempsey, K., Schmitt, P., Peterson, M. (2021) An Experimental Comparison of Simple Measurements Used for the Characterization of Sand Equestrian Surfaces. *Animals* 11, 2896. <https://doi.org/10.3390/ani11102896>.

Blanco, M.A., Di Rado, F.N., Peterson, M. (2023). Warm Season Turfgrass Equine Sports Surfaces: An Experimental Comparison of the Independence of Simple Measurements Used for Surface Characterization. *Animals* 13, 811. <https://doi.org/10.3390/ani13050811>

INDICE GENERAL

INDICE DE CUADROS.....	XII
INDICE DE FIGURAS.....	XVII
ABREVIATURAS.....	XXV
RESUMEN.....	XXVI
ABSTRACT.....	XXVII
Capítulo I: Introducción general	1
1.1 Motivación:	2
1.2. Biomecánica de la superficie y el pie equino:.....	5
1.3. Galope	6
1.4 Otras tecnologías y otros aires:	9
1.5 Investigación previa en Superficies	10
1.6 Descripción general de la tesis.....	19
1.7 Organización de los Capítulos	20
Hipótesis general:	24
Capítulo II.....	24
Capítulo III.....	25
Capítulo IV.....	26
Capítulo V	27
1.8 Referencias:.....	28
Capítulo II: Comparación experimental de mediciones sencillas utilizadas para la caracterización de superficies ecuestres de arena.	29

2.1. Introducción	30
2.1.1 Motivación para mediciones horizontales y verticales	31
2.1.2 Herramientas más pequeñas propuestas.....	32
2.1.3 Otros dispositivos pequeños.....	34
2.1.4 Factores críticos	35
2.2 Objetivo.....	36
2.3 Hipótesis.....	37
2.4 Materiales y métodos	38
2.4.1 Diseño del estudio.....	38
2.4.2 Cajas de prueba:	40
2.4.3 Medición in situ de las cajas de ensayo:	42
2.4.4 Sonda con sensor de dos ejes Going Stick:.....	43
2.4.5 El dispositivo de medición de impacto (ITD).....	45
2.4.6 Medidor de tracción rotacional (ASTM F2333-04).	46
2.4.7 Sonda de humedad:	48
2.5 Análisis estadístico.....	48
2.6 Resultados	49
2.6.1 Going Stick.....	49
2.6.2 Dispositivo de prueba de impacto	51
2.6.3 Dispositivo ASTM de Tracción rotacional:	53
2.6.4 Medidor de humedad:	54
2.7 Discusión.....	55

2.8 Conclusiones	60
Capítulo III: Superficies deportivas ecuestres de césped de especies megatérmicas: comparación experimental de la independencia de mediciones simples utilizadas para la caracterización de superficies.	62
3.1 Introducción	63
3.2 Objetivos:	66
3.3 Hipótesis:.....	67
3.4 Materiales y métodos:	67
3.4.1 Visión general	67
3.4.2 Diseño del estudio	68
3.4.3 Medición in situ de cajas de prueba	70
3.5. Análisis estadístico.....	74
3.6 Resultados	75
3.6.1 Medición in situ en cajas de prueba	75
3.6.2 Sonda de humedad	75
3.6.3 Tracción rotacional.....	77
3.6.4 Dispositivo de prueba de impacto	77
3.6.5 Penetrómetro de cono.....	78
3.6.6 Going Stick.....	78
3.7 Discusión.....	79
3.8 Conclusiones	84

Capítulo IV: Comparación experimental de una superficie de arena con área elástica mediante una prueba biomecánica y una herramienta simple que utiliza el método track-in-a box o pista en caja.....	86
4.1 Introducción:	87
4.2 Objetivos:	90
4.3 Hipótesis:.....	90
4.4 Métodos:.....	91
4.5 Análisis estadístico:.....	96
4.6 Resultados:	97
4.6.1 Clegg Hammer:	100
4.6.2 Medidor Biomecánico de Superficies Orono (OBST)	101
4.7 Discusión:.....	108
4.8 Conclusión:	110
Capítulo V: Conclusión y Discusión.....	113
5.1 Discusión:.....	114
5.1.1 Ensayo de cajas in situ de arena:.....	114
5.1.2 Ensayo de cajas in situ de césped.....	116
5.1.3 Track-in-a-box y OBST	117
5.2 Conclusión.....	119
Referencias.....	122
Apéndice A:	144
Apéndice B.....	150

Calibración del Going Stick.....	151
Apéndice C.....	155
Ensayo de disponibilidad agua-aire CEN EN-13041.....	156
Apéndice D.....	159
Apéndice E.....	¡Error! Marcador no definido.
Amortiguación total por cada % CVH para cada lanzamiento - 1er lanzamiento	164
Amortiguación total por cada % CVH para cada lanzamiento - 2do lanzamiento ...	165
Amortiguación total por cada % CVH para cada lanzamiento - 3er lanzamiento	166

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1: Metodología general de los capítulos 2,3 y 4, Se describen las etapas, las diferencias metodológicas respecto al método de testeo y de instrumentos utilizados. Todas las arenas utilizadas se caracterizan por el método adoptado por FEI. En los dos primeros capítulos se realizan mediciones con instrumentos de medición livianos en cajas armadas según la norma de construcción y en el cuarto se utiliza el método estandarizado por el RSTL track-in-a-box específicamente para testear materiales cuyo destino serán las pistas de carrera o de equitación, se utiliza el OBST un instrumento pesado y complejo que es el estándar vigente de la industria en América del Norte, Europa y Asia y un instrumento liviano como el Clegg Hammer.	20
Cuadro 1.2: Descripción y organización de la tesis. Detalle de objetivos generales y específicos.	22
Cuadro 2.1: Descripción de los 2 ³ tratamientos del diseño experimental. geotextil: G1: Sin geotextil, G2: con 2 kg por m ² ; drenaje: D1: sin paquete drenante, D2: con paquete drenante descrito en los métodos. Humedad: M1: Humedad gravimétrica baja (11,16%± 2,93 CVH), M2: Humedad gravimétrica alta (21,69% ± 3,90 CVH)	40
Cuadro 2.2: Valores F y p de los factores principales, Humedad, Drenaje y Adición de Geotextil sobre las variables obtenidas del Going Stick: GSP (penetración) y GSS (tracción) y de las interacciones.....	50
Cuadro 2.3: Coeficientes de regresión (R ²), constante y significación de cada modelo lineal para cada variable obtenida del Going Stick: GSP (penetración), GSS (tracción),	50
Cuadro 2.4: Valores de F y p para los factores principales sobre ITI (F y p-valor), media y desvío estándar (en m) en los tres factores Humedad, Drenaje y agregado de Geotextil y de las interacciones.....	52

Cuadro 2.5: Coeficientes de regresión (R^2), constante y significación de cada modelo lineal para cada variable ITI (Índice de Impacto).	53
Cuadro 2.6: Valores de F y p para los factores principales sobre RPS (Pico máximo de tracción rotacional), media y desvío estándar en los tres factores Humedad, Drenaje y agregado de Geotextil y para las interacciones.	53
Cuadro 2.7: Coeficientes de regresión (R^2), constante y significación de cada modelo lineal para RPS (Pico de Tracción Rotacional).....	54
El Contenido Volumétrico de Humedad (%CVH) fue significativamente diferente para los tratamientos de Humedad, M1:10.20 \pm 2.41; M2: 25.08 \pm 4.39 $p < 0.0001$ (Cuadro 2.7). Las interacciones entre los factores no fueron significativas.	54
Cuadro 2.8: Valores de F y p para los factores principales sobre CVH (f y p-valor), media y desvío estándar en los tres factores Humedad, Drenaje y agregado de Geotextil.....	55
Cuadro 2.9: Coeficientes de correlación de Pearson (r) de cada una de las variables GSP (resistencia a la penetración por GS), GSS (resistencia a la tracción longitudinal por GS), ITI (índice de impacto por ITD), RPS (Pico de tracción rotacional) y CVH (Contenido volumétrico de humedad por TDR).....	55
Cuadro 3.1: Índice de condición proporcionado por Going Stick®.....	74
Cuadro 3.2: Correlaciones de los coeficientes de Pearson r y p para cada variable CVH (%), SCP y GSI en los tratamientos. (*) diferencia significativa.	75
Cuadro 3.3: Valores H y p del CVH (%) (Contenido volumétrico de humedad), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis $p < 0,05$ prueba estadística H.....	76
Cuadro 3.4: Valores f y p del RPS (Pico máximo de tracción rotacional), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables paramétricas: $p < 0,05$ Test de Tuckey.	77

Cuadro 3.5: Valores f y p del ITI (Índice de Impacto), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables paramétricas: $p < 0.05$ Test de Tuckey..... 77

Cuadro 3.6: Valores H y p del SCP (Penetrómetro de Cono), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis $p < 0,05$ prueba estadística H. 78

Cuadro 3.7: Valores H y p del GSI (Índice del Going Stick), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis $p < 0,05$ prueba estadística H. 79

Cuadro 4.1: Resumen de las normas ASTM en uso para CH, detalle de los equipos, objetivo y datos reportados..... 94

Cuadro 4.2: Organización de tratamientos y repeticiones..... 96

Cuadro 4.3: ANVA: $p < 0.05$ prueba estadística f. Se probaron distintos % de CVH (20%, 23% y 25%) con (CP) y sin pad (SP). Para variables no paramétricas (CIV-ASTMD5874-16, ASTM-D1936-07 e Impulso) $p < 0.01$ prueba estadística H..... 98

Cuadro 4.4: Media y desviación estándar para cada combinación de factores de humedad y presencia o ausencia de Pad. (Los tratamientos de humedad son: 20, 23 y 25 % de CVH y los tratamientos de pad: SP, sin pad y CP, con pad, del Valor de Impacto de Clegg Hammer (CIV, coeficiente de impacto Clegg, expresada en tres Normas ASTM) y 8 variables obtenidas por el OBST. Los valores de desaceleración (Max_Ay=Máxima aceleración vertical, Max_Ah=Máxima aceleración horizontal) se reportan como positivos. (Max_Lv=Máxima fuerza vertical, Lv_tasa de carga=tasa de carga en el eje vertical, Max_Lh=Máxima fuerza en el eje horizontal. Letras diferentes indican diferencias significativas para $p < 0,01$ 99

Cuadro 4.5: Coeficientes de correlación de Pearson de las variables obtenidas del CIV de los tres estándares y de las variables del OBST. Se eliminaron las correlaciones

de las variables del OBST entre sí mismas por provenir del mismo equipo. Valores significativos a $p < 0.05$ 100

Cuadro 5.1: (+) o (-) significa detección del tratamiento M: Contenido de humedad, D: Paquete Drenante, G: Geotextil. Interacciones significativas: D x G: interacción de Paquete Drenante x Geotextil agregado, M x G: interacción Contenido de humedad x Geotextil, M x D x G: interacción Contenido de humedad x Paquete Drenante x Geotextil agregado. 116

Cuadro 5.2: (+) o (-) significa detección de los tratamientos D: Paquete drenante, G: Geotextil. B: F: fechas. Interacciones significativas: D x G: Paquete drenante x agregado de geotextil, D x F: interacción Paquete drenante x Fechas, G x F: Interacción agregado de geotextil x fechas, D x G x F: Interacción paquete drenante x agregado de geotextil x fechas..... 117

Cuadro 5.3: (+) o (-) significa detección de los tratamientos. H: Humedad CVH 20%, 23% y 25%, SP/CP: Sin pad y con pad. CVH % x SP/CP interacción del CVH % y el uso de pad. Estas variables están descritas en la Cuadro 4.3 del Capítulo IV. 119

Cuadro A1: Ficha Técnica de Geo Mesh (GN 900). 145

Cuadro A2: Ficha técnica de Geotextil tejido 150 de Poliéster..... 145

Cuadro A3: Descripción de la arena* basado en el porcentaje de arena, limo y arcilla en cada muestra. 146

Cuadro A4: Distribución de tamaño de partículas*..... 146

Cuadro A5: Clasificación* de arena por comparación de la distribución de grava, arena, limo y arcilla de la muestra. 147

Cuadro A6: Análisis XRD que muestra la composición mineral de la arena.. 147

Cuadro B1: Resultados de la verificación de la fuerza aplicada al extremo de la sonda del Going Stick usando el equipo de calibración para la fuerza de penetración. (UI: Unidades Imperiales, SI: Sistema Internacional). 152

Cuadro B2: Resultados de la variación de la fuerza aplicada al extremo de la sonda del Going Stick utilizando el equipo de calibración, para el modo de ingeniería. (UI: Unidades Imperiales, SI: Sistema Internacional).	152
Cuadro B3: Resultados de la verificación del torque aplicado al extremo de la sonda del Going Stick usando el equipo de calibración para la fuerza de tracción.	153
Cuadro B4: Resultados de la variación del par aplicado a lo largo de la sonda del Going Stick usando el equipo de calibración. (UI: Unidades Imperiales, SI: Sistema Internacional).	153
Cuadro C1: Cuadro de comparación de medias. PT o 0 hPa: Porosidad Total; CRA o 10 hPa: Capacidad de retención de agua; ADD o 100 hPa: Agua difícilmente disponible; AFD: Agua fácilmente disponible; AR: Agua de reserva; CA: Capacidad de aireación; Dd: Densidad en seco (kg/m ³). Diferencia significativa de la prueba T $p < 0.05$. Asterisco significa diferencias significativas entre medias.	156
Cuadro D1: Porcentaje de arena, limo y arcilla en cada muestra según la escala de tamaño de grano de Wentworth.....	160
Cuadro D2: Distribución del tamaño de partículas, el contenido orgánico y el contenido de humedad de cada muestra.	160
Cuadro D3: Distribución de grava, arena, limo y arcilla de cada muestra según la clasificación de textura del suelo del USDA.....	160
Cuadro D4: Análisis de difracción de rayos X (XRD) que muestra la composición mineral de la arena.	161

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Estados de las fases del paso, la flecha de puntos indica la desaceleración y la flecha llena la fuerza o carga, la longitud de las flechas indican la magnitud del parámetro. A: concusión, B: deslizamiento y frenada, C: apoyo (fuerza), D: impulsión..... 7

Figura 1.2: Movimientos típicos de rotación longitudinal y rotacional del casco de un caballo vistos lateralmente a) impacto primario, b) impacto secundario y c) despegue en los que ocurre: rotación en el eje perpendicular al sentido de avance y paralelo al suelo y deslizamiento. d) Vistas frontales y c) solares del casco: rotación de rol y rotación alrededor del eje vertical perpendicular al suelo (Tomado de Lewis et al., 2015 y traducido por MAB)..... 11

Figura 1.3: Modo de operación del Going Stick. El operador hinca el instrumento en el suelo, al penetrar el suelo mediante la fuerza ejercida en A, registra resistencia a la penetración; luego el operador inclina el mango 45 ° hacia el punto B, aquí registra tracción longitudinal..... 12

Figura 1.4: Diagrama de flujo que ilustra la secuencia de análisis realizados para la caracterización de una muestra de arena destinada a uso ecuestre adoptadas por la FEI. El proceso comienza con la determinación del contenido de humedad gravimétrica y todas las determinaciones que están en la caja 1. Según el tipo de muestra, se sigue uno de dos caminos: las muestras sintéticas o enceradas, y las muestras de arena pura (opción No) en la que avanzan directamente a la separación y determinación de materia orgánica, seguidas de la distribución del tamaño de partículas mediante hidrómetro, tamices y difracción láser, y luego a la microscopía y análisis mineralógico por difracción de rayos X. Las mezclas de arena y fibras pasan primero por un proceso de separación; la fracción fibrosa se analiza mediante FTIR (espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier)

y la fracción arenosa sigue el mismo camino que la arena pura. Las muestras de arena encerada se someten a una extracción Soxhlet y cromatografía de gases para identificar la cera, y luego siguen el mismo proceso que las mezclas de arena con fibras. 17

Figura 1.5: A la izquierda de la imagen el OBST montado sobre una camioneta y a la derecha el Clegg Hammer ambos sobre la misma superficie..... 27

Figura 2.1: Esquema de distribución de cajas según el material del espesor de amortiguación superior compuesto por arena (G1) o arena con geotextil (G2) sobre tosca (D1) o sobre paquete drenante (D2) y combinaciones de ambos tratamientos (D1G1, D1G2, D2G1, D2G2). 39

Figura 2.2: Esquema de la disposición de las capas del paquete drenante. Consiste en una capa de geotextil no tejido de 150 micrones dispuesto sobre una capa de geomalla de polietileno de alta densidad denominada Geonet (GN 900) y ésta sobre una capa adicional de geotextil no tejido de 150 micrones. 39

Figura 2.3: Esquema del diseño de cajas que incluye la profundidad del material del espesor superior que consiste en arena (G1) o arena con geotextil (G2) sobre tosca compactada (D1) o sobre paquete drenante (D2). 41

Figura 2.4: Imagen del pisón, masa de 4 kg lanzada tres veces desde una altura de 0,30 m sobre un área de 0,20 m por 0,17 m. 41

Figura 2.5. Sonda de sensor de fuerza de dos ejes (Going Stick). 43

Figura 2.6. Dispositivo de medición de impacto autoconstruido (ITD) para operar de manera análoga al dispositivo descrito en ASTM D5874-16. 46

Figura 2.7. Medidor de tracción rotacional (ASTM F2333-04). 48

Figura 2.8: Penetración (GSP en N) medida con el Going Stick. Valor medio y desvío estándar de la interacción humedad x geotextil de los tratamientos M1G1: CGH fue 11,16 % \pm 2,93 sin geotextil; M2G1: CGH 21,60 % \pm 10,90 sin geotextil; M1G2: CGH fue 11,16 % \pm 2,93 con 2 kg/m² de geotextil; M2G2: CGH 21,60 % \pm 10,90 con 2

kg/m² de geotextil. Las letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas $p < 0,0395$. Los tratamientos con Geotextil mostraron un valor de resistencia a la penetración mayor. 51

Figura 2.9. Valor de impacto registrado con el ITD medido como deformación (en m). Valor medio y desvío estándar de la interacción drenaje y geotextil para ITD de los tratamientos D1G1: sin paquete drenante y sin geotextil; D2G1: con paquete drenante y 2 kg/m² de geotextil; D1G2: sin paquete drenante y 2 kg/m² de geotextil; D2G2: con paquete drenante y 2 kg/m² de geotextil. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p < 0,0156$. Los tratamientos con paquete drenante y/o geotextil mostraron mayor deformación. 52

Figura 2.10. Valor del pico máximo de tracción rotacional (RPS) medido con el dispositivo según ASTM F2333-04 en Nm. Valores medios y desvío estándar de la interacción drenaje, humedad y geotextil de los tratamientos M1D1G1: CGH fue 11,16 % \pm 2,93, sin paquete drenante y sin geotextil; M1D1G2: CGH fue 11,16 % \pm 2,93, sin paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil; M1D2G1: CGH fue 11,16 % \pm 2,93 con paquete drenante y sin geotextil; M2D1G1: CGH 21,60 % \pm 10,90 sin paquete drenante y sin geotextil; M2D1G2: CGH 21,60 % \pm 10,90 sin paquete drenante con 2 kg/m² de geotextil; M2D2G1: CGH fue 21,60 % \pm 10,90 con paquete drenante y sin geotextil; M2D2G2: CGH fue 21,60 % \pm 10,90 con paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas. $p < 0,0498$. Los tratamientos con geotextil presentaron los valores mayores de RPS. 54

Figura 2.11: Síntesis de los resultados hallados en el capítulo. En las cajas en colores se hallan los factores: humedad: 2 niveles (CVH % 10% y 21 %), Geotextil, 2 niveles (sin y con) y paquete drenante dos niveles (sin y con). En las cajas blancas intermedias se hallan los instrumentos, Going Stick, ITD y RPS, y en las cajas de la última línea se hallan las propiedades mecánicas: las variables obtenidas del Going Stick: GSP

(Resistencia a la penetración) y GSS (Resistencia a la tracción longitudinal), ITD (Dispositivo de Impacto) y RPS (Pico de tracción rotacional). Las flechas enteras indican efecto principal, y las de línea partida interacción de factores. Las flechas negras grandes en la última línea de cajas indica el aumento de la propiedad medida como consecuencia del agregado de geotextil, o humedad o paquete drenante. El número de flechas indica la capacidad de detección de más factores por parte del instrumento. 62

Figura 3.1. Esquema del diseño de las cajas, incluida la profundidad del material del espesor de amortiguación superior que consiste en arena (G1), o arena con geotextil ($G2 = 2 \text{ kg por m}^2$) sobre tosca compactada (D1) o sobre paquete drenante (D2). 69

Figura 3.2. Uno de los miembros del equipo parado sobre las cajas de césped en el momento de la prueba de RPS (3 de marzo de 2018), ©2018 María Alejandra Blanco. 72

Figura 3.3: Penetrómetro de cono con un martillo de 2 kg (detallado en el círculo a la derecha), que se desplaza sobre los 0,5 m superiores de un eje de 1 metro y golpea una masa situada a 0,5 m del extremo inferior. El peso total del eje y de la masa de apoyo es de 3,5 kg. El peso total del instrumento es 5,5 kg. El extremo inferior tiene un cono de 0,02 m de diámetro en la base y 0,015 m de altura. El tamaño del cono se define según el tipo de suelo, en este caso se consideraron las dimensiones descriptas para suelos arenosos. 73

Figura 3.4. Contenido Volumétrico de humedad medido con TDR. Valor medio y desvío estándar de la interacción fecha x drenaje x geotextil para el contenido volumétrico de humedad (% CVH) para los tratamientos F1D1G1: 3 de marzo, sin paquete drenante y sin geotextil; F1D2G1: 3 de marzo con paquete drenante y sin geotextil; F1D1G2: 3 de marzo, sin paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil; F1D2G2: 3 de marzo, con paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil; F2D1G1: 30 de marzo, sin paquete drenante y sin geotextil; F2D2G1: 30 de marzo, con paquete drenante

y sin geotextil; F2D1G2: 30 de marzo, sin paquete drenante con 2 kg/m² de geotextil; F2D2G2: 30 de marzo, con paquete drenante con 2 kg/m² de geotextil. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p < 0,0001$ 76

Figura 3.5. Índice de Going Stick. Valor medio y desvío estándar de la interacción fechas × drenaje × geotextil para el Índice Going Stick (GSI) F1D1G1: 3 de marzo sin paquete drenante y sin geotextil; F1D1G2: 3 de marzo sin paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil; F1D2G1: 3 de marzo con paquete drenante y sin geotextil; F1D2G2: 3 de marzo con paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil.; F2D1G1: 30 de marzo, sin paquete drenante y sin geotextil; F2D2G1: 30 de marzo, con paquete drenante y sin geotextil; F2D2G2: 30 de marzo, con paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil. 79

Figura 3.6: Síntesis de los resultados hallados en el capítulo. En las cajas en colores se hallan los factores: Geotextil: 2 niveles (sin y con), paquete drenante dos niveles (sin y con), fechas: 3 de marzo de 2018 y 30 de marzo 2018. En las cajas blancas intermedias se hallan los instrumentos, Going Stick, SCP, ITD y RPS, y en las cajas de la última línea se hallan las propiedades mecánicas: las variables obtenidas del Going Stick: GSP (Resistencia a la penetración) y GSS (Resistencia a la tracción longitudinal), SCP: resistencia a la penetración, ITD (Dispositivo de Impacto) y RPS (Pico de tracción rotacional). Las flechas enteras indican efecto principal, y las de línea partida interacción de factores. Las flechas negras grandes en la última línea de cajas indica el aumento de la propiedad medida como consecuencia del agregado de geotextil, o presencia de paquete drenante o paquete drenante. El número de flechas indica la capacidad de detección de más factores por parte del instrumento. 86

Figura 4.1. Vista de la cara adaxial, abaxial y espesor del pad colocado sobre la base de la caja del Titb. (Racing Surfaces Testing Laboratory). 92

Figura 4.2: Dispositivo martillo Clegg a la izquierda y a la derecha detalle del display del datalogger. 93

Figura 4.3: Medidor biomecánico de superficies ORONO (Orono Biomechanical Surface Tester)..... 95

Figura 4.4: Valor de Impacto Clegg (CIV) medido con el Clegg Hammer. Media y desvío estándar de los Valores de Impacto de Clegg (CIV) según norma ASTM F5874-16 para los tratamientos SP 20% CVH: sin pad y con 20 % de CVH; CP 20% CVH: con pad y 20 % CVH; SP 23 % CVH: sin pad y con 23 % de CVH; CP 23 % CVH: con pad y 23 % de CVH; SP 25 % CVH: sin pad y con 25 % de CVH y CP 25 % CVH: con pad y 25 % de CVH. Los valores de desaceleración se informan como positivos. $p < 0.0001$ 101

Figura 4.5: Media (95 % del intervalo de confianza) de la firmeza del impacto (Max_Av) de las lecturas de OBST para tres lanzamientos en seis ubicaciones (repeticiones) en Titb cuando se probaron los seis tratamientos SP 20 %: sin pad y 20 % de CVH; SP 23 %: sin pad 23 % de CVH; SP 25 %: sin pad y 25 % de CVH; CP 20 %: con pad y 20 % de CVH; CP 23 %: con pad y 23 % de CVH y CP 25 %: con pad y 25 % de CVH..... 103

Figura 4.6: Fuerza o Carga vertical (Lv) del primer lanzamiento de la pesa del OBST en kN en función del tiempo en segundos, para el tratamiento de 20 % CVH de los tratamientos sin pad (SP) a) y con pad (CP) b). L del 1 al 6 indica las repeticiones, D1= primer lanzamiento de tres, en cada repetición. El área bajo la curva representa el impulso vertical..... 105

Figura 4.7: Promedio del impulso de 6 repeticiones calculado en kN.s para los tres lanzamientos (D1, D2, D3) de las combinaciones de los tratamientos de Humedad (20,23 y 25 CVH %) y ausencia de pad (SP) o con pad (CP)..... 106

Figura 4.8. Modelo de regresión II entre el valor de impacto de Clegg CIV (G) y la firmeza o pico máximo de la aceleración obtenida del OBST, Max_Av (G) 107

Figura 4.9: Modelo de regresión II entre el valor de impacto de Clegg CIV (G) y el pico máximo de fuerza horizontal (deslizamiento) obtenida del OBST Max_Lh (G) 108

Figura 4.10: Síntesis de los resultados hallados en el capítulo. En las cajas en colores se hallan los factores: Humedad: 3 niveles (20, 23 y 25 % CVH), PAD: dos niveles (sin y con). En las cajas blancas intermedias se hallan los instrumentos, OBST y Clegg Hammer, y en las cajas de la última línea se hallan las propiedades funcionales determinadas por el OBST: firmeza, amortiguación, agarre (o grip), devolución de la energía a partir de las propiedades mecánicas registradas: firmeza o Max_Av, Amortiguación o Max_Lv, Deslizamiento o Max_Lh e Impulso. Clegg Hammer: firmeza o absorción de impacto. Las flechas enteras indican efecto principal, y las de línea partida interacción de factores. Las flechas negras grandes en la última línea de cajas indica el aumento de la propiedad medida como consecuencia de la humedad o presencia de pad. El número de flechas indica la capacidad de detección de más factores por parte del instrumento. En la última línea se muestra la Correlación hallada entre la Firmeza del OSBT y la firmeza del Clegg Hammer. 112

Figura A1: Densidad aparente de arena silícica y adición de arena silícica y geotextil con contenido de humedad gravimétrica (kg/m^3). Línea azul arena silícica, línea marrón arena silícica + geotextil. 148

Figura A2: Densidad aparente de arena silícica y adición de arena silícica y geotextil ($2 \text{ kg}/\text{m}^2$) con contenido volumétrico de humedad (kg/m^3). Línea azul arena silícica, línea marrón arena silícica + geotextil. 148

Figura A3: El análisis FTIR muestra que las fibras son 100 % poliéster. Los picos que se encuentran en la longitud onda 2000 son de polvo. 149

Figura B1. Ajuste de la curva bajo el supuesto de linealidad para determinar el factor de conversión de los valores GS de penetración y tracción. 154

Figura C1. Gráfico de contenido volumétrico de humedad en función de distintas tensiones obtenido en la prueba de disponibilidad de agua de las muestras del espesor de amortiguación luego de los tratamientos con paquete drenante (D1: sin paquete drenante y D2: con paquete drenante) y adición de geotextil (G1: 0 adición y G2: 2 kg/m²). Diferencia significativa de la prueba T $p < 0,05$. PT o 0 hPa: Porosidad Total; CRA o 10 hPa: Capacidad de retención de agua; ADD o 100 hPa: Agua difícilmente disponible ; AFD: Agua fácilmente disponible; AR: Agua de reserva; CA: Capacidad de aireación. Letras diferentes indican diferencias significativas entre pares de medias para un mismo nivel de succión..... 158

Figura D1. Densidad aparente de arena silícica y adición de geotextil con contenido de humedad gravimétrico (kg/m³)..... 162

Figura D2. Densidad aparente de arena silícica y adición de geotextil con contenido de humedad volumétrico (kg/m³)..... 162

Figura E1. Amortiguación (Lv) a lo largo del tiempo (segundos) a), b) y c) seis ubicaciones (L₁₋₆) (repeticiones) del primer lanzamiento (D₁) sin pad al 20-23-25 % CVH, d), e) y f) seis ubicaciones (L₁₋₆) del primer lanzamiento (D₁) con pad a 20-23-25 % CVH. El área bajo la curve representa el impulso..... 164

Figura E2. Amortiguación (Lv) a lo largo del tiempo (segundos) a), b) y c) seis ubicaciones (L₁₋₆) (repeticiones) del segundo lanzamiento (D₂) sin pad al 20-23-25 % CVH, d), e) y f) seis ubicaciones (L₁₋₆) del segundo lanzamiento (D₂) con pad a 20-23-25 % CVH. El área bajo la curva representa el impulso..... 165

Figura E3. Amortiguación (Lv) a lo largo del tiempo (segundos) a), b) y c) seis ubicaciones (L₁₋₆) (repeticiones) del tercer lanzamiento (D₃) sin pad al 20-23-25 % CVH, d), e) y f) seis ubicaciones (L₁₋₆) del tercer lanzamiento (D₃) con pad a 20-23-25 % CVH. El área bajo la curva representa el impulso..... 166

ABREVIATURAS

ASTM- American Society for Testing and Materials

B1 y B2 – Indicación de bloques

CGH y CVH – Contenido Gravimétrico de Humedad y Contenido Volumétrico de Humedad

CH - Clegg Hammer

D1 y D2 – Indicación de ausencia 1, o presencia 2, de paquete drenante

G1 y G2 – Indicación de ausencia 1, o presencia 2 de geotextil

GS – Going Stick

GSI – Índice de Going Stick

GSP – Penetración de Going Stick

GSS – Tracción de Going Stick

ITD – Dispositivo de Prueba de Impacto

ITI – Índice de Impacto

M1 y M2 – Indicación de dos niveles de contenido de humedad

OBST – Medidor biomecánico de superficies “Orono”

SPC – Penetrómetro de Cono

RPS – Pico de tracción Rotacional

SP y CP – Indicación de ausencia, o presencia de pad

TDR - Medidor de Humedad por Reflectometría de Dominio del Tiempo

Titb – Track-in-a-box

RESUMEN

Comparación de dos diseños de perfil de amortiguación subsuperficial en superficies ecuestres de arena y césped: la influencia en las propiedades funcionales.

Uno de los factores menos explorados que afectan la seguridad de caballos y jinetes es la calidad de la superficie o pista. Esta tesis se centra en establecer las propiedades funcionales de superficies ecuestres de arena y césped, y caracterizarlas con herramientas simples para determinar parámetros de calidad en su construcción y mantenimiento. Los objetivos fueron: a) determinar las propiedades mecánicas de dos diseños de pistas de arena tipo punto elástico, b) evaluar las propiedades mecánicas de dos diseños de pistas de césped tipo punto elástico en dos momentos consecutivos, y c) identificar las propiedades funcionales de dos sistemas de pistas de arena, uno convencional y otro de área elástica. Se realizaron tres experimentos: dos en cajas de arena y césped, y un tercero utilizando el método Titb (track-in-a-box). En los primeros dos experimentos se emplearon instrumentos como Going Stick (GS), Dispositivo de Impacto (ITD), Medidor de Tracción Rotacional (RPS) y TDR para medir humedad. En las cajas de césped también se utilizó un penetrómetro de cono (PC). En el experimento Titb se usaron el Orono Biomechanical Tester (OBST) y el Clegg Hammer (CH), además del TDR para controlar la humedad. Los resultados en las cajas de arena mostraron que GS, RPS, ITD y TDR detectaron la presencia del paquete de drenaje, el contenido de humedad y la adición de geotextil. En las cajas de césped, TDR detectó la presencia del paquete de drenaje, SCP la adición de geotextil, y GS la interacción entre el geotextil y el paquete de drenaje. Estas herramientas, a pesar de sus limitaciones, podrían usarse para controlar la calidad en nuevas instalaciones o en el mantenimiento de pistas de arena. El OBST reveló cambios en las propiedades de la superficie de área elástica y mostró una correlación del Valor de Impacto de Clegg (CIV) con la firmeza, subrayando la necesidad de estandarizar su uso para obtener mediciones consistentes.

Palabras claves: equinos, arena, césped, herramientas portables, seguridad, bienestar animal.

ABSTRACT**Comparison of two designs for subsurface cushioning for sand and grass equestrian surfaces: The influence on functional properties.**

One of the least explored factors affecting the safety of horses and riders is the quality of the surface or track. This thesis focuses on establishing the functional properties of sand and grass equestrian surfaces and characterizing them with simple tools to determine quality parameters in their construction and maintenance. The objectives were: a) determine the mechanical properties of two elastic point type sand track designs, b) evaluate the mechanical properties of two elastic point type turfgrass track designs at two consecutive times, and c) identify the functional properties of two sand track systems, one conventional and the other elastic area. Three experiments were carried out: two in sand and grass boxes, and a third using the Titb (track-in-a-box) method. In the first two experiments, instruments such as Going Stick (GS), Impact Device (ITD), Rotational Traction Peak Shear (RPS) and TDR were used to measure humidity. A cone penetrometer (CP) was also used in the grass boxes. In the Titb experiment, the Orono Biomechanical Tester (OBST) and the Clegg Hammer (CH) were used, in addition to the TDR to control humidity. The results in the sandboxes showed that GS, RPS, ITD and TDR detected the presence of the drainage package, the moisture content and the addition of geotextile. In the turfgrass boxes, TDR detected the presence of the drainage package, SCP the addition of geotextile, and GS the interaction between the geotextile and the drainage package. These tools, despite their limitations, could be used to control quality in new installations or in the maintenance. The OBST revealed changes in elastic area surface properties and showed a correlation of Clegg Impact Value (CIV) with firmness, underscoring the need to standardize its use to obtain consistent measurements.

Key words: equine, sand, turfgrass, portable tools, safety, animal welfare.

Capítulo I: Introducción general

1.1 Motivación:

Para seguir utilizando caballos en el deporte, el público debe conocer que se protege su bienestar. Las expectativas sociales asociadas con el uso de cualquier animal en el deporte dependen del bienestar real y percibido de los atletas humanos y animales (Duncan et al., 2018). Para que el uso de caballos en el deporte continúe, se deben abordar cuestiones asociadas al bienestar animal (Heleski, 2023). La imperativa necesidad de avances en las superficies ecuestres se ve subrayado por la necesidad de cultivar y perpetuar el respaldo público a la participación equina en los deportes. El progreso sistemático en las condiciones de la superficie no sólo aumenta la experiencia ecuestre general, sino que también amplifica el conocimiento público sobre el papel fundamental de los entornos optimizados en el fomento del rendimiento atlético óptimo de los caballos. Estudios recientes sobre el efecto de las superficies deportivas en la salud y la tasa de lesiones de los atletas humanos han demostrado la importancia potencial de una superficie adecuada (Hewett et al., 2010; FIFA 2009).

Los altos costos de rehabilitación de lesiones de caballos relacionadas a las superficies, que luego de rehabilitados vuelven a las mismas superficies y se lesionan nuevamente genera un círculo vicioso que finalmente contribuye al engrosamiento del flujo de animales lesionados. Todo esto conlleva a la pérdida de animales para el circuito deportivo, al encarecimiento de los costos de mantenimiento de los equinos, al alejamiento de deportistas aficionados y a la pérdida progresiva de potenciales deportistas profesionales. En particular, las lesiones catastróficas no solo amenazan la vida del caballo y del jinete, sino que también representan un riesgo considerable para la continuidad de los deportes equinos debido a la creciente sensibilidad pública hacia el bienestar animal (Heleski, et al., 2020; Heleski, 2023).

Si bien la industria equina ha mostrado avances significativos en genética, entrenamiento y nutrición, ha habido menos avances en el diseño de superficies. A diferencia de estos otros ámbitos, las superficies para deportes ecuestres han sido considerado desde hace poco tiempo. Este descuido se debe, al menos en parte, se debe a la alta carga y velocidad de un caballo. Las evaluaciones realizadas con cargas más bajas y con tasas de carga bajas no han replicado características importantes de la superficie identificadas por jinetes y veterinarios. Como resultado, la mayoría de las superficies de salto, doma, polo y carreras ecuestres utilizan gran parte de la misma tecnología de construcción que se usaba hace 50 años. Las nuevas tecnologías poseen el potencial de incorporar conocimientos más avanzados sobre la interacción entre las superficies ecuestres y los cascos de los equinos. Los fenómenos que ocurren en esta zona de contacto son los que presentan una mayor probabilidad de provocar lesiones, lo que conlleva un impacto negativo en el bienestar del animal.

El alcance mundial de la investigación y generación de conocimiento sobre superficies ecuestres es mucho menor que el de los deportes de equipo. Como resultado, aún persiste la posibilidad de que nueva información tenga un impacto significativo. El desarrollo en Europa y América del Norte en los últimos 12 años ha sentado las bases para nuevos estándares respaldados por la Federación Ecuestre Internacional (FEI). La FEI ha iniciado este proceso para garantizar las condiciones de las superficies ecuestres internacionales con un enfoque inicial en eventos de 4* y 5* pero eventualmente introduciendo estándares para un mayor número de eventos. Asimismo, Estados Unidos en el marco de la Ley de Integridad y Seguridad en las Carreras de Caballos (HISA, 2019) impuso pruebas basadas en determinaciones estandarizadas por ASTM y el Racing Surfaces Testing Laboratory (RSTL).

Algunas de las investigaciones más importantes recientes han demostrado que las superficies afectan tanto la incidencia de lesiones (Hernandez et al., 2001; Parkin et al.,

2004a; Murray et al., 2010a; Egenvall et al., 2013; Hernlund, 2016; Hitchens et al., 2019), como la performance de los atletas equinos (Peterson et al., 2010). Otras investigaciones están relacionadas con fases específicas de la marcha (Clayton et al., 1991, Eliashaer et al., 2002) o la adaptación y el riesgo (Parkes y White, 2015). El diseño actual de superficies se basa en la experiencia del diseñador y la familiaridad de los usuarios con un tipo específico de superficie. En muchos casos, la sensibilidad de los atletas de élite al entorno de desempeño es tal que se han desarrollado buenas superficies que son adecuadas tanto para el entrenamiento como para la competición. Sin embargo, estas superficies sólo pueden funcionar con materiales y condiciones climáticas locales específicos. Si bien en la mayoría de los casos se utiliza material local, la construcción de superficies seguras para el entrenamiento y la competición debe basarse en métricas de desempeño que puedan relacionarse con las condiciones de carga cuando se utilizan. Los beneficios potenciales incluyen la reducción de lesiones tanto crónicas como agudas.

El diseño de superficies basado en cualidades subjetivas es más difícil de defender ante el público. Es más probable que un protocolo de diseño de superficie basado sobre datos científicos resista el escrutinio público. Tanto la documentación del desempeño como el mantenimiento adecuado son requeridos para el bienestar animal (Peterson et al., 2012 p.2).

Se ha desarrollado una cantidad significativa de nuevos conocimientos sobre la biomecánica de la interacción entre el caballo y las superficies (Clayton, 2004). Este desarrollo es suficiente para que la interacción entre el casco y la superficie se convierta en un campo de investigación independiente. Si bien trabajos anteriores demostraron la importancia de las superficies (Baker y Cannaway, 1993), el cambio comenzó después de los Juegos Olímpicos de Atenas en 2004 (van Weeren, 2010). En Atenas, tres caballos sufrieron heridas graves y otros sufrieron lesiones en los tejidos blandos después de la competición de salto. Estas lesiones también pueden haber sido el resultado de la

interacción de los ramplones, tacos que se colocan en la herradura para un mejor agarre y la superficie ecuestre (Horse and Hound, 2005).

1.2. Biomecánica de la superficie y el pie equino:

Para evaluar adecuadamente la condición de la superficie, la superficie debe cargarse basándose en la carga o fuerza y en la tasa de carga del atleta equino. La tasa de carga describe el proceso dinámico de aplicación de una carga, puede definirse como la velocidad a la que se aplica una carga o fuerza. Las cualidades de las superficies también deben medirse con las direcciones de carga acopladas en los planos vertical y horizontales combinados. Las investigaciones en esta área describen la biomecánica del caballo en los diferentes aspectos de la marcha y diferentes disciplinas del deporte (Biewener et al., 1983, Merkens et al., 1993, Thomason y Peterson, 2008; Peterson et al., 2012).

El objetivo inicial de estudiar la interacción pie-superficie no es la simple comprensión de las claudicaciones del pie, sino avanzar en la prevención de todas las claudicaciones inducidas mecánicamente y de lesiones catastróficas (Peterson 2008). Aunque en la interacción pie-superficie las propiedades mecánicas de tendones, músculos y huesos, timing de contracciones musculares; tensión y stress en tendones y huesos, no puede ser medida en condiciones de campo. Las características de las superficies determinan la interacción pie-superficie. La fuerza resultante de las características de la superficie y el casco soportado por un peso y la velocidad es un dato crítico. La asociación más clara entre las características del impacto vertical sobre una pista de arena o arcilla y las lesiones ha sido demostrada en Minnesota (Robinson et al., 1988, Clanton et al., 1991).

Estas consideraciones se enfocan en los posibles efectos de la superficie en la “pisada” individual, pero es necesario considerar la variabilidad entre esas pisadas. Las pisadas en una carrera o en una sesión de entrenamiento pueden mostrar una variabilidad considerable. Aunque la estructura del pie y los miembros distales están contruidos para

modular la impredecibilidad con respecto al contacto con superficies irregulares (Thomason y Peterson, 2008). El grado de impredecibilidad en aceleración ha sido probado ser mayor en pisadas sobre arena con respecto al asfalto (Burn, 2006). El impacto primario ocurre muy rápidamente para reflejar una reacción, y el pie y el miembro distal presumiblemente actúan pasivamente durante esta fase, aunque la respuesta muscular es posible durante el impacto secundario (Mc. Guigan y Wilson, 2003). Los caballos tienen la capacidad de moderar su cinemática de acuerdo con la dureza de la superficie (Burn y Usmar, 2005). Si bien tienen esta capacidad, los cambios repentinos en la consistencia de la superficie que incrementan las aceleraciones del impacto vertical o alteran la velocidad del frenado del pie, son potencialmente deletéreos, en cuyo caso el caballo puede tomar varias batidas para ajustarse. Es aquí donde cobra importancia analizar las características de las superficies ecuestres y la metodología de medición de estas.

1.3. Galope

La revisión de la biomecánica del galope que sigue a continuación no considera la extensa literatura sobre la asimetría de la marcha para el bienestar y la performance de los caballos (Clayton, 2004; Bjornsdottir, 2018; Kallerud et al., 2021; de Mira et al., 2022; Dyson y Pollard, 2024; Schumacher y Gehlen, 2024).

Thomason y Peterson (2008) determinaron cinco fases en la cinemática y cinética de la marcha del caballo. De las cinco fases descritas, tres son claramente observadas, pero las otras requieren de comprensión de biomecánica y aceleraciones asociadas al caballo (Figura 1.1).

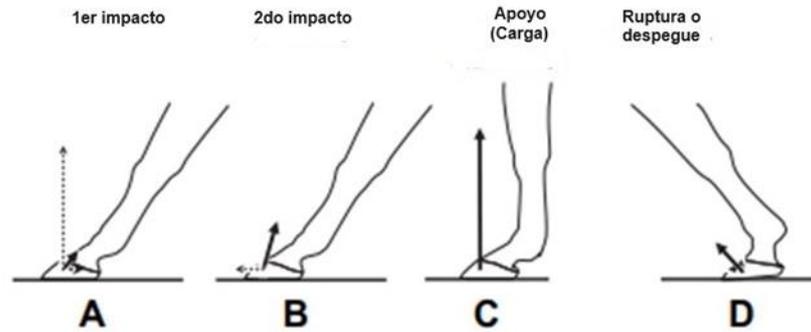


Figura 1.1: Estados de las fases del paso, la flecha de puntos indica la desaceleración y la flecha llena la fuerza o carga, la longitud de las flechas indican la magnitud del parámetro. A: concusión, B: deslizamiento y frenada, C: apoyo (fuerza), D: impulsión.

La fase inicial o preimpacto ocurre inmediatamente antes de que el casco toque el suelo. La segunda fase o impacto ocurre inmediatamente después de que el casco toque el suelo; existe un impacto primario y uno secundario, el impacto secundario es con el casco totalmente en contacto con la superficie, y la masa corporal del caballo carga la extremidad. Esta carga alcanza dos veces y media el peso del caballo, se asocia con la rotación de la articulación del menudillo. La carga máxima sobre la extremidad transcurre durante el 7-30% de la marcha. En la tercera o fase de soporte el casco se encuentra estacionario y el menudillo está rotado hacia abajo, pero la masa del caballo no está desacelerando más. En esta fase no hay deslizamiento ni frenado ocurre con el peso sobre el casco durante 5-90% del tiempo de marcha. La cuarta, la ruptura o despegue (breakover), a medida que el casco se levanta en los talones, rueda desde el suelo y la fuerza de propulsión se aplica a la pata del 85 al 100% de la marcha. La quinta, post despegue (o postbreakover) es el período inmediatamente después que el casco deja el suelo. Esta es la primera parte de la fase de oscilación (swing) y dura el 15% del período de marcha. Estas cargas involucran fuerzas horizontales y verticales, que también dependen de la velocidad del impacto.

La carga desde la superficie ocurre en el primer impacto, cuando el pie toca la superficie (Thomason y Peterson, 2008; Clayton, 2016). Cuando el cuerpo del caballo se

mueve hacia adelante la carga sobre la superficie se incrementa durante la fase de soporte o apoyo. Esto incluye una componente de carga horizontal que inicialmente está asociada con desaceleración del pie al tocar el suelo y es completamente invertida para impulsar el caballo hacia adelante. La resistencia de la superficie al impacto y la fuerza sobre el pie determina la tasa de carga sobre el miembro y las aceleraciones y fuerzas que experimentan las articulaciones del caballo. La combinación de cargas en el miembro es una respuesta a la superficie, que depende de las respuestas en sentido vertical y horizontal a la superficie. Los dos elementos de movimiento de un animal cuadrúpedo están presentes en los miembros anteriores y posteriores con diferente proporción de la carga dependiendo de la función del miembro en el aire del animal (Biewener, 2003). La componente vertical de la superficie, relacionada a la dureza, es mayor en los miembros anteriores. Esta es la mayor fuerza transferida a través de los miembros anteriores del caballo durante el galope (Clayton, 2004). La fuerza vertical en el suelo resulta en un stress normal en el suelo debajo del pie. La componente horizontal de la carga en el suelo resulta en una fuerza de tracción, τ . La componente horizontal puede ser comparado con fricción, o en el caso del suelo durante la fase de impacto del paso, es la tracción de la capa del material de la superficie (Wong, 2001). El esfuerzo de tracción se incrementa durante la carga del suelo hasta que el suelo cede a la fuerza de tracción τ_s . Cuando la pisada no mantiene su posición horizontal, esto corresponde a una falla de la superficie o de los materiales subsuperficiales (Thomason y Peterson, 2008). En los miembros anteriores, la componente horizontal determina el pico de desaceleración del pie y mantiene a la pisada para mantener la propulsión del caballo hacia adelante. Los miembros posteriores del caballo aplican fuerzas mayores en la dirección horizontal dependiendo del aire y del material de la superficie. Estas fuerzas más altas resultan de las altas fuerzas de propulsión que se genera en los posteriores (Clayton, 2004).

1.4 Otras tecnologías y otros aires:

Las cargas y velocidades también dependen del aire: paso, trote o galope y sus variantes, con velocidades y cargas muy diferentes, por ejemplo, en salto versus galopar o trotar (Peterson et al., 2012). Una variedad de autores ha considerado la cinemática y la cinética de los movimientos en diferentes modos de aires (Biewener et al., 1983, Merckens, et al., 1993) el enfoque es diferente dependiendo de la pregunta que se esté considerando. Por ejemplo, en algunos trabajos se consideró la fuerza resultante, incluido el signo, la duración y la dirección. Otros trabajos se han centrado en los momentos, la liberación de energía o la aceleración y desaceleración durante los movimientos del caballo. Existen varios trabajos que intentan describir a través de datos cinemáticos el movimiento del pie (y otros segmentos del cuerpo) en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento (distancia recorrida) de su movimiento lineal y rotaciones experimentado como resultado de la acción de las articulaciones.

Históricamente la mayoría de los trabajos se han realizado con cámaras de alta velocidad (Khumsap et al., 2001; Singleton et al., 2003; Clayton et al., 2007) mientras que los sistemas basados en infrarrojo tienen suficiente resolución para capturar la deformación de la pared del pie mientras está en el suelo.

Los acelerómetros han sido también, empleados para medir aceleración y desaceleración del pie y del cuerpo durante todas las fases del paso (Benoit et al., 1993), unidireccionales y triaxiales (Schaer et al., 2006). Sin embargo, los acelerómetros son lineales y a menos que se usen de a pares, no registran por completo rotaciones mientras sus resultados son afectados por la rotación (Burn, 2006). Los platos de fuerza requieren ajustes de laboratorio y la herradura dinamométrica requiere ser suficientemente rígida para que su propia deformación no introduzca errores y además ser lo suficientemente liviana para ser usada en el campo sin alterar el aire del caballo (Björck, 1957; Roepstorff,

1998; Kai et al., 2000). En el mejor de los casos, estos métodos solo miden una parte de las fuerzas y por tanto llegan a una conclusión parcial.

Solo recientemente ha sido posible realizar mediciones durante una carrera o alto nivel competitivo. Aunque aún se encuentran en etapas iniciales, las tecnologías portátiles tienen el potencial de proporcionar información importante sobre el rendimiento y el riesgo potencial para el caballo (Serra Bragança et al., 2020, Darbandi et al., 2021).

1.5 Investigación previa en Superficies

Para caracterizar una superficie ecuestre es necesario medir fuerza y aceleración en ambos ejes, horizontales y verticales, bajo condiciones que representen las cargas que el pie transfiere a la superficie, independientemente de si el aire es paso, trote o galope. Cuando se analiza la respuesta desde una perspectiva de ingeniería de materiales, se asume que los materiales son lineales y elásticos. En un material lineal y elástico, el material provee una cantidad de fuerza constante por unidad de desplazamiento y vuelve a su forma original cuando se retira la carga. Los materiales utilizados en superficies ecuestres se transforman de modo progresivo en rígidos debido a que se deforman. Luego de utilizar un piso se ve la deformación plástica en la forma de la huella, que debe ser removida con una rastra u otro equipo. Cuando el casco toca y penetra el suelo la carga se incrementa a una tasa elevada. La carga se incrementa primero lentamente con la penetración en la superficie, cuando el material bajo el pie se compacta, la superficie se vuelve más dura. La resistencia del suelo es dependiente de la velocidad de deformación (Dexter y Tanner, 1974). La tasa de la carga de impacto ejercida por el pie también altera la rigidez del material. La no linealidad y la dependencia de la velocidad de deformación de los materiales de las superficies ecuestres hace necesario testearlas usando cargas y velocidades que sean similares a las del impacto del pie del caballo. Además del movimiento vertical (figura 1.1.), con sus correspondientes fuerza y aceleración es crucial

considerar el movimiento de rotación en sus distintos tipos como la rotación longitudinal y transversal (Figura 1.2).

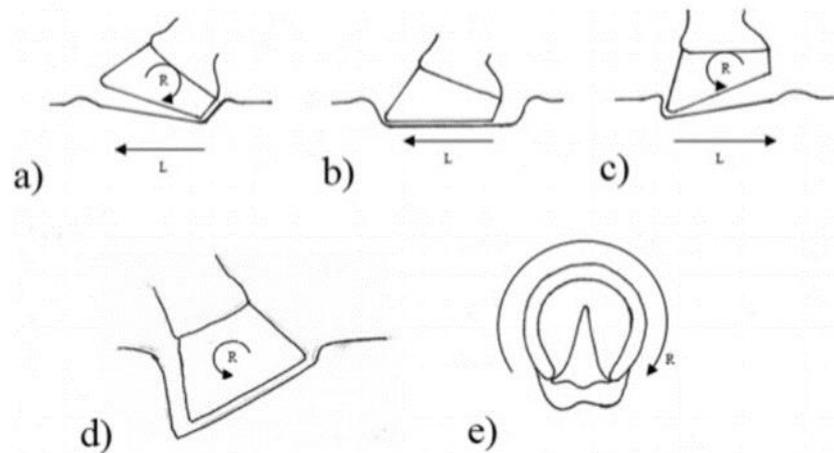


Figura 1.2: Movimientos típicos de rotación longitudinal y rotacional del casco de un caballo vistos lateralmente a) impacto primario, b) impacto secundario y c) despegue en los que ocurre: rotación en el eje perpendicular al sentido de avance y paralelo al suelo y deslizamiento. d) Vistas frontales y e) solares del casco: rotación de rol y rotación alrededor del eje vertical perpendicular al suelo (Tomado de Lewis et al., 2015 y traducido por MAB).

En el contexto de la respuesta de la superficie, surgen preguntas con respecto a las herramientas que a menudo se usan para medir superficies ecuestres. La carga y la aceleración vertical se miden típicamente con un Clegg hammer o un penetrómetro. El Clegg hammer, es un dispositivo de masa pequeña (1-10 kg) que cae desde una altura relativamente baja (0,60-1,0 m). El penetrómetro más comúnmente utilizado es el penetrómetro Longchamp, que utiliza una sonda cuadrada de 1 cm² empujada sobre la superficie con un peso reducido. Estas mediciones de baja carga como el Clegg Hammer, son útiles para evaluar la condición de la capa superior de la superficie, para asegurar que la preparación de la superficie ha generado la porosidad suficiente en la capa superficial que provocará la desaceleración del casco. Este tipo de ensayos son también apropiados para animales pequeños o pueden representar parámetros de interés para atletas humanos.

Durante el galope, el pico de fuerza vertical en la mano alcanza un valor de 2,5 veces el peso del caballo (peso dinámico) y está distribuido sobre la superficie del pie, esta fuerza llega a capas más profundas de la superficie (Peterson et al 2008). Estas altas cargas dinámicas producen fuerzas significativas en las capas más profundas de la superficie que no se pueden medir con el equipo liviano. Más recientemente, se ha agregado a la lista de dispositivos utilizados para superficies de césped el Going Stick.



Figura 1.3: Modo de operación del Going Stick. El operador hinca el instrumento en el suelo, al penetrar el suelo mediante la fuerza ejercida en A, registra resistencia a la penetración; luego el operador inclina el mango 45° hacia el punto B, aquí registra tracción longitudinal.

Este dispositivo usa una sonda plana que llega a cierta profundidad del perfil de la superficie. Al igual que el penetrómetro Longchamp, el Going Stick aplica una carga sobre un área pequeña, comparada con la superficie del casco, que da como resultado una mayor penetración de la superficie, pero el Going Stick agrega una acción de flexión vertical (Figura 1.3). Esta acción es más similar a la extremidad posterior del caballo durante la ruptura del galope ya que es casi estática y representa un alto estrés aplicado. Al igual que el penetrómetro Longchamp, el Going Stick se entiende mejor como un dispositivo que imita la carga aplicada a la superficie por una porción del casco. A diferencia del penetrómetro Longchamp, la carga es tanto horizontal (Figura 1.3) como vertical, aunque de una manera más difícil de vincular a la biomecánica del caballo. (Peterson et al., 2012, Schmitt et al., 2024).

Por esta razón, el desafío consiste en medir el efecto sobre superficies que están ubicadas en mayor profundidad. Esto ha llevado a la construcción de superficies con distinto tipo de subbases (Holt et al., 2014). En este sentido, Peterson et al., (2008) desarrollaron el Medidor Biomecánico de Superficies “Orono” (OBST por sus siglas en inglés Orono Biomechanical Testing surfaces), que hace posible aplicar una carga sobre la superficie a la velocidad y peso que son aplicados por un caballo al galope. Este equipo imita el punto en el cual la mano del caballo contacta la superficie y el peso de este es transferido al casco (Peterson et al, 2008) (Figura 1.1). Debido al tamaño y la velocidad del atleta equino, el sistema es mucho más grande y costoso que los sistemas descritos anteriormente. Este dispositivo registra varios parámetros que reproducen cinco variables denominadas propiedades funcionales: firmeza, amortiguación, agarre, devolución de la energía, y uniformidad. La consistencia es la sexta propiedad funcional (FEI, 2014) y es el sostenimiento de las cinco propiedades funcionales en valores óptimos en el tiempo, pero no es parte de esta investigación.

Basado en una gran cantidad de datos tomados con el OBST en competencias europeas de salto de primer nivel, las percepciones de los competidores se utilizaron para validar el conjunto de datos (Hernlund et al., 2017). Los resultados sugieren que la percepción del jinete está razonablemente bien asociada con las propiedades medidas. Estas percepciones son independientes del tipo de superficie, césped o arena, ya que se espera que todos proporcionen un rendimiento similar. Si bien este tipo de estudio aún no fue llevado a cabo en carreras de caballos, al igual que sucede en el estudio mencionado, existe una gran diferencia de percepción entre jinetes y a esta variabilidad se agrega la diferencia entre los tipos de pistas.

Esta nueva definición de calidad es ya implementada por la Federación Ecuestre Internacional (FEI 2014). El objetivo a largo plazo del proyecto es similar al de las carreras de caballos en Estados Unidos de América: vincular los datos epidemiológicos a

todos los aspectos del diseño de la superficie con un énfasis particular en la importancia relativa de las diferentes propiedades funcionales. Para mantener en óptimos niveles estas propiedades, cobra importancia la correcta nivelación, el uso de arenas clasificadas, la humedad, las labores de mantenimiento de la superficie y la calidad y tipo de subbase en la que es dispuesto el material sobre la que impactan directamente las extremidades de los caballos (espesor de amortiguación). Desde el punto de vista agronómico, en las superficies con cubierta vegetal las variables que pueden modificar algunas de las propiedades funcionales descritas son profundidad de raíces, profundidad de thatch (capa entremezclada de material muerto y de tallos y raíces vivas), compactación, enfermedades, plagas, capacidad de infiltración. Todas estas variables hacen al estado de salud del sistema biológico en cuestión, a la capacidad de recuperación después de una intervención y a la persistencia del tapiz vegetal. Todas estas variables intervienen en la conformación de las fuerzas de desaceleración sobre el casco del caballo que se manifestarán tanto en las heridas sobre el césped como en las lesiones sobre el atleta equino. En este único caso, el daño al césped y las potenciales lesiones al atleta equino están íntimamente relacionadas. Esto refuerza que todo el trabajo relacionado con la calidad de la superficie de césped debe ser específico para el clima y las especies de césped locales, dado que los caballos viajan a gran distancia para competir y tienen una expectativa de superficies consistentes similares a aquellas en las que compiten y entrenan localmente.

Cada deporte tiene exigencias particulares que determinan las propiedades funcionales de las superficies deportivas. Atender al cumplimiento de estas propiedades promueve el bienestar animal. En lo referente a la construcción y mantenimiento de las superficies deportivas de atletas equinos, pocas o casi ninguna de las prácticas de manejo que se realizan en nuestro país contempla el punto de vista del bienestar animal del atleta equino. Esto determina una epidemiología de lesiones no difundida, pero si percibida a

través del número de días en que los caballos están sin actividad. Altos costos de rehabilitación y pérdida de caballos deportivos que malogran su potencial genético. Esta situación debería ser una razón más que suficiente para incorporar parámetros de calidad funcional.

Los estudios realizados en superficies de césped en nuestro país son escasos, limitándose a trabajos en compactación de suelos deportivos (Laureda et al., 2016) y a introducción de especies de gramíneas para uso en césped (Reinoso et al., 2016). Casi sin comunicaciones a congresos y tan solo algunas reuniones técnicas orientadas más al mantenimiento y comercialización de maquinarias e insumos, que a la búsqueda de conocimiento. Sin embargo, en el mundo entero la investigación en especies gramíneas de césped fue y es muy relevante a la hora de seleccionar especies y de definir planes de manejo de campos deportivos (Beard, 1972; Emmons y Rossi, 2015).

Las superficies deportivas de equinos incluyen varios tipos de superficie, siendo las más comunes de arena o césped. Se han realizado importantes esfuerzos para investigar nuevos diseños y compararlos con los diferentes diseños de superficies utilizados en diferentes regiones del mundo y en diferentes disciplinas ecuestres. Recientemente ha habido interés tanto comercial como académico en las superficies de área elástica para superficies ecuestres (Flemming, 2011; Van der Heijden, 2018; Souza et al., 2023). Las superficies deportivas utilizadas para los deportes con equinos son similares a las superficies artificiales utilizadas para los atletas humanos (Nigg & Yeadon, 1987; Blundell, 2010;). Se denomina superficie de área elástica a las superficies en las que la carga se distribuye sobre un área mayor que el punto de aplicación (Fleming 2011).

Sin embargo, el tipo de superficie no cambia los requerimientos asociados con la interacción superficie-pie equino las cuales son además específicas para cada disciplina ecuestre. La mayoría de las investigaciones recientes han sido sobre sistemas de dos capas que consiste en el espesor de amortiguación (constituido por arena, geotextil y/o

fibras) y una capa base separada (Mahaffey et al., 2012; Holt et al., 2014). La adición de una capa subsuperficial es un método con el potencial de mejorar las propiedades mecánicas de las superficies y al mismo tiempo mantener la superficie más consistente durante el uso intensivo. Los últimos tres Juegos Olímpicos Londres 2012, Río de Janeiro 2016 y Tokyo 2020, incorporaron una capa subterránea de diferentes materiales respectivamente (Otto Sport Nordic, 2017; Northrop et al., 2021; Redrup, 2021) debajo de la arena. El contenido de humedad y el tipo de mantenimiento realizado interactúan en la amortiguación del impacto recibido por el pie del caballo (Mahaffey et al., 2013; Holt et al., 2014). Una de las características fundamentales de las superficies ecuestres es la composición granulométrica de la arena obtenida mediante análisis de tamices e hidrómetro (hoy también por difracción laser), así como su capacidad de compactación (Peterson et al., 2014). Esta información es crucial para comprender el comportamiento de las partículas finas en combinación con las partículas gruesas, así como su densidad aparente, capacidad de compactación, retención de humedad y producción de polvo (Figura 1.4).

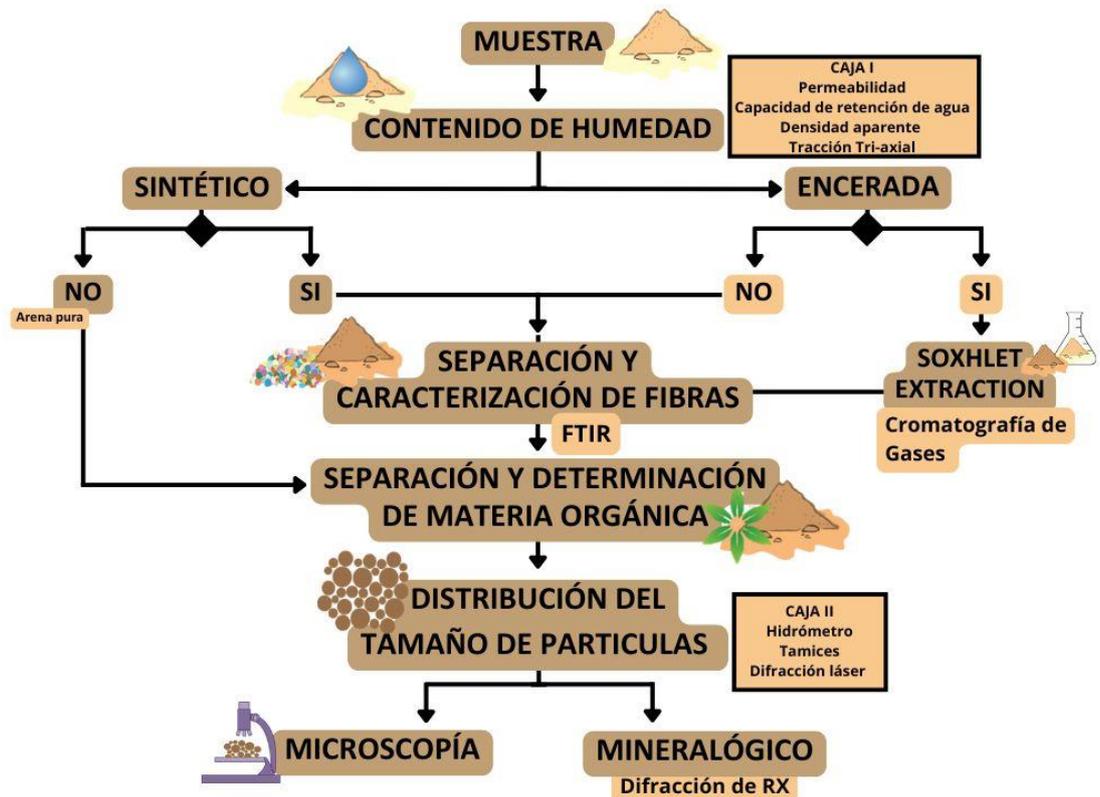


Figura 1.4: Diagrama de flujo que ilustra la secuencia de análisis realizados para la caracterización de una muestra de arena destinada a uso ecuestre adoptadas por la FEI. El proceso comienza con la determinación del contenido de humedad gravimétrica y todas las determinaciones que están en la caja 1. Según el tipo de muestra, se sigue uno de dos caminos: las muestras sintéticas o enceradas, y las muestras de arena pura (opción No) en la que avanzan directamente a la separación y determinación de materia orgánica, seguidas de la distribución del tamaño de partículas mediante hidrómetro, tamices y difracción láser, y luego a la microscopía y análisis mineralógico por difracción de rayos X. Las mezclas de arena y fibras pasan primero por un proceso de separación; la fracción fibrosa se analiza mediante FTIR (espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier) y la fracción arenosa sigue el mismo camino que la arena pura. Las muestras de arena encerada se someten a una extracción Soxhlet y cromatografía de gases para identificar la cera, y luego siguen el mismo proceso que las mezclas de arena con fibras.

La distribución del tamaño de las partículas influye directamente en la capacidad de absorción de impacto. Barrey et al., (1991) clasificaron la absorción de impacto en dos categorías: friccional, en la cual la amortiguación se logra a través del desplazamiento de las partículas, y estructural, en la cual la amortiguación se produce por la deformación de partículas viscoelásticas. La amortiguación puede ser beneficiosa al reducir la magnitud de la fuerza máxima durante la fase de apoyo, lo que disminuye el estrés experimentado

por el caballo. Sin embargo, también puede resultar perjudicial, ya que podría requerir un mayor esfuerzo muscular para generar movimiento (FEI, 2014). En este contexto, la humedad se considera la propiedad física más importante debido a su papel en el mantenimiento de la cohesión de las partículas de arena. Diversos autores han señalado que el contenido de humedad incrementa la adherencia y, en consecuencia, la resistencia a la tracción, lo que proporciona una mayor estabilidad (Ratzlaff et al., 1997; Chateau et al., 2010; Murray et al., 2010). Sin embargo, cuando el material se satura, la resistencia a la tracción disminuye nuevamente, lo que limita esta mejora a un rango específico de contenido de humedad para cada tipo de arena. El rango óptimo de humedad para alcanzar la máxima resistencia a la tracción suele situarse entre el 8% y el 17% (Barrey et al., 1991; Ratzlaff et al., 1997). Cabe destacar que este contenido de humedad óptimo puede variar según el tipo de superficie, la composición granulométrica y el deporte en cuestión. Una vía de mejorar la absorción de impactos adicionalmente al manejo de la humedad es el agregado de materiales sintéticos o ceras a las partículas de arena. Se han obtenido altos niveles de absorción de impacto en ensayos con distintas mezclas de arena y materiales sintéticos en pruebas con caballos de trote (Robin et al., 2009; Crevier Denoix et al., 2010). Las fuerzas máximas, las tasas de carga, las aceleraciones máximas y las fuerzas de los tendones también fueron menores en las pistas sobre materiales sintéticos. En superficies de arena, la incorporación de materiales triturados ha dado lugar al desarrollo de superficies ecuestres sintéticas, también conocidas como superficies “de ingeniería”, debido a la inclusión de diversos materiales como geotextil triturado, trozos de alfombra, goma, fragmentos de tela, o un porcentaje de fibra de poliéster. Estos aditivos mejoran la tracción y otras propiedades de la superficie, como la retención de humedad y la amortiguación (Van der Heijden et al., 2017; Souza et al., 2022), lo que se traduce en una mejora del rendimiento, la seguridad y una reducción en el mantenimiento requerido (Van der Heijden, 2018). La adición de geotextil contribuye a disminuir la fuerza vertical y a

aumentar la tracción en la superficie. Asimismo, se incorporan partículas de goma para reducir la compactación, y dependiendo de su forma, se incrementa la tracción (Thomason y Peterson, 2008). En superficies de césped, algunas de las características relacionadas con la reducción del impacto y la tracción están asociadas con la porosidad y la presencia de raíces (Serensits et al., 2011).

Entre los aspectos a considerar está la ausencia de protocolos unificados de preparación y mantenimiento de las superficies ecuestres que tengan en cuenta todas las implicancias aquí mencionadas y que generen uniformidad en las distintas superficies ecuestres.

Esta investigación se realiza en un área poco explorada donde abundan los conceptos subjetivos. La comunidad de investigadores a nivel mundial es muy pequeña y por esta razón un avance en este sentido sería de gran impacto.

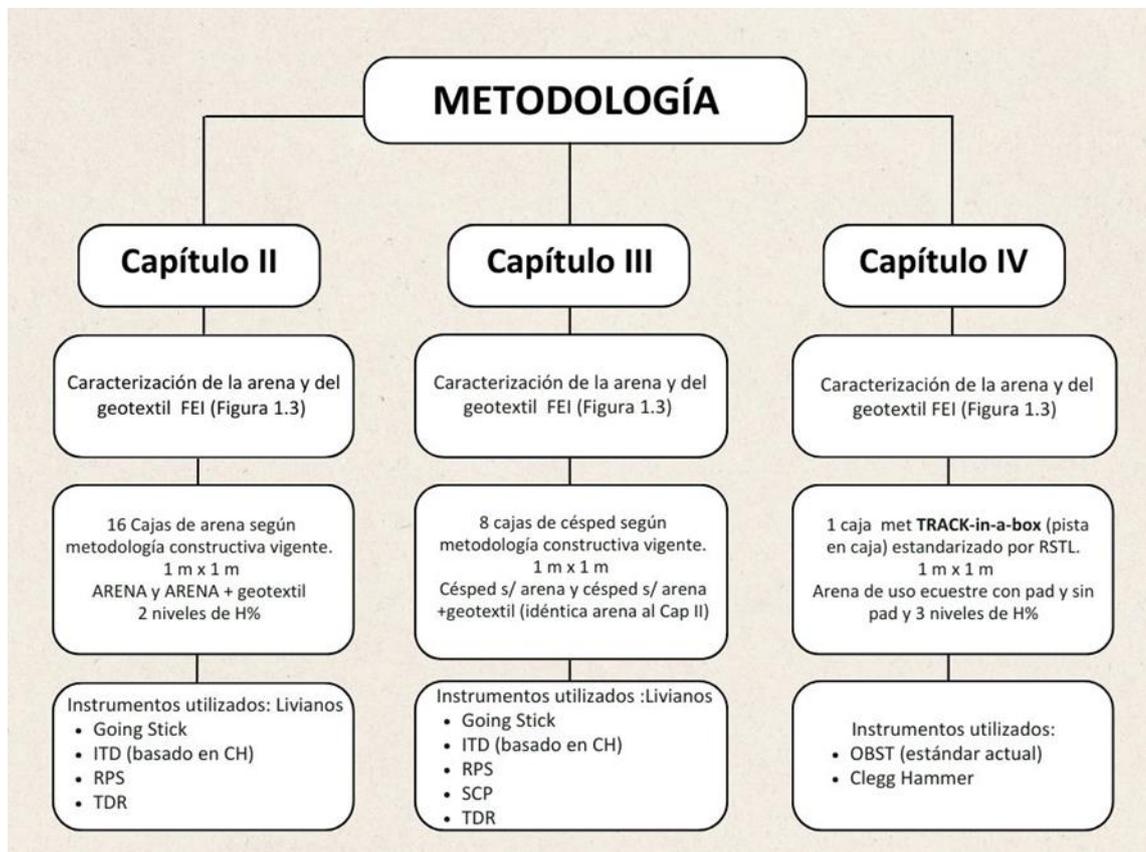
En lo referente a la situación de nuestro país, la construcción y mantenimiento de las superficies deportivas de atletas equinos, escasamente contempla la interacción pie equino-superficie. En algunos deportes, raramente esto es tenido en cuenta para la performance, pero es desatendido el punto de vista del bienestar animal.

1.6 Descripción general de la tesis

El trabajo de tesis se presenta en Capítulos, el Capítulo inicial incluye la introducción general, el segundo Capítulo se refiere a la comparación experimental usando cajas de arena con distintas combinaciones de factores (humedad, geotextil triturado y paquete drenante) (Cuadro 1.1) a través de mediciones con instrumentos simples, el tercer capítulo se realiza la comparación del efecto de distintos factores (Geotextil triturado y paquete drenante) usando cajas de césped de especies megatérmicas plantado sobre una base de arena y turba a través de medidas simples utilizadas para la caracterización de superficies ecuestres, el cuarto capítulo se refiere a la comparación

experimental de dos factores (humedad y uso de un pad de goma EVA) mediante el método Track-in-a-box a través de las variables obtenidas con el OBST y el CIV (herramienta simple). El quinto capítulo concluye con una visión general del trabajo realizado y las implicaciones de los resultados obtenidos.

Cuadro 1.1: Metodología general de los capítulos 2,3 y 4, Se describen las etapas, las diferencias metodológicas respecto al método de testeo y de instrumentos utilizados. Todas las arenas utilizadas se caracterizan por el método adoptado por FEI. En los dos primeros capítulos se realizan mediciones con instrumentos de medición livianos en cajas armadas según la norma de construcción y en el cuarto se utiliza el método estandarizado por el RSTL track-in-a-box específicamente para testear materiales cuyo destino serán las pistas de carrera o de equitación, se utiliza el OBST un instrumento pesado y complejo que es el estándar vigente de la industria en América del Norte, Europa y Asia y un instrumento liviano como el Clegg Hammer.



1.7 Organización de los Capítulos

El objetivo general de esta tesis es establecer las propiedades funcionales de superficies ecuestres de arena y césped diseñadas con los materiales existentes en el medio local y caracterizarlas con las herramientas sencillas disponibles que permitan

establecer parámetros de calidad disponibles para un protocolo de preparación y mantenimiento de superficies ecuestres.

Esta tesis (Cuadro 1.2) consta de un Capítulo I, Introducción, que es este capítulo, tres capítulos de resultados originales y un capítulo final de discusión general y conclusiones. El objetivo general se desdobló en tres objetivos específicos que serán desarrollados en cada uno de los capítulos II, III y IV. La metodología general se encuentra sintetizada en el cuadro 1.1. En el capítulo II se comparan las propiedades mecánicas: penetración (GSP) y tracción (GSS), Impacto (ITI) medido como deformación de la superficie y tracción rotacional (RPS) de dos diseños constructivos de pista de arena del tipo punto elástico con variación en el contenido de humedad medidos con herramientas sencillas. Las herramientas empleadas son el Going Stick (GS), el Medidor de Impacto (ITD), el Medidor de Tracción Rotacional (RPS) y la sonda de humedad (TDR), esta última se incluye por su precisión (Sharma et al., 2021) y practicidad para medir el contenido volumétrico de humedad (CVH). La sonda TDR ha demostrado ser eficaz como estimador de la resistencia a la penetración en un rango específico de humedad (0,15-0,30 cm³/cm³) en suelos predominantemente areno-limosos (Vaz, 2003). Mumford (2006) describió que entre el 70 al 90 % de las variaciones halladas en el índice de Going Stick se explicaban por las variaciones en el contenido volumétrico de humedad (CVH%). Aunque no es su función principal, la sonda TDR es una herramienta valiosa y utilizada diariamente por quienes mantienen superficies ecuestres, en líneas generales en cada sitio hay un rango óptimo de CVH y su clasificación puede proporcionar una indicación útil sobre la condición de la superficie. En el Capítulo 3 se comparan las propiedades mecánicas mencionadas anteriormente de dos diseños constructivos de pista de césped del tipo punto elástico en dos fechas consecutivas con las mismas herramientas sencillas del capítulo II más un Penetrómetro de Cono (PC) que al igual que el Going Stick determina la resistencia a la penetración. En el capítulo 4 se

comparan las propiedades funcionales de dos sistemas constructivos de pista de arena, uno convencional y otro del tipo área elástica por el método de Titb medidos por OBST y Clegg Hammer. En el capítulo V se destacan los aportes originales de los resultados hallados en el marco teórico abordado de cada uno de los capítulos, se concluyen algunas alternativas de aplicación del conocimiento hallado a la vez que se esboza una perspectiva a futuro del área de estudio.

Cuadro 1.2: Descripción y organización de la tesis. Detalle de objetivos generales y específicos.

Capítulos	Título	Objetivo general	Objetivos específicos
Capítulo I:	Introducción general		
Capítulo II:	Comparación experimental de mediciones simples utilizadas para la caracterización de superficies ecuestres de arena	Determinar la incidencia de dos niveles de humedad en dos sistemas constructivos de pista de arena sobre las propiedades mecánicas del espesor de amortiguación con herramientas de medición livianas.	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar el impacto de una capa drenante y geotextil triturado en las propiedades mecánicas de la arena seleccionada. • Analizar cómo el contenido de humedad influye en dichas propiedades. • Identificar el mejor estimador de la condición de la superficie utilizando instrumentos sencillos.
Capítulo III:	Comparación experimental de medidas simples utilizadas para la caracterización de superficies ecuestres de césped de especies megatérmicas	Determinar la incidencia de dos sistemas constructivos de pista de césped y de base arena sobre las propiedades mecánicas del espesor de amortiguación con herramientas de medición livianas.	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar el impacto de una capa drenante y geotextil triturado en la capa de amortiguación de césped sobre arena, manteniendo la humedad constante. • Analizar las modificaciones en las propiedades mecánicas de la superficie utilizando instrumentos sencillos.

			<ul style="list-style-type: none"> • Facilitar decisiones de manejo rápidas mediante clasificaciones de la calidad de la superficie con estos instrumentos.
Capítulo IV:	Comparación experimental de las variables obtenidas con el OBST y el CIV (herramienta simple) mediante el método Track-in-a-box de un perfil de arena con pad de goma Eva.	Determinar las propiedades funcionales de dos sistemas constructivos de pista de arena, uno convencional y otro del tipo área elástica por el método de Titb medidos por OBST (Norma FEI) y por Clegg Hammer (medidor de impacto).	<ul style="list-style-type: none"> • Comparar el efecto del agregado de un pad de goma EVA en las propiedades funcionales del diseño constructivo consistente en espesor de amortiguación de arena y geotextil triturado. • Determinar el efecto del contenido de humedad en las propiedades funcionales de los perfiles mencionados. • Comparar los resultados obtenidos con el OBST y con el Clegg Hammer y evaluar su correlación.
Capítulo V:	Discusión y Conclusión de la Tesis	Explicar la significación de los resultados hallados. Conceptualizar los resultados.	<ul style="list-style-type: none"> • Explicar los resultados hallados. • Observar las limitaciones del estudio y sugerir futuras investigaciones en el contexto de la ciencia en superficies ecuestres • Conceptualizar los resultados para poder incluirlos en relevamientos de superficies ecuestres.

Hipótesis general:

El agregado de geotextil triturado, el ajuste del contenido de humedad y el uso de paquete drenante modifican las propiedades mecánicas del perfil, en particular las asociadas a amortiguación y firmeza, de superficies ecuestres de arena o de césped debidamente mantenidas.

Los objetivos específicos fueron abordados en su capítulo correspondiente a resultados originales. Se detallan seguidamente los objetivos específicos de cada capítulo y sus respectivas hipótesis y predicciones:

Capítulo II

El objetivo general de este capítulo fue determinar la incidencia de dos niveles de humedad en dos diseños de pista base arena sobre las propiedades mecánicas del espesor de amortiguación.

En este capítulo se buscó discernir el efecto del agregado de una capa drenante sobre la tosca compactada y de geotextil triturado al espesor de arena seleccionada según normas FEI, y del contenido de humedad como modificadores de las propiedades mecánicas medibles con instrumentos sencillos: Going Stick (GS): Medidor de Impacto (ITD), Medidor de Tracción Rotacional y Sonda de humedad (TDR). Estos instrumentos son utilizados hoy en diversos deportes y su utilización permitiría tener clasificaciones rápidas de la calidad de la superficie que permitirían tomar decisiones de manejo inmediatas.

La hipótesis general es la siguiente:

La inclusión de un paquete drenante en el diseño constructivo, el agregado de geotextil triturado y el ajuste de la humedad del espesor de amortiguación modifican las propiedades mecánicas de la superficie y su variabilidad. A la vez que esta modificación

puede ser detectada con los instrumentos de medición sencillos Going Stick, ITI, RPS Y TDR.

Capítulo III

El objetivo general de este capítulo fue determinar la incidencia de dos diseños de pista de césped y de base arena sobre las propiedades mecánicas del espesor de amortiguación: resistencia a la penetración GSI y PC, tracción (GSI), impacto (ITI), tracción rotacional (RPS).

En este capítulo se buscó discernir el efecto del agregado de una capa drenante sobre la tosca compactada y de geotextil triturado al espesor de amortiguación constituido por césped sobre arena seleccionada según normas FEI, manteniendo la humedad constante, como modificadores de las propiedades mecánicas medibles con instrumentos sencillos: Going Stick (GS), Medidor de Impacto (ITD), Medidor de Tracción Rotacional, Penetrómetro de Cono (PC) y Sonda de humedad (TDR). Estos instrumentos son utilizados hoy en diversos deportes y su utilización permitiría tener clasificaciones rápidas de la calidad de la superficie que permitirían tomar decisiones de manejo inmediatas.

La hipótesis general es la siguiente:

La inclusión de un paquete drenante y de geotextil triturado en el perfil constructivo del espesor de arena y césped modifican las propiedades mecánicas de la superficie y su variabilidad medidos a través de instrumentos sencillos: Going Stick, ITI, RPS Y TDR y las variables derivadas de ellos.

Capítulo IV

El objetivo general de este capítulo fue determinar las propiedades funcionales de dos sistemas constructivos de pista de arena, uno convencional y otro del tipo área elástica por el método de Titb medidos por OBST (Norma FEI) y por Clegg Hammer (medidor de impacto).

En este capítulo se buscó comparar las propiedades funcionales de un perfil mezcla de arena y geotextil triturado sobre una base de hormigón con un perfil de idéntica composición, pero con el agregado de una capa intermedia denominada pad de goma EVA. El contenido de humedad también fue un factor a analizar. Las propiedades funcionales son derivadas de las mediciones realizadas con el OBST. Este dispositivo se basa en la biomecánica de un caballo al galope y tiene sensores que permiten reproducir la aceleración y fuerzas verticales y horizontales generadas por la mano líder al impactar contra una superficie. Es a partir de estas variables que se definen las propiedades funcionales. El OBST es el instrumento tomado como patrón tanto por la FEI como por el Jockey Club Americano. Se incluyó el Clegg Hammer (Figura 1:5) (dispositivo de impacto y liviano) para realizar la comparación de los datos obtenidos por este último instrumento y el instrumento patrón (Figura 1.5).



Figura 1.5: A la izquierda de la imagen el OBST montado sobre una camioneta y a la derecha el Clegg Hammer ambos sobre la misma superficie.

El agregado de pad en el diseño constructivo y el ajuste de humedad del espesor de amortiguación modifican las propiedades funcionales de la superficie y su variabilidad. A la vez que esta modificación puede ser detectada con el instrumento diseñado específicamente para superficies ecuestres OBST como con un instrumento de medición sencillo como el Clegg Hammer.

Capítulo V

En este capítulo se proporciona una discusión de todos los hallazgos con la literatura existente y los marcos teóricos. A través de este capítulo se dan aportes de la investigación al marco actual. Conclusiones de los hallazgos clave y sus implicaciones más amplias y algunas recomendaciones para futuras investigaciones y áreas potenciales para explorar en superficies ecuestres y herramientas simples.

1.8 Referencias:

Para finalizar se proporcionan todas las referencias de las citas incluidas en la tesis.

Capítulo II: Comparación experimental de mediciones sencillas utilizadas para la caracterización de superficies ecuestres de arena.

2.1. Introducción

Investigaciones recientes han considerado el efecto de las superficies ecuestres sobre la incidencia de lesiones (Hernandez et al., 2001; Parkin et al., 2004; Murray et al., 2010; Egenvall et al., 2013). Además, del impacto en el rendimiento del caballo (Hernlund et al., 2017; Peterson et al., 2010).

Como resultado, las mediciones cuantitativas de las superficies han sido adoptadas por la Federación Ecuestre Internacional (FEI) (Hernlund, 2016). Las mediciones cuantitativas también fueron adoptadas por las carreras de caballos en América del Norte ya que existe el potencial para vincular estas mediciones con los extensos datos epidemiológicos disponibles (Georgopoulos y Parkin, 2016, 2017; Georgopoulos, 2017; Peterson et al., 2021).

Las mediciones cuantitativas desarrolladas por las iniciativas FEI incluyen cinco propiedades funcionales: firmeza, amortiguación, rebote, agarre, uniformidad y consistencia (Hobbs et al., 2014). Con el fin de mantener las propiedades funcionales en sus niveles óptimos, generalmente se acepta que la profundidad constante de la superficie, la arena correctamente clasificada, el control constante de la humedad, el mantenimiento adecuado de la superficie, la selección adecuada de los materiales utilizados para la base y los aditivos en la arena tienen un impacto directo sobre el caballo (Thomason y Peterson, 2008; Setterbo et al., 2012; Holt et al., 2014). Estos aportes cambian la desaceleración vertical y horizontal del casco y las fuerzas resultantes en la extremidad del caballo.

La construcción de superficies tanto para entrenamiento como para competición debe basarse en el entendimiento de la biomecánica equina. Por lo tanto, para caracterizar completamente una superficie ecuestre, es necesario usar una tasa de carga que coincida con el atleta equino y replicar las cargas horizontales y verticales. Tanto la velocidad

como la carga son importantes, ya que los materiales de construcción de la arena incluyen partículas insaturadas que, en general, no son lineales y dependen de la velocidad de deformación (Goncu, 2012). Sin embargo, la carga y la tasa de carga también dependen de la disciplina ecuestre, la actividad dentro del evento y el tipo de paso (aire). Por lo tanto, es necesario identificar aquellas partes de cada disciplina y aquellas partes de cada evento que son críticas para el rendimiento y la seguridad de los atletas (Merkens et al., 1993; Clayton, 1995; Thomason y Peterson, 2008; Clayton y Hobbs, 2019).

Si bien la medición de estos parámetros con instrumentos que imitan las cargas y la velocidad del caballo es lo ideal (Thomason y Peterson, 2008, Mahaffey et al., 2013, 2016), el costo asociado con los instrumentos requeridos presenta un desafío significativo. No es posible una reducción directa del tamaño o la velocidad de la carga, dado que la velocidad y el tamaño del atleta equino son fijos. Si se pudiera determinar una correlación entre al menos algunos de los parámetros constructivos críticos y el rendimiento medido con herramientas más pequeñas, entonces existe el potencial para expandir el uso de mediciones cuantitativas a regiones donde el costo es un problema mayor. Idealmente, también sería posible que estas herramientas más pequeñas se fabriquen localmente. La primera prioridad del instrumento debería ser la movilidad. Es más probable que se adopte una herramienta que se pueda transportar fácilmente entre superficies para realizar evaluaciones. La accesibilidad, y la posibilidad del uso de la adquisición de datos comercialmente disponibles también facilitarán la construcción de estas herramientas más simples por parte de los constructores y propietarios de superficies, aumentando aún más el potencial de adopción generalizada.

2.1.1 Motivación para mediciones horizontales y verticales

Dos de las propiedades funcionales descritas por la investigación de la FEI, la amortiguación y la firmeza, están relacionados con la respuesta vertical de la superficie.

Estas propiedades funcionales se relacionan con el impacto inicial y la consiguiente carga de la masa del cuerpo del animal que se transfiere dinámicamente al soporte del miembro. La tracción, el componente horizontal de la carga sobre la superficie, es en una dirección durante el primer y segundo impacto y luego se invierte durante el despegue del casco cuando la superficie soporta la propulsión (Thomason y Peterson, 2008). La resistencia a la tracción afecta la medida en que el casco se desliza hacia adelante y hacia atrás, rotar al aterrizar, girar, empujar, passage, hacer piruetas o en un alto repentino (Lewis et al., 2015; Claußen y Hessel, 2017). La tracción longitudinal afecta el deslizamiento del casco en el plano horizontal al frenar en un movimiento lineal. También afecta la resistencia de la superficie a la penetración del casco en la forma del ángulo con el suelo, durante el despegue o la penetración de la superficie por la parte interior del casco en un giro cerrado. La extremidad del caballo gira alrededor del eje horizontal del casco que es resistido por la fricción entre las partículas y las fibras de refuerzo en la superficie ecuestre (Thomason y Peterson, 2008; Lewis et al., 2015). El Probador Biomecánico de Superficies Orono representa el estado del arte en la evaluación de superficies en regiones significativas para las actividades ecuestres del mundo. Este dispositivo es un requisito en las competencias de élite de la Federación Ecuéstre Internacional (FEI) (Hernlund et al., 2017) y una norma obligatoria en las pistas de carreras de caballos de Norte América (Mahaffey et al., 2013; Mahaffey et al., 2016. HISA, 2021). Las herramientas simplificadas elegidas para caracterizar la superficie deben incluir, no solo las características de carga vertical, sino también el comportamiento a la tracción, ya que estas características pueden no estar correlacionadas entre superficies.

2.1.2 Herramientas más pequeñas propuestas

Para caracterizar tanto la respuesta vertical como la horizontal de la superficie, se requieren herramientas separadas o herramientas con más de un eje de medición. Para

superficies de césped, un sistema con un sensor de fuerzas y acelerómetro, el Going Stick (Turfrax Ltd. Cambridgeshire, UK), es ampliamente aceptado en las carreras de pura sangre (Godfrey, 2017) y ha sido propuesto como un estándar internacional (American Society of Testing and Materials, 2020). Esta herramienta mide tanto la resistencia a la penetración como la resistencia a la tracción de la superficie. Estos dos parámetros se adquieren empujando el dispositivo hacia la superficie y luego inclinándolo 45 grados hacia el suelo. Es razonable suponer que estos dos movimientos están relacionados con el impacto y la respuesta de propulsión de la superficie, incluso si las mediciones son análogas. El valor máximo de desaceleración para una pequeña masa que se deja caer desde una distancia pequeña se usa en algunas aplicaciones deportivas y se basa comúnmente en la norma ASTM D5874-16. Un medidor de tracción rotacional descrito por la norma ASTM F2333-04 es una medida superficial de rotación a diferencia del Going Stick que mide la resistencia a la tracción debajo de la superficie. También es posible hacer uso de un sistema de adquisición de datos simple de bajo costo para ambos dispositivos. Dado que el contenido de humedad de la superficie controla la respuesta de casi todas estas herramientas, también se incluye en el trabajo una sonda de humedad basada en un estándar de ASTM D6565 más antiguo. Además del bajo costo de las herramientas descritas en las tres normas ASTM, todas ellas también son fácilmente transportables.

Con la excepción del Going Stick, las cargas utilizadas en estas mediciones son bajas. Esto es útil para evaluar el estado de la capa superior de la superficie y puede ser importante para el control de calidad en la instalación de la superficie. Además, la compactación que resulta de dejar caer repetidamente una pequeña masa sobre la superficie (Clegg Hammer) estará influenciada por los aditivos en la superficie y la selección de arena. De hecho, la intención original del dispositivo utilizado en el impacto vertical es evaluar el nivel de compactación y estabilidad de los materiales base utilizados

para los cimientos de una ruta o edificio (Twomey et al., 2013; Mohajerani et al., 2019). Si bien estos dispositivos livianos generalmente son más adecuados para describir la carga estática de la superficie y la carga de animales mucho más pequeños que un caballo, pueden permitir inferir la condición de las capas más profundas de la pista y son útiles para la evaluación de cada una de las capas cuando las superficies se construyen en varios estratos.

2.1.3 Otros dispositivos pequeños

Para este tipo de mediciones, también se han investigado otros dispositivos ligeros que miden la resistencia a la penetración de una sonda cónica. Estos dispositivos, normalmente denominados penetrómetros, pueden ser dispositivos con una sonda más pequeña que mide la respuesta dinámica (ASTM D6067/6067M-17) o dispositivos grandes montados en camiones (ASTM D3441-16) o los dispositivos cuasiestáticos portátiles más pequeños comúnmente utilizados en la agricultura (ASAE S313.3 Standards, 1999).

Todos estos penetrómetros probarían potencialmente la carga máxima vertical para las capas más profundas de la superficie independientemente de la respuesta de la superficie horizontal, aunque ninguno de estos dispositivos replica la carga dinámica donde la carga máxima vertical y horizontal están relacionadas (Thomason y Peterson, 2008). Un diseño experimental también debería incluir lanzamientos a una serie de profundidades para obtener información relacionada con la respuesta del perfil (Ratzlaff et al 2005, Setterbo et al 2012). Los otros dispositivos también tienen una característica de alcance que son inconvenientes para las mediciones diarias, como la oscilación de la varilla en cada lanzamiento, la variación de las fuerzas verticales aplicadas dependiendo de la profundidad y el efecto sobre la compactación superficial de las ruedas que sostienen los penetrómetros. Al igual que el Going Stick, estos dispositivos son sensibles a la

compactación de las capas inferiores de la superficie y que influyen en la carga de la extremidad a velocidades más altas, como durante un galope o el aterrizaje de un salto. Las grandes cargas dinámicas bajo estas condiciones, que son de hasta 2,5 veces el peso corporal, están significativamente influenciadas por las propiedades de las capas más profundas de la superficie (Thomason y Peterson, 2008). El Going Stick es una alternativa más interesante ya que también incluye el movimiento de flexión o tracción, así como la penetración.

Los métodos alternativos para medir la tracción máxima rotacional con electrónica más sofisticada hacen que esos parámetros sean más confiables, aunque más costosas. Lewis y colaboradores (Lewis et al., 2015) utilizaron un dispositivo de este tipo y encontraron una relación lineal débil entre la tracción rotacional medido usando el medidor de tracción Glen Witty (GWTT) y la tracción longitudinal cuantificada usando el OBST. El medidor del pico máximo de tracción rotacional RPS descrito por la norma ASTM F2333-04, en el mismo estudio no mostró ninguna relación con otras herramientas mencionadas anteriormente, pero detectó diferencias en superficies con cargas más altas. Como resultado, los dispositivos simples utilizados en este trabajo se evalúan por su capacidad para hacer que las evaluaciones cuantitativas sean accesibles para más constructores de superficies. Es importante comprender la utilidad de estos dispositivos y reconocer las diferencias de carga entre estos dispositivos y un caballo.

2.1.4 Factores críticos

La absorción de impacto, en las superficies de arena, dependen en gran medida de la humedad. Distintos grados de absorción de impacto y resistencia a la tracción se alcanzan con distintos niveles de humedad. Este comportamiento también depende de la composición del material (Peterson et al., 2012; FEI 2014). El agregado de materiales sintéticos como el geotextil o la cera y las labores de mantenimiento han probado ser

mejoradores de la absorción de impacto. El efecto del contenido de humedad, la adición de geotextil y la existencia de drenaje influyen en las propiedades funcionales de las superficies ecuestres (Ratzlaff et al., 1997, 2005; Holt et al., 2014). Estas modificaciones que afectan las propiedades funcionales y, por lo tanto, el rendimiento, también es razonable suponer que pueden tener un impacto en las lesiones y en la seguridad. En las superficies que se prueban en base de arena de sílice, se utilizaron herramientas livianas de medición estándar para caracterizar superficies con diferentes diseños que representan las utilizadas en una amplia gama de instalaciones. Si bien no se replica la medición más compleja de las propiedades funcionales, el objetivo fue investigar la sensibilidad de estas herramientas a los cambios en el diseño de la superficie. Estas herramientas se podrían utilizar para el control de calidad al instalar nuevas superficies y también pueden ser útiles al evaluar la consistencia del mantenimiento por parte de los usuarios.

2.2 Objetivo

El objetivo general de este capítulo es evaluar el efecto de tres factores sobre las propiedades mecánicas del espesor de amortiguación de una superficie ecuestre construida sobre tosca compactada. Los factores son paquete drenante, adición de geotextil triturado y humedad utilizando herramientas sencillas como el Going Stick (GS), el Medidor de Impacto (ITD), el Medidor de Tracción Rotacional (RPS) y la Sonda de Humedad (TDR).

Los objetivos específicos son:

1. Evaluar el agregado de una capa drenante debajo del espesor de amortiguación (arena seleccionada según normas FEI) y sobre la tosca compactada sobre las propiedades mecánicas de la superficie: resistencia a la penetración (GSP),

tracción (GSS), Impacto (ITI) y tracción rotacional (RPS) de la superficie en estudio

2. Determinar el efecto del agregado de geotextil triturado en las propiedades mecánicas del espesor de amortiguación (arena seleccionada según las normas FEI) y en el contenido de humedad.
3. Establecer el efecto del contenido de humedad sobre las propiedades mecánicas.
4. Establecer el mejor estimador de la condición a partir de las propiedades mecánicas utilizando instrumentos sencillos: Going Stick (GS), Medidor de Impacto (ITD), Medidor de Tracción Rotacional y Sonda de Humedad (TDR).

2.3 Hipótesis

Las hipótesis asociadas son las siguientes:

Hipótesis 1: El uso de capa de separación denominado paquete drenante reduce el pico de carga durante el impacto del casco sobre la superficie y su variabilidad.

Predicción 1: La resistencia a la penetración (GSP), a la tracción longitudinal (GSS) y rotacional (RPS) y el impacto (ITI, medido como deformación) aumentarán y reducirán su variabilidad debido al uso de paquete drenante.

Hipótesis 2: El agregado de geotextil triturado reduce el contenido de humedad y tiene un efecto modificador sobre las propiedades mecánicas medidas del espesor de amortiguación y reduce su variabilidad.

Predicción 2: La resistencia a la penetración (GSP), la tracción longitudinal (GSS) y la tracción rotacional aumentaran y el impacto (ITI) y el Contenido volumétrico de humedad CVH (medido por TDR) se reducirá por agregado de geotextil triturado.

Hipótesis 3: Las variaciones en el contenido de humedad modifican las propiedades mecánicas medidas del espesor de amortiguación: resistencia a la penetración, tracción longitudinal, tracción rotacional e impacto.

Predicción 3: La resistencia a la penetración (GSP), la tracción longitudinal (GSS) y la tracción rotacional (RPS) y el impacto (ITI) aumentarán por reducción del contenido de humedad.

Hipótesis 4: Las variaciones en las propiedades mecánicas resistencia a la penetración (GSP), la tracción longitudinal (GSS) y la tracción rotacional (RPS) y el impacto (ITI) ocurridas por el agregado de paquete drenante, geotextil y contenido de humedad pueden ser detectadas con los dispositivos sencillos de medición.

Predicción 4: Las variables registradas por los dispositivos Going Stick, RPS, ITI podrán identificar cambios en las propiedades mecánicas asociados a las variaciones de los tres factores en estudio.

2.4 Materiales y métodos

2.4.1 Diseño del estudio

Es un diseño experimental de dos niveles con tres factores 2^3 (Cuadro 2.1) y dos repeticiones (dieciséis unidades experimentales). Los detalles de la construcción se muestran en la Figura 2.1. El primer factor es la adición de geotextil: donde no se agrega geotextil (G1) y con 2 kg por m^2 de geotextil triturado agregadas a la superficie de 10 cm de profundidad (G2). El segundo factor es el paquete drenante que consta de una malla de geotextil no tejido de 150 micrones colocado sobre la base de tosca, sobre esta se dispone una capa de geomalla (GN 900) y seguidamente otra capa de malla de geotextil no tejido de 150 micrones (Figura 2.2.). Las capas de geotextil se utilizan para evitar la saturación de la geomalla con arena.

Las dos condiciones para la capa de drenaje son la ausencia de un paquete de drenaje (D1) y la incorporación del paquete de drenaje (D2). Los contenidos de humedad gravimétricos (% CGH) del tratamiento de menor CGH fue de $11,16 \% \pm 2,93$ CGH (M1) y el de mayor fue $21,69 \% \pm 3,90$ CGH (M2).

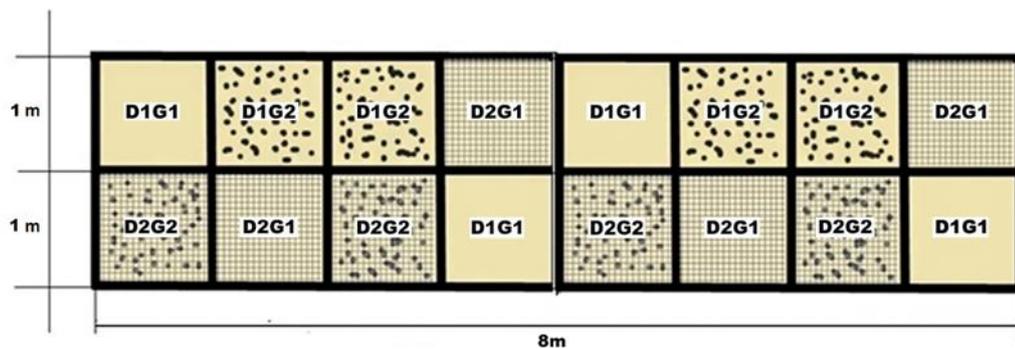


Figura 2.1: Esquema de distribución de cajas según el material del espesor de amortiguación superior compuesto por arena (G1) o arena con geotextil (G2) sobre tosca (D1) o sobre paquete drenante (D2) y combinaciones de ambos tratamientos (D1G1, D1G2, D2G1, D2G2).

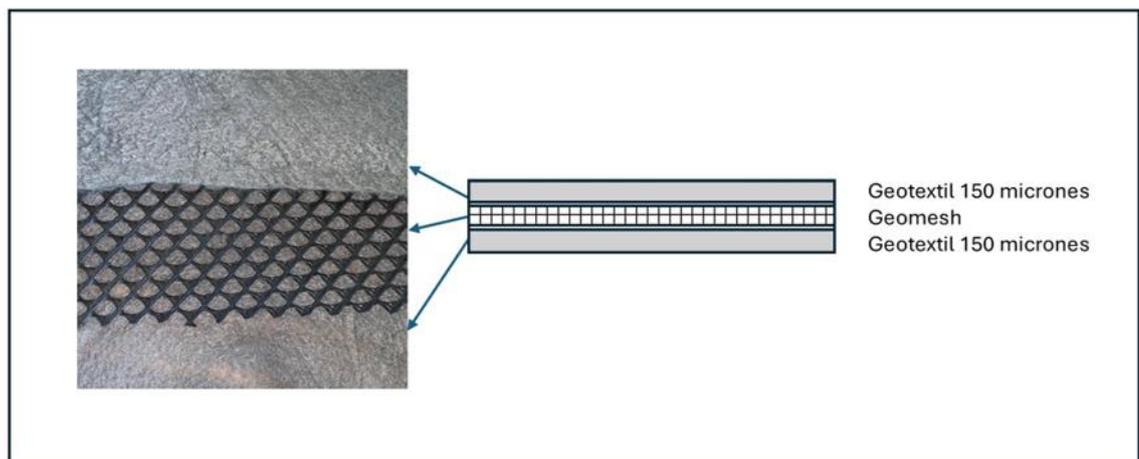


Figura 2.2: Esquema de la disposición de las capas del paquete drenante. Consiste en una capa de geotextil no tejido de 150 micrones dispuesto sobre una capa de geomalla de polietileno de alta densidad denominada Geonet (GN 900) y ésta sobre una capa adicional de geotextil no tejido de 150 micrones.

Cuadro 2.1: Descripción de los 2³ tratamientos del diseño experimental. geotextil: G1: Sin geotextil, G2: con 2 kg por m²; drenaje: D1: sin paquete drenante, D2: con paquete drenante descrito en los métodos. Humedad: M1: Humedad gravimétrica baja (11,16% ± 2,93 CVH), M2: Humedad gravimétrica alta (21,69% ± 3,90 CVH)

Factores		Paquete Drenante (D)			
		D1		D2	
		Humedad (M)			
		M1	M2	M1	M2
Geotextil (G)	G1	D1G1M1	D1G1M2	D2G1M1	D2G1M2
	G2	D1G2M1	D1G2M2	D2G2M1	D2G2M2

Se colocaron dieciséis cajas de 1m x 1m x 0,20 m sobre una base de tosca compactada (Dirección Nacional de Vialidad., 1993) o sobre una base de tosca compactada con un paquete drenante (Apéndice A y B). Las cajas se construyeron siguiendo las especificaciones de construcción de un fabricante de superficies ecuestres (Sports Arenas S.A., 2020).

Las dimensiones de las cajas de prueba se seleccionaron de acuerdo con la ecuación de Boussinesq para limitar los efectos de borde (Das, 2008). Otros investigadores han utilizado cajas con dimensiones similares y forman parte de los protocolos de prueba establecidos (Setterbo et al., 2011; Northrop et al., 2016;)

2.4.2 Cajas de prueba:

Se instalaron ocho experimentos con dos repeticiones (dieciséis unidades experimentales) sobre una base de tosca compactada con una pendiente transversal de 0,7% (Figura 2.3). Se aplicó arena en dos capas, cada capa de 0,05 m fue compactada por separado sobre un total de 0,10 m de material sobre la base, para alcanzar el nivel de compactación óptimo para una superficie ecuestre. Cada capa se compactó utilizando una masa de 4 kg que se dejó caer tres veces desde una altura de 0,30 m sobre un área de 0,20 m por 0,17 m. La compactación se realizó de manera similar en todos los tratamientos. (Figura 2.4).

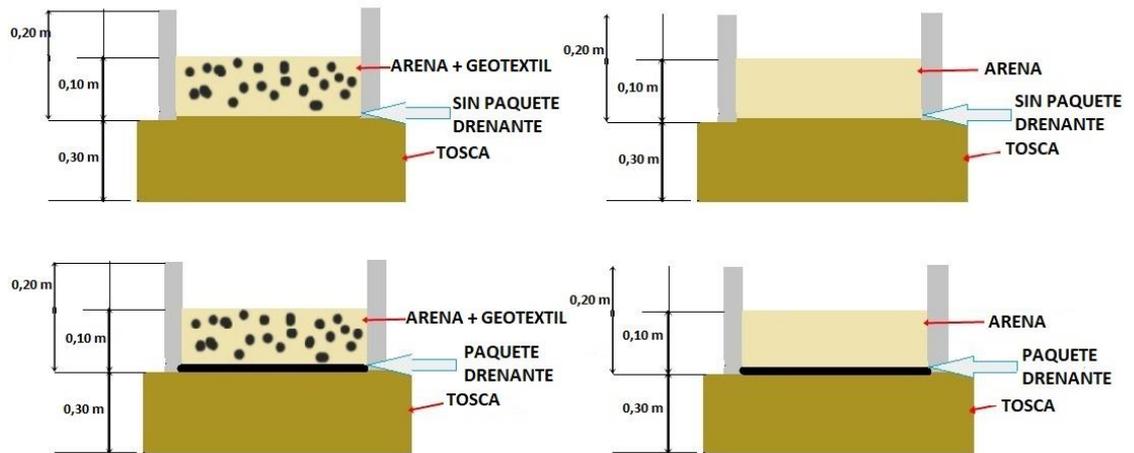


Figura 2.3: Esquema del diseño de cajas que incluye la profundidad del material del espesor superior que consiste en arena (G1) o arena con geotextil (G2) sobre tosca compactada (D1) o sobre paquete drenante (D2).



Figura 2.4: Imagen del pisón, masa de 4 kg lanzada tres veces desde una altura de 0,30 m sobre un área de 0,20 m por 0,17 m.

El perímetro de las cajas de ensayo se definió colocando baldosas de hormigón de 2 m de largo, 0,20 m de profundidad y 0,08 m de ancho alrededor del borde de la parcela. Las cajas de ensayo de un metro cuadrado estaban divididas por paredes internas hechas con dos hileras de losas de concreto de 0,20 m de largo, 0,10 m de profundidad y 0,08 m de ancho, que estaban reforzadas en el exterior con losas de concreto idénticas

desplazadas 0,10 m para eliminar los espacios entre las losas. La arena era originaria de la zona donde se encontraban las cajas de prueba: el Centro Ecuestre de Haras Solaguayre, en la localidad de Los Cardales, provincia de Buenos Aires, Argentina. El geotextil y la geomalla fueron proporcionados por un constructor local de superficies ecuestres y eran consistentes con el uso local. La granulometría de la arena se determinó mediante el test de tamiz e hidrómetro (arcilla y limo) y fue 92,3% arena, 2,6% limo y 5,1% arcilla (Testing by Racing Surfaces Testing Laboratory, Lexington, KY, USA). La distribución del tamaño de partícula de la arena se determinó mediante la norma ASTM D422-63(2007) e2, el limo y la arcilla se determinaron con hidrómetro. El geotextil utilizado en las cajas fue 100 % poliéster según las pruebas de FTIR (ASTM F3416-21). La mineralogía de la arena se determinó mediante análisis de difracción de rayos X (ASTM F3419-22). La densidad aparente se determinó de acuerdo con la norma ASTM D698-12, tanto para arena como para arena con refuerzo de fibra para determinar el contenido de humedad óptimo para la compactación de la superficie (esto se describe con más detalle en el Apéndice A).

Las mediciones del % de CVH se realizaron sobre una base volumétrica, cada vez que se compactó al nivel determinado por el protocolo de preparación de muestra del RSTL, usando TDR de acuerdo con la norma ASTM D6870M-19. El contenido de humedad gravimétrica también se determinó en el laboratorio. De cada caja se tomaron muestras, se pesó y se colocó en estufa a 65°C por 48 horas. (ISO 17892-1:2014).

2.4.3 Medición in situ de las cajas de ensayo:

Como se describió anteriormente, se realizaron cinco mediciones in situ utilizando cuatro herramientas de medición una vez que se instalaron las cajas: Penetración de Going Stick (GSP) y Tracción de Going Stick (GSS) (American Society of Testing and Materials., 2020), el dispositivo de prueba de impacto (ITD) basado en ASTM D5874-

16, el dispositivo de Tracción Rotacional (RPS) basado en ASTM F2333-04R2017, y el Contenido Volumétrico de Humedad (CVH) que es consistente con ASTM D6790-19. La operación y el uso de cada uno de estos dispositivos fue consistente con los estándares aplicables que se describen a continuación.

2.4.4 Sonda con sensor de dos ejes Going Stick:

El Going Stick mide la resistencia a la penetración y la resistencia a la rotación longitudinal de la cuchilla en el césped. La penetración muestra la resistencia a la penetración del casco del caballo en el césped y la rotación de la cuchilla es una medida de la resistencia a la tracción de la superficie a una profundidad de 100 mm que puede estar relacionada con la rotación del casco en la superficie y la fuerza de propulsión posterior del caballo (Figura 2.5).



Figura 2.5. Sonda de sensor de fuerza de dos ejes (Going Stick).

El dispositivo ha sido propuesto recientemente como una herramienta de medición estándar internacional (American Society of Testing and Materials, 2020). Además de las dos medidas distintas de penetración y tracción, el dispositivo también calcula una medida

integrada de los dos valores medidos que se denomina "índice de Going Stick". El índice de Going Stick se usa comúnmente en las carreras de pura sangre para describir las condiciones de la superficie (Dufour y Mumford, 2008). La fuerza máxima requerida para presionar la sonda contra la superficie y el par máximo aplicado al mango para girar la sonda 45 grados se registran en la memoria del dispositivo y luego se utilizan para calcular el índice. El par se calcula a partir de las fuerzas aplicadas a 128 mm de la punta y el cálculo de la carga asume que la rotación del dispositivo ocurre alrededor de la parte superior de la placa de la sonda que penetra en la superficie (Mumford, 2006, Dufour y Mumford, 2008)

Los valores de carga de tracción y penetración también se han convertido a partir de los valores medidos de las fuerzas para intentar relacionarlos con la tensión aplicada a la superficie utilizando el área de la sonda de penetración y el área del lado de la sonda. Debido a que la sonda de penetración es cónica y el dispositivo no está restringido horizontalmente, la carga y el par aplicados al mango superior del dispositivo tienen una relación compleja con la tensión en el suelo. Sin embargo, asumiendo varias simplificaciones es posible calcular una carga en un punto de referencia que proporciona un valor cuantificable razonable para la comparación.

El Going Stick se calibró sobre una plataforma de calibración (Apéndice B), con una masa de carga en la punta y la salida de la fuerza se convirtió luego en N y Nm para la fuerza de penetración y el par aplicado, respectivamente (Dufour y Mumford, 2008). El uso de una calibración con cargas conocidas y ubicaciones de medición informadas en unidades de medida estándar es consistente con la prueba estándar propuesta. Se utilizó el software Going Stick versión 2.30 que no promedia los valores y guarda el valor máximo de penetración y tracción. Este software contiene tres modos: "salto" (o jump), ya que fue desarrollado para carreras de salto, "plano" (o flat) que fue desarrollado para carreras en llano en el Reino Unido y "+33%" que fue desarrollado para carreras en llano

en Estados Unidos. El modo +33% se llama así porque se necesitaría una superficie un 33% más firme para obtener la misma lectura que el modo plano en la escala de 1 a 15 del Going Stick. Durante la recopilación de datos y la calibración, el Going Stick se configuró en modo plano.

2.4.5 El dispositivo de medición de impacto (ITD)

La dureza de la superficie y la resistencia a la compactación se midieron utilizando un dispositivo de medición de impacto autoconstruido (ITD) basado en la norma ASTM D5874-16 (Figura 2.6). Esta norma describe la estructura y el uso del Clegg Hammer. El Clegg Hammer es un dispositivo portátil utilizado para evaluar la dureza y resistencia al impacto de superficies, de suelos deportivos o caminos. Consiste en una masa (martillo) de peso estandarizado que se deja caer desde una altura fija sobre la superficie a medir, registrando la desaceleración del impacto mediante un acelerómetro. Los datos obtenidos se expresan en unidades de Impacto Clegg (Clegg Impact Value o CIV), lo que permite evaluar la firmeza de la superficie para actividades deportivas o tráfico de vehículos. Su diseño y su uso está estandarizado en las normas ASTM F1702-10, ASTM F1936-07 y ASTM D5874-16 lo que permitió la auto construcción y determinar el manejo de los datos. El Impact Test Device, instrumento construido siguiendo la norma constructiva del Clegg Hammer, consiste en el mismo sistema solo que se registra la deformación que produce la masa al impactar en el suelo, carece de acelerómetro y datalogger. Esta deformación es registrada manualmente por un medidor laser que previamente es calibrado en reposo y mide la diferencia alcanzada una vez que la pesa toca el suelo. Al igual que el Clegg Hammer consiste en una masa de 2,25 kg que se deja caer repetidamente dentro de un tubo en cada ubicación desde una altura de 0,45 m. A diferencia de los diversos diseños estáticos y dinámicos de penetrómetros, el desplazamiento en el ITD se mide para una masa de impacto más grande que los pequeños

dispositivos cuadrados o cónicos que normalmente se usan en un penetrómetro (ASAE Standards, 1999). En el ITD, la distancia a la masa de impacto se mide con respecto a un punto de referencia en la parte superior del tubo utilizando un dispositivo de medición de distancia láser comercial de bajo costo (Modelo GLM 150 c, Bosch, Singapur). El costo del sistema es una fracción de los del Clegg Hammer y, si se produjera localmente, estaría al alcance de casi todos los constructores y propietarios de superficies ecuestres.

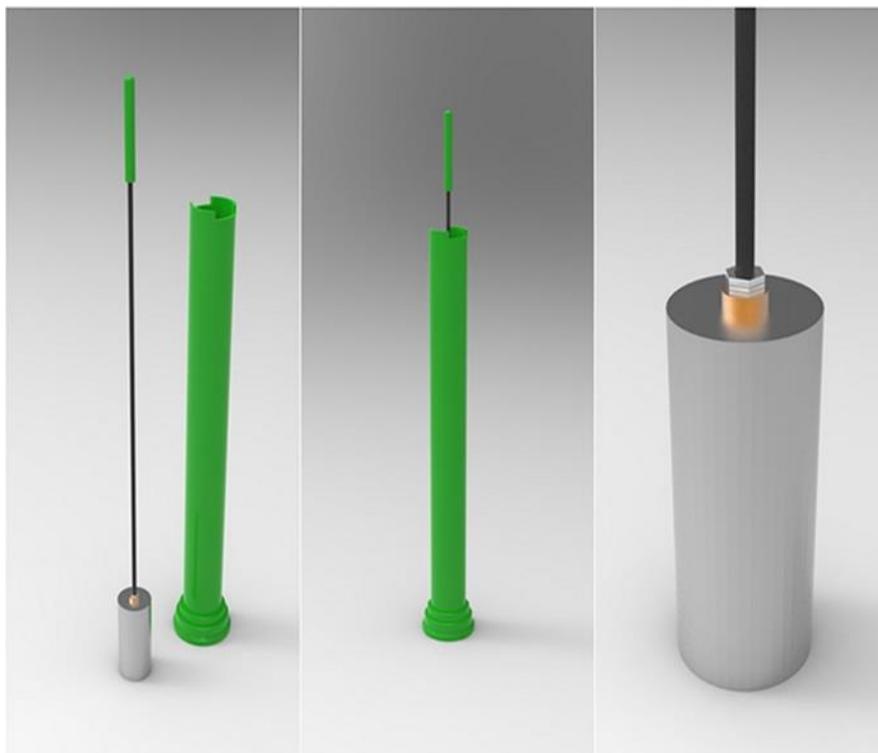


Figura 2.6. Dispositivo de medición de impacto autoconstruido (ITD) para operar de manera análoga al dispositivo descrito en ASTM D5874-16.

2.4.6 Medidor de tracción rotacional (ASTM F2333-04).

La resistencia a la tracción rotacional se midió utilizando un medidor de tracción rotacional, un dispositivo de diseño sencillo compuesto por un eje de acero unido a una base circular, que incluye tres placas de 10 kg y una herradura fijada en el centro de la cara inferior de la base. En el extremo opuesto del eje, se encuentra un torquímetro con una pinza, donde el operador aplica la fuerza que es registrada por el dispositivo. El medidor se eleva aproximadamente 30 cm por encima de la superficie a evaluar y se deja caer. Luego, el operador toma la pinza y gira el eje hasta que el torquímetro registra el

valor máximo de fuerza rotacional. El dispositivo utilizado es una adaptación de la norma ASTM F2333-04, diseñada originalmente para evaluar el agarre en deportes como el fútbol y el rugby. En esta versión, los tacos de la base circular fueron reemplazados por una herradura, lo que lo hace más adecuado para su uso en superficies ecuestres. La Figura 2.7 muestra el dispositivo, el mismo que también fue empleado junto a otros en investigaciones equinas para estudiar la débil correlación entre la percepción del jinete y el agarre de la superficie (Lewis et al., 2015; Northrop et al., 2016). Para posicionar el disco en la superficie, se toma por el eje y se deja caer el peso de 30 kg con un diámetro de la base de 0,30 m, con una herradura de acero número 3 en su parte inferior. Esta herradura incluía dos ramplones de sección troncocónica en su cara inferior, de 2,5 cm de largo, que se estrechaban de un diámetro de 1,35 cm a 0,50 cm. La carga máxima de tracción rotacional (RPS) se midió utilizando un torquímetro digital, con un rango de medición de 4 a 200 Nm y una precisión de 0,08 Nm.

Para registrar la resistencia a la tracción, el torquímetro se giraba hasta alcanzar la carga máxima, manteniendo la placa plana sobre el suelo. Se realizaron cinco mediciones por cada área evaluada, y para minimizar la variabilidad en los resultados, todas las pruebas fueron realizadas por el mismo operador, en línea con las mejores prácticas (Blundell, 2010).



Figura 2.7. Medidor de tracción rotacional (ASTM F2333-04).

2.4.7 Sonda de humedad:

La reflectometría de dominio temporal (TDR) se usa ampliamente para medir el contenido volumétrico de humedad (% CVH) como uno de los principales factores necesarios para lograr una superficie uniforme. Se utilizó el medidor de humedad TDR (Spectrum Field Scout TDR-100 Aurora, IL USA) con dos varillas de medición de 8 cm de longitud. Se tomaron cinco ubicaciones de muestra en cada una de las cajas de prueba.

2.5 Análisis estadístico

Para todas las variables se realizó la prueba de Shapiro Wilks para comprobar la normalidad y test de Levene para la homogeneidad de las varianzas. Se realizaron gráficos de distribución y de valores de predicho y residuo para cada una de las variables. Se realizó análisis de varianza utilizando un software de análisis estadístico comercial (Infostat). Para la comparación de medias marginales se realizó la prueba Tuckey. Los valores de $p < 0,05$ se consideraron estadísticamente significativos.

Se realizó análisis de regresión lineal entre variables dependientes e independientes, se determinaron los coeficientes de regresión y el estadístico asociado T y la significación p para cada variable dependiente e independiente, también se calcularon coeficientes de correlación de Pearson para identificar el grado de asociación entre variables dependientes.

El modelo propuesto para el ensayo de las cajas es:

$$Y_{ijk} = \mu + D_i + M_j + G_k + (DM)_{ij} + (DG)_{ik} + (MG)_{jk} + (DMG)_{ijk} + e_{ijkl}$$

D: Drenaje (1,2) M: Humedad (1,2) G: Geotextil (1,2)

2.6 Resultados

Usando las cinco mediciones obtenidas de cuatro dispositivos, se halló que el efecto de los diferentes tratamientos de las cajas es significativo para algunas de las condiciones probadas: drenaje (D), humedad (M) y la adición de geotextil (G). Los resultados de cada tratamiento y medición se muestran sucesivamente en los cuadros 2.2 al Cuadro 2.9. Los efectos significativos se muestran a través de los valores f y p.

2.6.1 Going Stick

La penetración registrada con GS (GSP) fue estadísticamente significativa para el paquete drenante (D) y para la adición de geotextil (G) (Cuadro 2.2). GSP mostro valores más altos con el segundo sistema de drenaje (D2) y con la adición de geotextil triturado (G2), además de ser significativa para la interacción entre el contenido de humedad y el geotextil (MG) (Figura 2.8, Cuadro 2.3). Los tratamientos M1G2 y M2G2 presentaron mayores valores de penetración. La tracción medida con GS (GSS) fue estadísticamente significativa para el paquete drenante, D1: $8,23 \pm 3,03$ y D2: $6,04 \pm 2,12$ ($P < 0.05$).

Cuadro 2.2: Valores F y p de los factores principales, Humedad, Drenaje y Adición de Geotextil sobre las variables obtenidas del Going Stick: GSP (penetración) y GSS (tracción) y de las interacciones.

Variable	Humedad		Drenaje		Geotextil			
	F	p	F	p	F	p		
GSP	0,12	0,7307	9,68	0,0028	36,26	0,0001		
Media \pm ds (N) (por niveles)	M1	356,83 \pm 165,35	D1	332,79 \pm 162,53	G1	282,40 \pm 120,87		
	M2	368,47 \pm 150,55	D2	394,16 \pm 145,03	G2	444,56 \pm 145,75		
GSS	0,23	0,6343	10,39	0,0021	0,64	0,4271		
Media \pm ds (Nm) (por niveles)	M1	7,30 \pm 2,57	D1	8,23 \pm 3,033	G1	7,30 \pm 2,91		
	M2	6,63 \pm 3,14	D2	5,73 \pm 2,18	G2	6,65 \pm 2,90		
Interacciones								
	Humedad x Drenaje		Humedad x Geotextil		Drenaje x Geotextil		Humedad x Drenaje x Geotextil	
	F	p	F	p	F	p	F	p
GSP	0,27	0,6059	4,42	0,0395	2,33	0,1319	3,09	0,0838
GSS	1,37	0,2465	0,26	0,6111	2,80	0,0996	1,22	0,2738

*Test de Tukey Alfa = 0,05 $p < 0,05$.

Cuadro 2.3: Coeficientes de regresión (R^2), constante y significación de cada modelo lineal para cada variable obtenida del Going Stick: GSP (penetración), GSS (tracción),

Variable	R^2	p			
		Const.	Humedad	Drenaje	Geotextil
GSP	0,35	0,793	0,7234	0,0076 *	0,0001 *
GSS	0,23	<0,0001 *	0,5877	0,0008 *	0,2716

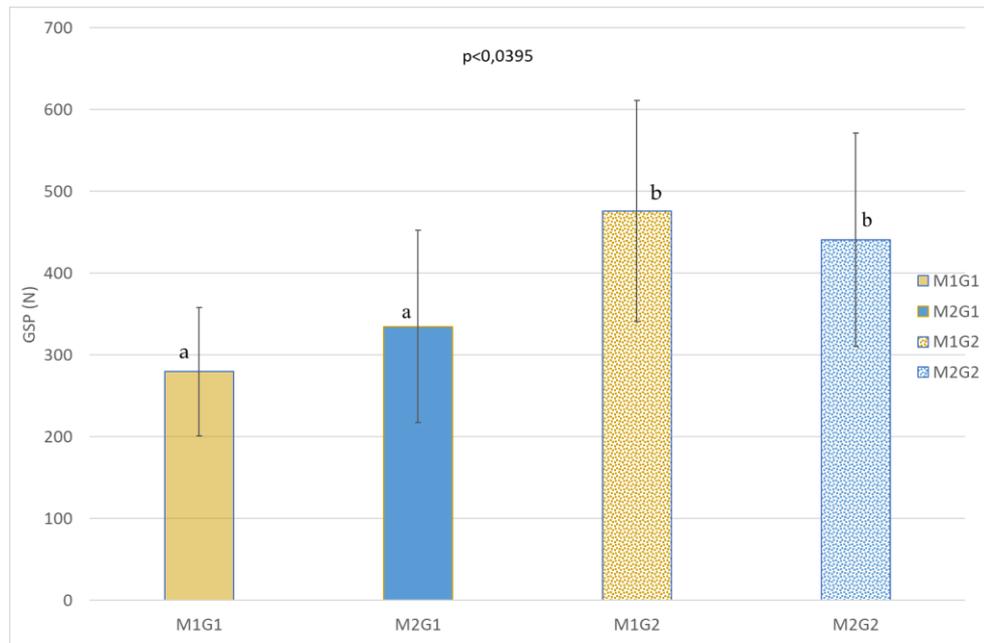


Figura 2.8: Penetración (GSP en N) medida con el Going Stick. Valor medio y desvío estándar de la interacción humedad x geotextil de los tratamientos M1G1: CGH fue 11,16 % \pm 2,93 sin geotextil; M2G1: CGH 21,60 % \pm 10,90 sin geotextil; M1G2: CGH fue 11,16 % \pm 2,93 con 2 kg/m² de geotextil; M2G2: CGH 21,60 % \pm 10,90 con 2 kg/m² de geotextil. Las letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas $p < 0,0395$. Los tratamientos con Geotextil mostraron un valor de resistencia a la penetración mayor.

El análisis de regresión lineal (Cuadro 2.3) mostró que GSS ($R^2=0,23$) estuvo positivamente asociado con D, y GSP fue significativa ($R^2= 0,35$) para D y G.

2.6.2 Dispositivo de prueba de impacto

Las mediciones realizadas con el dispositivo de medición de impacto (ITD) fueron estadísticamente significativas para los tres factores y para la interacción de drenaje y geotextil (D x G) (Cuadro 2.4, Figura 2.9). ITD fue sensible a ambos tratamientos de humedad logrados, M1: 0,01209 m \pm 0,00316; M2: 0,01316 m \pm 0,00314). El desplazamiento fue mayor cuando el paquete drenante estaba presente (D2G1 y D2G2); sin embargo, el geotextil puede provocar un desplazamiento similar cuando el paquete drenante está ausente (D1G2). Si bien ambos tratamientos con paquete drenante (D2G1 y D2G2), presentan los valores más altos de deformación y los menores desvíos estándar, el menor desvío lo presenta el tratamiento con paquete drenante y sin geotextil (D2G1).

(D1G1: 0,00983 m \pm 0,00323 m frente a D1G2: 0,01376 m \pm 0,00304 m; D2G1: 0,01272 m \pm 0,00215 m; D2G2: 0,01472 m \pm 0,00278 m). El análisis de regresión lineal (Cuadro 2.5) estuvo positivamente asociado ($R^2 = 0,24$) para D y G.

Cuadro 2.4: Valores de F y p para los factores principales sobre ITI (F y p-valor), media y desvío estándar (en m) en los tres factores Humedad, Drenaje y agregado de Geotextil y de las interacciones.

Variable	Humedad		Drenaje		Geotextil			
	F	p	F	p	F	P		
ITI	5,03	0,0284	4,75	0,0331	13,84	0,0004		
Media \pm ds (m) (por niveles)	M1	0,01208 \pm 0,0032	D1	0,01208 \pm 0,0037	G1	0,01148 \pm 0,0030		
	M2	0,01306 \pm 0,0031	D2	0,01332 \pm 0,0025	G2	0,01392 \pm 0,0029		
Interacciones								
	Humedad x Drenaje		Humedad x Geotextil		Drenaje x Geotextil		Humedad x Drenaje x Geotextil	
	F	p	F	p	F	p	F	p
ITI	1,79	0,1860	0,01	0,9253	6,18	0,0156	2,27	0,1372

*Test de Tukey Alfa = 0,05 $p < 0,05$.

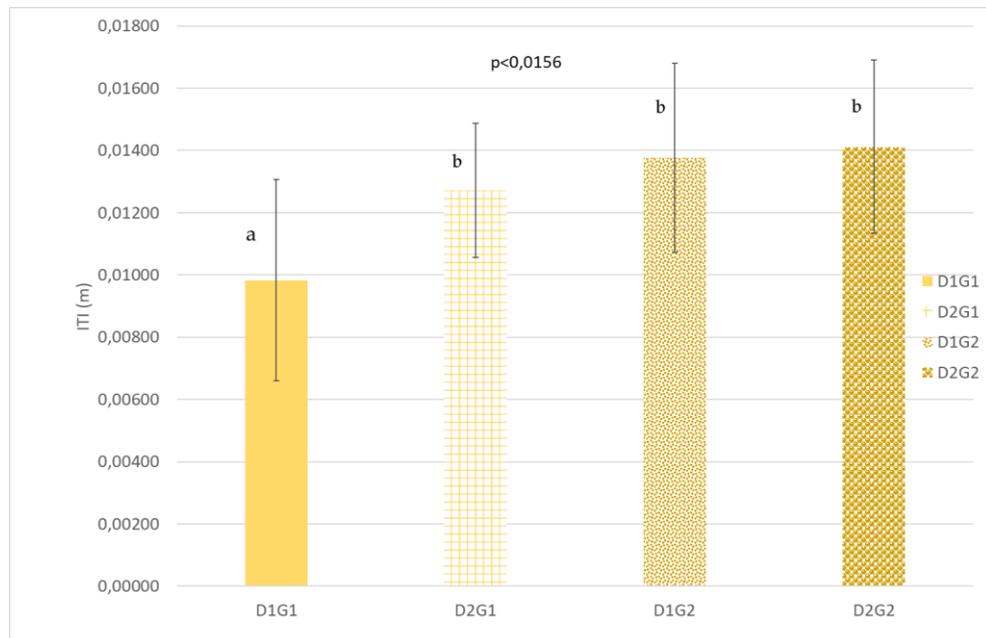


Figura 2.9. Valor de impacto registrado con el ITD medido como deformación (en m). Valor medio y desvío estándar de la interacción drenaje y geotextil para ITD de los tratamientos D1G1: sin paquete drenante y sin geotextil; D2G1: con paquete drenante y 2 kg/m² de geotextil; D1G2: sin paquete drenante y 2 kg/m² de geotextil; D2G2: con paquete drenante y 2 kg/m² de geotextil. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p < 0,0156$. Los tratamientos con paquete drenante y/o geotextil mostraron mayor deformación.

Cuadro 2.5: Coeficientes de regresión (R^2), constante y significación de cada modelo lineal para cada variable ITI (Índice de Impacto).

Variable	R^2	P			
		Const.	Humedad	Drenaje	Geotextil
ITI	0,24	0,0194 *	0,1204	0,0203 *	0,0002 *

2.6.3 Dispositivo ASTM de Tracción rotacional:

El pico de tracción rotacional (RPS) fue significativo para la adición de geotextil (G1: 23,57 Nm \pm 1,85 y G2: 25,86 \pm 2,16; respectivamente). La interacción de los factores Humedad, Geotextil y Paquete drenante es significativa (Figura 2.10 y Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6: Valores de F y p para los factores principales sobre RPS (Pico máximo de tracción rotacional), media y desvío estándar en los tres factores Humedad, Drenaje y agregado de Geotextil y para las interacciones.

Variable	Humedad		Drenaje		Geotextil			
	F	p	F	p	F	p		
RPS	0,01	0,9356	3,59	0,0627	19,17	0,0001		
Media \pm SD (Nm) (por niveles)	M1	24,44 \pm 2,26	D1	24,28 \pm 2,28	G1	23,53 \pm 1,91		
	M2	24,74 \pm 2,49	D2	24,94 \pm 2,47	G2	25,68 \pm 2,34		
Interacciones								
	Humedad x Drenaje		Humedad x Geotextil		Drenaje x Geotextil		Humedad x Drenaje x Geotextil	
	F	p	F	p	F	p	F	p
RPS	0,18	0,6724	0,16	0,6933	0,80	0,3754	4	0,0498

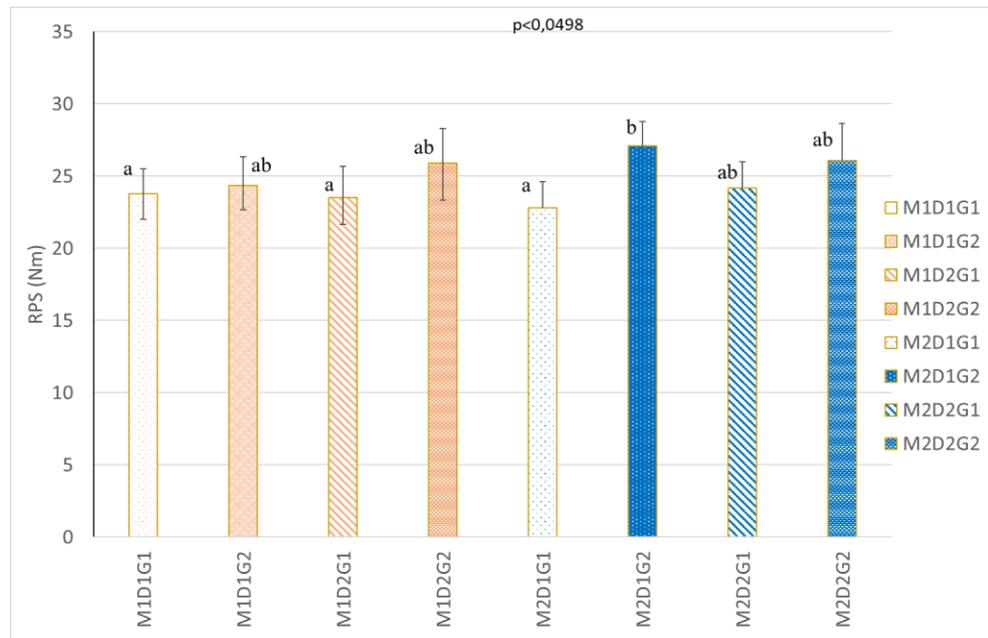


Figura 2.10. Valor del pico máximo de tracción rotacional (RPS) medido con el dispositivo según ASTM F2333-04 en Nm. Valores medios y desvío estándar de la interacción drenaje, humedad y geotextil de los tratamientos M1D1G1: CGH fue 11,16 % \pm 2,93, sin paquete drenante y sin geotextil; M1D1G2: CGH fue 11,16 % \pm 2,93, sin paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil; M1D2G1: CGH fue 11,16 % \pm 2,93 con paquete drenante y sin geotextil; M2D1G1: CGH 21,60 % \pm 10,90 sin paquete drenante y sin geotextil; M2D1G2: CGH 21,60 % \pm 10,90 sin paquete drenante con 2 kg/m² de geotextil; M2D2G1: CGH fue 21,60 % \pm 10,90 con paquete drenante y sin geotextil; M2D2G2: CGH fue 21,60 % \pm 10,90 con paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas. $p < 0.0498$. Los tratamientos con geotextil presentaron los valores mayores de RPS.

Cuadro 2.7: Coeficientes de regresión (R^2), constante y significación de cada modelo lineal para RPS (Pico de Tracción Rotacional).

Variable	R^2	p			
		Const.	Humedad	Drenaje	Geotextil
RPS	0,25	0,0001 *	0,5638	0,0558	0,0001 *

2.6.4 Medidor de humedad:

El Contenido Volumétrico de Humedad (%CVH) fue significativamente diferente para los tratamientos de Humedad, M1: 10,20 \pm 2,41; M2: 25,08 \pm 4,39 $p < 0,0001$ (Cuadro 2.7).

Las interacciones entre los factores no fueron significativas.

Cuadro 2.8: Valores de F y p para los factores principales sobre CVH (f y p-valor), media y desvío estándar en los tres factores Humedad, Drenaje y agregado de Geotextil.

Variable	Humedad		Drenaje		Geotextil			
	F	p	F	p	F	p		
CVH	252,73	0,0001	0,28	0,5991	2,03	0,1594		
Media \pm SD (%) (por niveles)	M1	10,20 \pm 2,41	D1	18,42 \pm 8,5	G1	19,46 \pm 8,06		
	M2	25,08 \pm 4,31	D2	18,99 \pm 8,14	G2	17,95 \pm 8,52		
Interacciones								
	Humedad x Drenaje		Humedad x Geotextil		Drenaje x Geotextil		Humedad x Drenaje x Geotextil	
	F	p	F	p	F	p	F	P
CVH	0,54	0,4668	0,01	0,9382	0,10	0,7507	0,49	0,4865

*Test de Tukey Alfa = 0,05 p < 0,05.

Los coeficientes de correlación entre dispositivos en el Cuadro 2.9 muestran que GSP está correlacionado con ITI (p < 0,0011; r = 0,38) y GSP está correlacionado con GSS (p < 0,0003; r = 0,42).

Cuadro 2.9: Coeficientes de correlación de Pearson (r) de cada una de las variables GSP (resistencia a la penetración por GS), GSS (resistencia a la tracción longitudinal por GS), ITI (índice de impacto por ITD), RPS (Pico de tracción rotacional) y CVH (Contenido volumétrico de humedad por TDR).

Variable	GSP		GSS		ITI		RPS		CVH	
	P	r	p	r	p	r	p	r	p	r
GSP	0,0001	1	0,0003 *	0,42	0,0011 *	0,38	0,1690	0,17	0,5444	-0,07
GSS	0,0003*	0,42	0,0001 *	1	0,2583	-0,14	0,7407	-0,04	0,8792	0,05
ITI	0,0011	0,38	0,2583	-0,14	0,0001 *	1	0,2880	0,13	0,4140	0,10
RPS	0,1744	0,16	0,7407	-0,04	0,2880	0,13	0,0001 *	1	0,6385	0,06
CVH	0,5444	-0,07	0,8792	0,05	0,4140	0,10	0,6385	0,06	<0,0001 *	1

*Valores significativos p < 0,05.

2.7 Discusión

El objetivo de este estudio fue determinar la capacidad de detectar el efecto del contenido de humedad, la adición de geotextil y el drenaje en el diseño de una pista ecuestre. El diseño incluyó arena de sílice de origen local y un paquete drenante utilizado como capa fundacional. Las pruebas utilizaron dispositivos fácilmente disponibles que podrían usarse para ayudar a mantener la consistencia durante y después de la construcción de la superficie.

La resistencia a la penetración medida con GS fue sensible a diferentes aspectos del diseño de la superficie, aunque la resistencia a la tracción medida con el GS fue sensible a uno de tres factores. GSP detectó los efectos del paquete de drenante y la adición de geotextil. La adición de geotextil fue detectada principalmente por GSP. La superficie con geotextil presentó mayor GSP, RPS e ITI (311,19 N \pm 105,13 vs 455,97 N \pm 131,87; 23,53 Nm \pm 1,91 vs 25,68 Nm \pm 2,34; 0,01148 m \pm 0,003 vs 0,01392 m \pm 0,0029; respectivamente). Aunque la adición de geotextil es una práctica generalizada en el hemisferio norte, no se ha investigado una comparación de arena idéntica sin efectos de geotextil utilizando este tipo de herramientas de medición, este estudio brinda los primeros resultados al respecto. Estos datos muestran que estas herramientas pueden detectar cambios que resultan de la adición de geotextil triturado. Estos atributos pueden interpretarse relacionados con la firmeza y amortiguación de la superficie.

Aunque GSS está relacionado con el deslizamiento en la tracción longitudinal de la superficie, los resultados indican que GSS tiene una relación lineal débil con el uso de un paquete drenante ($R^2=0,23$, 0,001) y el resultado indicaría que la tracción longitudinal lograda en el experimento es menor cuando el paquete drenante está presente (D1: 8,23 \pm 3,03 Nm; D2: 6,04 \pm 2,12 Nm). El paquete drenante consta de dos capas de geotextil con una geomalla en el medio, esta disposición ha sido estudiada extensamente para cimientos. Este tipo de refuerzo de geoceldas tiene un mejor comportamiento respecto de otros tipos de geosintéticos debido a su estructura tridimensional (Dash, 2012). Para los cimientos, la fricción de la interfaz suelo-refuerzo es menor que la fricción de la interfaz suelo-suelo (Juran, et al., 1988). Esta puede ser la razón de menor tracción longitudinal para el tratamiento D2.

El contenido de humedad es un factor generalmente conocido en las propiedades dinámicas de las superficies ecuestres (Ratzlaff et al., 2005; Holt et al., 2014;). En un caballo al galope, el casco ejerce fuerzas de compresión y fricción a través de la

profundidad del espesor de amortiguación. Ratzlaff (Ratzlaff et al., 2005) encontró que un nivel moderado de humedad estaba asociado con niveles más bajos de impacto. En este experimento la densidad aparente alcanzada para los tratamientos con adición de arena y geotextil resultó ser menor (Figuras A2 y A3, Apéndice A). El Impacto medido con el ITD fue sensible a ambos tratamientos de humedad. El ITD es una medida del desplazamiento de arriba hacia abajo de la masa del dispositivo que implica la compactación del espesor de amortiguación provocada por la caída de la masa. Esta compactación se incrementa a valores más altos de contenido gravimétrico de humedad (CGH). Esta medida del desplazamiento indicada por el ITD es una medida de la capacidad de absorber impacto de la superficie. La condición M1 para CGH ($11,16 \% \pm 2,93$) estuvo fuera del rango de la curva estándar para la densidad aparente mostrada (Figura A3 Apéndice A). El resultado es una superficie de arena muy suelta con menos poros lubricados para facilitar la reorientación de las partículas de arena. El M2 de CGH ($21,60 \% \pm 10,90$) da como resultado una compactación que es consistente con el rango de la curva de densidad aparente (Figura A2 y A3 Apéndice A).

Un ITI más alto ($0,01209 \text{ m} \pm 0,00316$) en M2 de CGH representa que el impacto es menor y la capacidad de absorción es mayor para este contenido de humedad. Esto es consistente con Ratzlaff (Ratzlaff et al., 2005), también puede indicar que el rebote de energía está presente. ITI tiene una relación lineal positiva con GSP ($P=0,38$, $p=0,0011$).

El efecto del geotextil en la respuesta de la superficie está relacionado con el movimiento relativo entre la herradura y la superficie. Esta resistencia da como resultado fuerzas mayores durante un movimiento de pivote (Twomey et al., 2013). El GSP, el ITD y el RPS han demostrado ser todos sensibles a este efecto. El RPS se ha abordado en trabajos anteriores con resultados más débiles (Lewis et al., 2015, Claußen et al., 2018). En este trabajo se muestra una sensibilidad a la triple interacción del paquete de drenaje, el contenido de humedad y la adición de geotextil. El deslizamiento del casco sobre la

superficie puede ocurrir entre la herradura y la superficie, o dentro del material debajo del casco dependiendo de las características de la superficie y el diseño de la herradura (Lewis et al., 2015). El contenido de humedad y la existencia del paquete drenante pueden afectar la respuesta de la superficie medida por RPS. La resistencia a la tracción rotacional de la superficie se detecta mediante las medidas RPS para la condición con geotextil, aunque los coeficientes R^2 no son significativos. Dada la forma del instrumento RPS, es probable que la medición este sesgada por la resistencia a la penetración y por esta razón esta medida es consistente con GSP. Aunque la profundidad efectiva de las mediciones es diferente y, la fuerza vertical máxima sobre las capas superficiales puede ser el factor que controla estos resultados.

Se demostró que el contenido de humedad, el paquete drenante y los tratamientos con geotextiles son significativos para el ITD. Los tres factores afectaron la deformación de la superficie de la arena. La humedad y el geotextil podrían lograr la uniformidad que el uso del paquete drenante no pudo, como se ve en la desviación estándar más alta. Este resultado es consistente con la influencia esperada del paquete drenante.

Aunque se pudieron observar aumentos en el GSP en la combinación de humedad y geotextil, el mayor GSP mostró que la humedad tiene un resultado similar al agregado del geotextil mostrado en el ANOVA. Los incrementos en GSP son mayores cuando se agrega geotextil ($M1G2= 70,3 \%$, $M2G1=19,7 \%$ y $M2G2=57,60 \%$).

Las diferencias en la máxima densidad aparente del material utilizado (arena con y sin geotextil) pueden ayudar a comprender este resultado. La densidad aparente varía con la cantidad de humedad, con la máxima densidad aparente alcanzada en un contenido de humedad específico. El contenido de humedad en el cual las partículas del suelo pueden reorientarse mientras permanecen en contacto proporciona los mayores valores de densidad aparente. Las curvas de densidad aparente de los materiales (arena y arena con geotextil agregado) mostraron diferencias en el rango de contenido de humedad en el

que ambos sistemas se mantienen estables a la compactación (Figura A1 y A2 Apéndice A). Los sistemas de arena obtienen densidades aparentes más altas que los sistemas de arena con la adición de geotextil en ambos CVH% probados (Figura A2 Apéndice A). El CVH% de la prueba de densidad aparente cubre el rango del presente experimento (M1= 10,20 % \pm 2,41 y M2: 25,08 % \pm 4,39 probado con TDR). Esto puede sugerir que la adición de geotextil con la compactación utilizada en este experimento respondería como un sistema de amortiguamiento de profundidad de baja densidad. Holt y colaboradores (Holt et al., 2014) informaron que las superficies de baja densidad tienen una carga máxima más baja y una aceleración máxima más baja en el impacto. En este experimento, la dureza estuvo representada por el menor desplazamiento alcanzado por el ITD cuando se aplicó M1 (alta densidad aparente). Aunque la resistencia a la penetración (GSP) se mide como una carga vertical máxima, el tamaño de la sonda y la profundidad de penetración son muy diferentes a los de la herradura.

No se esperaría que las propiedades intrínsecas de la superficie medidas con el RPS cambien con la adición de drenaje subterráneo. Sin embargo, el paquete drenante sobre la tosca compactada puede estar reduciendo la tasa de flujo de agua y también puede proporcionar una interfaz más consistente. Esta menor tasa de drenaje puede causar una distribución vertical del agua más homogénea y evitar la pérdida de agua mostrada por McInnes y Thomas en diseños experimentales de perfiles de césped (Rose-Harvey et al., 2012). En las cajas experimentales se utilizó una capa de geotextil doble con malla plástica. Estos resultados sugieren que la capa de malla no solo sirve como capa de separación, sino que también puede servir como almacenamiento de agua bajo la superficie. La capa de malla y la capa de drenaje pueden trabajar juntas para proporcionar un contenido de agua más consistente tanto lateralmente en las cajas como verticalmente en el perfil.

2.8 Conclusiones

El primer objetivo de este capítulo se cumplió al demostrar que el efecto del agregado de geotextil, el uso del paquete drenante y la humedad modifican las propiedades mecánicas de la pista. El efecto de cada uno de los factores y la interacción del contenido de humedad, el drenaje y el geotextil se probó con cinco de las variables medidas que representan a los cuatro instrumentos utilizados. Se confirmaron estudios previos con respecto al efecto de la humedad y la adición de geotextil, los que pueden ser detectados con instrumentos simples. Sobre los aportes originales de este estudio cabe destacar que la modificación de las propiedades mecánicas como la penetración y tracción longitudinal y las variaciones en la firmeza (el desplazamiento del ITD) por agregado de geotextil, en comparación con arena sin geotextil. Otro aporte original de este estudio es el resultado del efecto del paquete drenante y su equivalencia con la presencia de geotextil triturado ante algunas propiedades mecánicas. La inclusión de un paquete drenante influyó en las propiedades mecánicas de la superficie, como la tracción, la penetración y la firmeza medidos con GS y el ITD y en su menor variabilidad. Sin embargo, la capacidad de probar las propiedades funcionales de la superficie puede verse limitada debido a las cargas y las tasas de carga más bajas que representan estos instrumentos.

El segundo objetivo es comparar la capacidad de detección de las variaciones en propiedades mecánicas a partir de instrumentos sencillos. Los dispositivos más simples como GS, RPS o ITD parecen ser más adecuados para el proceso de control de calidad en la construcción de pistas, en lugar de una evaluación de la funcionalidad de la superficie completa para el rendimiento (o comportamiento) y la consistencia que utiliza equipos pesados y costosos.

De los tres instrumentos mencionados en el párrafo anterior, el ITD una herramienta autoconstruida y sencilla, basada en el diseño del Clegg Hammer detectó las variaciones producidas en la firmeza (Figura 2.11) como resultado de los factores G y D.

El ITD fue el único dispositivo que pudo detectar las diferencias entre los tres factores incluidos en este experimento. El ITD construido para este experimento es económico y portátil, lo que puede justificar un mayor desarrollo. Con más puntos de medición y mediciones de deflexión más precisas, este dispositivo promete ser una herramienta pequeña y asequible para el control de calidad. Otras herramientas como el GS pueden tener una aplicabilidad limitada debido a su complejidad de diseño y costo. Los fabricantes de algunas capas subsuperficiales utilizadas en determinadas disciplinas ecuestres, como el adiestramiento recomiendan profundidades de perfil inferiores a 10 cm. La sonda del GS sería demasiado larga para usarse en esas superficies. Si bien ninguno de estos dispositivos se correlaciona directamente con la carga de las extremidades de los caballos o el rendimiento en la arena. Muchas pistas tienen diseños estándar que, si se instalan correctamente, pueden proporcionar propiedades funcionales razonables. Como resultado, cuando se utilizan estos diseños estándar, un dispositivo de medición simple puede ser suficiente para el control de calidad y puede desempeñar un papel útil en el desarrollo de superficies de arena mejoradas. El trabajo futuro debe considerar enfoques alternativos que también sean adecuados para monitorear el mantenimiento de la superficie para garantizar que una superficie de alta calidad continúe brindando un rendimiento constante a lo largo del tiempo.

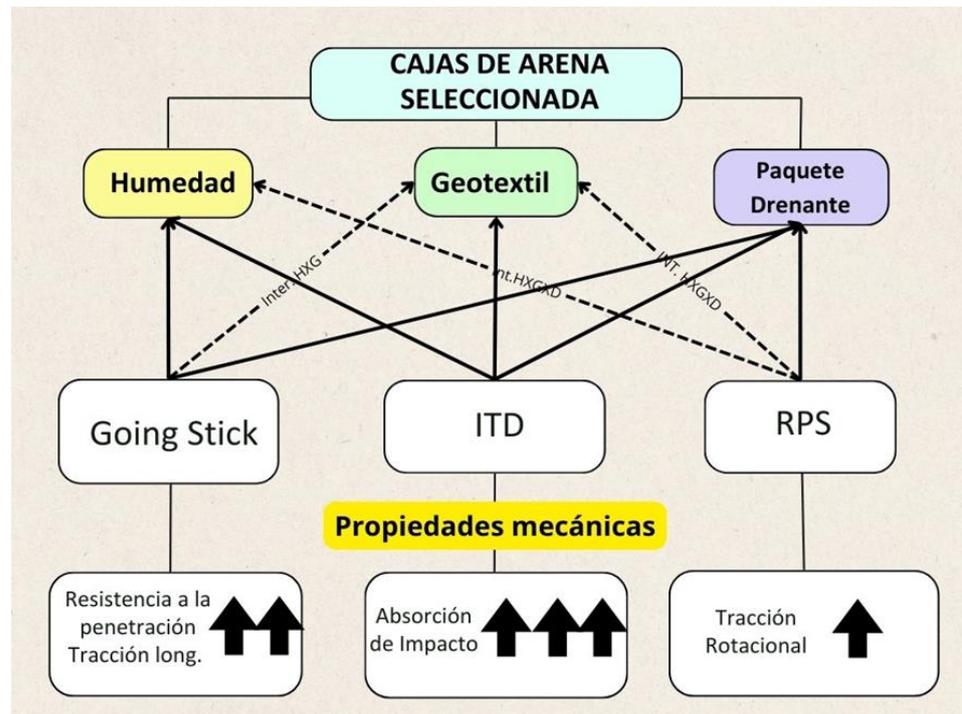


Figura 2.11: Síntesis de los resultados hallados en el capítulo. En las cajas en colores se hallan los factores: humedad: 2 niveles (CVH % 10% y 21 %), Geotextil, 2 niveles (sin y con) y paquete drenante dos niveles (sin y con). En las cajas blancas intermedias se hallan los instrumentos, Going Stick, ITD y RPS, y en las cajas de la última línea se hallan las propiedades mecánicas: las variables obtenidas del Going Stick: GSP (Resistencia a la penetración) y GSS (Resistencia a la tracción longitudinal), ITD (Dispositivo de Impacto) y RPS (Pico de tracción rotacional). Las flechas enteras indican efecto principal, y las de línea partida interacción de factores. Las flechas negras grandes en la última línea de cajas indica el aumento de la propiedad medida como consecuencia del agregado de geotextil, o humedad o paquete drenante. El número de flechas indica la capacidad de detección de más factores por parte del instrumento.

**Capítulo III: Comparación Experimental de la
Independencia de Mediciones Simples para la
Caracterización de Superficies Deportivas Equestres de
Césped con Especies Megatérmicas.**

3.1 Introducción

En la mayoría de los deportes ecuestres, las superficies de competencia son construidas con arena, arena reforzada con fibras o con césped (Hobbs et al., 2014). El uso de césped como superficie para deportes ecuestres añade complejidad a la interacción entre el pie, la herradura y la superficie. El césped permite que el casco y la herradura penetren en la superficie, mientras que el sistema de raíces proporciona un refuerzo adicional para soportar el casco y evitar una falla en la tracción o hendidura en la superficie (Liu et al., 2011; Wieder y Shoop, 2018). El césped también tiene claras ventajas sobre otros tipos de superficies como las de arena estabilizada con fibras, ya que, a diferencia de las fibras añadidas, las raíces dañadas volverán a crecer. Además, las raíces tienden a orientarse preferentemente en dirección vertical, lo que aumenta la resistencia a la tracción, pero no inhibe la penetración vertical. La orientación vertical de la raíz permite que el casco penetre en la superficie entre las raíces y al mismo tiempo la refuerzan durante la propulsión cuando se aplican grandes fuerzas horizontales. Como en otros campos deportivos, las zonas de raíces se construyen utilizando una alta proporción de arena para mejorar el crecimiento y el rendimiento (Serensits et al., 2011). Sin embargo, esto puede provocar una falta de cohesión y un mal apoyo a la herradura, por lo que es necesaria la estabilización de la zona radicular. La estabilización de la superficie se puede lograr reforzando la zona de la raíz con materiales sintéticos (Maher y Woods, 1990; Serensits et al. 2011; Chang et al., 2022).

Investigaciones recientes han considerado el efecto del tipo de superficie y condición sobre la incidencia de lesiones y el rendimiento (Hernández et al., 2001; Parkin et al., 2004; Hitchens et al., 2019). La disponibilidad de datos sobre lesiones y la sensibilidad del público hacia la seguridad de los jinetes y caballos, son una oportunidad para mantener la licencia social en las carreras de caballos (McGreevy y McManus, 2017;

Heleski et al., 2020). La investigación epidemiológica asociada al riesgo debido a las condiciones de la superficie se basa generalmente en valoraciones del césped. En general, las calificaciones de las condiciones de la superficie son juicios cualitativos de los oficiales de carreras (Peterson et al., 2005). Se pueden obtener mediciones cuantitativas de la pista, pero las calificaciones disponibles públicamente se ajustan de acuerdo con la experiencia del oficial de carreras y pueden no coincidir con las mediciones cuantitativas. Una excepción notable son los datos de Nueva Zelanda, que son estrictamente cuantitativos (Murphy et al., 1996; Thomas et al., 1996). Utilizan el penetrómetro de Longchamps para cuantificar el efecto de la superficie sobre los tiempos de carrera, pero recientemente se ha demostrado que los mismos datos son útiles para cuantificar el riesgo asociado a la condición de la superficie (Rogers et al., 2014). Las calificaciones en Australia, Japón y el Reino Unido son una combinación de datos cualitativos y cuantitativos interpretados por oficiales de carreras que han demostrado predecir el riesgo en algunos casos, aunque los resultados son mixtos (Neylan and Stubbs, 1998; Maeda et al., 2012; Rosanowski et al., 2017). Las herramientas existentes utilizadas para medir el rendimiento de la superficie del césped pueden proporcionar una base prometedora para la investigación. Actualmente, las clasificaciones de condiciones de las pistas disponibles pueden no ser comparables entre jurisdicciones de carreras o incluso dentro de una sola jurisdicción de carreras debido al ajuste cualitativo de las mediciones cuantitativas.

En otros deportes con equinos como el salto o el adiestramiento, el efecto de la condición de la superficie sobre las lesiones está menos disponible, ya que los datos de la condición sobre las lesiones están disponibles de manera menos consistente. Sin embargo, generalmente se acepta que comprender el riesgo para el caballo (y el jinete) puede requerir una mejor comprensión del estado de las superficies de césped ecuestre (Holt et al., 2014; Hobbs et al 2014; Lewis et al., 2015).

Dado que el contenido de humedad de la superficie está estrechamente relacionado con la calidad de la superficie, se incluyó en el trabajo una sonda de humedad basada en una norma ASTM anterior D6565 para determinar el contenido de humedad volumétrico (CVH%). El pico de tracción rotacional (RPS), basado en ASTM F2333, se utilizó en un estudio anterior (Holt et al., 2014; Lewis et al., 2015; Blanco et al., 2021) para probar superficies de arena con resultados variables. En césped, se utilizó con éxito un dispositivo similar descrito por Canaway (1986) para diferenciar especies, cultivares (Baker, S.W., 1997), materiales de refuerzo en la zona de las raíces (Adams, 1997; Dest y Guillard, 2005; Minner y Hudson, 2005) y biomasa (Li y Minner, 2009), pero era menos sensible a la condición del suelo, resultante del tráfico y la compactación (Baker, 1994; Goodall et al 2005; Minner y Valverde, 2005). El dispositivo de prueba de impacto (ITD), desarrollado según la norma ASTM D5874-16, es comparable al Clegg Hammer. Sin embargo, a diferencia del Clegg Hammer, el ITD (Medidor de impacto) no cuenta con un acelerómetro, por lo que el Índice de Prueba de Impacto (ITI) que mide refleja la deformación de la superficie (en metros) tras una caída. Guertal y Han (Guertal y Han, 2009) hallaron que el Clegg Hammer podía diferenciar entre áreas con y sin tráfico en pistas de césped, pero no podía distinguir diferentes niveles de tráfico. También se consideraron dos dispositivos de medición de uso común, el penetrómetro de Longchamps y el Going Stick. Aunque no existe un estándar de uso para el penetrómetro de Longchamps, este es el único dispositivo que se emplea actualmente en varios países del mundo (Neylan y Stubbs, 1998; Stubbs y Neylan, 2002) para determinación de la condición de la pista. Su uso está respaldado por datos que correlacionan las mediciones obtenidas con el rendimiento de los caballos mediante un modelo descriptivo general (Murphy et al., 1996; Thomas et al., 1996), así como por estudios que lo vinculan con la incidencia de lesiones (Rogers et al., 2014). En este estudio se utiliza una herramienta similar, el penetrómetro de cono dinámico, en lugar del Longchamps, ya que está incluido

como estándar con sólo ligeras modificaciones con respecto a un estándar internacional (ASTM D6951-03, 2015). El Going Stick se usa habitualmente en algunos países, si bien actualmente su uso no se encuentra estandarizado fue proporcionado por una entidad comercial, y se incluyó en la lista de herramientas actuales.

Si estas herramientas proporcionan mediciones independientes sobre el estado de la superficie de césped, podrían utilizarse en futuras investigaciones epidemiológicas a gran escala.

3.2 Objetivos:

El objetivo general de este capítulo fue determinar la incidencia de dos diseños de pista de césped, sin y con paquete drenante sobre base de arena en las propiedades mecánicas del espesor de amortiguación, mediante el uso de instrumentos sencillos: Going Stick (GS), Medidor de Impacto (ITD), Medidor de Tracción Rotacional, Penetrómetro de Cono (PC) y Sonda de humedad (TDR). Estos instrumentos son utilizados hoy en diversos deportes y su utilización permitiría tener clasificaciones rápidas de la calidad de la superficie que permitirían tomar decisiones de manejo inmediatas.

1. Evaluar la influencia de los factores paquete drenante y geotextil triturado en la modificación de las propiedades mecánicas de la superficie, mediante instrumentos sencillos: Going Stick (GS), Medidor de Impacto (ITD), Medidor de Tracción Rotacional, Penetrómetro de Cono (PC) y Sonda de Humedad (TDR).
2. Determinar la efectividad de los instrumentos de medición mencionados para facilitar clasificaciones rápidas y precisas de la calidad de la superficie para apoyar la toma de decisiones inmediatas en la gestión de superficies.

Las hipótesis asociadas son las siguientes:

3.3 Hipótesis:

Hipótesis 1: El uso de capa de separación (paquete drenante) reduce el pico de carga durante el impacto sobre la superficie cespitosa y su variabilidad.

Predicción 1: El Índice de Going Stick (GSI) y la resistencia a la penetración medido con el penetrómetro de cono (SPC) se reducirán y la deformación registrada por el medidor de impacto (ITI) aumentarán además de reducir su variabilidad como resultado del uso de paquete drenante.

Hipótesis 2: El agregado de geotextil triturado no solo permite reducir el contenido de humedad, sino que también disminuye la variabilidad de las propiedades mecánicas del espesor de amortiguación de césped.

Predicción 2: El CVH (TDR), y el impacto (ITI) se reducirán y el índice de Going Stick (GSI), la resistencia a la penetración (SPC) y la tracción rotacional (RPS) aumentarán por agregado de geotextil triturado y se reducirá su variabilidad.

Hipótesis 3: Las variaciones en las propiedades mecánicas ocasionadas por los factores mencionados pueden ser detectadas con los dispositivos sencillos de medición.

Predicción 3: Las variables registradas por los dispositivos Going Stick, RPS, ITI y PC podrán identificar cambios en las propiedades mecánicas asociados a las variaciones de los dos factores en estudio.

3.4 Materiales y métodos:

3.4.1 Visión general

Los efectos de dos sistemas de construcción de césped fueron probados con cinco dispositivos portátiles. Las superficies se prepararon con y sin paquete drenante (D) sobre la tosca compactada para establecer si existía algún efecto que modificara las propiedades mecánicas de la superficie. El paquete drenante era un sistema de tres capas que constaba de dos capas de geotextil con una capa de geomalla entre las de geotextil. Dado que el

perfil se construyó con sustrato de arena, se agregaron fibras de geotextil (G) en la zona de raíces, para estabilizar o reforzar el perfil.

3.4.2 Diseño del estudio

El diseño fue de bloques al azar con dos factores en dos niveles con dos repeticiones (ocho cajas). Los factores fueron la adición de geotextil a la arena, que constituye el espesor de amortiguación, y la inclusión de una capa de drenaje sobre la base de tosca compactada. A la ausencia de geotextil se denominó como G1 y a la inclusión de 2 kg por m² de fibras de geotextil mezcladas a través del perfil como G2. En ambos casos, el espesor de amortiguación tiene 10 cm de profundidad por encima de la base. La base era tosca compactada con 0,7% de pendiente transversal, ya sea directamente dispuesto debajo del espesor de amortiguación, designado como D1, o con la adición de un paquete drenante entre el espesor de amortiguación y la base de tosca, designado como D2 (Figura 3.1). El paquete drenante constó de dos capas de tela geotextil con una capa de geomalla colocada entre ellas. Las pruebas se realizaron en dos fechas: 3 de marzo de 2018 y 30 de marzo de 2018. Las dos fechas se consideraron como bloques en el análisis estadístico. El contenido gravimétrico de humedad se determinó en laboratorio para ambos tratamientos para las fechas 3 de marzo de 2018; fue $44,6\% \pm 9,40$ y el 30 de marzo de 2018 fue $47,6 \pm 8,94$ (ISO, 2014).

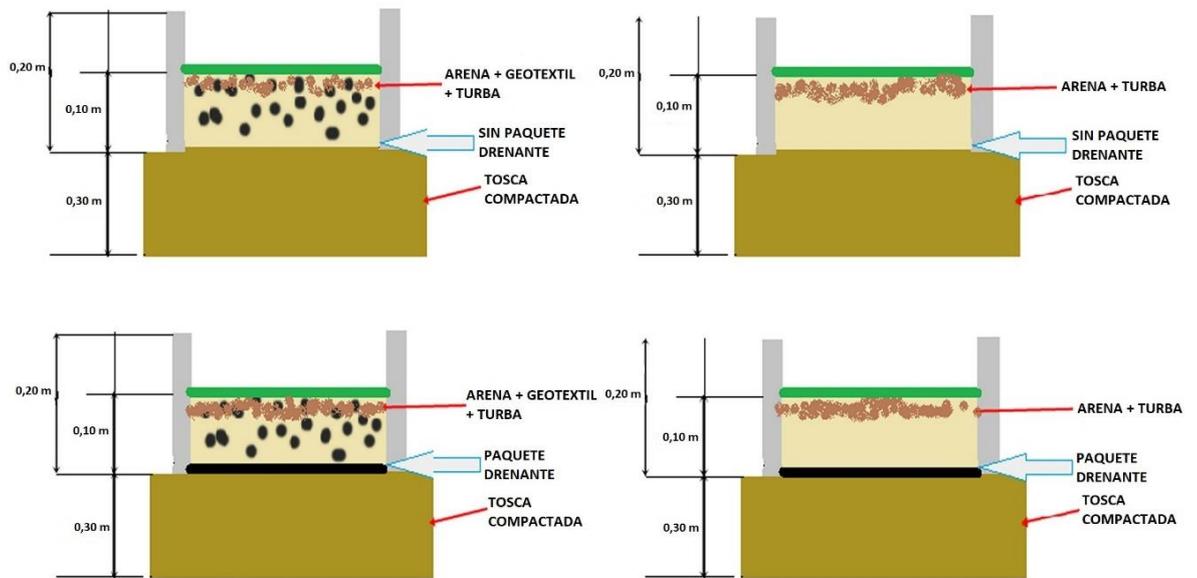


Figura 3.1. Esquema del diseño de las cajas, incluida la profundidad del material del espesor de amortiguación superior que consiste en arena (G1), o arena con geotextil (G2 = 2 kg por m²) sobre tosca compactada (D1) o sobre paquete drenante (D2).

Las dimensiones de la caja de prueba fueron 1 m × 1 m con una profundidad total de 0,20 m. Las cajas se construyeron como se describe en el capítulo II (Blanco et al., 2021) con las dimensiones establecidas a partir de pruebas anteriores (Setterbo et al., 2011; Holt et al., 2014). Los 10 cm de arena sobre los 30 cm de material base se aplicaron en dos capas. Cada capa de 5 cm se compactó por separado utilizando una masa de 4 kg que se dejó caer tres veces desde una altura de 0,30 m sobre un área de 0,20 m por 0,17 m para todos los tratamientos. Sobre la arena, se colocaron turba sphagnum y panes de césped de Bermuda híbrida cv “Tifway 419” (*Cynodon dactylon* (L.) Pers. x *C. transvaalensis* Burt Davy) con 2 cm de espesor de un suelo arcillo-limoso (sod). Todas las cajas fueron fertilizadas con fertilizantes de liberación controlada, los cuales eran completamente recubiertos y de solubilidad lenta. El fertilizante aplicado fue una mezcla de nitrógeno, fósforo y potasio (SPK) con 30 g/m² de Basacote (Compo Expert® GmbH, 2017) y 50 g/m² de Floranid permanent (Compo Expert® GmbH, 2017). Se suministró

riego durante todo el experimento. La altura de corte se mantuvo entre 30 y 50 mm en cada caja y durante todo el experimento.

El sustrato de cultivo fue 92,3% arena, 2,6% limo y 5,1% arcilla según norma ASTM D422-63 (Racing Surfaces Testing Laboratory, Lexington, Kentucky). El césped de 2 cm no tenía la misma composición que el perfil y fue adquirido de un productor de césped. El geotextil era 100% poliéster determinado por FTIR según norma ASTM F3416-21 (Lab Cor Materials, LLC, Seattle, WA, EE. UU.). La composición mineralógica de la arena era 90,6% cuarzo, 2,7% feldespatos potásicos, 2,5% plagioclasa, 0,2% calcita y 4% filosilicatos, determinado por Difracción de Rayos X de acuerdo con la norma ASTM F3419-22 (KT Geoservices, Gunnison, CO, EE. UU.). La Geomalla era polietileno de alta densidad. La caracterización de los materiales, arena y geotextil utilizados, son los mismos que en el capítulo II en superficies de arena sin césped (Blanco et al., 2021). Debido a la naturaleza viva del césped y considerando el sistema de poros del sustrato después del experimento del 1 de abril de 2018, se tomaron muestras del espesor de amortiguación de los tratamientos con paquetes drenantes y geotextil para pruebas de disponibilidad de agua y aire (Laboratorio de Sustratos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires) de acuerdo con las normas europeas CEN EN-3041 (European Committee for Estandarization CEN, 2011; Vence, 2012), los resultados se encuentran en el Apéndice C.

3.4.3 Medición in situ de cajas de prueba

Todas las pruebas se realizaron en ambas fechas utilizando cinco herramientas de medición in situ. Las cinco herramientas de medición fueron: una sonda de medición (TDR) del contenido volumétrico de humedad (CVH) consistente con ASTM D6780-19, un probador de tracción rotacional, que se usó para medir el pico máximo de tracción rotacional (RPS) basado en ASTM F2333-04, un dispositivo de prueba de impacto que

midió el índice de prueba de impacto (ITI) basado en ASTM D5874-16, un penetrómetro dinámico también llamado penetrómetro de cono de suelo (SCP) consistente con ASTM D 6951-03 y el Going Stick, un instrumento comercial que mide el índice Going Stick (GSI). En la medida de lo posible, estos dispositivos se utilizaron de acuerdo con todas las normas aplicables. Si bien no existe ninguna norma actual para el Going Stick, el uso y diseño fueron consistentes con otra literatura publicada (Mumford, 2006; Dufour y Mumford, 2008; Blanco et al., 2021). Se realizaron tres repeticiones de todas las mediciones durante la primera fecha y cinco en la segunda fecha. Se utilizó la sonda de humedad (Spectrum Field Scout TDR-100 Aurora, IL, EE. UU.) que aplica reflectometría en el dominio del tiempo para medir el contenido volumétrico de humedad (CVH%). La sonda estaba equipada con dos varillas de medición de 8 cm de longitud.

El pico máximo de tracción rotacional (RPS) se registró utilizando un probador de tracción torsional basado en una modificación de ASTM F2333-04. El dispositivo estándar se modificó eliminando los tapones de botín del disco y reemplazándolos por una herradura. La herradura incluía dos tacos de 2,5 cm de largo. La carga de tracción máxima rotacional (RPS) se midió con una llave dinamométrica digital con un rango de 4 a 200 NM y una precisión de 0,08 Nm (modelo ARM602-4, ACDelco, Detroit, MI, EE. UU.). Para minimizar la variabilidad del operador, la misma persona, que se muestra en la Figura 3.2, realizó todas las pruebas, lo que fue consistente con las mejores prácticas (Blundell, 2010).



Figura 3.2. Uno de los miembros del equipo parado sobre las cajas de césped en el momento de la prueba de RPS (3 de marzo de 2018), ©2018 María Alejandra Blanco.

La dureza de la superficie y la resistencia a la compactación se midieron utilizando un dispositivo de prueba de impacto (ITD) basado en ASTM D5874-16. La deformación de la superficie en cm se utiliza para describir la superficie y se denominará índice de prueba de impacto (ITI).

La prueba del penetrómetro de cono (SCP) se basó en ASTM D6951-03. La prueba SCP utiliza repetidos tiros de una masa sobre una varilla para introducir un penetrómetro con forma de cono en el suelo a una distancia fija (Mohammadi et al., 2008). El método de prueba se utiliza con varias configuraciones diferentes, que dependen tanto de la aplicación como del tipo de suelo. Si bien la prueba actual fue una aplicación agrícola típica, se dejó caer una masa más pequeña a una distancia más corta para tener en cuenta la profundidad finita de la caja de prueba y el suelo arenoso (Vanags et al 2004). Se dejó caer un martillo con una masa de 2 kg desde una altura de 0,50 m hasta la superficie de impacto de la base (Figura 3.3). Se mide el número de tiros necesarios para presionar el extremo de la varilla hasta una profundidad de 0,1 m. El extremo de la varilla

era un cono circular recto con una base de 0,02 m de diámetro y 0,015 m de altura, y la masa del eje era de 3,5 kg. Si bien investigaciones anteriores habían correlacionado este aparato tanto con la resistencia a la tracción del suelo como con el índice de carga de California (California Bearing Ratio o CBR) (Mohammadi et al., 2008), estas relaciones dependerían de la configuración exacta del instrumento.

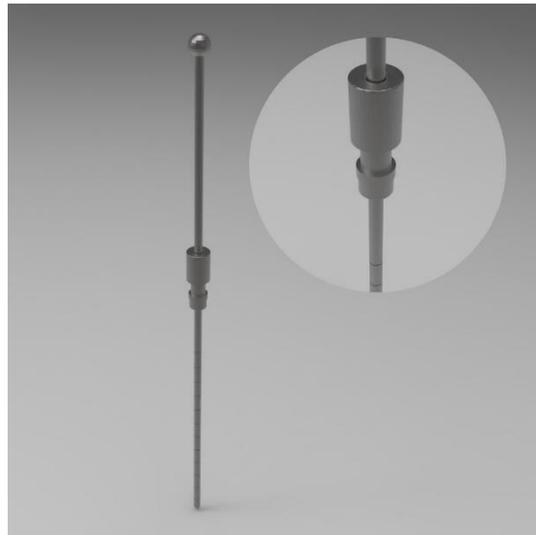


Figura 3.3: Penetrómetro de cono con un martillo de 2 kg (detallado en el círculo a la derecha), que se desplaza sobre los 0,5 m superiores de un eje de 1 metro y golpea una masa situada a 0,5 m del extremo inferior. El peso total del eje y de la masa de apoyo es de 3,5 kg. El peso total del instrumento es 5,5 kg. El extremo inferior tiene un cono de 0,02 m de diámetro en la base y 0,015 m de altura. El tamaño del cono se define según el tipo de suelo, en este caso se consideraron las dimensiones descriptas para suelos arenosos.

El Going Stick mide la resistencia a la penetración (GSP) y la resistencia a la tracción (GSS) de la cuchilla en el césped (Dufour y Mumford, 2008). El GSI es un modelo integrado de los dos valores medidos. El GSI se utiliza comúnmente en las carreras de pura sangre para describir las condiciones de la superficie en varias jurisdicciones (Dufour y Mumford, 2008). El rango del índice va de 1 a 15 (Cuadro 3,1).

Cuadro 3.1: Índice de condición proporcionado por Going Stick®

Condición	Índice de Going (GSI)
Duro	13,0-15,0
Firme	11,0-12,9
Buena a Firme	9,0-10,9
Buena	7,0-8,9
Buena a Blanda	4,0-6,9
Blanda	3,0-3,9
Pesada	1,0-2,9

3.5. Análisis estadístico

Para todas las variables se realizó la prueba de Shapiro Wilks para comprobar la normalidad y test de Levene para la homogeneidad de las varianzas. Para el caso de variables no normales se utilizó análisis de varianza de datos no paramétricos Kruskal Wallis y el estadístico es H. Para las variables normales se realizó ANOVA y el estadístico es f. Las pruebas de medias de las variables normales se realizaron por la prueba de Tuckey. Se determinaron los coeficientes correlación de Pearson y la significación p entre variables dependientes. Para todos los datos obtenidos, el análisis de varianza en bloques completamente aleatorizados se realizó mediante un software comercial de análisis estadístico (Infostat versión 2, Buenos Aires, Argentina). Se consideraron estadísticamente significativos valores de $p < 0,05$. Se calcularon coeficientes de correlación de Pearson para identificar el grado de asociación entre variables dependientes. Las dos fechas en las que se realizaron las mediciones fueron tomadas como bloques.

El modelo propuesto para el ensayo de las cajas es:

$$Y_{ijk} = \mu + D_i + G_j + F_k + (DG_{ij}) + (DF_{ik}) + (GF_{jk}) + (DGF_{ijk}) + e_{ijk}$$

D: Drenaje (1,2) G: Geotextil (1,2) F Fechas (1,2): .

3.6 Resultados

3.6.1 Medición in situ en cajas de prueba

Los tratamientos drenaje (D), adición de geotextil (G) y Fechas (F) y sus interacciones mostraron diferencias significativas para algunos de los cinco dispositivos probados. Los resultados de las variables analizadas para cada tratamiento y sus interacciones se hallan descriptas en los Cuadros 3.4 al 3.8). Los efectos significativos se muestran a través de los valores f y p o H y p en cada uno de los cuadros.

Las correlaciones entre dispositivos (Cuadro 3.2) mostraron que CVH (%) tuvo una correlación negativa con el penetrómetro ($p < 0,0216$; $p = -0,29$) y el GSI tuvo una correlación positiva con el SCP ($p < 0,0025$; $p = 0,37$).

Cuadro 3.2: Correlaciones de los coeficientes de Pearson r y p para cada variable CVH (%), SCP y GSI en los tratamientos. (*) diferencia significativa.

Variables	CVH (%)		SCP		GSI	
	r	p	r	p	r	p
CVH (%)	1	0,001	-0,29	0,0216 *	-0,15	0,2439
SCP	-0,29	0,0216 *	1	0,001	0,37	0,0025 *
GSI	-0,15	0,2439	0,37	0,0025 *	1	0,001

*Valores significativos a $p < 0,05$.

3.6.2 Sonda de humedad

El contenido volumétrico de humedad (CVH%) fue significativo para la interacción triple bloques (fechas) \times drenaje \times geotextil (Figura 3.4). El efecto bloque mostró valores más altos de CVH en la fecha 2. Cuando estuvo presente el geotextil, el % de CVH fue el más bajo en ambas fechas. Los paquetes de drenaje conservaron un

mayor % de CVH cuando el geotextil no estaba presente en ambas fechas. La correlación entre dispositivos mostró que CVH (%) tenía una correlación negativa con SCP ($r = -0,29, p < 0,0216$).

Cuadro 3.3: Valores H y p del CVH (%) (Contenido volumétrico de humedad), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis $p < 0,05$ prueba estadística H.

Variable	Drenaje		Geotextil		Fechas (F)			
	H	<i>p</i>	H	<i>p</i>	H	<i>p</i>		
CVH (%)	4,94	0,0262 *	27,92	0,0001 *	1,46	0,2275		
Interacciones								
	D × G		D × F		G × F		D × G × F	
	H	<i>P</i>	H	<i>P</i>	H	<i>p</i>	H	<i>p</i>
CVH (%)	33,75	0,0001 *	6,75	0,082	30,32	0,0001 *	37,87	0,0001 *

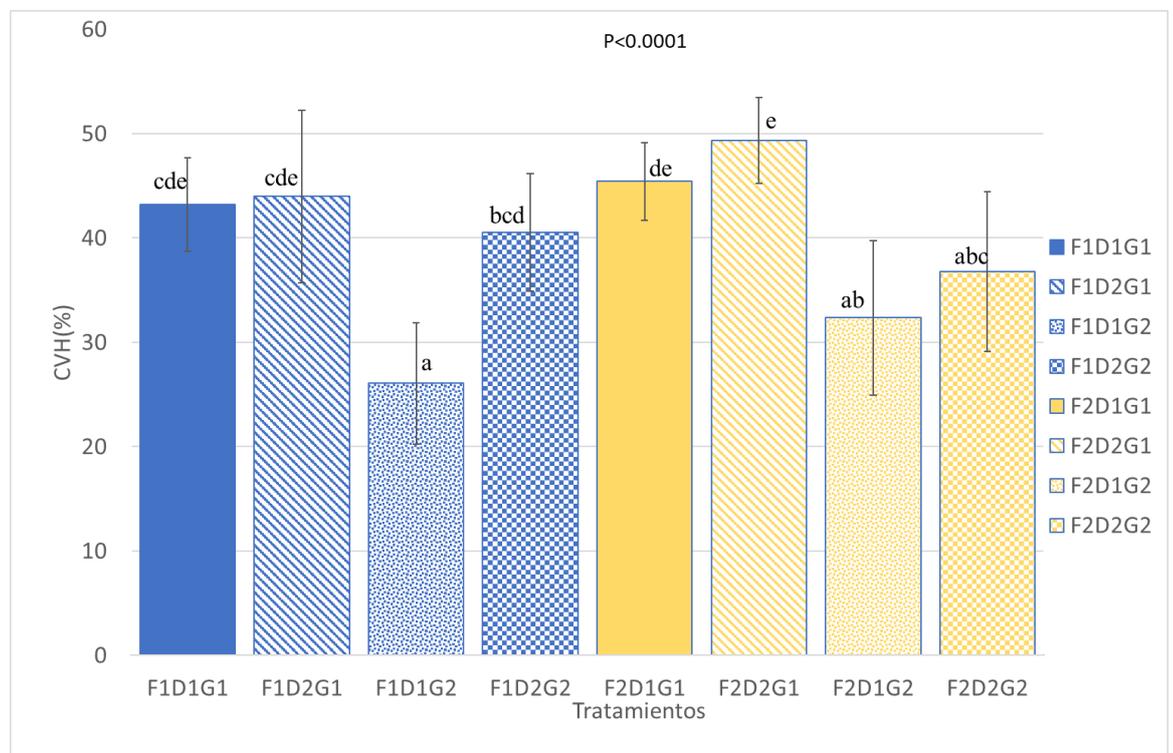


Figura 3.4. Contenido Volumétrico de humedad medido con TDR. Valor medio y desvío estándar de la interacción fecha x drenaje x geotextil para el contenido volumétrico de humedad (% CVH) para los tratamientos F1D1G1: 3 de marzo, sin paquete drenante y sin geotextil; F1D2G1: 3 de marzo con paquete drenante y sin geotextil; F1D1G2: 3 de marzo, sin paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil; F1D2G2: 3 de marzo, con

paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil; F2D1G1: 30 de marzo, sin paquete drenante y sin geotextil; F2D2G1: 30 de marzo, con paquete drenante y sin geotextil; F2D1G2: 30 de marzo, sin paquete drenante con 2 kg/m² de geotextil; F2D2G2: 30 de marzo, con paquete drenante con 2 kg/m² de geotextil. Letras diferentes indican diferencias significativas. $p < 0,0001$.

3.6.3 Tracción rotacional

El pico máximo de tracción rotacional (RPS) no fue significativo para los factores D y G pero sí para el factor fechas (bloques), lo que significa que el transcurso del tiempo produjo un resultado diferente F1 (3 de marzo de 2018): $44,41 \text{ Nm} \pm 5,56$ y F2 (30 de marzo de 2018): $47,64 \pm 5,49$; respectivamente $p < 0,0274$ (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.4: Valores *f* y *p* del RPS (Pico máximo de tracción rotacional), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables paramétricas: $p < 0,05$ Test de Tuckey.

Variable	Drenaje		Geotextil		Fechas			
	<i>f</i>	<i>P</i>	<i>f</i>	<i>P</i>	<i>f</i>	<i>p</i>		
RPS	2,46	0,1221	1,38	0,2445	5,13	0,0275 *		
Interacciones								
	D × G		D × F		G × F		D × G × F	
	<i>f</i>	<i>P</i>	<i>f</i>	<i>P</i>	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>p</i>
RPS	0,04	0,8500	0,13	0,7161	0,99	0,3240	0,72	0,4001

Prueba de Tukey Alfa = 0,05 $p < 0,05$. () diferencia significativa.

3.6.4 Dispositivo de prueba de impacto

Las mediciones realizadas con el dispositivo de prueba de impacto (ITD) no fueron estadísticamente significativas para los dos factores y bloques (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.5: Valores *f* y *p* del ITI (Índice de Impacto), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables paramétricas: $p < 0,05$ Test de Tuckey.

Variable	Drenaje		Geotextil		Fechas			
	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>P</i>	<i>f</i>	<i>P</i>		
ITI	0,57	0,4539	1,03	0,3152	0,16	0,6825		
Interacciones								
	D × G		D × F		G × F		D × G × F	
	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>p</i>
ITI	0,57	0,4539	1,03	0,3152	0,16	0,6825	0,13	0,7237

Prueba de Tukey Alfa = 0,05 $p < 0,05$. () diferencia significativa.

3.6.5 Penetrómetro de cono

La penetración obtenida por el penetrómetro de cono de suelo (SCP) fue significativo para el geotextil ($p < 0,0118$) (Cuadro 3.6). La adición de geotextil tuvo los valores medios más altos de SCP ($G1 = 3,82 \text{ kg/cm}^2 \pm 1,03 \text{ kg/cm}^2$ y $G2 = 4,63 \pm 1,29 \text{ kg/cm}^2$).

Cuadro 3.6: Valores H y p del SCP (Penetrómetro de Cono), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis $p < 0,05$ prueba estadística H.

Variable	Drenaje		Geotextil		Fechas			
	H	P	H	P	H	p		
SCP	1,01	0,287	5,52	0,0118 *	2,50	0,094		
	Interacciones							
	D × G		D × F		G × F		D × G × F	
	H	p	H	p	H	p	H	p
SCP	6,76	0,055	3,73	0,2325	8,35	0,0225 *	9,72	0,132

3.6.6 Going Stick

El GSI fue estadísticamente significativo para el paquete drenante (D) (Cuadros 3.6). El GSI mostró valores más altos durante la segunda fecha (B2) y con el paquete drenante, además de ser significativo para la interacción entre el paquete drenante y la adición de geotextil (D x G) (Figura 3.5 y Cuadro 3.7). Los tratamientos B2D2G2 ($6,57 \pm 2,65$) y B2D2G1 ($5,53 \pm 0,88$) mostraron valores mayores del índice GS comparados con el resto de las combinaciones de factores. La correlación entre dispositivos mostró que GSI se correlacionaba con SCP ($p < 0,0025$ $r = 0,37$) (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.7: Valores H y p del GSI (Índice del Going Stick), para tres factores drenaje (D), adición de geotextiles (G) y fechas (F). ANVA para variables no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis $p < 0,05$ prueba estadística H.

Variable	Drenaje		Geotextil		Fechas			
	H	P	H	P	H	p		
GSI	4,79	0,0286 *	2,16	0,1413	10,04	0,0015 *		
Interacciones								
	D × G		D × F		G × F		D × G × F	
	H	p	H	p	H	p	H	p
GSI	10,46	0,015*	14,84	0,0020 *	12,78	0,0054 *	21,19	0,0035 *

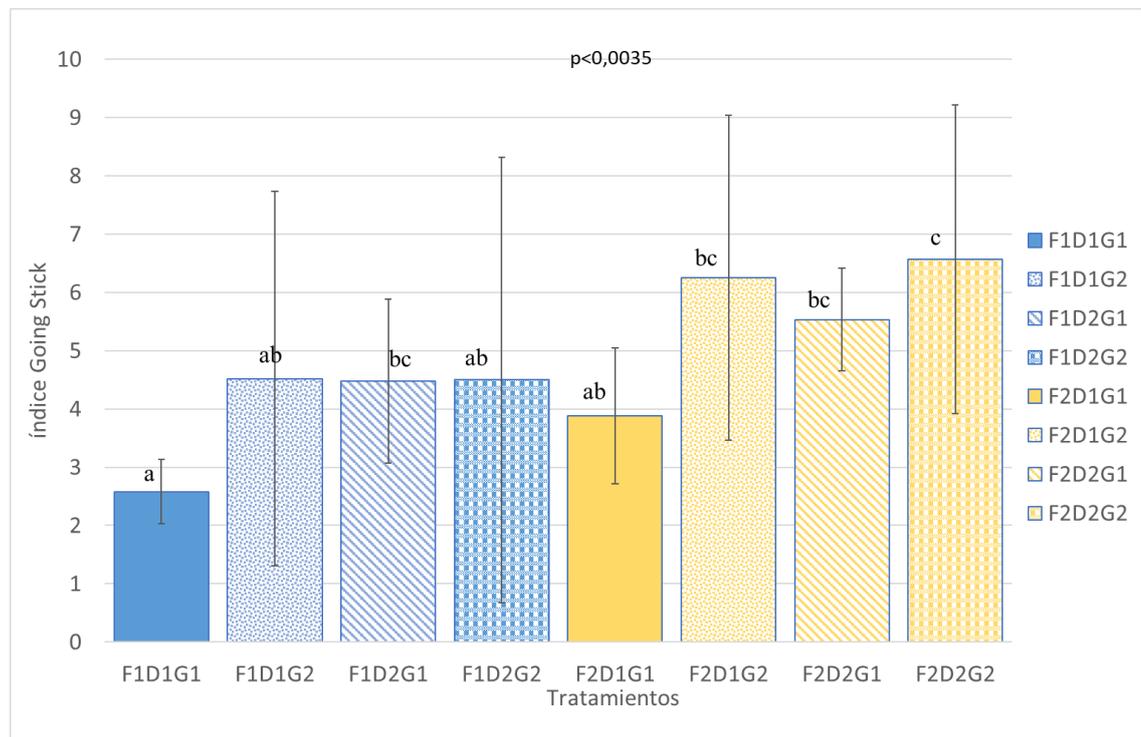


Figura 3.5. Índice de Going Stick. Valor medio y desvío estándar de la interacción fechas × drenaje × geotextil para el Índice Going Stick (GSI) F1D1G1: 3 de marzo sin paquete drenante y sin geotextil; F1D1G2: 3 de marzo sin paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil; F1D2G1: 3 de marzo con paquete drenante y sin geotextil; F1D2G2: 3 de marzo con paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil.; F2D1G1: 30 de marzo, sin paquete drenante y sin geotextil; F2D2G1: 30 de marzo, con paquete drenante y sin geotextil; F2D2G2: 30 de marzo, con paquete drenante y con 2 kg/m² de geotextil.

3.7 Discusión

Para que sean útiles, las herramientas básicas que se utilizan en este estudio deben ser sensibles a los tratamientos de las superficies de las cajas que se sabe tienen un impacto en el rendimiento de una superficie ecuestre de césped, como el drenaje y el

geotextil (Hobbs et al 2014). La insensibilidad de algunas de las mediciones a los tratamientos es al menos tan notable como la sensibilidad de otras mediciones.

El contenido de humedad se entiende generalmente como uno de los factores más importantes en las propiedades dinámicas de las superficies ecuestres (Ratzlaff et al., 2005; Holt et al., 2014;). Lo más notable de los resultados de la medición con la sonda de humedad es que los tratamientos del geotextil y el paquete drenante se identifican más claramente monitoreando el contenido de humedad (Cuadro 3.2). La dinámica de este efecto parece estar influenciada por la pluviometría, la temperatura del suelo (B1 = 23 mm/mes y temperatura promedio 26 °C; B2 = 35 mm/mes y temperatura promedio 22,1 °C) y la evapotranspiración ocurrida durante ambos períodos (final de verano). El drenaje y el geotextil combinados parecen reducir el CVH (%), mientras que el drenaje parece reducir el flujo de agua (Cuadro C1, Figura C1). Al observar las interacciones, la conclusión más notable es que CVH (%) es sensible a casi todos los efectos que se sabe que influyen en el comportamiento de la pista.

La medición de RPS se destacó por la insensibilidad a los tratamientos y la falta de repetibilidad entre los días de prueba. Anteriormente, el RPS mostró diferencias significativas en una mezcla de arena y geotextil (Blanco et al., 2021). Sin embargo, en este estudio, el perfil incluye un césped de estación cálida, Bermuda híbrida “Tifway 419”, que tiene una alta densidad de brotes y tallos horizontales. En superficies de arena, el efecto del geotextil agregado sobre la respuesta de la superficie está relacionado con el movimiento relativo entre la herradura y la superficie. Esta resistencia da como resultado fuerzas mayores durante un movimiento de pivote estrechamente relacionado con la medición de RPS (Twomey et al., 2013). El césped podría modificar el movimiento relativo entre la herradura y la superficie, de modo que el césped, y no la presencia del geotextil, domine la respuesta. La magnitud de las lecturas de tracción en el experimento actual fueron 20 puntos superiores a las pruebas anteriores en arena. Se detectaron

diferencias entre fechas ($F1 = 44,41 \text{ Nm} \pm 5,56$; $F2 = 47,64 \text{ Nm} \pm 5,49$), pero si el césped en sí y no el perfil domina la respuesta, entonces el crecimiento adicional de los tallos horizontales podría explicar las diferencias entre días. Esta debería ser una medición útil y representaría una característica de los campos con césped de estación cálida que puede ser importante para el comportamiento de la superficie. El híbrido Bermuda “Tifway 419” ha sido reportado como una especie de tracción intermedia ($42,9 \text{ Nm}$) (Lulli et al., 2014) en comparación con otros dos céspedes de estación cálida.

Tanto el ITI como el SCP, no parecen proporcionar ninguna información adicional de las cajas de prueba. El ITI no sólo fue insensible a los dos tratamientos, sino que tampoco se correlacionó con ninguna de las otras herramientas de medición (Cuadro 3.6).

A diferencia del capítulo anterior, ITD no fue sensible a ningún factor en este experimento. Al igual que con el RPS, los componentes adicionales en el perfil del césped, como la disposición horizontal del tallo, la densidad de los brotes, el grosor de las hojas y las raíces, pueden interferir con el desplazamiento de un instrumento de peso bajo como la pesa ($2,25 \text{ kg}$) del ITD; por lo tanto, la altura de corte puede oscurecer los efectos de drenaje y geotextil. Otros autores han encontrado desplazamiento vertical con un Clegg Hammer de 5.8 mm para Bermuda “Tifway 419” (Lulli et al., 2014) en capacidad de campo a una altura de corte de 15 mm . En este experimento, el rango de desplazamiento vertical obtenido del ITD fue de 8 a 13 mm a una altura de corte de 30 a 50 mm y un CVH más alto (%). La altura de corte elegida aquí está más relacionada con la altura usual en pistas de carreras que con otros deportes como los campos de polo. Estudios posteriores a este experimento, realizados en tres canchas de polo de la Asociación Argentina de Polo por Blanco et al., (en revisión) indicarían que los instrumentos GS, ITD, RPS y CVH, utilizados en este capítulo, permiten clasificar las superficies de manera efectiva. Además, en algunas canchas, estos instrumentos han permitido identificar patrones de variabilidad espacial, destacándose especialmente el

CVH% y el índice de impacto del ITD como los principales indicadores de dicha variabilidad. Otro factor a considerar es el método de establecimiento del césped, el cual pudo haber contribuido a la falta de sensibilidad de algunos dispositivos. El césped fue colocado en forma de pan (sod), que incluía una capa de suelo arcillo-limoso de 2 cm de espesor, lo que podría haber actuado como una barrera para la detección de tratamientos de drenaje y geotextiles por parte del ITD y el RPS. Aunque investigaciones futuras podrían contemplar el lavado del césped, esta práctica no es común en la mayoría de las instalaciones, aunque recientemente se ha comenzado a recomendar en algunas colocaciones de césped sobre arena.

Lulli y colaboradores (Lulli et al., 2014) también encontraron una correlación negativa entre la materia seca y la deformación vertical en campos de fútbol. Nuestros datos preliminares sobre la partición de la materia seca (brote/raíz) mostraron que el césped que crece con paquete drenante o geotextil mejora la partición de la materia seca, estas condiciones y la adición del alto contenido de humedad logrado en el estudio pueden haber operado en la falta de sensibilidad mostrado por ITD. Algunos autores encontraron una tendencia exponencial bien definida de disminución de la resistencia a la compresión al aumentar la saturación del suelo (Sion et al., 2022), independientemente del tipo de suelo. La falta de sensibilidad del ITD puede ser una combinación de una menor resistencia a la compresión con un aumento de la humedad volumétrica y la biomasa del césped que cambian la configuración.

El SCP mostró valores más altos cuando el geotextil está presente (Cuadro 3.2). SCP, así como GSI, también han mostrado sensibilidad hasta la fecha de las pruebas, pero al detectar el efecto del D y G. También se ha informado que el híbrido Bermuda “Tifway 419” tiene una alta resistencia a la penetración en superficies deportivas (Lulli et al., 2014), aunque en este experimento la resistencia a la penetración registrada por SCP fue en promedio de $4,23 \text{ kg/cm}^2$ (mín = 1,37 y máx: 8,24), lo que significa un valor menor en

comparación con otros estudios, y puede estar relacionado con el alto CVH (%), como explican las correlaciones halladas entre CVH (%) y SCP explicadas ($p < 0,0216$, $r = -0,29$). Este resultado concuerda con la disminución de los valores del penetrómetro de cono dinámico, medidos a través del índice de carga o California Bearing Ratio (CBR %), a medida que aumenta la saturación (Sion et al., 2022).

El GSI fue sensible a diferentes aspectos del diseño de las superficies. Se demostró que GSI detecta consistentemente la presencia del geotextil, cuando el paquete drenante también estaba presente. La superficie con geotextil tuvo mayor GSI y alternativamente cuando hay paquete drenante. En ambas fechas de prueba, el valor de GSI estuvo en un rango equivalente a una calificación de superficie buena a blanda (Cuadro 3.1) con valores más bajos en la primera fecha (F1) y valores más altos en la segunda fecha de prueba (F2). Aunque existe una correlación entre los resultados de GSI y SCP, el GSI incluye una combinación de resistencia a la penetración y a la tracción longitudinal. Debido al efecto del césped, ambas propiedades fueron capturadas por el GSI bajo las condiciones incluidas en este estudio.

La correlación mostrada entre CVH y SCP y SCP y GSI sugiere que el geotextil está modificando la fuerza de resistencia a la penetración. Ambos resultados serían compatibles con la firmeza y la amortiguación de una superficie, aunque no miden la carga máxima.

El paquete drenante puede estar actuando como un almacenamiento de agua subterráneo, como lo muestra la prueba de disponibilidad de agua (Figura C1). Esto es consistente con los resultados de McInnes y Thomas (2012), donde el paquete drenante sobre la tosca compactada redujo la tasa de flujo de agua y también puede proporcionar una interfaz más consistente (Rose-Harvey et al., 2012). Esto significa que la reducción en el flujo de agua promueve una disposición especial de la distribución de partículas, aunque todos los tratamientos tuvieron la misma distribución de tamaño de partículas de

inicial. Este hallazgo es relevante para la salud del césped, aunque, para las condiciones experimentales consideradas, el CVH (%) fue alto. El exceso de humedad también influye en la falta de sensibilidad de algunos dispositivos. Sin embargo, dado que los estadios o pistas de carreras están al aire libre, alguna combinación de factores como el paquete drenante y el alto contenido de humedad volumétrica pueden provocar que el césped no esté en buenas condiciones. Comprender las consecuencias del riesgo de lesiones es el objetivo principal del uso de estas herramientas y de la comprensión de los factores añadidos.

3.8 Conclusiones

El primer objetivo de este capítulo fue parcialmente probado, se probó parcialmente el efecto del paquete drenante en la retención hídrica (Figura C1 y Cuadro C1, Apéndice C) y en la superficie. Aunque el nivel de humedad alcanzado en las cajas de arena y césped fue superior al deseado debido a condiciones externas al ensayo, la reducción en el desvío estándar de las combinaciones con paquete drenante pudo ser probada. Es probable que el efecto del drenaje en las propiedades de la superficie esté relacionado con la presencia de un movimiento de agua tanto vertical como horizontal y el efecto posterior de empaquetamiento sobre las partículas del sustrato que conducen a un CVH más alto, a valores más altos de tensión del agua y, en este sentido, agregando uniformidad y consistencia. Otro aporte original de este capítulo es la comprobación de que algunas herramientas como el TDR fueron más efectivas para detectar diferencias de CVH % debido al geotextil o al paquete drenante. El GS y el PC pudieron detectar una modificación en sus índices respecto del tratamiento sin paquete drenante pero no fue detectable con el ITD y con el RPS. A la vez el agregado de geotextil se manifestó en una reducción del CVH (%) medido con el TDR, como en un aumento del GSI como del PC.

Si bien, como en el capítulo II, la capacidad de probar las propiedades funcionales de la superficie puede ser limitada debido a las cargas más bajas y las tasas de carga más bajas de estos instrumentos. Además, la cubierta del césped añade complejidad a través de su estructura y las variaciones en la altura de corte. Estas propiedades del césped contribuyen a las complejas características de la interacción superficie-cascos y limitan la capacidad de detectar diferencias con dispositivos más simples como RPS, ITD, SCP o GS. Esta diferente sensibilidad genera la necesidad de establecer condiciones en las que cada instrumento puede ser o no versátil: composición del perfil, corte previo, rango de CVH%.

Los futuros trabajos deberían considerar enfoques alternativos que también sean adecuados para monitorear el mantenimiento adecuado de las superficies de césped. Métodos como el corte vertical y la aireación son fundamentales para garantizar que se pueda proporcionar una superficie de alta calidad que dé como resultado un rendimiento constante a lo largo del tiempo.

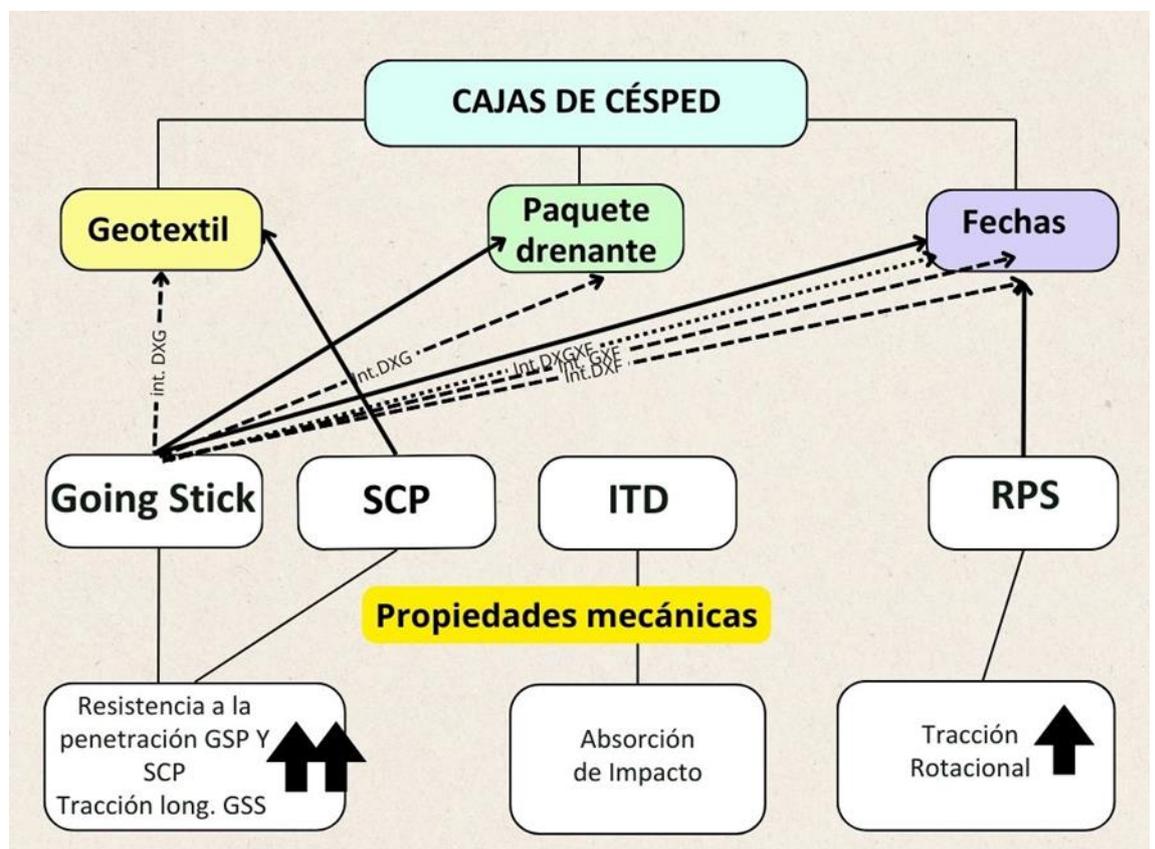


Figura 3.6: Síntesis de los resultados hallados en el capítulo. En las cajas en colores se hallan los factores: Geotextil: 2 niveles (sin y con), paquete drenante dos niveles (sin y con), fechas: 3 de marzo de 2018 y 30 de marzo 2018. En las cajas blancas intermedias se hallan los instrumentos, Going Stick, SCP, ITD y RPS, y en las cajas de la última línea se hallan las propiedades mecánicas: las variables obtenidas del Going Stick: GSP (Resistencia a la penetración) y GSS (Resistencia a la tracción longitudinal), SCP: resistencia a la penetración, ITD (Dispositivo de Impacto) y RPS (Pico de tracción rotacional). Las flechas enteras indican efecto principal, y las de línea partida interacción de factores. Las flechas negras grandes en la última línea de cajas indica el aumento de la propiedad medida como consecuencia del agregado de geotextil, o presencia de paquete drenante o paquete drenante. El número de flechas indica la capacidad de detección de más factores por parte del instrumento.

**Capítulo IV: Comparación experimental de una
superficie de arena con área elástica mediante
evaluación biomecánica y una herramienta simple
usando el método track-in-a-box o pista en caja.**

4.1 Introducción:

El riesgo de lesiones, tanto para el caballo como para el jinete, ha sido de gran interés en la ciencia equina. Si bien el riesgo para el caballo y el jinete es multifactorial, generalmente se acepta que la condición de la superficie influye tanto en las lesiones como en el rendimiento (Hobbs et al., 2014). Como resultado, se han realizado esfuerzos activos para investigar nuevos diseños de superficies y compararlos con los diferentes diseños utilizados en diferentes regiones del mundo y en diversas disciplinas ecuestres. Recientemente ha habido interés tanto comercial como académico en el área de superficies elásticas para superficies ecuestres (Flemming, 2011; van der Heijden, 2018; Souza et al., 2023;). Las superficies con área elástica utilizadas para las superficies ecuestres son similares a las superficies artificiales utilizadas para los atletas humanos (Nigg y Yeadon, 1987; Blundell, 2010).

El rendimiento de una superficie ecuestre está influenciado por los materiales y el diseño. Los materiales para la construcción de pistas varían, ya que normalmente se utilizan materiales locales y los objetivos de rendimiento dependen de las disciplinas (Blundell, 2010; van der Heijden, 2018). Las características funcionales o de rendimiento dependen tanto de la forma de la arena y la distribución del tamaño de sus partículas, como de la respuesta a la humedad (Ratzlaff et al., 1997, 2005; Holt et al., 2014;). Las características de los materiales también se adaptan a las condiciones climáticas (Mahaffey et al., 2012).

El mantenimiento de la superficie es importante para el rendimiento, un uso intensivo requiere un mantenimiento frecuente y extenso (Tranquille et al., 2015). La adición de una capa subterránea es un método que tiene el potencial de mejorar las propiedades mecánicas de las superficies y al mismo tiempo mantenerlas más consistentes durante el uso intensivo. Las superficies utilizadas en los últimos tres Juegos

Olímpicos incorporaron una capa subsuperficial. En Londres 2012 se utilizó un subsuelo de unidades geo celulares modulares entrelazadas (Northrop et al, 2022). En Río de Janeiro 2016 (Otto Sport Nordic, 2017) y Tokio 2020 (Redrup G, 2021) se utilizaron planchas de PVC debajo de las pistas. Estas capas subsuperficiales abren la posibilidad de seguir reduciendo la carga máxima y las tasas de carga, al mismo tiempo que permiten que la capa superior de la pista se compacte lo suficiente para proporcionar una superficie consistente incluso durante el uso intensivo.

Dado el potencial de los pads subsuperficiales para proporcionar una superficie con área elástica, existe la necesidad de monitorear el desempeño y la durabilidad de esta. Las condiciones de carga de los materiales de la superficie en los deportes ecuestres son únicas. El Medidor Biomecánico de Superficies Orono (OBST) fue desarrollado para simular la tasa de carga y la magnitud de las cargas aplicadas por un caballo al galope (Peterson et al., 2008). Los datos biomecánicos tomados con OBST en pistas de carrera describieron el comportamiento de las propiedades mecánicas de la superficie en estudios donde se simularon diferentes tratamientos de mantenimiento que determinaban distinta condición (Peterson y McIlwraith, 2008). El equipo por su constitución detecta el efecto de las capas más profundas de la superficie en el casco del caballo. El OBST se utiliza para las inspecciones previas a las reuniones (o encuentros de carreras) como parte de la HISA (Horseracing Integrity and Safety Authority, 2022) y es utilizado por la Federación Ecuestre Internacional (FEI) (Hobbs, et al 2014) como estándar de calidad para las pruebas de superficies. En otras aplicaciones se utilizan herramientas portátiles como Clegg Hammer (CH) (Carré y Haake, 2004; Fleming et al., 2004; Dixon et al., 2015; Mohajerani et al., 2019). El CH también ha probado ser útil para controlar la calidad en instalación de nuevas superficies (Carré y Haake, 2004). El CH ha demostrado correlacionar con mediciones biomecánicas de la desaceleración del casco en trece superficies diferentes (Muñoz-Nates et al., 2017). Sin embargo, debido a la pequeña masa

y la baja energía involucrada en el impacto, los datos obtenidos pueden representar características de riesgo de lesiones asociadas con la capa superior y un rango más limitado de contenido de humedad. El uso de capas subsuperficiales (pads) añade otra variable que está vinculada a la durabilidad del pad. Si se utilizan pads para incorporar la utilización de área elástica en las pistas, un dispositivo tan sencillo como el CH podría, potencialmente, detectar la presencia del pad y, por ende, identificar la degradación del rendimiento a lo largo del tiempo. La posibilidad de llevar a cabo un control de calidad mediante un instrumento simple y económico en una superficie con área elástica constituiría una contribución significativa para expandir la adopción de superficies elásticas y fomentar el desarrollo de superficies de arena más consistentes a largo plazo.

El método track-in-a-box (Setterbo et al., 2011; Mahaffey et al., 2013; Lewis et al., 2015;) es actualmente uno de los métodos normalizados utilizados para comparar materiales utilizados en pistas de carrera o de salto en deportes ecuestres (Hobbs et al., 2014; Horseracing Integrity and Safety Authority, 2022). Las diferencias halladas entre las pruebas en track-in-a-box y en pista de carreras in situ, fueron menores que las debidas a los tipos de superficies (arena o sintéticas) (Setterbo et al. 2012). Se utilizó el método track-in-the-box para probar instrumentos portátiles disponibles comercialmente para identificar la presencia de Pads de área elástica. Estos resultados se comparan con la mayor tasa de tensión y mayor carga reproducidas por el OBST en condiciones de superficie de prueba. Los parámetros informados con estas herramientas portátiles de bajo costo contribuirían a la revisión de superficies con características de área elástica con la capacidad de probar la condición y funcionalidad del Pad. El contenido de humedad es un factor dominante en el comportamiento de la superficie (Ratzlaff et al., 1997; Holt et al., 2014) es por esta razón que se incluyeron tres niveles en el estudio.

4.2 Objetivos:

El objetivo general de este capítulo fue determinar las propiedades funcionales de dos sistemas constructivos de pista de arena, uno convencional y otro del tipo área elástica por el método de Titb medidos por OBST (Norma FEI) y por Clegg Hammer (medidor de impacto).

Los objetivos específicos son.

1. Comparar el efecto del agregado de un pad de goma EVA en las propiedades funcionales del diseño constructivo consistente en espesor de amortiguación de arena y geotextil triturado.

2. Determinar el efecto del contenido de humedad en las propiedades funcionales de los perfiles mencionados.

3. Comparar los resultados obtenidos con el OBST y con el Clegg Hammer y evaluar su correlación.

Las propiedades funcionales son derivadas de las mediciones realizadas con el OBST que está diseñado para realizar una medición basado en la biomecánica del caballo y es el instrumento utilizado como norma tanto por la FEI como por el Jockey Club Americano. Para evaluar la posibilidad de comparar los datos obtenidos por el instrumento considerado patrón en la industria con instrumentos livianos se incluyó el Clegg Hammer, un dispositivo de impacto y liviano, muy difundido en evaluaciones de campos deportivos.

4.3 Hipótesis:

Hipótesis 1: El agregado de pad reduce el pico de aceleración vertical y de carga vertical del OBST y aumenta el impulso.

Predicción 1: Los valores alcanzados por la firmeza y la amortiguación serán menores debido al factor pad.

Hipótesis 2: El contenido de humedad modifica la firmeza y la amortiguación medidas por OBST.

Predicción 2: Los valores de contenido de humedad más altos reducirán los valores de firmeza y amortiguación del perfil.

Hipótesis 3: Las variaciones ocasionadas por los factores mencionados detectadas por OBST pueden ser también detectadas por un dispositivo sencillo de medición como Clegg Hammer.

Predicción 3: Un dispositivo sencillo como el Clegg Hammer detectará las variaciones ocasionadas por los factores mencionados que permitirán tomar decisiones de manejo inmediatas.

4.4 Métodos:

Las pruebas se realizaron con el método track-in-a-box (Titb). La simulación de laboratorio utiliza el mismo tipo constructivo, el mantenimiento y pruebas que se realizarían en una superficie de deportes ecuestres (Setterbo et al., 2011). En este caso el marco de madera de 1 m x 1 m se colocó sobre una plataforma de concreto. Los diseños típicos también utilizan tosca compactada o una base de grava y asfalto. Se colocó un revestimiento ajustado de plástico en la caja para retener el material y la humedad dentro del marco. Los efectos de contorno se han considerado para la carga aplicada y las dimensiones de la caja en pruebas anteriores (Setterbo et al., 2011; Holt et al., 2014). La arena se extendió en cuatro capas y cada capa de 3 cm se compactó por separada para un total de 12,5 cm de material sobre la base como espesor de amortiguación. Cada capa se compactó con un contenido de humedad óptimo (mostrado en la Figura 8 del apéndice I) utilizando una masa de 9 kg arrojada desde una altura de 50 cm, la compactación se realizó en incrementos superpuestos, teniendo toda el área de la caja una energía de compactación de 71,83 KJ/m³ (1500 ft-lb/ft³).

La caracterización de los materiales de la arena y del geotextil y de la mezcla arena + geotextil se describe en los apéndices D y E. La composición de la arena era 88,2% arena, 9,5% limo y 2,3% arcilla, determinado según norma ASTM D422-63-2007. La composición mineralógica de la arena fue Cuarzo 95,5 %, Feldespato potásico 0,7 %, Calcita 1,5 %, Hematita 0,2 %, Illita y Mica: 1,3 % y Caolinita 0,6 % y se determinó mediante análisis de difracción de rayos X según ASTM F3419-22. También se midió la densidad aparente tanto de la arena como de la arena reforzada con pequeñas fibras de geotextil por la norma ASTM D698-12e2.

Ambos tratamientos se llevaron adelante con tres contenidos volumétricos de humedad (CVH): 20, 23 y 25 % equivalentes a 12, 14 y 16 % de contenido gravimétrico de humedad (GMC). El CVH se midió durante la preparación de las cajas y entre cada prueba de impacto con una sonda de reflectometría de dominio temporal (TDR) (Spectrum Field Scout TDR-350) consistente con la norma ASTM D6780/D6780-19. El Pad utilizado para crear las superficies con área elástica fue un pad de goma EVA reciclada de 2 cm, que se colocó entre la arena y la base de concreto subyacente (Figura 4.1.). Las pruebas fueron designadas como fueron conducidas con pad (CP) y sin pad (SP).

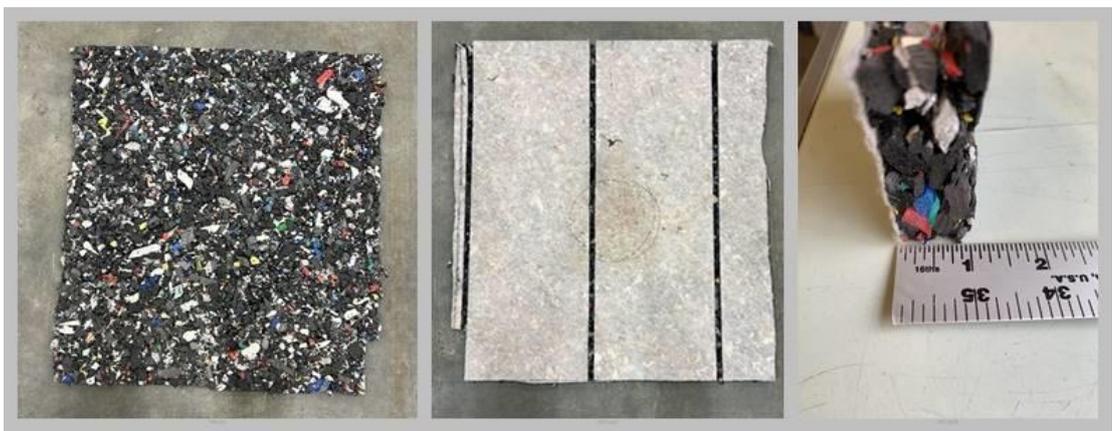


Figura 4.1. Vista de la cara adaxial, abaxial y espesor del pad colocado sobre la base de la caja del Titb. (Racing Surfaces Testing Laboratory).

La respuesta de la superficie se registró mediante dos dispositivos: el Clegg Hammer (CH) y el Medidor Biomecánico de Superficies Orono (OBST). El CH es un martillo compactador compuesto por un tubo guía y una masa cilíndrica con extremos planos. El aparato está basado en ASTM D5874-16, con una masa (2,25 kg) ubicada dentro del tubo y se opera dejando caer manualmente la masa por el tubo a una altura estándar (0,45 m). El CH está diseñado con un acelerómetro piezoeléctrico acoplado al martillo y un lector digital acoplado al tubo que proporciona el valor máximo de desaceleración de la masa cuando cae (Clegg, 1976 a y b) (Figura 4.2).



Figura 4.2: Dispositivo martillo Clegg a la izquierda y a la derecha detalle del display del datalogger.

El resultado o valor de impacto de Clegg (CIV), se informa en unidades de decenas de gravedades. Se registró el valor de impacto del martillo de Clegg (CIV) para cada uno de los cuatro valores repetidos en cada ubicación. Luego, los datos se procesaron y reportaron de acuerdo con los métodos de ASTM F1702-10, el promedio de los valores del primer lanzamiento, ASTM F1936-07 el promedio del segundo y tercer lanzamiento

y ASTM D5874-16 el valor máximo de los cuatro lanzamientos realizados en cada ubicación (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1: Resumen de las normas ASTM en uso para CH, detalle de los equipos, objetivo y datos reportados.

Norma	Equipo	Objetivo	Reporte de datos
ASTM-F1702-10	Clegg Hammer 2,25 kg	Impacto Máximo de las superficies de césped natural	Gmax en cada ubicación de un lanzamiento.
ASTM-F1936-07	Clegg Hammer 9,1 kg	Máxima atenuación de impacto para todo tipo de sistemas de juego de césped instalados para el fútbol americano.	Gmax Promedio del 2° y 3° lanzamiento
ASTM-D5874-16	Clegg Hammer 2,25 kg	Valor de Impacto de un suelo ya sea en campo o en un molde de prueba.	La desaceleración máxima de cuatro lanzamientos.

El OBST es un aparato de impacto con tres ejes impulsado por gravedad, que deja caer un proyectil en forma de casco (con herradura de acero de tamaño 2) en ángulo hacia la superficie del suelo que provee una energía en el impacto de 540 (J) (ASTM F3400-19) (American Society of Testing and Materials, 2019, Peterson et al., 2008). El dispositivo es sostenido por un marco que se monta en otro marco en el laboratorio o en un vehículo de peso suficiente para estabilizarlo durante las pruebas (Figura 4.3). Los dos ejes de movimiento no ortogonales impulsan el casco hacia el suelo, lo que produce un movimiento simultáneo hacia abajo y un deslizamiento hacia adelante del pie. Este movimiento imita el movimiento de la extremidad anterior de un caballo durante la fase inicial y secundaria de carga de las fases del paso del casco (Thomason y Peterson 2008). La fuerza se genera por la aceleración de una masa de 33 kg lanzada hacia abajo por un conjunto longitudinal de rieles que tienen un ángulo de 12° desde una altura vertical de 840 mm. Un segundo conjunto más corto de rodamientos lineales que están alineados verticalmente aloja un sistema de resorte y amortiguador precargado al que se fija el

casco. Este se desliza hacia abajo como parte de la masa unida al riel y cuando el casco entra en contacto con el suelo, el segundo eje precargado se comprime y la diferencia de ángulo entre los rieles en ángulo y los rodamientos alineados verticalmente obligan al casco a deslizarse hacia adelante. La carga del sistema masa- resorte-amortiguador se registra directamente sobre el casco usando una celda de carga dinámica. La aceleración se registra mediante un acelerómetro triaxial unido a una masa rígida sobre el casco. La respuesta de deformación y recuperación se mide desde un potenciómetro lineal que está unido a las porciones estacionarias y móviles del segundo conjunto lineal de rodamientos más pequeño. La velocidad de aterrizaje se mide utilizando un potenciómetro de cuerda unido a la masa que cae del sistema.

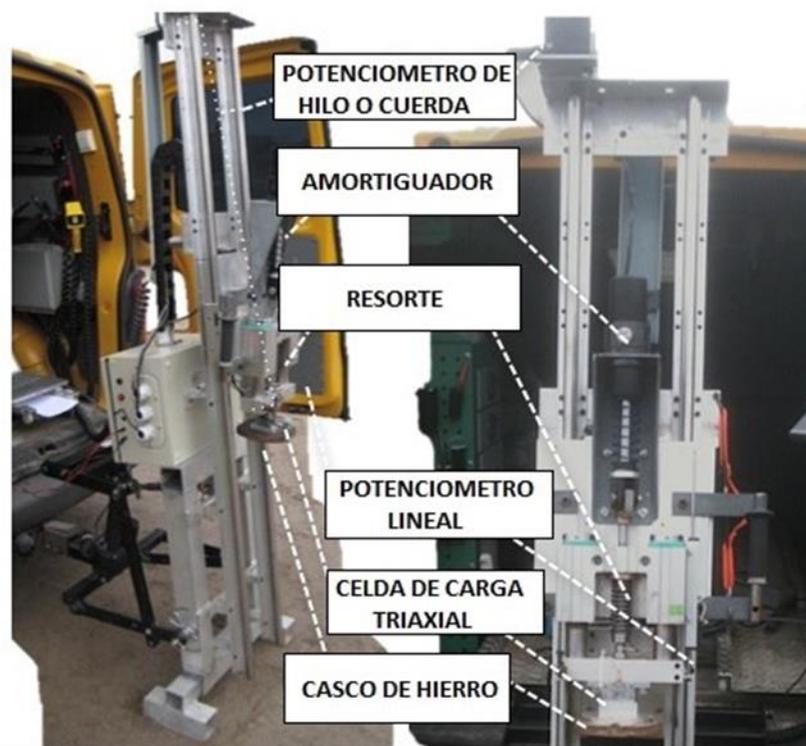


Figura 4.3: Medidor biomecánico de superficies ORONO (Orono Biomechanical Surface Tester).

Para registrar la humedad de manera consistente en el área central de la caja, las mediciones se realizaron en un rectángulo interior más pequeño de 0,30 m x 0,30 m con los contenidos de humedad volumétricos especificados de 20, 23 y 25 %. El cuadrado central de la caja se separó del resto de la caja con una membrana de látex consistente con

experimentos anteriores (Mahaffey et al., 2013). Se realizaron cinco lanzamientos de CH en seis ubicaciones dentro de la caja (Cuadro 4.2). Se realizaron tres lanzamientos de OBST en seis ubicaciones (Cuadro 4.2). Del OBST se obtuvieron siete parámetros: Firmeza del impacto (máxima desaceleración en el eje vertical) Max_Av en [G] y Amortiguación (carga máxima en el eje vertical, Max_Lv) en [kN] según ASTM-3400-19 y otros 3 parámetros del mismo equipo: tasa de carga en el eje v en [kN]; máxima desaceleración en el eje horizontal: Max_Ah en [G]; carga máxima en el eje horizontal (delante-atrás del casco): Max_Lh, en [kN]. El impulso (efecto de la fuerza Lv durante un tiempo t) se calculó como la sumatoria de las fuerzas verticales (Lv) durante el tiempo que transcurrió cada lanzamiento, se expresa en kN.s.

Cuadro 4.2: Organización de tratamientos y repeticiones.

Tratamientos		Ubicaciones	Numero de lanzamientos/ Ubicación
Sin Pad= SP; Con Pad=CP	CVH=20%; 23%; 25%.	OSBT y Clegg Hammer: 6 ubicaciones (L1, L2, L3, L4, L5, L6)	OBST :3 Lanzamientos Clegg Hammer: 5 Lanzamientos

4.5 Análisis estadístico:

Para todos los datos obtenidos, se realizó la prueba de Shapiro Wilks y el test de homogeneidad de Levene. El análisis de MANOVA se realizó utilizando un software comercial de análisis estadístico (Infostat, versión 2), para estos análisis el estadístico es f. Para las variables no normales se utilizó análisis de variables no paramétricas de Kruskal Wallis y el estadístico es H. Para la comparación de medias marginales se realizó la prueba LSD (Fisher). Se consideraron estadísticamente significativos valores de $p < 0,01$. Se realizaron análisis de correlación. El Modelo de Regresión II se realizó entre variables aleatorias (Legendre y Legendre, 2012) de CIV (Valor de Impacto de Clegg) y OBST (Firmeza, y deslizamiento).

4.6 Resultados:

Todas las mediciones obtenidas de los dos dispositivos demostraron ser significativas para el factor humedad CVH (%) o la interacción de CVH (%) y el Pad. Los resultados de ANOVA y prueba de medias de las variables probadas para cada tratamiento se muestran en los Cuadros 4.3 y 4.4. Los efectos significativos se muestran a través de los valores f (variables paramétricas) o H (variables no paramétricas) y p (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3: ANVA: $p < 0,05$ prueba estadística f. Se probaron distintos % de CVH (20%, 23% y 25%) con (CP) y sin pad (SP). Para variables no paramétricas (CIV-ASTMD5874-16, ASTM-D1936-07 e Impulso) $p < 0,01$ prueba estadística H.

Variables	CVH %		SP/CP		CVH% X SP/CP	
	H(f)	p	H (f)	p	H(f)	P
CIV (G)- ASTM F1702-10*	2,29	0,1190	4,76	0,0371*	0,40	0,6753
CIV (G)-ASTM F1936-07	1,48	0,4755	26,27	<0,0001*	29,88	<0,0001*
CIV (G)-ASTM D5874-16	0,88	0,6425	26,27	<0,0001*	28,42	<0,0001*
Max Av (G) Firmeza de Impacto	2,38	0,1098	314,80	<0,0001*	43,73	0,0001*
Max_Ah (G)	6,87	0,0035*	30,13	<0,0001*	7,06	0,0031*
Max_Lv (kN) Amortiguación	2,62	0,0895	30,45	<0,0001*	33,03	<0,0001*
Lv_tasa_de_carga	2,75	0,0801	138,86	<0,0001*	42,36	<0,0001*
Max_Lh (kN)	1,97	0,1567	131,99	<0,0001*	20,91	<0,0001*
Impulso (kN.s)	1,82	0,4021	77,40	<0,0001*	81,8	<0,0001*

Cuadro 4.4: Media y desviación estándar para cada combinación de factores de humedad y presencia o ausencia de Pad. (Los tratamientos de humedad son: 20, 23 y 25 % de CVH y los tratamientos de pad: SP, sin pad y CP, con pad, del Valor de Impacto de Clegg Hammer (CIV, coeficiente de impacto Clegg, expresada en tres Normas ASTM) y 8 variables obtenidas por el OBST. Los valores de desaceleración (Max_Ay=Máxima aceleración vertical, Max_Ah=Máxima aceleración horizontal) se reportan como positivos. (Max_Lv=Máxima fuerza vertical, Lv_tasa de carga=tasa de carga en el eje vertical, Max_Lh=Máxima fuerza en el eje horizontal. Letras diferentes indican diferencias significativas para $p < 0,01$).

Variables	Interacción CVH% X SP/CP Tratamientos					
	SP 20 %	SP 23 %	SP 25 %	CP 20 %	CP 23 %	CP 25 %
CIV (G)- ASTM_F1702- 10	45,83 ± 7,22 ab	47,67 ± 7,50 a	40,00 ± 4,56 bc	40,67 ± 8,55 bc	40,83±3,87 abc	37,83 ± 5,98 c
CIV (G)- ASTM_F1936- 07	77,33 ± 5,41 ab	86,33 ± 2,50 a	71,83 ± 5,86 abc	53,33 ± 4,77 bc	49,75 ± 2,36 c	49,92 ± 2,44 c
CIV (G)- ASTM_D5874- 16	95 ± 5,62 ab	98,67 ± 7,20 a	88,83 ± 7,63 abc	59 ± 6 bcd	52,50 ± 5,36 d	54,67 ± 3,50 cd
Max_Av (G)	99,37 ± 3,39 a	94,34 ± 4,09 b	84,28 ± 4,15 c	61,42 ± 4,39 e	72,35 ± 4,59 d	76,55 ± 1,22 d
Max_Ah (G)	8,85 ± 0,54 bc	9,47 ± 0,83 b	8,6 ± 0,69 c	9,12 ± 0,84 bc	10,53 ± 0,60 a	11,01 ± 0,59 a
Max_Lv (kN)	15,13 ± 0,19 b	14,53 ± 0,50 bc	13,69 ± 0,78 d	14,21 ± 0,66 cd	15,80 ± 0,65 a	16,36 ± 0,17 a
Lv tasa de carga	4,54 ± 0,13 a	4,29 ± 0,30 a	3,58 ± 1,36 b	2,66 ± 0,27 c	3,28 ± 0,29 b	3,56 ± 0,09 b
Max_Lh (kN)	1,35± 0,05 c	1,21± 0,07 d	1,19± 0,07	1,42± 0,09 bc	1,49± 0,06 b	1,62± 0,06 a
Impulso (kN.s)	0,14 ± 0,03	0,13 ± 0,00036	0,13 ± 0,00031	0,15 ± 0,00017	0,15 ± 0,00011	0,15 ± 0,000099

Las correlaciones entre las variables de los dos dispositivos (Cuadro 4.5 y 4.6) mostraron que el valor de impacto de Clegg (CIV) se correlaciona positivamente con la firmeza del impacto (Max_Av) con la fuerza de la correlación dependiente de cuál de los métodos estandarizados se utilizan para calcular el valor CIV. Las correlaciones entre los datos de CH expresados a través de diferentes estándares y Max_Av_media (Firmeza de impacto) mostraron diferencias significativas. Las correlaciones mostraron que la firmeza (Max_Av_media) está correlacionado positivamente con CIV_ASTM D5874-16 y CIV_ASTM F1936-07 ($r=0,79$; $p<0,0001$) y débilmente correlacionado con CIV_ASTM F1702-10 ($r=0,38$ $p<0,0215$), amortiguación (Max_Lv) está correlacionado negativamente con CIV_ASTM D5874-16 ($r=-0,51$) y CIV_ASTM F1936-07 ($r=-0,45$), mientras que la Lv_tasa de carga está correlacionada positivamente con CIV_ASTM D5874-16 ($r=-0,68$) y CIV_ASTM F1936-07 ($r=-0,7$). CIV también se correlacionó negativamente con (deslizamiento) Max_Lh ($r=-0,79$). Por esta razón en adelante nos referiremos al valor de CIV expresado por la norma ASTM D5874-16 ya que es el que presenta la mayor correlación con dos variables del OBST.

Cuadro 4.5: Coeficientes de correlación de Pearson de las variables obtenidas del CIV de los tres estándares y de las variables del OBST. Se eliminaron las correlaciones de las variables del OBST entre sí mismas por provenir del mismo equipo. Valores significativos a $p<0,05$.

Variable	CIV_ASTMD5874-16		CIV_ASTMF1702-10		CIV_ASTMF1936-07	
	p	r	p	r	p	r
CIV_ASTMD5874-16	<0,0001	1	0,0254*	0,37	<0,0001	0,95
CIV_ASTMF1702-10	0,0254*	0,37	<0,0001*	1	0,0035	0,47
CIV_ASTMF1936-07	<0,0001*	0,95	0,0035*	0,47	<0,0001	1
Max_Av	<0,0001*	0,79	0,0215*	0,38	<0,0001*	0,79
Max_Ah	0,0005*	-0,55	0,2598	-0,19	0,0023	-0,49
Max_Lv	0,0016*	-0,51	0,8634	0,03	0,0054	-0,45
Lv_tasacarga	<0,0001*	0,68	0,012*	0,41	<0,0001*	0,7
Max_Lh	<0,0001*	-0,79	0,2146	-0,21	<0,0001*	-0,79

4.6.1 Clegg Hammer:

La presencia del Pad generalmente representa un CIV más bajo que sin pad. El valor de impacto Clegg (CIV), registrado como ASTM F1702-10 (promedio del primer lanzamiento), mostró diferencias significativas también para la interacción presencia de Pad x CVH (%) (Cuadro 4.1), pero en un rango estrecho. CIV_ASTM F1936-07 (promedio de segundo y tercer lanzamiento) y CIV_ASTM D5874-16 (Figura 4.4) mostraron diferencias significativas para la interacción presencia de Pad x CVH (%) en un rango más amplio. El CIV aumentó al disminuir el CVH (%).

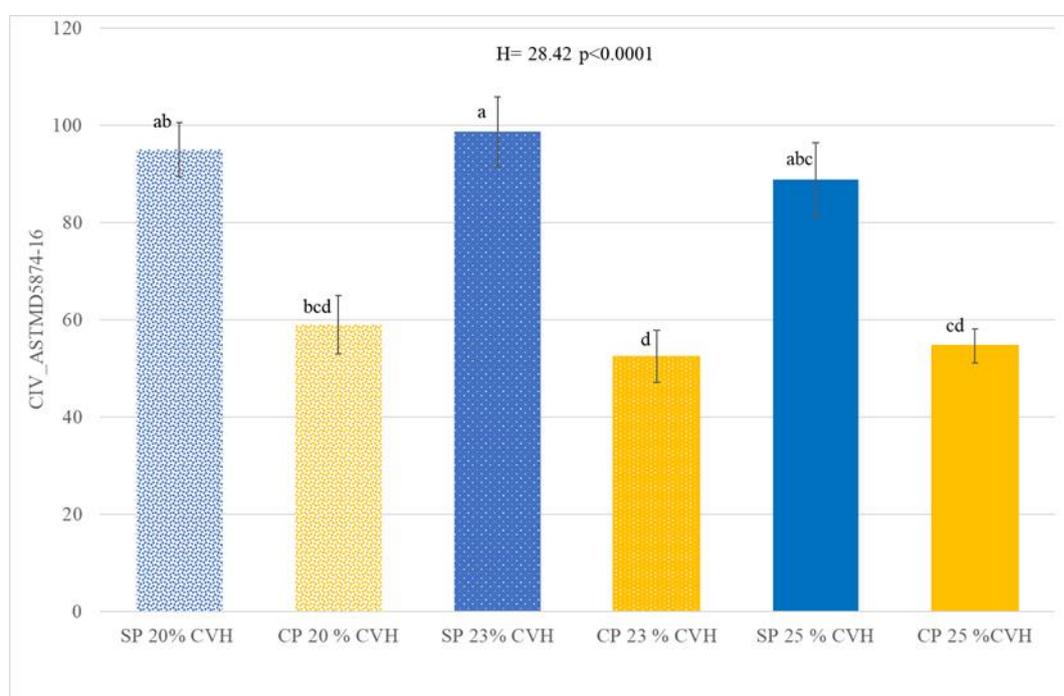


Figura 4.4: Valor de Impacto Clegg (CIV) medido con el Clegg Hammer. Media y desvío estándar de los Valores de Impacto de Clegg (CIV) según norma ASTM F5874-16 para los tratamientos SP 20% CVH: sin pad y con 20 % de CVH; CP 20% CVH: con pad y 20 % CVH; SP 23 % CVH: sin pad y con 23 % de CVH; CP 23 % CVH: con pad y 23 % de CVH; SP 25 % CVH: sin pad y con 25 % de CVH y CP 25 % CVH: con pad y 25 % de CVH. Los valores de desaceleración se informan como positivos. $p < 0.0001$

4.6.2 Medidor Biomecánico de Superficies Orono (OBST)

El análisis de varianza mostró diferencias significativas para algunas variables (Cuadro 4.3). La firmeza de Impacto es significativa para los tratamientos de humedad

medido por el CVH y todas las variables mostraron diferencias significativas combinadas con la presencia de Pad (Cuadro 4.3).

La firmeza del impacto (Max_Av) se caracteriza por la desaceleración máxima en el eje vertical y se informaron como valores positivos. La condición SP al 20% de CVH mostró los valores más altos y fue significativamente diferente a la condición SP 25 y las condiciones CP a 20, 23 y 25% CVH. Las diferencias significativas se muestran en la Cuadro 4.3; la condición CP mostró valores más bajos de firmeza al impacto, pero la disminución del impacto cuando aumentó el CVH está en un rango estrecho.

El porcentaje de cambio en la firmeza del impacto en lecturas de lanzamientos consecutivos fue significativamente diferente cuando se compararon los tratamientos con Pad y sin Pad (Figura 4.5). Sin Pad al 25 % de CVH el cambio entre los lanzamientos 1 y 2 representa el 44,32 % de cambio, exceptuando la desaceleración del primer lanzamiento (Figura 4.5). El tercer lanzamiento fue significativamente mayor en la condición sin Pad, aunque el porcentaje de cambio disminuyó (Figura 4.4). La presencia de Pad representó un 23 % del cambio entre los lanzamientos 1 y 2, y la disminución de los lanzamientos consecutivos no fue significativa. La diferencia encontrada entre los lanzamientos provee los resultados más consistentes cuando se utilizó el promedio de los tres lanzamientos.

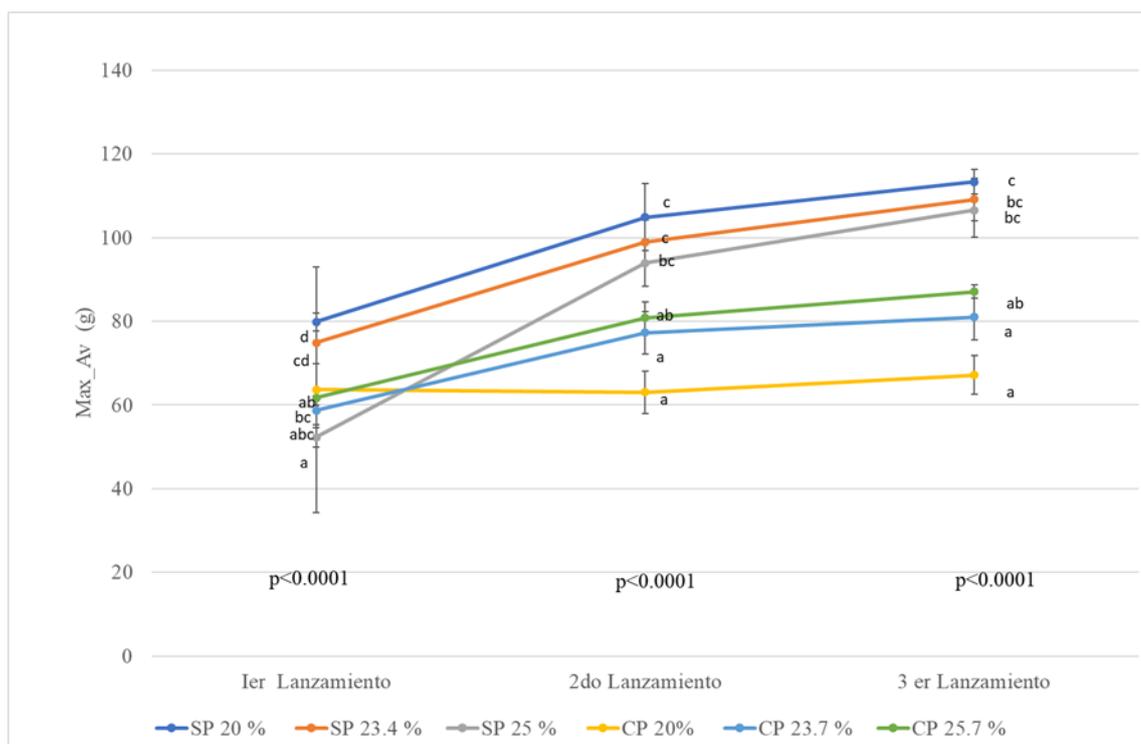


Figura 4.5: Media (95 % del intervalo de confianza) de la firmeza del impacto (Max_Av) de las lecturas de OBST para tres lanzamientos en seis ubicaciones (repeticiones) en Titb cuando se probaron los seis tratamientos SP 20 %: sin pad y 20 % de CVH; SP 23 %: sin pad 23 % de CVH; SP 25 %: sin pad y 25 % de CVH; CP 20 %: con pad y 20 % de CVH; CP 23 %: con pad y 23 % de CVH y CP 25 %: con pad y 25 % de CVH.

La aceleración horizontal máxima (Max Ah) del impacto fue significativamente diferente para todos los tratamientos. (Cuadro 4.3). CP-20 y 25% son los valores más altos y SP-25% es el valor más bajo. La tendencia de la media máxima de la aceleración horizontal para los tratamientos SP fue decreciente al aumentar el % de CVH. Para los tratamientos CP el CVH% mostró la tendencia opuesta. La amortiguación se determinó utilizando la carga vertical máxima media (Max Lv) en kN. CP-20% y SP 25% mostraron el valor más bajo de amortiguación (Cuadro 4.4) y CP_25% mostró el más alto. La interacción CP-CVH% mostró una tendencia creciente con el aumento del % de CVH, aunque los valores son más bajos que SP. La tasa de carga vertical (Lv) mostró la misma tendencia que Max_Lv. (Cuadro 4.3) y la tendencia fue decreciente hasta aumentar el % de CVH. Cuando se representaron todas las fuerzas verticales (Lv) durante el período de tiempo (impulso) para los tres lanzamientos (primera, segunda y tercera) (Figura 4.6 y

Figuras E1, E2 y E3 en el Apéndice E), se observó una mayor área bajo la curva para los tratamientos con pad. La presencia del pad mostró que después de llegar al Lv_{max} cae dramáticamente, no mostró un efecto significativo mejorando la amortiguación en términos de valor absoluto de Lv . Esta diferencia en el área bajo las curvas se calculó como impulso vertical para todas las combinaciones sin pad/con pad * CVH (%) (Figura 4.7) y las combinaciones con pad tienen mayor impulso en kN.s.

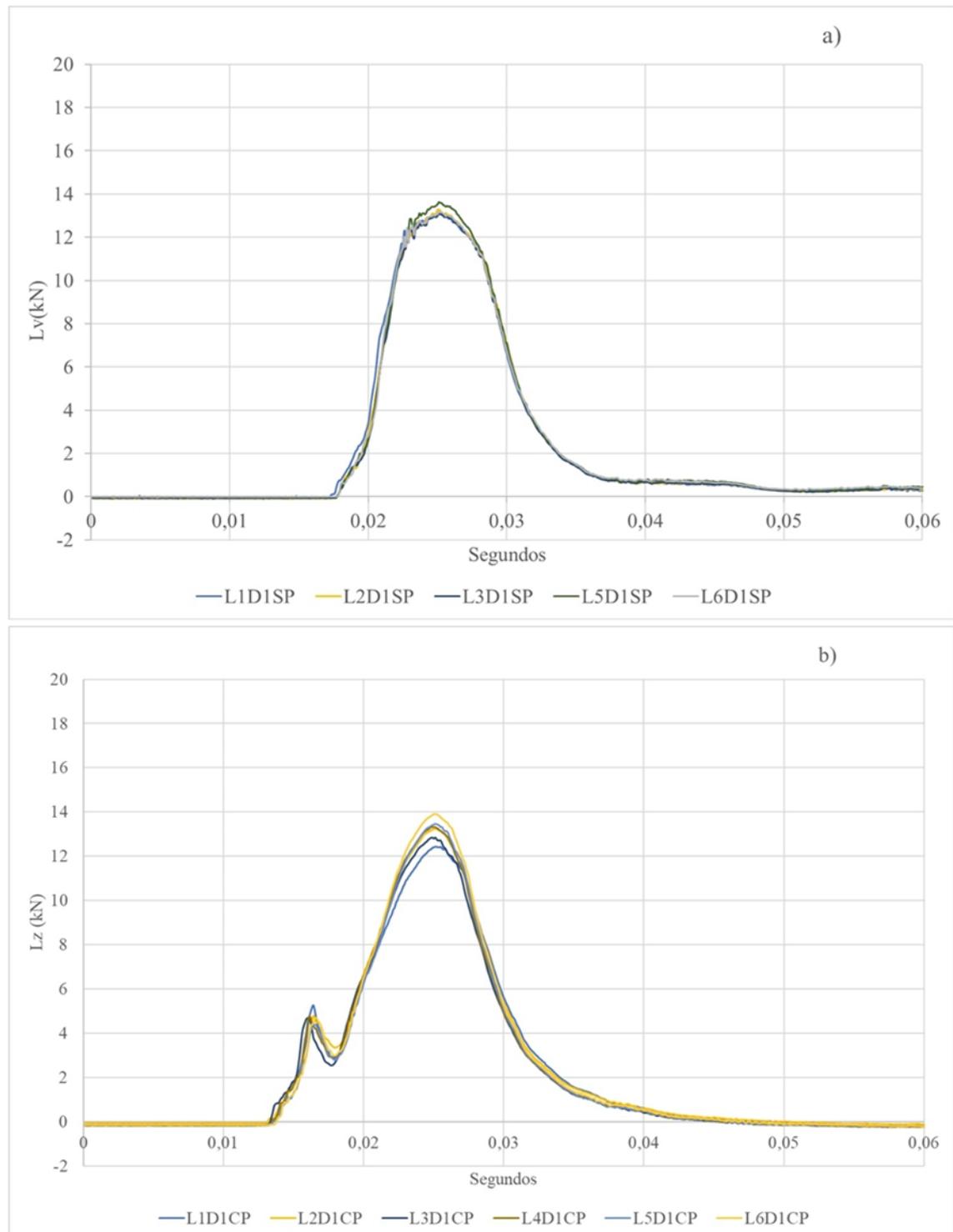


Figura 4.6: Fuerza o Carga vertical (L_v) del primer lanzamiento de la pesa del OBST en kN en función del tiempo en segundos, para el tratamiento de 20 % CVH de los tratamientos sin pad (SP) a) y con pad (CP) b). L del 1 al 6 indica las repeticiones, D1= primer lanzamiento de tres, en cada repetición. El área bajo la curva representa el impulso vertical.

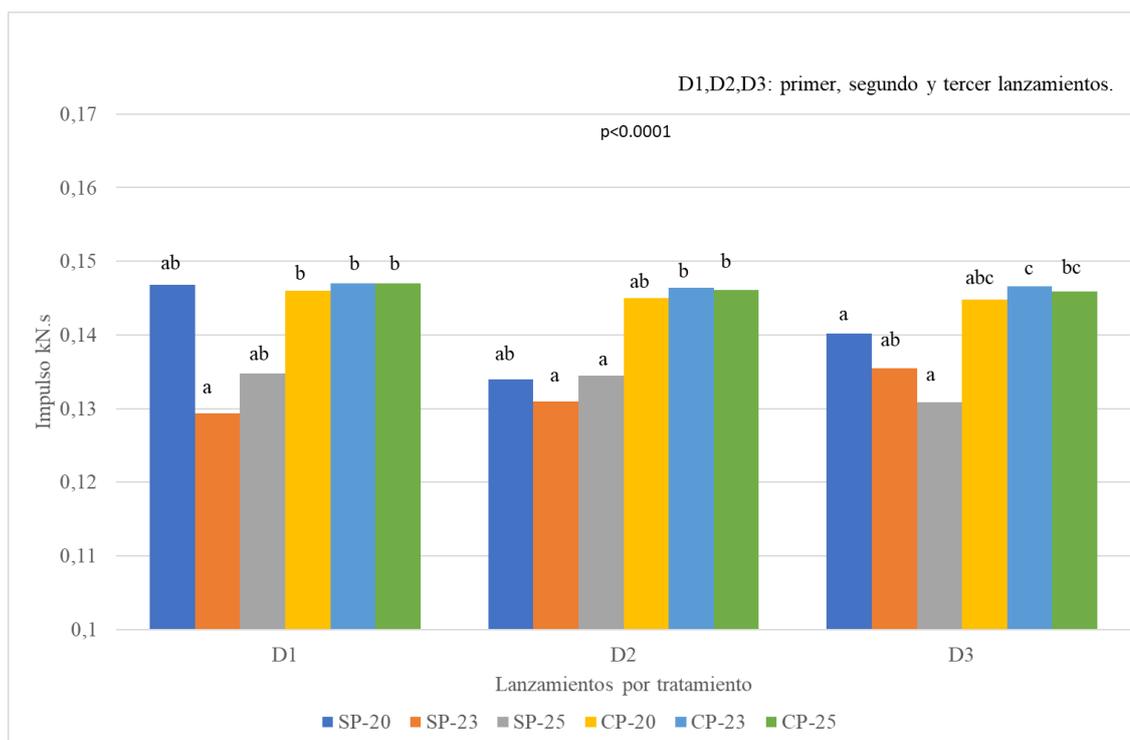


Figura 4.7: Promedio del impulso de 6 repeticiones calculado en kN.s para los tres lanzamientos (D1, D2, D3) de las combinaciones de los tratamientos de Humedad (20,23 y 25 CVH %) y ausencia de pad (SP) o con pad (CP).

De las correlaciones encontradas entre todas las variables producidas por el OBST y el CIV, las correspondientes a la correlación positiva entre la firmeza Max_Av y CIV (Cuadro 4.5) y la correlación negativa entre la fuerza longitudinal (o deslizamiento adelante-atrás) Max_Lh y CIV las hacen elegibles para aplicar el Modelo de Regresión II para variables aleatorias. Estos análisis permiten predecir los valores de firmeza Max_Av (Figura 4.8) y deslizamiento Max_Lh (Figura 4.9) para cada valor de CIV registrado.

$$Max_{Ah} = 37,25646 + 0,5901243 * CIV (p<0,001)$$

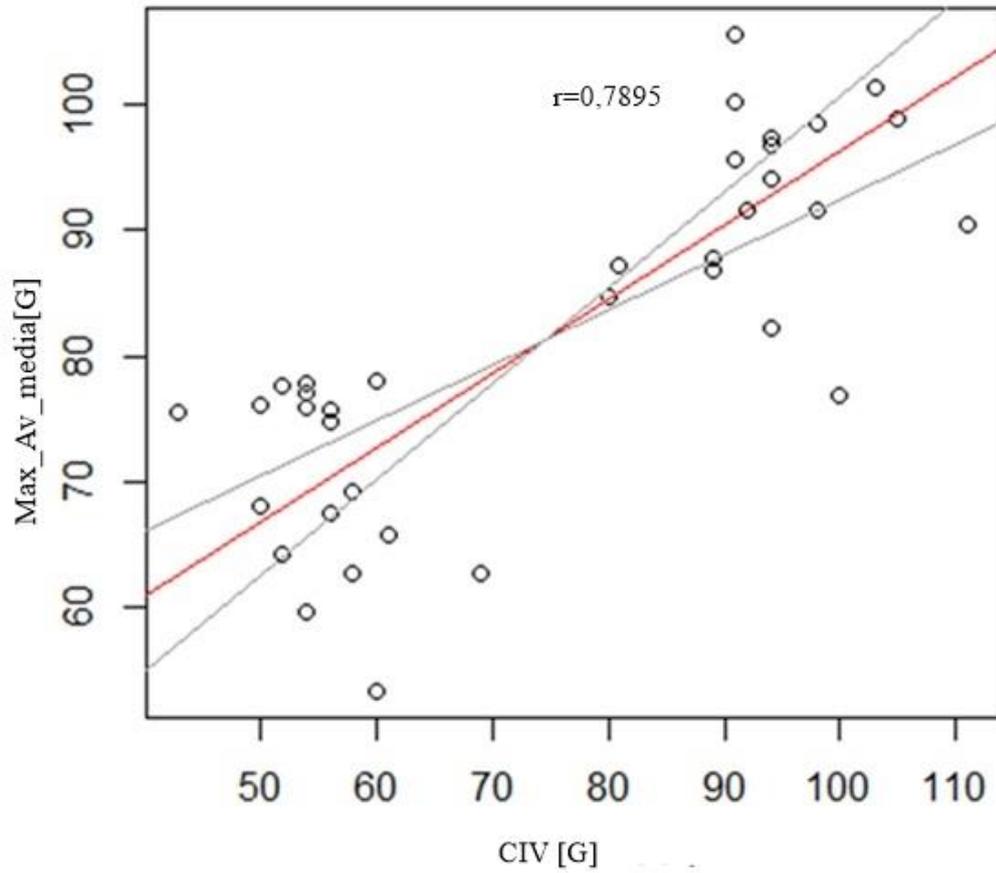


Figura 4.8. Modelo de regresión II entre el valor de impacto de Clegg CIV (G) y la firmeza o pico máximo de la aceleración obtenida del OBST, Max_Av (G)

$$Max_{Lh} = 1,726884 - 0,006333635 * CIV(p < 0,001)$$

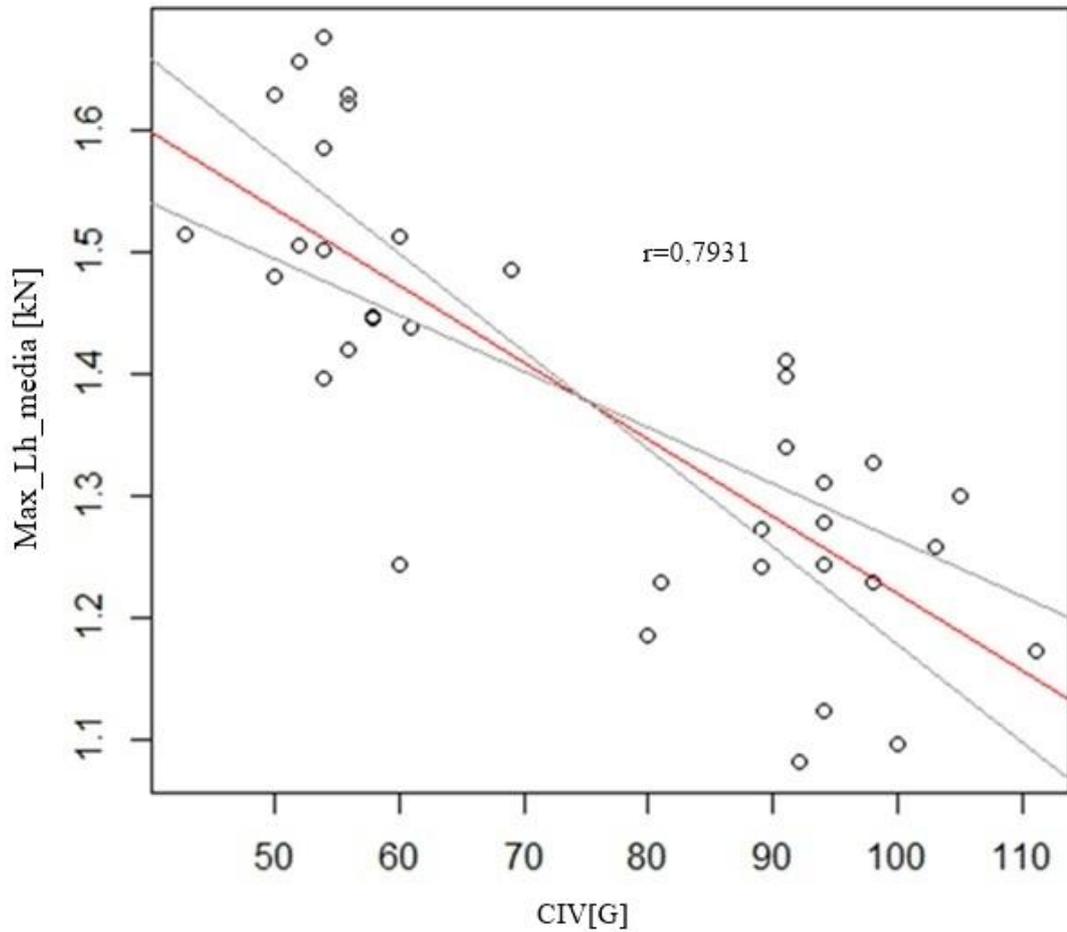


Figura 4.9: Modelo de regresión II entre el valor de impacto de Clegg CIV (G) y el pico máximo de fuerza horizontal (deslizamiento) obtenida del OBST Max_Lh (G)

4.7 Discusión:

En algunos trabajos anteriores los equipos pequeños portátiles no se consideraron debido a su baja carga y bajo impacto comparado con el caballo. La realización de pruebas en una variedad de niveles de humedad y la limitación de las comparaciones de datos de Clegg a una única composición superficial son importantes para un material granular parcialmente saturado, como la superficie de una arena. La sensibilidad a la velocidad de deformación de la superficie se determina por la relación entre el aire, flujo compresible, y el agua, flujo incompresible, en los poros (Zhang et al 2023). De manera análoga, la resistencia a la tracción también se ve influenciada por el contenido de humedad y la

composición (Naser, 2001). Los datos registrados por el Clegg Hammer permiten estimar algunas propiedades funcionales como la firmeza de impacto (Muñoz Nates et al 2017, Blanco et al 2021). La firmeza del impacto representa la primera fase de la postura y corresponde a la colisión (desaceleración) del casco con el suelo (Thomason y Peterson, 2008). Es razonable que para un rango de materiales la firmeza del impacto pueda ser efectivamente estimada con un dispositivo de bajo peso dado que golpea múltiples veces y prueba de esta manera la superficie compactada. Para una superficie área elástica esta estimación puede ser suficiente para probar la degradación del pad subyacente.

La amortiguación representa cuánto la superficie absorbe y reduce la fuerza máxima (Holt et al., 2014), el hecho de que SP muestre una tendencia decreciente al aumentar el CVH confirma la importancia de la humedad en la amortiguación (Ratzlaff et al., 1997, 2005). La respuesta del pad (CP) es más obvia en la forma de las curvas de carga L_v y tiempo (segundos) (Figura 4.6 y Figuras F1, F2 y F3, Apéndice F), tasas de carga L_v y el impulso calculado para cada combinación de SPCP*CVH (Apéndice F), la presencia del pad muestra un mayor impulso y reduce el tiempo en la carga vertical máxima. Aunque las cargas verticales máximas son superiores en algunos casos (CP-23 % CVH=15,80 \pm 0,65; CP-25 % CVH=16,36 \pm 0,17). El pad muestra más consistencia en los tres CVH y lanzamientos. La amortiguación se define en la fase de apoyo de la marcha, por lo que las correlaciones negativas de la amortiguación con CIV-ASTMD5874-16 ($r=-0,51$, $p<0,0016$) y CIV-ASTM1936-07 ($r=-0,45$, $p<0,0054$) pueden estar indicando el límite del alcance de CIV en términos biomecánicos. En el momento del impacto del OBST, el casco metálico entra en contacto con la superficie y se produce la compresión del resorte y la deformación de la superficie del pad. Luego, la masa deslizante empuja el casco de metal vertical y horizontalmente hacia la superficie, lo que da como resultado una compresión máxima del resorte y una producción de fuerza máxima. La fuerza se amortigua durante la carga secundaria mediante el amortiguador

unido a la estructura metálica rígida de la extremidad (Hernlund et al., 2017). La amortiguación de OBST cubre una combinación dinámica de desaceleración y fuerzas que se producen en la fase de apoyo y que CH no detecta. Las curvas de amortiguación y tiempo (Figuras E1, E2 y E3 en el Apéndice E) muestran que el pad suaviza las oscilaciones en el pico y la velocidad para llegar al pico y caen dramáticamente después del pico.

El Clegg Hammer pudo detectar el pad subsuperficial y posiblemente representar su condición; sin embargo, no replica el efecto del pad subsuperficial en la biomecánica del paso equino y su uso abre cuestionamientos sobre la degradación del pad. Sin embargo, dado que la firmeza del impacto captura el comportamiento del pad, es posible que el martillo Clegg detecte la compactación del mismo.

La fuerza anteroposterior y el movimiento horizontal del casco al aterrizar después del impacto no están bien representados por el martillo Clegg. No se espera que la degradación del pad subsuperficial influya en la adherencia (Hernlund et al 2017). Anteriormente se mostró una correlación negativa entre Max_Ly y CIV (Clayton y Hobbs 2019), pero esta correlación no puede generalizarse y probablemente esté relacionada con la creación de una huella del casco en la capa superior de la superficie. La idea de una superficie de área elástica sería minimizar los cambios en la superficie superior para mejorar la consistencia del terreno.

4.8 Conclusión:

El objetivo general de este capítulo de determinar las propiedades funcionales de dos sistemas constructivos de pista de arena, uno convencional y otro del tipo área elástica, por el método de TitB medidos por OBST (Norma FEI) y por Clegg Hammer (medidor de impacto) fue alcanzado (Figura 4.10).

Los resultados indicaron que la Firmeza (aceleración máxima en el eje vertical) obtenida por OBST se reduce al aumentar el CVH % y que la inclusión de un pad de goma EVA en un perfil de arena y geotextil mantiene la misma tendencia con el aumento de humedad a excepción del 25% de CVH, punto que coincide con la ruptura del pad. También se observó que el aumento del contenido de humedad tiene un efecto amortiguador ligero cuando no hay pad (reducción de la fuerza máxima en el eje vertical).

La firmeza obtenida por Clegg Hammer por la norma ASTM D5874-16, se redujo en la medida que aumentó el CVH % y con el uso de PAD. Este es un aporte significativo dado que la correlación entre la medición de firmeza del OBST y el CIV del Clegg Hammer, convierte a este último en un instrumento liviano y accesible con la capacidad de detectar cambios en la performance de la subcapa destinada a mejorar las propiedades funcionales. De este modo el CH puede convertirse en un buen estimador de al menos una propiedad funcional obtenida del medidor biomecánico OBST. La correcta elección de la norma de cálculo de la firmeza (ASTM D5874-16) permite aproximarnos a un estimador confiable.

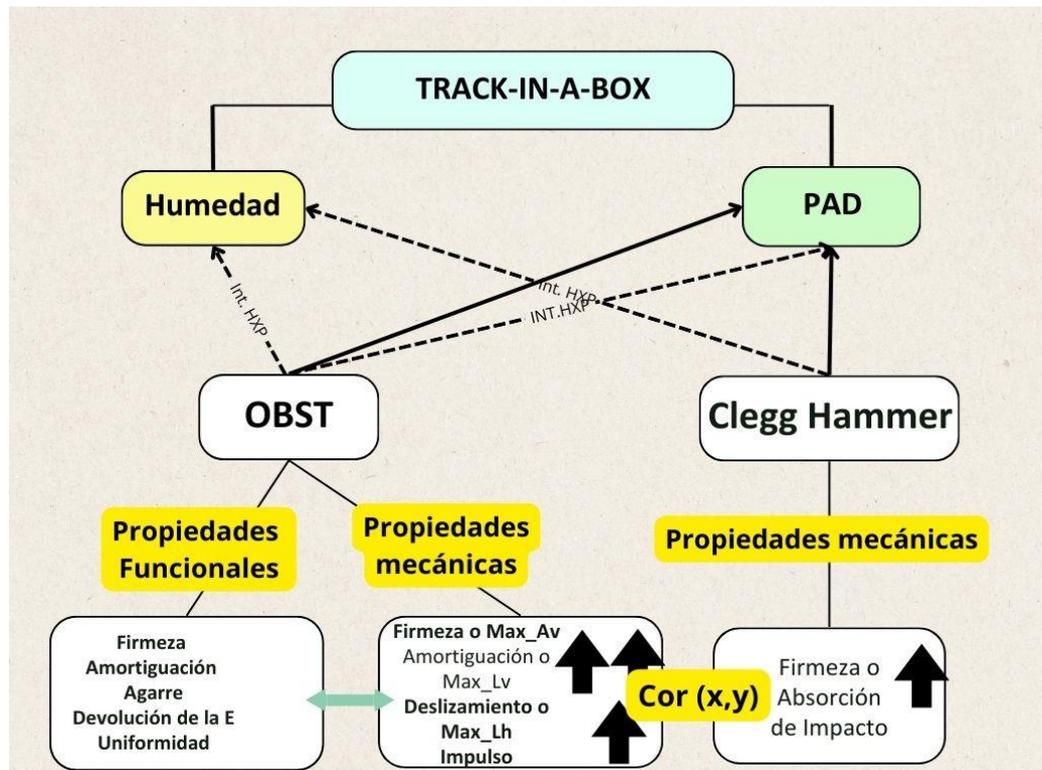


Figura 4.10: Síntesis de los resultados hallados en el capítulo. En las cajas en colores se hallan los factores: Humedad: 3 niveles (20, 23 y 25 % CVH), PAD: dos niveles (sin y con). En las cajas blancas intermedias se hallan los instrumentos, OBST y Clegg Hammer, y en las cajas de la última línea se hallan las propiedades funcionales determinadas por el OBST: firmeza, amortiguación, agarre (o grip), devolución de la energía a partir de las propiedades mecánicas registradas: firmeza o Max_Av, Amortiguación o Max_Lv, Deslizamiento o Max_Lh e Impulso. Clegg Hammer: firmeza o absorción de impacto. Las flechas enteras indican efecto principal, y las de línea partida interacción de factores. Las flechas negras grandes en la última línea de cajas indica el aumento de la propiedad medida como consecuencia de la humedad o presencia de pad. El número de flechas indica la capacidad de detección de más factores por parte del instrumento. En la última línea se muestra la Correlación hallada entre la Firmeza del OSBT y la firmeza del Clegg Hammer.

Capítulo V: Conclusión y Discusión General

5.1 Discusión:

El objetivo general de este estudio fue determinar las variaciones de tres factores: humedad, agregado de geotextil triturado y uso de paquete drenante sobre las propiedades funcionales. Los diseños constructivos utilizados se basaron en tres factores distintos: un diseño convencional de arena sobre base compactada, una alternativa que incorpora materiales que sirven como drenaje planar con las propiedades de capa asociadas, y un tercer diseño que incluye una capa de goma para exacerbar la respuesta de área elástica. En este estudio se prueba que variaciones en el contenido de humedad, el agregado de geotextil y la inclusión de capas generan variaciones en los parámetros utilizados para evaluar la calidad de la superficie. Estas variaciones se replican consistentemente en pruebas de laboratorio que emplean el medidor de superficies biomecánico Orono (OBST), que podría usarse como base para comparar con una variedad de otras herramientas de medición.

Debido a la naturaleza crítica tanto de la instalación como del mantenimiento, se utilizaron dispositivos ligeros y de bajo costo para evaluar las propiedades funcionales. Estas herramientas son fundamentales para facilitar el adecuado mantenimiento e instalación de las superficies. Varios instrumentos son prometedores para proporcionar, como mínimo, una evaluación comparativa del estado de los materiales en comparación con una línea base. Estos datos permitirán monitorear las condiciones que pueden afectar tanto el rendimiento del caballo como del jinete en diferentes tipos de superficies ecuestres: arena y césped.

5.1.1 Ensayo de cajas in situ de arena:

Los hallazgos de las pruebas de cajas de arena in situ se centran en el uso de geotextil y en el contenido volumétrico de humedad en el diseño de superficies elásticas para deportes ecuestres. El estudio revela que la adición de geotextil triturado aumenta la

penetración capturada por el GSP, el pico de tracción rotacional (RPS) y el índice del test de impacto (ITI) en la superficie (Cuadro 5.1). Aunque la adición de geotextil es una práctica generalizada el efecto sobre las propiedades ha sido solo recientemente analizado (Souza, et al 2023). Este capítulo demuestra que las herramientas usadas pueden detectar cambios en los parámetros físicos como resultado de la adición de geotextil picado, y, de este modo brindar perspectivas sobre el efecto de la firmeza y amortiguación sobre la superficie. De acuerdo con van der Heijden (2018), el efecto de la adición de geotextil agrega rugosidad a la superficie, influye sobre el movimiento relativo entre la herradura y la superficie, que resulta en fuerzas mayores durante un movimiento pivotante. El GSP, el ITD y el RPS han demostrado ser todos sensibles a este efecto. A pesar de las inquietudes previas respecto al empleo de RPS (Lewis et al., 2015), este estudio evidencia su sensibilidad ante la interacción triple entre el paquete drenante, el contenido de humedad y la incorporación de geotextiles. Claußen et al. (2018) destacan la variación significativa dependiente del operador del RPS, lo que podría contribuir a las debilidades halladas en estudios anteriores. La capa drenante reduce la tracción longitudinal (GSS), potencialmente debido al ajuste tridimensional de las partículas de arena, provocando una distribución más homogénea del agua. Esto sugiere que la capa de drenaje actúa como capa de separación y como depósito de agua. La colaboración entre la malla y las capas de drenaje tiene como objetivo mantener un contenido de agua constante en los perfiles de las cajas de arena tanto lateral como verticalmente (Rose-Harvey et al., 2012; Blanco et al., 2023), contribuyendo significativamente a lograr la consistencia en dichos perfiles.

Cuadro 5.1: (+) o (-) significa detección del tratamiento M: Contenido de humedad, D: Paquete Drenante, G: Geotextil. Interacciones significativas: D x G: interacción de Paquete Drenante x Geotextil agregado, M x G: interacción Contenido de humedad x Geotextil, M x D x G: interacción Contenido de humedad x Paquete Drenante x Geotextil agregado.

Variable	M	D	G	D x G	M x G	M x D x G
GSP	-	+	+	-	+	-
GSS	-	+	-	-	-	-
ITD	+	+	+	+	-	-
RPS	-	-	+	-	-	+
TDR	+	-	-	-	-	-

5.1.2 Ensayo de cajas in situ de césped

El ensayo de cajas in situ resalta hallazgos clave sobre el impacto del agregado de geotextil triturado y el paquete drenante, en las cajas de césped (Cuadro 5.2). Estos efectos fueron detectados como diferencias en el CVH (%). El paquete drenante y el geotextil combinados parecen reducir el CVH (%), mientras que el paquete drenante parece reducir el flujo de agua manteniendo mayores niveles de humedad a mayores niveles de succión. En particular, las mediciones de RPS muestran insensibilidad a los tratamientos y carecen de repetibilidad entre los días de prueba. Las limitaciones observadas con el RPS son potencialmente influenciadas por las especies de pastos de estación cálida (*Cynodon dactylon* x *C. transvaalensis*) que dominan la respuesta en lugar de la adición de geotextiles en las superficies de arena. Las lecturas de tracción en césped superan a las de arena, lo que sugiere la necesidad de tener precaución en la selección de herramientas, especialmente considerando la altura de corte y el crecimiento adicional de los tallos horizontales. ITI y SCP no proporcionan información adicional, mientras que ITD demuestra ser insensible a factores en el experimento con césped debido a la interferencia de varios elementos en la cubierta de césped.

La altura de corte y los niveles de humedad se identifican como consideraciones críticas para mediciones válidas (Lulli et al 2014, Blanco et al 2023). El dispositivo GS diseñado para pistas de césped detecta con éxito diferencias entre la adición de geotextil y la capa de drenaje. Por lo tanto, el GS podría ser adecuado para proporcionar información sobre las condiciones de la superficie para eventos ecuestres en superficies de césped. Si bien no existen correlaciones con las mediciones del OBST (Schmitt et al 2023), los valores GSI proporcionan datos de certeza relativa para determinadas decisiones sobre la calidad de la superficie en entornos ecuestres. Se destaca el papel de la capa de drenaje como depósito de agua subterránea, relevante para la salud del césped, a pesar del alto %VMC observado en condiciones experimentales.

Cuadro 5.2: (+) o (-) significa detección de los tratamientos D: Paquete drenante, G: Geotextil. B: F: fechas. Interacciones significativas: D x G: Paquete drenante x agregado de geotextil, D x F: interacción Paquete drenante x Fechas, G x F: Interacción agregado de geotextil x fechas, D x G x F: Interacción paquete drenante x agregado de geotextil x fechas.

Variable	D	G	F	DxG	DxF	GxF	DxGxF
GSI	+	-	+	+	+	+	+
ITD	-	-	-	-	-	-	-
RPS	-	-	+	-	-	-	-
SCP	-	+	-	-	-	+	-
TDR	+	+	-	+	-	+	+

5.1.3 Track-in-a-box y OBST

El ensayo en laboratorio por el método track-in-a-box permite tener mayor control sobre las variables ambientales para obtener resultados más consistentes. Aun cuando en las cajas in situ no es posible controlar el clima, lo cual sucede en la situación real, el método Titb tampoco es adecuado para el estudio de césped. Este método permite comparar los diseños en condiciones ideales y separar los efectos. En este sentido fue posible discernir el efecto del uso de capas de elasticidad (pad) sobre las propiedades funcionales de la superficie. Sin embargo, las propiedades observadas no se mantienen consistentes en los sucesivos lanzamientos sobre la misma superficie (ocurren en los

sucesivos niveles de humedad) (Cuadro 5.3). La información más importante que este estudio podría proporcionar se refiere a posibles problemas de durabilidad de la capa en uso. Por lo tanto, el monitoreo de la condición del pad y la influencia del uso del pad y el CVH (%) pueden ser investigados en el futuro utilizando herramientas simples, con el fin de determinar si los problemas de durabilidad también son evidentes en el uso corriente. Si el pad hubiera sido reemplazado en cada nivel de CVH (%) para asegurar la independencia de las mediciones, el efecto de la durabilidad no hubiera sido detectado en el estudio.

Una contribución notable y original de este estudio radica en demostrar que el impulso calculado derivado de los datos de fuerza vertical, obtenidos por el OBST para cada tratamiento, indica una respuesta estandarizada en presencia del pad, independientemente del %CVH (Apéndice E, Figuras E1, E2 y E3). La observación de iguales valores de impulso en algunos casos con y sin Pad se deben a los diferentes niveles de CVH (%). El efecto de niveles de CVH (%) medianos y altos ocurre a pesar de que el tiempo transcurrido en el valor máximo es más corto cuando hay pad (Figura 4.4, Capítulo IV).

La condición del pad es determinada de manera confiable por el CH para estos materiales, como lo demuestra una fuerte correlación con las mediciones de firmeza registradas por el OBST ($R^2=0,62$, $r=0,79$) (Cuadro 5.3). Este hallazgo representa una contribución original y valorable al actual estado del arte dado que la medición de firmeza representa la fase inicial de carga del paso y desaceleración del casco con el suelo (Thomason y Peterson, 2008). Para superficies con capas que otorgan propiedades de “área elástica” este valor de firmeza puede ser suficiente para identificar la degradación de la capa subterránea para estos materiales. Incluso para una pista con más de diez centímetros de profundidad sobre el pad, el CH pudo detectar la presencia del mismo y la progresión hacia una superficie más compactada en este caso de estudio. Además del uso

como herramienta sencilla para la detección de la condición del pad en una superficie elástica, el OBST también demostró que el aumento del CVH (%) redujo la firmeza, la amortiguación, y la carga del eje simple, y las tasas correspondientes a ambas variables (firmeza, amortiguación y carga del eje simple) (Cuadro 5.3).

Cuadro 5.3: (+) o (-) significa detección de los tratamientos. H: Humedad CVH 20%, 23% y 25%, SP/CP: Sin pad y con pad. CVH % x SP/CP interacción del CVH % y el uso de pad. Estas variables están descritas en la Cuadro 4.3 del Capítulo IV.

Variable	Humedad (%)	SP/CP	CVH (%) x SP/CP
CIV (G)- ASTM F1702-10*	-	+	-
CIV (G)-ASTM F1936-07	-	+	+
CIV (G)-ASTM D5874-16	-	+	+
Max Av (G) (Impacto) Firmeza	-	+	+
Max_Ah (G)	+	+	+
Max_Lv (kN) Amortiguación	-	+	+
Lv_tasa de carga	-	+	+
Max_Lh (kN)	-	+	+
Impulso (kN.s)	-	-	+

5.2 Conclusión

La sostenibilidad a largo plazo en los deportes ecuestres depende, entre otros factores, de la mejora continua de las superficies, enfocándose en su rendimiento y seguridad. Esto requiere una comprensión detallada de la física del impacto del casco del caballo y las propiedades dinámicas de las superficies. La investigación introduce nuevos conceptos, como las superficies de "área elástica," y promueve la evaluación basada en datos objetivos para optimizar su diseño y mantenimiento. Aunque estos conceptos son

recientes, su adopción ha mostrado beneficios en la distribución de cargas y en el rendimiento tanto de caballos como de jinetes.

El objetivo general de esta tesis se ha logrado de manera significativa a lo largo de cada capítulo con la meta de respaldar el futuro de la industria. Dentro de cada sección, se ejecutaron pruebas para evaluar las modificaciones propuestas, incluida la evaluación de la influencia de la humedad, la incorporación de geotextil triturado, la aplicación de un sistema de drenaje y el uso de una capa subsuperficial de goma para proporcionar una respuesta mecánica de superficie elástica en la superficie ecuestre simulada. Los hallazgos indican claramente que, por selección de los materiales disponibles en el mercado local, es factible crear superficies optimizadas para actividades ecuestres deportivas en todos los niveles de competencia.

Se concluye:

La adición de geotextil triturado y la incorporación de un paquete drenante modifican las propiedades mecánicas de las cajas de arena, especialmente en términos de absorción de impacto y resistencia a la penetración, las cuales están directamente relacionadas con sus propiedades funcionales. Además, se ha probado que un dispositivo simple como el ITD, detecta los cambios generados en absorción de impacto por los factores estudiados y puede ser útil a la hora de monitorear la condición de una superficie ecuestre.

En las cajas de arena y de césped el paquete drenante genera un efecto significativo y una menor variabilidad en absorción de impacto, resistencia a la penetración y tracción longitudinal. A la vez en cuanto al césped se concluye que es necesario establecer un rango de condiciones tanto de CVH como de altura del césped, en los que tanto el ITD como el GS podrían ser de utilidad, particularmente para determinar la absorción de impacto y la resistencia a la penetración.

Se ha determinado que el uso de un pad de goma EVA mejora las propiedades funcionales medidas por OBST, específicamente en términos de firmeza y amortiguación. Además,

se ha establecido una correlación significativa con el Clegg Hammer, lo que permite utilizar este dispositivo para monitorear la condición de superficies de tipo punto elástico. Dado que el Clegg Hammer sirvió como base para la construcción del ITD, es posible que, con un dispositivo de autoconstrucción sencillo, se pueda evaluar la firmeza de una superficie ecuestre. También se ha concluido que la estimación alcanzada de Firmeza (Av) con el Clegg Hammer (CIV) podría ser suficiente para detectar el impacto recibido por el casco en la primera fase del paso (Figura 1.1) y así ser comparable con un dato biomecánico.

La identificación de dispositivos útiles para detectar cambios en las propiedades mecánicas de las superficies ecuestres abre nuevas posibilidades para monitorear su calidad en todos los niveles deportivos. Estas herramientas simples podrían ampliar el monitoreo más allá de los eventos de alto nivel (4 y 5 estrellas) y las carreras reguladas por la HISA, permitiendo su uso en categorías preliminares. Además, podrían implementarse en nuestro país y en otros de la región, fuera de la regulación de la FEI y la HISA, mediante un protocolo basado en estos instrumentos para mejorar la calidad de las superficies ecuestres.

Referencias

Adams, W. A. (1997) The effect of 'fibermaster' fibres on the stability and other properties of sand rootzones. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 8, 15–26.

ASTM D 6951-03. (2015) Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, MI, USA, pp. 1–7.

ASTM D 698-07. (2007) Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12, 400 ft-lbf / ft³ (600 kN-m / m³)). *The Annual Book of ASTM Standards.* 2007, 3, 1–11.

ASTM D3441-16. (2016). Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils [online]. doi:10.1520/D3441-16

ASTM D5874-16. (2016). Standard Test Methods for Determination of the Impact Value (IV) of a Soil. <https://doi.org/10.1520/D5874-16>

ASTM D6067 / D6067M-17. (2017) Standard Practice for Using the Electronic Piezocone Penetrometer Tests for Environmental Site Characterization and Estimation of Hydraulic Conductivity [online]. doi:10.1520/D6067_D6067M-17

ASTM D6780 / D6780M-19. (2019). Standard Test Method for Water Content and Density of Soil In situ by Time Domain Reflectometry (TDR) [online]. doi:10.1520/D6780_D6780M-19

ASTM F2333-04. (2017). Standard Test Method for Traction Characteristics of the Athletic Shoe-Sports Surface Interface. [online]. doi:10.1520/F2333-04R17

ASTM F3416-21. (2021). Standard Guide for Using Fourier Transform Infrared Spectrometry to Evaluate Synthetic Equine Surface Components. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, MI, USA.

ASTM F3419-22. (2022). Standard Test Method for Mineral Characterization of Equine Surface Materials by X-Ray Diffraction (XRD) Techniques.

ASTM International. (2020). WK73697 Proposed Standard Test Method for Assessing Physical Resistance in Turfgrass Equine Surfaces [online].

ASTM-D422-63 (2007) e2. (2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils., (Reapproved), 1–8. ISSN <null>.

ASAE S313.3 FEB1999 (R2018). Soil Cone Penetrometer. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Reaffirmed 2018.

Baker, S.W. (1994) The effect of the frequency of slit tine aeration on the quality of soccer and rugby pitches. *J. Sport. Turf Res. Inst.* 70, 44–54.

Baker, S.W., Hunt, J.A. (1997) Effect of shade by stands on grass species and cultivars selection for football pitches. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 8, 593–601.

Barrey, E., Landjerit, B., y Wolter, R. (1991) Shock and vibration during the hoof impact on different track surface surfaces, In: *Equine Exercise Physiology 3*. Eds Persson, Lindholm and Jeffcott, ICEEP Publications Davis California pp. 97-106.

Beard, J (1972) *Turfgrass: Science and Culture*. Regents/Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Benoit, P., Barrey E., Regnault J.C., y J.L. Brochet. (1993) Comparison of the damping effect of different shoeing by the measurement of hoof acceleration. *Acta Anat (Basel)*1993:146:109–13.

Biewener, A.A. (2003) *Animal locomotion*. Oxford: Oxford University Press, 2003. p. 46.

Biewener, A.A., Thomason, J.J., Goodship, A., y L.E. Lanyon. (1983) Bone stress in the horse forelimb during locomotion at different gaits: a comparison of two experimental methods. *J Biomech* 1983, 16:565–76. DOI: 10.1016/0021-9290(83)90107-0

Björck, G. (1957) Studies on the draught force of horses. *Acta Agricultura Scandinavica, Supplement* 1957, 4:1–109.

Blanco, M.A., Di Rado, F.N., Peterson, M. (2023). Warm Season Turfgrass Equine Sports Surfaces: An Experimental Comparison of the Independence of Simple

Blanco, M.A., Hourquebie, R., Dempsey, K., Schmitt, P., Peterson, M. (2021) An Experimental Comparison of Simple Measurements Used for the Characterization of Sand Equestrian Surfaces. *Animals* 11, 2896. <https://doi.org/10.3390/ani11102896>.

Blundell, E. (2010) The Effects of Dressage Competitions on the Mechanical Properties of a Synthetic Equestrian Arena Surface. Ph.D. Thesis, University of Central Lancashire, Preston, UK. <https://clock.uclan.ac.uk/1861/1/BlundellMSCthesisfinal.pdf>

Burn, J.F. y Usmar, S.J. (2005). Hoof landing velocity is related to track surface properties in trotting horses. *Equine Comp. Exerc.Physiol.* 2,37-41.

Björnsdóttir, S. (2018). Gait analysis and lameness detection of the Icelandic horse. Conference Paper. Nordic Equine Veterinary Congress 2018. Bergen, Norway.

Canaway, P.M., Bell, M.J. (1986) An apparatus for measuring traction and friction on natural and artificial playing surfaces. *J. Sport. Turf Res. Inst.* 62, 211–214.

Caple, M., I., James y M., Bartlett. (2012) Spatial analysis of the mechanical behaviour of natural turf sports pitches. *Sports Engineering* [online]. 15(3), 143–157. ISSN 13697072. doi:10.1007/s12283-012-0097-4

Carré, M. J., y Haake, S.J. (2004). An examination of the Clegg impact hammer test with regard to the playing performance of synthetic sports surfaces. *Sports Engineering*, 7, 121–129. <https://doi.org/10.1007/BF02844050>

CEN—EN 13041. (2011) Soil improvers and growing media—Determination of physical properties—Dry bulk density, air volume, water volume, shrinkage value and total pore space. European Committee for Estandarization (CEN): Brussels, Belgium, p. 30.

Chang, Z., Wang, C., Zhu, H., Li, D. (2022) Physical properties of sports turf rootzones modified with organic fibers. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 14, 176–181. <https://doi.org/10.1002/its2.107>.

Chateau, H., Holden, L., Robin, D., Falala, S., Pourcelot, P., Estoup, P., Denoix, J.-M. y Crevier-Denoix, N. (2010) Biomechanical analysis of hoof landing and stride parameters in harness trotter horses running on different tracks of a sand beach (from wet to dry) and on an asphalt road. *Equine Veterinary Journal*, 42 (38): 488-495.

Clanton, C., Kobluk, C., Robinson, R. A., Gordon, B. (1991). Monitoring surface conditions of a thoroughbred racetrack. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 198(3), 613–620.

Claußen, G., Dürselen, R., Krone, B., y E.F. Hessel. (2019) Evaluation of the Factors Influencing the Rotational Shear Resistance of Horse Riding Arena Surfaces (Technical and Field Investigations). *Journal of Equine Veterinary Science* [online]. 74, 95–102. ISSN 07370806. Disponible: doi: 10.1016/j.jevs.2018.12.002

Clayton, H.M, D. Sha, J. Stick, N. Elvin. (2007) 3D kinematics of the equine metacarpophalangeal joint at walk and trot. *Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology* · 20: 86–91 doi:10.1160/VCOT-07-01-0011

Clayton, H.M, y S.J. Hobbs. (2019). A review of biomechanical gait classification with reference to collected trot, passage and piaffe in dressage horses. *Animals* [online]. 9(10), 1–19. ISSN 20762615. Disponible: doi:10.3390/ani9100763

Clayton, H.M. (1995). Comparison of the stride kinematics of the collected, medium, and extended walks in horses. *American Journal of Veterinary Research*. 56, 849–852.

Clayton, H.M. (2004). *The dynamic horse. A Biomechanical Guide to Equine Movement and Performance*. Sport Horse Publications. p. 195. ISBN: 097476700X

Clayton, H.M. (2016). HORSE SPECIES SYMPOSIUM: Biomechanics of the exercising horse. *J. Anim. Sci.* 2016.94 doi:10.2527/jas2015-9990

Clayton, H.M., Sigafos, R., Curle, R.D. (1991). Effect of three shoe types on the duration of breakover in sound trotting horses. *Journal of Equine Veterinary Science* Vol 11(2) 129-132 [https://doi.org/10.1016/S0737-0806\(07\)80147-X](https://doi.org/10.1016/S0737-0806(07)80147-X)

Clegg, B. (1976) a. An Impact testing device for in situ base course evaluation, PhD thesis, University of Western Australia.

Clegg, B. (1976) b. An impact testing device for in-situ base course evaluation. In: *Proceedings of the eighth Australian Road*, Perth, Australia, Melbourne, VIC, Australia: Australian Road Research Board., 8 (Research Board conference), 1–6.

Compo Expert. (2020) Controlled Release Fertilizers: Basacote Plus 6M 16-8-12(+2+TE), Compo Expert: Münster, Germany, 2017, Volume 12, pp. 6–12. Disponible: <https://www.compo-expert.com/products/basacote-plus-6m-16-8-122te>.

Compo Expert. (2020) Slow-Release Fertilizers. Floranid ® Twin. Compo Expert: Münster, Germany, 2017, Volume 15, pp. 1–7. Disponible: <https://www.compo-expert.com/pt-PT/produtos/floranid-twin-permanent-16-7-152>.

Crevier-Denoix, N., Robin, D., Pourcelot, P., Falala, S., Holden, L., Estoup, P., Desquilbet, L., Denoix, J.-M. y Chateau, H. (2010) Ground reaction force and kinematic analysis of limb loading on two different beach sand tracks in harness trotters. *Equine Veterinary Journal Supplement*, 38: 544-551.

Dallap Schaer, B. L., Ryan, C.T., Boston, R.C., y D.M. Numaker. (2006) The horse-racetrack interface: a preliminary study on the effect of shoeing on impact trauma using a novel wireless data acquisition system. *Equine Vet J* 38:664–70.

Darbandi, H., Serra Bragança F., van der Zwaag, B.J., Voskamp, J., Gmel, A. I., Haraldsdóttir, E.H., and Paul Havinga . (2021). Using Different Combinations of Body-

Mounted IMU Sensors to Estimate Speed of Horses—A Machine Learning Approach. *Sensors* 21, 798. <https://doi.org/10.3390/s21030798>

Das, B. M. (2008) *Advanced Soil Mechanics*, 3rd ed. Pages 567. Taylor and Francis, New York.

Dash, S. K. (2012). Effect of Geocell Type on Load-Carrying Mechanisms of Geocell-Reinforced Sand Foundations. *International Journal of Geomechanics* [online]., 12(5), 537–548. ISSN 1532-3641. doi:10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000162

de Mira, M.C., Fernandes, O., Pucetti, M. y C.B. Gómez Álvarez. (2022) Agreement and interpretation of subjective gait scores compared to gait asymmetry in endurance horses. 11th International Conference on Equine Exercise Physiology. Upsala, Sweden.

Dest, W.M., Guillard, K., Ebdon, S. (2005). The effects of reinforcement inclusions on wear tolerance, playing quality and physical properties in a silt loam and sand root zone matrix. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 2005, 10, 1049–1059.

Dexter, A.R., Tanner, D.W. (1974) Time dependence of compressibility for remoulded and undisturbed soils. *European Journal of Soil Science* 1974,25(2):153–64.

Dirección Nacional de Vialidad. Norma de ensayos. (1993). VN-E5-93 Compactación de suelos [online]. 1993, (March), 1–14. <https://www.monografias.com/trabajos107/compactacion-suelos-mecanica-suelos/compactacion-suelos-mecanica-suelos.shtml#bibliograa>

Dixon, S., Fleming, P., James, I., y Carré, M. (2015). The science and engineering of sport surfaces. En *The Science and Engineering of Sport Surfaces*. <https://doi.org/10.4324/9780203133385>

Douglas, J., Owers, R. y M. H. Campbell. (2022) Social License to Operate: What can equestrian sports learn from other industries? Review. *Animals*: 12,1987. <https://doi.org/10.3390/ani12151987>

Dufour, M.J.D., Mumford, C. (2008). GoingStick® technology and electromagnetic induction scanning for naturally-turfed sports surfaces. *Sports Technol.* 1, 125–131. <https://doi.org/10.1002/jst.27>.

Duncan, E., Graham, R., McManus, P. (2018). ‘No one has even seen... smelt... or sensed a social licence’: Animal geographies and social licence to operate, *Geoforum*, Volume 96, 2018, Pages 318-327, <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.08.020>

Dyson, S., y D. Pollard. Determination of Equine Behaviour in Subjectively Non-Lame Ridden Sports Horses and Comparison with Lamé Sports Horses Evaluated at Competitions. *Animals* 2024, 14, 1831. <https://doi.org/10.3390/ani14121831>

Egenvall, A., Tranquille, C., Lönnell, A., Bitschnau, C., Oomen, A., Hernlund, E., Montavon, S., Franko, M., Murray, R., Weishaupt, M., Van Weeren, R. y L. Roepstorff. (2013). Days-lost to training and competition in relation to workload in 263 elite show-jumping horses in four European countries. *Preventive Veterinary Medicine* [online]. 2013, 112(3–4), 387–400. ISSN 01675877. doi:10.1016/j.prevetmed.2013.09.013

Eliashar, E., McGuigan, M. P., Rogers, K. A., Wilson, A. M. (2002). A comparison of three horseshoeing styles on the kinetics of breakover in sound horses. *Equine Veterinary Journal*. 34-184-190. First published: 05 January 2010 <https://doi.org/10.2746/042516402776767303>

Emmons, R. y F. Rossi. (2015). *Turfgrass Science and Management*. 5th Edition. Cengage Learning.

FEI. *Equestrian Surfaces-A Guide*. (2014). Swedish Equestrian Federation. Ridsportens Hus 734 94 Strömsholm www.ridsport.se

FIFA. (2009) *Quality Concept for Football turf. Handbook of Test Methods*.

Fleming, P., Young, C., y Dixon, N. (2004). Performance measurements on synthetic turf hockey pitches. *Engineering of Sport* 5, Volume 2. <https://doi.org/10.1007/BF02915925>

Flemming P. (2011). Artificial turf systems for sport surfaces: Current knowledge and research needs. *Journal of Sports Engineering and Technology*, 225, 43–64. <https://doi.org/10.1177/1754337111401688>

Georgopoulos, S.P. (2017). An investigation of equine injuries in Thoroughbred flat racing in North America. PhD thesis, University of Glasgow.

Georgopoulos, S.P. and T.D.H. Parkin. (2017). Risk factors for equine fractures in Thoroughbred flat racing in North America. *Preventive Veterinary Medicine*. [online]. 2017, 139((Pt.B)), 99–104. ISSN 1943569X. doi:10.2460/javma.249.8.931

Georgopoulos, S.P. y T. D. H. Parkin. (2016) Risk factors associated with fatal injuries in thoroughbred racehorses competing in flat racing in the United States and Canada. *Journal of the American Veterinary Medical Association* [online]. 2016, 249(8), 931–939. ISSN 1943569X. at: doi:10.2460/javma.249.8.931

Godfrey, N. (2017) Everything you ever wanted to know about the smelly stuff. *Horse Racing News* [online]. (Racing Post), 1–8. <https://www.racingpost.com/news/everything-you-ever-wanted-to-know-about-the-goingstick/260234>

Goncu, F. (2012) *Mechanics of Granular Materials: Constitutive Behavior and Pattern Transformation*. ISBN 9789461913418.

Goodall, S.A., Guillard, K., Dest, W.M. y K.R. Demars. (2005). Ball response and traction of skinned infill fields amended with calcined clay at varying soil moisture contents. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 10, 1085–1093.

Guertal, E.A., Han, D.Y. (2009) Footing assessment of equine event courses. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 11, 365–374.

Heleski, C., Stowe, C.J., Fiedler, J., Peterson, M.L., Brady, C., Wickens, C., MacLeod, J.N. (2020) Thoroughbred Racehorse Welfare through the Lens of ‘Social

License to Operate—With an Emphasis on a U.S. Perspective. *Sustainability* 12, 1706. <https://doi.org/10.3390/su12051706>.

Heleski, C.R. (2023) "Social License to Operate—Why Public Perception Matters for Horse Sport—Some Personal Reflections," *Journal of Equine Veterinary Science*, Volume 124, 2023, 104266, <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2023.104266>.

Herlund E. (2016) *Sport Surfaces in Show Jumping*. Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae* 2016:54. ISBN 9789157686107

Hernandez, J., Hawkins, D.L. y Scollay, M.C. (2001). Race-start characteristics and risk of catastrophic musculoskeletal injury in Thoroughbred racehorses. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 218(1), pp.83–6. <https://doi.org/10.2460/javma.2001.218.83>.

Hernlund, E., Egenvall, A., Hobbs, S. J., Peterson, M. L., Northrop, A. J., Bergh, A., Martin, J. H., y Roepstorff, L. (2017). Comparing subjective and objective evaluation of show jumping competition and warm-up arena surfaces. *The Veterinary Journal*, 227, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2017.09.001>

Hewett, T., Ford, K., Hoogenboom, B., y G. Myer. (2010) Understanding and preventing ACL injuries. Current biomechanical and epidemiologic considerations. *Update N. Am. J. Sports Phys Ther.* 2010. Dec. 5(4):234-251

Hitchens, P., Morrice-West, A., Stevenson, M., Whitton, R. (2019) Meta-analysis of risk factors for racehorse catastrophic musculoskeletal injury in flat racing. *Veter J.* 245, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2018.11.014>.

Hobbs, S.J., Northrop, A.J., Mahaffey, C., Martin, J.H., Clayton, H.M., Murray, R., Thomason, J., Peterson, J., Tranquile, C., Walker, V. (2014) *Equestrian Surfaces—A Guide*. https://inside.fei.org/system/files/Equestrian_Surfaces-A_Guide.pdf

Holt, D., Northrop, A., Owen, A., Martin, J., Hobbs, S. (2014) Use of Surface Testing Devices to Identify Potential Risk Factors for Synthetic Equestrian Surfaces. *Procedia Eng.*, 72, 949–954. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.160>.

Horse y Hound (2005). Athen's injuries prompt footing specifications. <http://www.horseandhound.co.uk/news/athens-injuries-prompt-footing-specifications-61624#y05oWyTCK4SxjaD8.03> [2016-03-21]

Horseracing Integrity and Safety Authority. (2022). Federal Register: Racetrack Safety Program. *Federal Register*, 87(3), 457 (Section 2276: Horseshoes).

International Organization for Standardization. ISO 17892-1:2014. Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 1: Determination of water content.

Johnston, C. y Back, W. (2006) Hoof ground interaction: when biomechanical stimuli challenge the tissues of the distal limb. *Equine vet. J.* 38, 634-641.

Juran, I., Guermazi, A., Chen, C.L. y H.H. Idder, (1988) Modelling and simulation of load transfer in reinforced soils: Part 1. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 12(2), 141–155.

Kai, M., Aoki, O., Hiraga, A. y M. Tokuriki. (2000) Use of an instrument sandwiched between the hoof and shoe to measure vertical ground reaction forces and three-dimensional acceleration at the walk, trot, and canter in horses. *Am J Vet Res* 61:979–85.

Kallerud, A.; Fjordbakk, C.; Hendrickson, E.; Persson-Sjodin, E.; Hammarberg, E.; Rhodin, M.; Herlund, E. Objectively measured movement asymmetry in yearling Standardbred trotters. *Equine Vet. J.* 2021, 53, 590–599.

Khumsap,S., Clayton, H., Lanovaz, J. (2001). Effect of walking velocity on hindlimb kinetics during stance in normal horses. *Equine Veterinary Journal* 33(33):21-6
DOI: 10.1111/j.2042-3306.2001.tb05352.x

Laureda, D.A, Botta, G.F., Tolón Becerra, A. y G. Rosatto. (2016) Compactación del suelo inducida por la maquinaria en campos de polo de Argentina. Tomo 48. N°1. Año 2016. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. P. 79

Lewis, K., Northrop, A.J., Crook, G.M., Mather, J., Martin, J.H., Holt, D., Clayton, H.M., Roepstorff, L., Peterson, M.L., Hobbs, S.J. (2015) Comparison of equipment used to measure shear properties in equine arena surfaces. *Biosyst. Eng.* 2015, 137, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.006>.

Li, D., Minner, D.D., Christians, N.E. (2009) Evaluation of factors contributing to surface stability of sand-based turf. *Agron. J.* 101, 1160–1167. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0031>.

Liu, K.F., Yang, X.R., Xie, X.Y., Wu, C.F., Liu, Y.H. (2011) Laboratory Triaxial Test Study on Soil Reinforced with Roots of Manilagrass. *Adv. Mater. Res.* 250–253, 1366–1370. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.1366>.

Lulli, F., de Bertoldi, C., Armeni, R., Guglielminetti, L., Volterrani, M. (2014) Warm-season Turfgrass Species Generate Sports Surfaces with Different Playability. *Horttechnology* 24, 749–756. <https://doi.org/10.21273/horttech.24.6.749>.

Maeda, Y., Tomioka, M., Hanada, M., Oikawa, M.-A. Influence of Track Surface Condition on Racing Times of Thoroughbred Racehorses in Flat Races. *J. Equine Veter-Sci.* 2012, 32, 689–695. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2012.02.012>.

Mahaffey, C. A., Peterson, M. y L. Roepstorff. (2013). The effects of varying cushion depth on dynamic loading in shallow sand thoroughbred horse dirt racetrack. *Biosystems Engineering* 114. pp 178-186. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.12.004>

Mahaffey, C. A., Peterson, M., y McIlwraith, C. W. (2012). Archetypes in Thoroughbred dirt racetracks regarding track design, clay mineralogy, and climate. *Sports Engineering*, 15(1), 21–27. <https://doi.org/10.1007/s12283-012-0082-y>

Mahaffey, C.A., M.L., Peterson J.J., Thomason and C.W., McIlwraith. (2016) Dynamic testing of horseshoe designs at impact on synthetic and dirt Thoroughbred racetrack materials. *Equine Veterinary Journal* [online]. 2016, 48(1). ISSN 20423306. doi:10.1111/evj.12360

Maher, M.H., Woods, R.D. (1990) Dynamic Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers. *J. Geotech. Eng.* 1990, 116, 1116–1131. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1990\)116:7\(1116\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1990)116:7(1116)).

McGreevy, P., McManus, P. (2017) Why Horse-Racing in Australia Needs a Social Licence to Operate. *Conversation*. 2017. <https://theconversation.com/why-horse-racing-in-australia-needs-a-social-licence-to-operate-79492>

McGuigan, M.P., Wilson, A.M. (2003) The effect of gait and digital flexor muscle activation on limb compliance in the forelimb of the horse *Equus caballus*. *J Exp Biol* 2003,206:1325–36.

Measurements Used for Surface Characterization. *Animals* 13, 811. <https://doi.org/10.3390/ani13050811>

Merkens, H.W, Schamhardt, H.C, van Osche, G.J.V.M., y A.J. van der Bogert. (1993) Ground reaction force patterns of Dutch Warmblood horses at normal trot. *Equine Vet J* 1993:25:134–7.

Merkens, H.W., Schamhardt, H.C., van Osche, G.J.V.M., van der Bogert, A.J., (1993) Ground reaction force analysis of Dutch Warmblood Horses at canter and jumping. *Equine Exerc.Physiol.* 1993, 3, 128–135.

Minner, D.D., Hudson, J.S. (2005) Evaluating a reinforced natural grass/synthetic turf system. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 2005, 10, 398–408.

Minner, D.D., Valverde, F.J. (2005) The effect of traffic intensity and periodicity on *Poa pratensis* L. performance. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 2005, 10, 387–392.

Mohajerani, A., Kurmus, H., Tran, L., Maha Arachchillegedar, C., Mirzababaei, M., y Arulrajah, A. (2019). Clegg impact hammer: An equipment for evaluation of the strength characteristics of pavement materials, turf, and natural and artificial playing surfaces: A review. *Road Materials and Pavement Design*. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1502092>

Mohammadi, S., Nikoudel, M., Rahimi, H., Khamchiyan, M. (2008) Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils. *Eng. Geol.* 101, 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.05.006>.

Mumford, C. (2006) The Optimization of Going Management on UK Racecourses Using Controlled Water Applications. Ph.D. Thesis, Cranfield University at Silsoe, National Soil Resources Institute, Luton, UK, p. 297. <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/1742>

Munoz-Nates, F., Pourcelot, P., Van Hamme, A., Martinot, J., Pauchard, M., Nouvel, M., Ravary-Plumioen, B., Chateau, H., y Crevier-Denoix, N. (2017). Comparison between Clegg Impact Soil Tester and hoof impact shock measurements on 13 surfaces used for training trotters or sport horses. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 20, 145–146. <https://doi.org/10.1080/10255842.2017.1382903>

Murphy, J.W., Field, T.R.O., Thomas, V.J. (1996) Racetrack Traction Assessment by Penetrometer Part II. Application of the Model. *J. Turfgrass Manag.* 1996, 1, 51–62. https://doi.org/10.1300/j099v01n04_05.

Murray, R.C., J.M., Walters H., Snart S.J., Dyson and T.D.H., Parkin. (2010) Identification of risk factors for lameness in dressage horses. *Veterinary Journal* [online]. 184(1), 27–36. ISSN 10900233. doi:10.1016/j.tvjl.2009.03.020

Naser A. Al-Shayea, (2001) The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. *Eng Geol* 62:319–342. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00032-1).

Neylan, J y A. Stubbs. (1997) A Review of Devices Currently Available for Assessing Racetrack Conditions. Project Number PTP-5A. Rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC. <http://www.rirdc.gov.au/fullreports/hor.html>

Nigg BM, Yeadon MR (1987) Biomechanical aspects of playing surfaces. *J. Sports Sci.* 5:117–145. <https://doi.org/10.1080/02640418708729771>

Northrop, A.J., Martin, J.H., Peterson, M., Roepstorff, L., Hernlund, E., Hobbs, S.J. (2022). The Challenges of Equestrian Arena Surfaces: The US Precedent Use of a Raised Platform at the 2012 Olympic Games. *Journal of Equine Veterinary Science*, 109. <https://doi.org/10.106/j.jevs.2021.1028>

Northrop, A.J., S.J., Hobbs D., Holt E., Clayton-Smith and J.H., Martin. (2016) Spatial Variation of the Physical and Biomechanical Properties Within an Equestrian Arena Surface. In: *Procedia Engineering* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, p. 866–871. ISSN 18777058. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.288

Otago, L., Swan, P., Chivers, I., Finch, C., Payne, W. y J. Orchard. (2007). Ground conditions and injury risk— Implications for sports grounds assessment practices in Victoria. *School of Human Movement and Sport Sciences University of Ballarat*. Pp.1-110.

Otto Sport Nordic (Director). (2017) Otto Sport at Olympic Games 2016 in Rio de Janeiro, Brazil. <https://fb.watch/nNjIxU1Qlq/>

Parkes, R.S.V., y T.H. Witte (2015). The foot-surface interaction and its impact on musculoskeletal adaptation and injury risk in the horse. *Equine Veterinary Journal* Volume 47, Issue 5, September. Pages 519-525 <https://doi.org/10.1111/evj.12420>

Parkin, T., Clegg, P.D., French, N., Proudman, C.J., Riggs, C.M., Singer, E.R., Webbon, P.M., Morgan, K.L. (2010) Race- and course-level risk factors for fatal distal limb fracture in racing Thoroughbreds. *Equine Veter- J.* 36, 521–526. <https://doi.org/10.2746/0425164044877332>.

Parkin, T.D.H., Clegg P.D., French N.P., Proudman C.J., Riggs, C.M. E.R., Singer P.M., Webbon and K.L., Morgan. (2004) Race- and course-level risk factors for fatal distal limb fracture in racing Thoroughbreds. *Equine Veterinary Journal* [online]. 36(6), 521–526. ISSN 0425-1644. doi:10.2746/0425164044877332

Peterson, M. L., McIlwraith, C.W., y Reiser, R. F. (2008). Development of a system for the in-situ characterisation of thoroughbred horse racing track surfaces. *Biosystems Engineering*, 101(2), 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.07.007>

Peterson, M. L., Roepstorff, L., Thomason, J. J., Mahaffey, C. y C.W. McIlwraith. (2012). *Racing Surfaces. White Paper.* Accessed via <http://www.racingsurfaces.org/bulletins.html>

Peterson, M. L., y McIlwraith, C. W. (2008). Effect of track maintenance on mechanical properties of a dirt racetrack: A preliminary study. *Equine Veterinary Journal*, 40(6), 602–605. <https://doi.org/10.2746/042516408X330347>

Peterson, M., Reiser, R.F.II., McIlwraith, W. (2005) Dynamic response of racetrack surfaces. In *Proceedings of the 2005 SEM Annual Conference and Exposition*, Society for Experimental Mechanics, Portland, OR, USA, 7–9 June, p. 258.

Peterson, M., Sanderson W., Kussainov, N., Hobbs, S.J., Miles, P., Scollay, M.C. y H.M. Clayton. (2021). Effects of racing surface and turn radius on fatal limb fractures

in thoroughbred racehorses. *Sustainability (Switzerland)* [online]., 13(2), 1–16. ISSN 20711050. doi:10.3390/su13020539

Peterson, M.L., Reiser, R.F. II, Kuo, P.H., Radford, D.W. y C.W. McIlwraith (2010) Effect of temperature on race times on a synthetic surface. *Equine veterinary journal* [online]. v. 42(4), 351-357–2010 v.42 no.4. doi:10.1111/j.2042-3306.2010.00072.x

Peterson, M.L., Roepstorff, L., Thomason, J.J., Mahaffey, C.A. y C.W. McIlwraith (2012). *Racing Surfaces: Current progress and future challenges to optimize consistency and performance of track surfaces for fewer horse injuries.* http://www.racingsurfaces.org/whitepapers/white_paper_1_20120508.pdf

Racing Surfaces Testing Laboratory. (2017) Standard Test method for Track-in-a-box testing of an equestrian arena surfaces/sub-surface.

Ratzlaff, M. H., Hyde, M. L., Hutton, D. V., Rathgeber, R. A., y Balch, O. K. (1997). Interrelationships between moisture content of the track, dynamic properties of the track and the locomotor forces exerted by galloping horses. *Journal of Equine Veterinary Science*, 17(1), 35–42. [https://doi.org/10.1016/S0737-0806\(97\)80456-X](https://doi.org/10.1016/S0737-0806(97)80456-X)

Ratzlaff, M. H., Wilson, P. D., Hutton, D. V., y Slinker, B. K. (2005). Relationships between hoof-acceleration patterns of galloping horses and dynamic properties of the track. *American Journal of Veterinary Research*, 66(4), 589–595. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2005.66.589>

Redrup G. (2021). The Tokyo Olympic equestrian arena surface: Learn more about the fascinating science of the 2020 Games footing [Entrevista]. <https://www.horseandhound.co.uk/features/olympic-equestrian-arena-surface-756595>

Reinoso, P.D., Carponi ,M.S., Laurencena, M.I., Butus, M., Martínez, V.A., y Tifni O. (2016) Caracterización y evaluación de especies nativas del género *Paspalum*

para céspedes en el departamento Paraná. Ciencia, Docencia y Tecnología, Suplemento. Vol.6 N°6.35-37.

Robin, D., Château, H., Pacquet, L., Falala, S., Valette, J.P., Pourcelot, P., Ravary, B., Denoix, J.M. y N. Crevier-Denoix. (2009) Use of a 3D dynamometric horseshoe to assess the effects of an all-weather waxed track and a crushed sand track at high speed trot: Preliminary study. *Equine vet. J.* 41, 253-256.

Robinson, R. A., Kobluck, C., Clanton, C., Martin, F., Gordon, B., Ames, T., Trent, M., Ruth G (1988). Epidemiological studies of musculoskeletal racing and training injuries in Thoroughbred racehorses. *Acta Veterinaria Scandinavica (Suppl. 84)*, 340–341.

Roepstorff, L. (1998) A force measuring horseshoe applied in kinetic and kinematic analysis of the trotting horse. *Vet Q* 20:40–5.

Rogers, C.W., Bolwell, C.F., Gee, E.K., Peterson, M.L., McIlwraith, C.W. (2014) Profile and Surface Conditions of New Zealand Thoroughbred Racetracks. *J. Equine Veter-Sci.* 34, 1105–1109. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2014.06.017>.

Rosanowski, S.M., Chang, Y.M., Stirk, A.J., Verheyen, K.L.P. (2018) Risk factors for race-day fatality in flat racing Thoroughbreds in Great Britain (2000 to 2013). *PLoS ONE* 13, e0194299. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194299>.

Rose-Harvey, K., McInnes, K.J., Thomas, J.C. (2012) Water Flow Through Sand-based Root Zones Atop Geotextiles. *Hortscience* 47 (10) 1543–1547. <https://doi.org/10.21273/hortsci.47.10.1543>.

Schaer, B.L.D., Ryan, C.T., Boston, R.C., Nunamaker, D.M. (2006). The horse-racetrack interface: a preliminary study on the effect of shoeing on impact trauma using a novel wireless data acquisition system. *Equine Vet J* 38:664–70.

Schamhardt, H.C., Merkens, H.W., Vogel, V. y Willekens, C. (1993). External loads on the limbs of jumping horses at take-off and landing. *American Journal of Veterinary Research*, 54(5), 675–680.

Schmitt, P.R., Sanderson, W., Rogers, J. III, Barzee, T.J., Peterson, M. (2024) A Comparison of Devices for Race Day Characterization of North American Turfgrass Thoroughbred Racing Surfaces. *Animals* 14,38. <https://doi.org/10.3390/ani14010038>

Schumacher A. y H. Gehlen. (2024). Health of Polo Horses. Review. *Animals* 2024, 14, 1735. <https://doi.org/10.3390/ani14121735>

Serensits, T.J., McNitt, A.S., Petrunak, D.M. (2011). Improving surface stability on natural turfgrass athletic fields. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part P: J. Sports Eng. Technol* 225, 85–92. <https://doi.org/10.1177/1754337110396013>.

Serra Bragança, R.M, Broomé, S., Rhodin, M., Björnsdóttir, S., Gunnarsson, V., Voskamp, J.P., Persson-Sjodin, E., Back, W., Lindgren, G., Novoa-Bravo, M., Gmel, A.I., Roepstorf, C., van der Zwaag, B.J., VanWeeren, P.R. and E. Hernlund Improving gait classification in horses by using inertial measurement unit (IMU) generated data and machine learning (2023). *Sci. Rep.* 10, 17785. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73215-9>

Setterbo, J.J., Chau, A., Fyhrie, P.B., Hubbard, M., Upadhyaya, S.K. y J.E. Symons (2012) Validation of a Laboratory Method for Evaluating Dynamic Properties of Reconstructed Equine Racetrack Surfaces. *PLoS One* 7: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.00505>

Setterbo, J.J., Garcia, T.C., Campbell, I.P., Reese, J.L., Morgan, J.M., Kim, S.Y., Hubbard, M. y Stover, S.M. (2009) Hoof accelerations and ground reaction forces of Thoroughbred racehorses measured on dirt, synthetic, and turf track surfaces. *Am J Vet Res* 70: 1220–1229.

Setterbo, J.J., Yamaguchi, A., Hubbard, M., Upadhyaya, S. K, y Stover, S.M. (2011). Effects of equine racetrack surface type, depth, boundary area, and harrowing on dynamic surface properties measured using a track-testing device in a laboratory setting. *Sports Engineering*, 14(2–4), 119–137. <https://doi.org/10.1007/s12283-011-0073-4>

Singleton, W.H., Clayton, H.M., Lanovaz, J.L., Prades, M. (2003). Effects of shoeing on forelimb swing phase kinetics of trotting horses, *Vet Comp Orthop Traumatol* 16:16, 2003.

Sion, B.D., Shoop, S.A., McDonald, E.V. (2022) Evaluation of in-situ relationships between variable soil moisture and soil strength using a plot-scale experimental design. *J. Terramechanics*, 103, 33–51. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.07.002>.

Souza, B., Van der Heijden, R, y Benoit, J. (2023). Strength and Deformation Behavior of Equestrian Riding Surfaces Improved with Recycled Geosynthetics. *Geotechnical Testing Journal*. <https://doi.org/doi:10.1520/GTJ20220245>

Sports Arenas S.A. (2020) Grass and Horses by Sports Arenas. Grass and Horses [online]. <https://grassandhorses.com/>

Stubbs, A.K., Neylan, J. (2002) Racetrack Management. A Manual for Racecourse Managers: A Report for the Rural Industries Research and Development Corporation, Rural Industries Research and Development Corporation: Canberra, Australia, pp. 1–135. <https://agrifutures.com.au/wp-content/uploads/publications/02-002.pdf> (accessed on 9 January 2023).

Thomas, V., Murphy, J.W., Field, T.R.O. (1996) Racetrack Assessment by Penetrometer. Part I: The Model. *J. Turfgrass Manag.* 1, 37–49.

Thomason, J.J., y Peterson, M. L. (2008). Biomechanical and Mechanical Investigations of the Hoof-Track Interface in Racing Horses. *Veterinary Clinics of North America - Equine Practice*, 24(1), 53–77. <https://doi.org/10.1016/j.cveq.2007.11.007>

Torg, J.S., Quedenfeld, T.C. and S. Landau. (1974). The shoe-surface interface and its relationship to football knee injuries. *J. Sports Med.* 2(5):261–269.

Tranquille, C.A., Walker, V.A., Hernlund, E., Egenvall, A., Roepstorff, L., Peterson, M.L. y R.C. Murray. (2015). Effect of superficial harrowing on surface properties of sand with rubber and waxed-sand with fibre riding arena surfaces: A preliminary study. *The Veterinary Journal.* doi: 10.1016/j.tvjl.2014.10.027

Twomey, D.M., Ullah, S., Petrass, L.A. (2013) One, two, three or four: Does the number of Clegg hammer drops alter ground hardness readings on natural grass? *Proc. Inst. Mech. Eng. Part P J. Sports Eng. Technol.* 228, 33–39. <https://doi.org/10.1177/1754337113501300>.

USDA Natural Resources Conservation Service. (2008). Soil Quality Indicators Bulk Density. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053256.pdf.

Van der Heijden, R. (2018). Engineered Equestrian Riding Surfaces. Master's Theses and Capstone. University of New Hampshire, Durham., 2002, 1–2.

Van Weeren, P. R. (2010). On surfaces and soreness, guest editorial. *The Veterinary Journal.* 186. 129-130.

Vanags, C., McBratney, A., Budiman, M., (2004) The Dynamic Penetrometer for Assessment of Soil Mechanical Resistance. In Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference, Sidney, Australia, 5–9 December. pp. 1–9. https://www.researchgate.net/profile/Budiman_Minasny/publication/237557382_The_dynamic_penetrometer_for_assessment_of_soil_mechanical_resistance/links/0046351d9fe9c8c895000000.df (accessed on 9 January 2023).

Vence, L. (2012) Métodos de Determinación de Parámetros que Estiman la Disponibilidad de Agua-Aire en Sustratos para Plantas y su Relación con la Respuesta Vegetal. Tesis de Magister, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina,

2012, p. 223.
<http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2012venceliliabeatriz.pdf> (accessed on 9 January 2023).

Wieder, W.L., Shoop, S.A.(2018) State of the knowledge of vegetation impact on soil strength and trafficability. *J. Terramech.* 78, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.03.006>.

Williams, J.M. (2023) Equestrianism’s social license to operate: assumptions, reality and the future. *UK-VET Equine*. September 2. Vol.7 Issue 5. ISSN (ONLINE): 2516-0591.<https://doi.org/10.12968/ukve.2023.7.5.196>

Wong J.Y. (2001) *Theory of ground vehicles*. New York: John Wiley y Sons. p. 13

Zhang, X., Zhang, D., Wang, Y., Ji S., Zhao H (2023) Dynamic characteristics of sphere impact into wet granular materials considering suction. *Granular Matter* 25:1–15.
<https://doi.org/10.1007/s10035-022-01304-9>

Apéndice A:

Cuadro A1: Ficha Técnica de Geo Mesh (GN 900).

Datos técnicos	Norma	GN 900
Materiales Constitutivos		HDPE
Densidad	ASTM D 792	0,94 g/cm ³
Espesor	IRAM 78004-1	5 mm
Masa mínima por unidad de área	IRAM 78002	725 g/cm ²
Resistencia a la tracción (Longitudinal)	IRAM 78012	7 kN/m
Transmisividad	ASTM D 4716	2,5 x 10 ⁻³
Resistencia a la Compresión	ASTM D 1621	350 kPa
Ancho Mínimo	-	2 m
Largo Mínimo	-	50 m

Cuadro A2: Ficha técnica de Geotextil tejido 150 de Poliéster.

Ficha Técnica		
Materiales Constitutivos	100 % Polyester	
Propiedades Mecánicas		
Resistencia a la tracción Método de faja ancha	IRAM 78012 / ASTM D-4595	8 kN/m
Deformación	IRAM 78012 / ASTM D-4595	70%
Índice de Resistencia al Punzonamiento CBR	IRAM 78011 / ASTM D-6241	1,3 kN/m
Fuerza de rasgado trapezoidal	IRAM 78017 / ASTM D-4533	250 N
Propiedades Hidráulicas		
Abertura de Filtración	IRAM 78006 / ASTM D-4751	0,21 mm
Permisividad	IRAM 78007 / ASTM D-4491	2,4 s ⁻¹
Flujo de agua	IRAM 78007 / ASTM D-4491	115 l/s/m ²

Cuadro A3: Descripción de la arena* basado en el porcentaje de arena, limo y arcilla en cada muestra.

DESCRIPCION DE LA MUESTRA	Arena Silícica
Arena	92,3%
Limo	2,6%
Arcilla	5,1%

*basado en la escala Wentworth de tamaño de partícula.

Cuadro A4: Distribución de tamaño de partículas*.

Descripción de la muestra (Tamices)	Arena Silícica
NO. 10	0,2%
NO. 14	0,0%
NO. 18	0,1%
NO. 35	1,0%
NO. 40	0,6%
NO. 60	13,6%
NO. 100	70,7%
NO. 140	5,5%
NO. 200	0,7%
NO. 270	0,4%
BANDEJA (LIMO Y ARCILLA)	7,4%
OTRO:	
HUMEDAD	3,7%
CARBON ORGANICO	0,7%

*Método aprobado por FEI.

Cuadro A5: Clasificación* de arena por comparación de la distribución de grava, arena, limo y arcilla de la muestra.

Descripción de la muestra	Grava		Arena			Limo	Arcilla	Rel Med a Muy Finas dividido por Grava + Arena Gruesa
	Gruesa	Fina	Muy Gruesa	Gruesa	Med a muy Fina			
	5 - 12 mm	2 - 5 mm	1 - 2 Mm	0,5 - 1 mm	0,05 – 0,5 mm	0,002 – 0,05 Mm	0 – 0,002 mm	
Arena Silícica	0,2%		0,1%	1,0%	91,3%	2,3%	5,1%	70,3
	0,2%		1,1 %		91,3%	7,4%		

*basado en la clasificación de textura del suelo del USDA.

Cuadro A6: Análisis XRD que muestra la composición mineral de la arena.

Mineralogía de roca entera (porcentaje en peso)	
Cuarzo	90,6
K-Feldespatos	2,7
Plagioclasa	2,5
Calcita	0,2
Dolomita	0
Total filosilicatos	4
TOTAL	100
Mineralogía del filosilicato (abundancia relativa)*	
R0 M-L I/S (90%S)*	72,5
Illita & Mica	20
Caolinita	5
Clorito	2,5
TOTAL	100
Cuarzo	90,6
K-Feldespatos	2,7
Plagioclasa	2,5
Calcita	0,2
Dolomita	0
R0 M-L I/S (90 % S)*	2,9
Illita & Mica	0,8
Caolinita	0,2
Clorita	0,1
TOTAL	100
*R0 M-L I/S (90 % S) - R0 Illita/Esmectita de capas mixtas ordenadas con 90% de capas de esmectita	
NOTA: Para las dos muestras RDE_19002, había una pequeña cantidad de cera de parafina.	
La parafina no se incluyó en los resultados analíticos anteriores.	

*Whole Pattern Fitting (WPF) y método de refinamiento de Rietveld

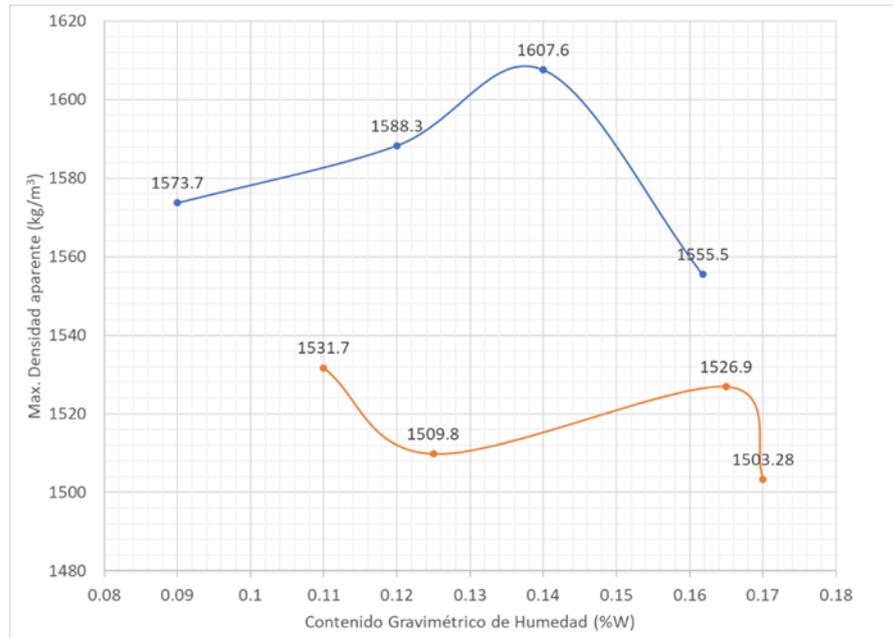


Figura A1: Densidad aparente de arena silícica y adición de arena silícica y geotextil con contenido de humedad gravimétrica (kg/m^3). Línea azul arena silícica, línea marrón arena silícica + geotextil.

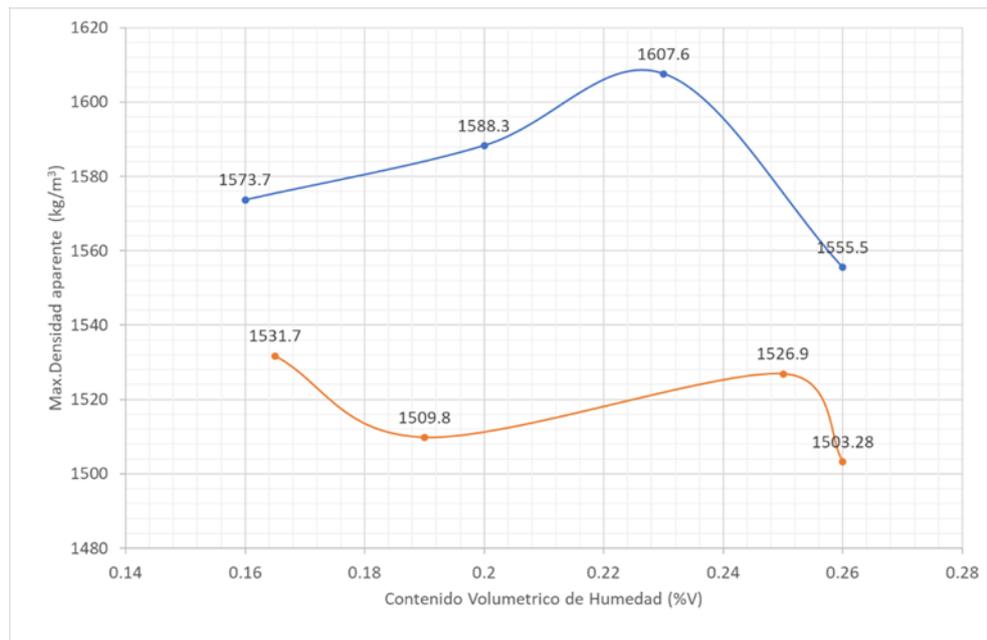


Figura A2: Densidad aparente de arena silícica y adición de arena silícica y geotextil (2 kg/m^2) con contenido volumétrico de humedad (kg/m^3). Línea azul arena silícica, línea marrón arena silícica + geotextil.

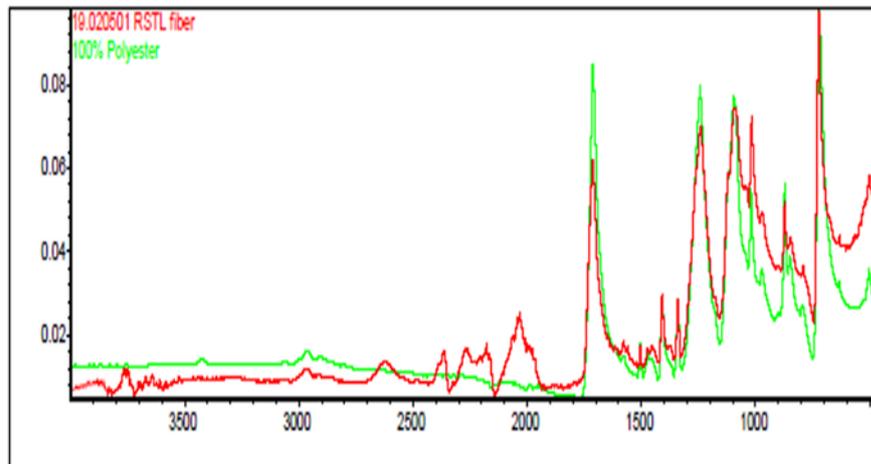


Figura A3: El análisis FTIR muestra que las fibras son 100 % poliéster. Los picos que se encuentran en la longitud onda 2000 son de polvo.

Apéndice B

Calibración del Going Stick

Para obtener datos de penetración en unidades de ingeniería, el Going Stick se colocó en un dispositivo de calibración con 4,5 kN. Una celda de carga (1000 lbf) (Omega Engineering, Omegadyne LC101-1K) alineada con la punta del aparato. Las cargas aplicadas se muestran en el Cuadro B1 con los valores de calibración equivalentes del GSP que se muestran en el Cuadro B2 para un promedio de dos Going Stick utilizados. Los momentos también se aplicaron a la punta de la sonda del Going Stick sujetado como se muestra en el Cuadro B3 para la calibración de tracción para determinar el valor GSS equivalente. Los valores de Going Stick se trazaron y un ajuste de curva polinomial se muestra en la Figura B1. La ecuación resultante para convertir GSP en fuerza de penetración máxima en Newtons (N)

$$F_p (N) = 58,291 \times P$$

Con $R^2 = 0,9956$

El valor de GSS se puede convertir a fuerza cortante máxima en Newton-metros (Nm) donde σ_s :

$$F_s (Nm) = 3,3131 \times S$$

Con $R^2 = 0,995$

En la misma línea, y utilizando cargas teóricas, se trazaron los valores de Going Stick de penetración y corte, y se ajustaron las curvas mediante un ajuste lineal (Figura B1).

Cuadro B1: Resultados de la verificación de la fuerza aplicada al extremo de la sonda del Going Stick usando el equipo de calibración para la fuerza de penetración. (UI: Unidades Imperiales, SI: Sistema Internacional).

Carga Aplicada UI (lbf)	Carga Aplicada SI (N)	Fuerza teórica (N)	Fuerza medida (N)	Porcentaje de Error
4,41	19,62	69,13	<59,291	14,23
11,02	49,02	172,59	98,42	42,97
22,05	98,08	345,63	319,51	7,56
33,07	147,10	518,22	527,69	1,83
44,09	196,12	691,25	711,49	2,93
52,51	233,59	823,12	850,83	3,37
55,12	245,19	863,84	>889,365	2,95
66,14	294,21	1036,88	>889,365	14,23
70,5479	313,81	1105,82	>889,365	19,57

Cuadro B2: Resultados de la variación de la fuerza aplicada al extremo de la sonda del Going Stick utilizando el equipo de calibración, para el modo de ingeniería. (UI: Unidades Imperiales, SI: Sistema Internacional).

Carga Calibración (UI unidades)	4,41	11,02	22,05	33,07	44,09	52,51	55,12	66,14	70,5479	lbf
Carga Calibración (SI units)	19,62	49,02	98,08	147,10	196,12	233,59	245,19	294,21	313,81	N
Carga en la punta (Teórica)	69,1	172,6	345,6	518,2	691,3	823,1	863,8	1036,9	1105,816	N
GS 001	16	39	72	106	135	158	167	199	209	GS EV*
GS 005	14	34	67	102	135	159	169	202	215	GS EV
Promedio	15	36,5	69,5	104	135	158,5	168	200,5	212	GS EV
Penetración en llano	<1	1,66	5,4	8,9	12	14,35	>15	>15	>15	GS Value
Factor de Conversión	4,6	4,7	5,0	5,0	5,1	5,2	5,1	5,2	5,2	to N

* Valor de ingeniería Going Stick.

Cuadro B3: Resultados de la verificación del torque aplicado al extremo de la sonda del Going Stick usando el equipo de calibración para la fuerza de tracción.

Carga Aplicada Load (Lbf)	Carga Aplicada (N)	Torque Teórico (N-m)	Torque medido (N-m)	Porcentaje de Error
0,00	0,00	2,68	4,07	51,90%
0,90	4,02	5,63	7,29	29,49%
3,82	16,97	15,14	18,55	22,56%
6,16	27,42	22,81	24,57	7,74%
8,22	36,59	29,54	30,09	1,89%
11,30	50,25	39,57	39,76	0,48%
14,84	66,01	51,14	48,04	6,06%

Cuadro B4: Resultados de la variación del par aplicado a lo largo de la sonda del Going Stick usando el equipo de calibración. (UI: Unidades Imperiales, SI: Sistema Internacional).

Carga de Calibración (UI)	0,00	0,90	3,82	6,16	8,22	11,30	14,84	lbf
Carga de Calibración (SI)	0,00	4,02	16,97	27,42	36,59	50,25	66,01	N
Torque aplicado (Teorico)	2,68	5,63	15,14	22,81	29,54	39,57	51,14	N-m
GS 001	11	20	44	66	85	121	151	GS EV
GS 005	10	20	46	66	87	121	151	GS EV*
Promedio	10,5	20	45	66	86	121	151	GS EV
Tracción en llano	1,23	2,20	5,60	7,42	9,08	12,00	14,50	GS V**
Factor de Conversión	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	2,8	to N-m

*Valor de Ingeniería de Going Stick **Valor de Going Stick.

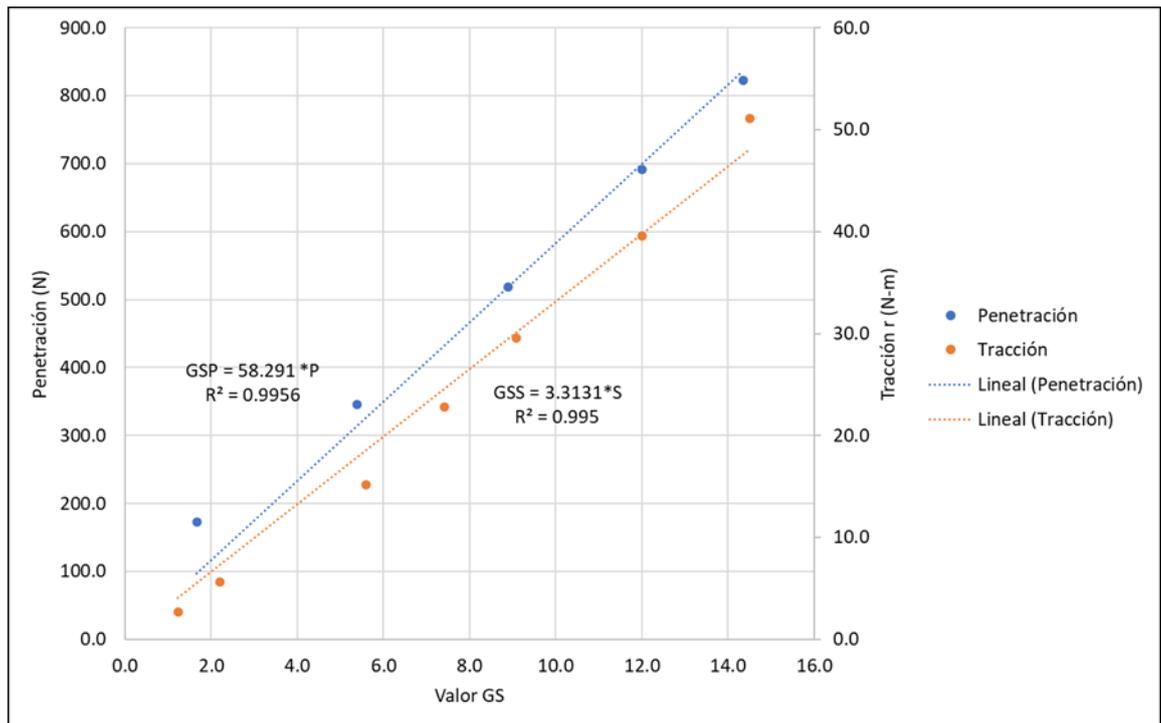


Figura B1. Ajuste de la curva bajo el supuesto de linealidad para determinar el factor de conversión de los valores GS de penetración y tracción.

Apéndice C

Ensayo de disponibilidad agua-aire CEN EN-13041.

Cuadro C1: Cuadro de comparación de medias. PT o 0 hPa: Porosidad Total; CRA o 10 hPa: Capacidad de retención de agua; ADD o 100 hPa: Agua difícilmente disponible; AFD: Agua fácilmente disponible; AR: Agua de reserva; CA: Capacidad de aireación; Dd: Densidad en seco (kg/m³). Diferencia significativa de la prueba T $p < 0,05$. Asterisco significa diferencias significativas entre medias.

	Grupo 1	Grupo 2	Media 1	Media 2	T	p-valor
Dds (Kg/m ³)	D1:G1	D1:G2	1197,47	1083,88	2,75	0,1105
Dds (Kg/m ³)	D1:G1	D2:G1	1197,47	973,81	4,14	0,0536
Dds (Kg/m ³)	D1:G1	D2:G2	1197,47	982,27	4,00	0,0572
Dds (Kg/m ³)	D1:G2	D2:G1	1083,88	973,81	3,00	0,0956
Dds (Kg/m ³)	D1:G2	D2:G2	1083,88	982,27	2,79	0,1080
Dds (Kg/m ³)	D2:G1	D2:G2	973,81	982,27	-0,17	0,8821
PT	D1:G1	D1:G2	0,47	0,52	-2,75	0,1105
PT	D1:G1	D2:G1	0,47	0,57	-4,14	0,0536
PT	D1:G1	D2:G2	0,47	0,56	-4,00	0,0572
PT	D1:G2	D2:G1	0,52	0,57	-3,00	0,0956
PT	D1:G2	D2:G2	0,52	0,56	-2,79	0,1080
PT	D2:G1	D2:G2	0,57	0,56	0,17	0,8821
CRA	D1:G1	D1:G2	0,43	0,43	0,29	0,7998
CRA	D1:G1	D2:G1	0,43	0,49	-1,86	0,2036
CRA	D1:G1	D2:G2	0,43	0,51	-1,90	0,1983
CRA	D1:G2	D2:G1	0,43	0,49	-2,23	0,1558
CRA	D1:G2	D2:G2	0,43	0,51	-2,16	0,1628
CRA	D2:G1	D2:G2	0,49	0,51	-0,49	0,6712
20 hPa	D1:G1	D1:G2	0,40	0,39	0,45	0,6988
20 hPa	D1:G1	D2:G1	0,40	0,45	-2,03	0,1798
20 hPa	D1:G1	D2:G2	0,40	0,48	-2,10	0,1706
20 hPa	D1:G2	D2:G1	0,39	0,45	-2,49	0,1304
20 hPa	D1:G2	D2:G2	0,39	0,48	-2,42	0,1367
20 hPa	D2:G1	D2:G2	0,45	0,48	-0,78	0,5194
30 hPa	D1:G1	D1:G2	0,39	0,37	1,18	0,3583
30 hPa	D1:G1	D2:G1	0,39	0,43	-2,31	0,1475
30 hPa	D1:G1	D2:G2	0,39	0,46	-1,99	0,1847
30 hPa	D1:G2	D2:G1	0,37	0,43	-4,10	0,0547
30 hPa	D1:G2	D2:G2	0,37	0,46	-2,67	0,1164
30 hPa	D2:G1	D2:G2	0,43	0,46	-0,89	0,4678
40 hPa	D1:G1	D1:G2	0,37	0,34	1,64	0,2435
40 hPa	D1:G1	D2:G1	0,37	0,40	-1,67	0,2372
40 hPa	D1:G1	D2:G2	0,37	0,43	-1,99	0,1854
40 hPa	D1:G2	D2:G1	0,34	0,40	-4,68	0,0427 *
40 hPa	D1:G2	D2:G2	0,34	0,43	-3,31	0,0803
40 hPa	D2:G1	D2:G2	0,40	0,43	-1,02	0,4142
50 hPa	D1:G1	D1:G2	0,36	0,33	2,15	0,1641
50 hPa	D1:G1	D2:G1	0,36	0,39	-2,12	0,1677

50 hPa	D1:G1	D2:G2	0,36	0,43	-2,16	0,1637
50 hPa	D1:G2	D2:G1	0,33	0,39	-6,82	0,0208 *
50 hPa	D1:G2	D2:G2	0,33	0,43	-3,41	0,0762
50 hPa	D2:G1	D2:G2	0,39	0,43	-1,18	0,3597
60 hPa	D1:G1	D1:G2	0,35	0,32	3,08	0,0912
60 hPa	D1:G1	D2:G1	0,35	0,38	-3,73	0,0651
60 hPa	D1:G1	D2:G2	0,35	0,42	-2,61	0,1209
60 hPa	D1:G2	D2:G1	0,32	0,38	-11,60	0,0073 *
60 hPa	D1:G2	D2:G2	0,32	0,42	-3,76	0,0641
60 hPa	D2:G1	D2:G2	0,38	0,42	-1,30	0,3228
80 hPa	D1:G1	D1:G2	0,34	0,31	4,09	0,0548
80 hPa	D1:G1	D2:G1	0,34	0,38	-4,50	0,0459
80 hPa	D1:G1	D2:G2	0,34	0,42	-2,75	0,1106
80 hPa	D1:G2	D2:G1	0,31	0,38	-10,50	0,0089 *
80 hPa	D1:G2	D2:G2	0,31	0,42	-3,78	0,0635
80 hPa	D2:G1	D2:G2	0,38	0,42	-1,34	0,3117
ADD	D1:G1	D1:G2	0,33	0,30	3,90	0,0599
ADD	D1:G1	D2:G1	0,33	0,37	-4,88	0,0395 *
ADD	D1:G1	D2:G2	0,33	0,41	-2,83	0,1052
ADD	D1:G2	D2:G1	0,30	0,37	-10,49	0,0090 *
ADD	D1:G2	D2:G2	0,30	0,41	-3,81	0,0625
ADD	D2:G1	D2:G2	0,37	0,41	-1,38	0,3007
AFD	D1:G1	D1:G2	0,07	0,10	-1,19	0,3564
AFD	D1:G1	D2:G1	0,07	0,09	-1,51	0,2703
AFD	D1:G1	D2:G2	0,07	0,08	-0,43	0,7120
AFD	D1:G2	D2:G1	0,10	0,09	0,04	0,9682
AFD	D1:G2	D2:G2	0,10	0,08	1,11	0,3840
AFD	D2:G1	D2:G2	0,09	0,08	1,56	0,2593
AR	D1:G1	D1:G2	0,03	0,03	0,30	0,7904
AR	D1:G1	D2:G1	0,03	0,02	1,63	0,2452
AR	D1:G1	D2:G2	0,03	0,01	2,70	0,1141
AR	D1:G2	D2:G1	0,03	0,02	1,06	0,4008
AR	D1:G2	D2:G2	0,03	0,01	2,01	0,1816
AR	D2:G1	D2:G2	0,02	0,01	3,49	0,0732
CA	D1:G1	D1:G2	0,03	0,09	-2,38	0,1407
CA	D1:G1	D2:G1	0,03	0,08	-9,61	0,0107 *
CA	D1:G1	D2:G2	0,03	0,06	-0,53	0,6474
CA	D1:G2	D2:G1	0,09	0,08	0,54	0,6438
CA	D1:G2	D2:G2	0,09	0,06	0,66	0,5758
CA	D2:G1	D2:G2	0,08	0,06	0,46	0,6904

(*) Diferencias significativas $p < 0,05$.

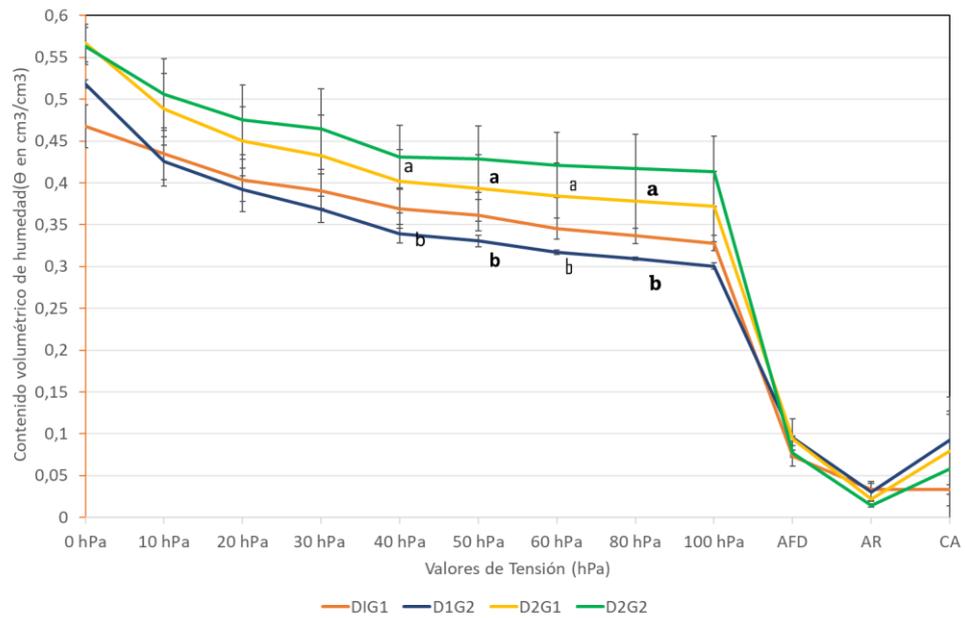


Figura C1. Gráfico de contenido volumétrico de humedad en función de distintas tensiones obtenido en la prueba de disponibilidad de agua de las muestras del espesor de amortiguación luego de los tratamientos con paquete drenante (D1: sin paquete drenante y D2: con paquete drenante) y adición de geotextil (G1: 0 adición y G2: 2 kg/m²). Diferencia significativa de la prueba T $p < 0,05$. PT o 0 hPa: Porosidad Total; CRA o 10 hPa: Capacidad de retención de agua; ADD o 100 hPa: Agua difícilmente disponible ; AFD: Agua fácilmente disponible; AR: Agua de reserva; CA: Capacidad de aireación. Letras diferentes indican diferencias significativas entre pares de medias para un mismo nivel de succión.

Apéndice D

Cuadro D1: Porcentaje de arena, limo y arcilla en cada muestra según la escala de tamaño de grano de Wentworth.

Descripción de la Muestra	Arena
Arena (%)	86,8
Limo (%)	11,2
Arcilla (%)	1,9

Cuadro D2: Distribución del tamaño de partículas, el contenido orgánico y el contenido de humedad de cada muestra.

Descripción Muestra	Arena
NO. 10	0,4%
NO. 14	0,2%
NO. 18	0,2%
NO. 35	2,7%
NO. 40	2,1%
NO. 60	25,0%
NO. 100	34,4%
NO. 140	15,4%
NO. 200	6,4%
NO. 270	3,8%
PAN (LIMO & ARCILLA)	9,4%
OTRA COMPOSICIÓN	
Fibras (%)	3,2

Cuadro D3: Distribución de grava, arena, limo y arcilla de cada muestra según la clasificación de textura del suelo del USDA.

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Grava		Arena			Limo	Arcilla	Radio Med a Fino dividido por Grava + Cs. Arena
	Gruesa	Fine	Muy Gruesa	Gruesa	Med. a Fino			
	5 - 12 mm	2 - 5 mm	1 - 2 mm	0,5 - 1 mm	0,05 – 0,5 mm	0,002 – 0,05 mm	0 – 0,002 mm	
Arena		0,4%	0,4%	2,7%	87,1%	7,4%	1,9%	24,7
	0,4%		3,1%		87,1%	9,4%		

Cuadro D4: Análisis de difracción de rayos X (XRD) que muestra la composición mineral de la arena.

Mineralogía Completa (Porcentaje de peso)	
Cuarzo	95,5
K-Feldespato	0,7
Plagioclasa	0
Calcita	1,5
Dolomita	0,2
Hematita	0,2
Total Filosilicatos	1,9
TOTAL	100
Mineralogía Filosilicatos (Abundancia Relativa)*	
Illita & Mica	68,4
Caolinita	31,6
Clorito	0
TOTAL	100
Resumen Mineralogía (Porcentaje de peso)	
Cuarzo	95,5
K-Feldespato	0,7
Plagioclasa	0
Calcita	1,5
Dolomita	0,2
Hematita	0,2
Illita & Mica	1,3
Caolinita	0,6
Clorito	0
TOTAL	100

*Métodos WPF (Whole Pattern Fitting) y método de refinamiento de Rietveld

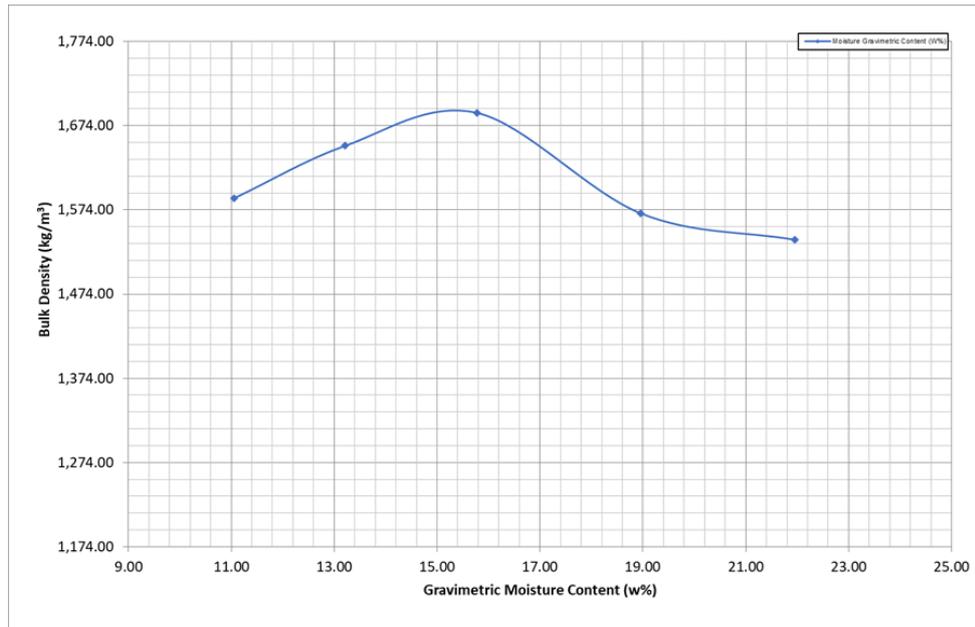


Figura D1. Densidad aparente de arena silícica y adición de geotextil con contenido de humedad gravimétrico (kg/m^3).

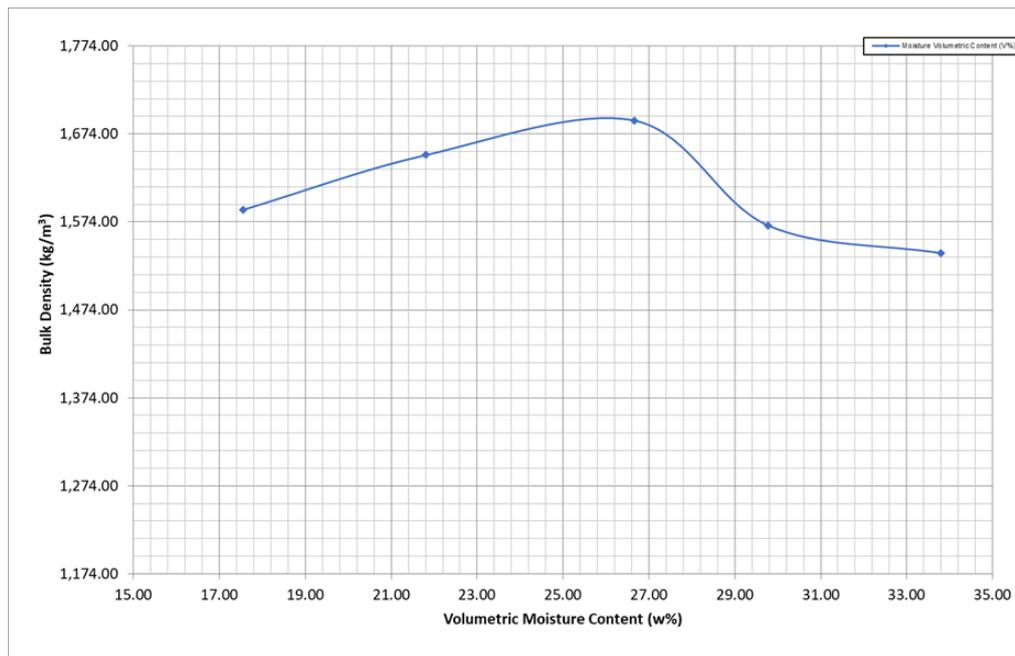


Figura D2. Densidad aparente de arena silícica y adición de geotextil con contenido de humedad volumétrico (kg/m^3).

Apéndice E

Amortiguación total por cada % CVH para cada lanzamiento - 1er lanzamiento

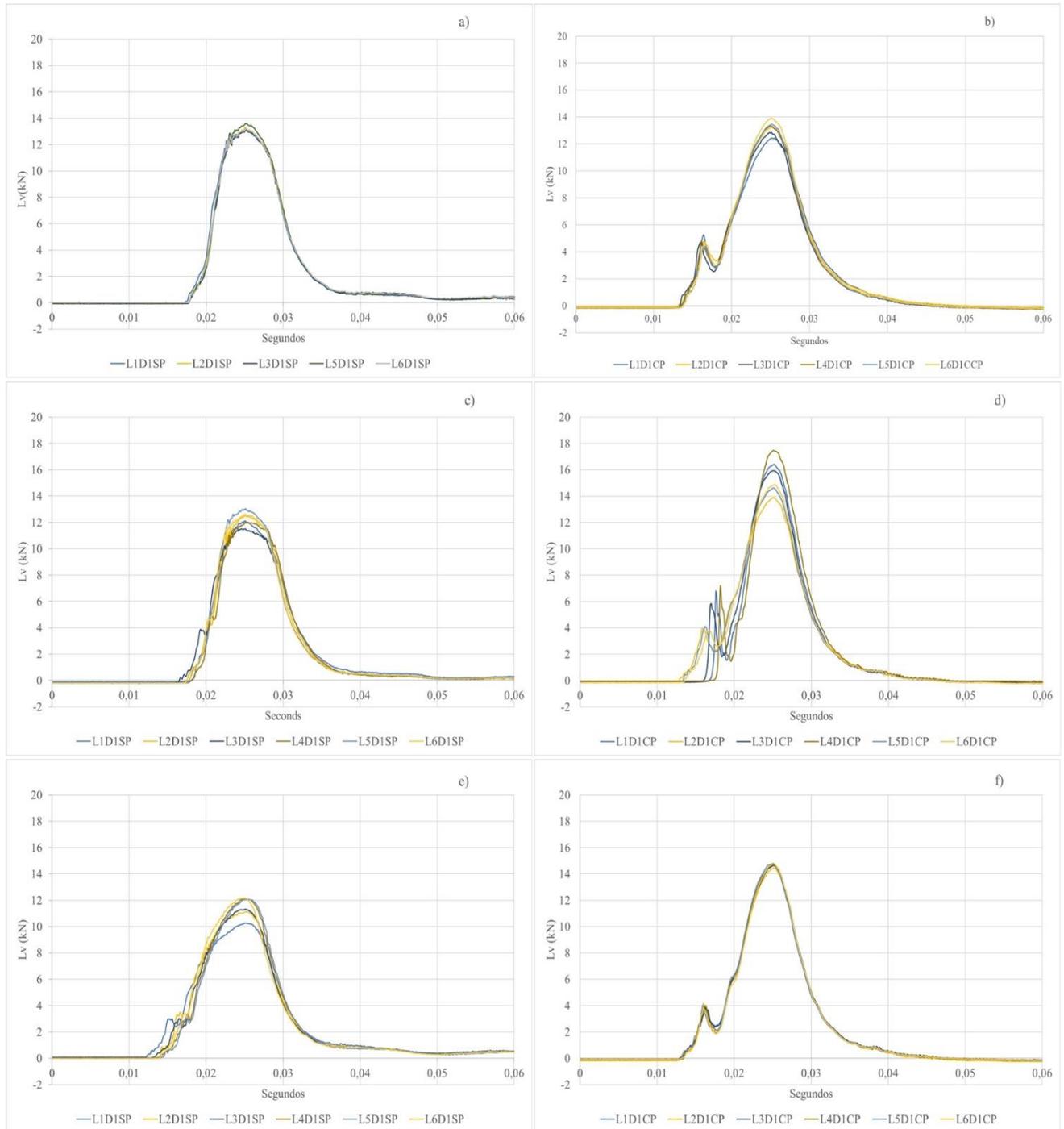


Figura E1. Amortiguación (L_v) a lo largo del tiempo (segundos) a), b) y c) seis ubicaciones (L_{1-6}) (repeticiones) del primer lanzamiento (D_1) sin pad al 20-23-25 % CVH, d), e) y f) seis ubicaciones (L_{1-6}) del primer lanzamiento (D_1) con pad a 20-23-25 % CVH. El área bajo la curve representa el impulso.

Amortiguación total por cada % CVH para cada lanzamiento - 2do lanzamiento

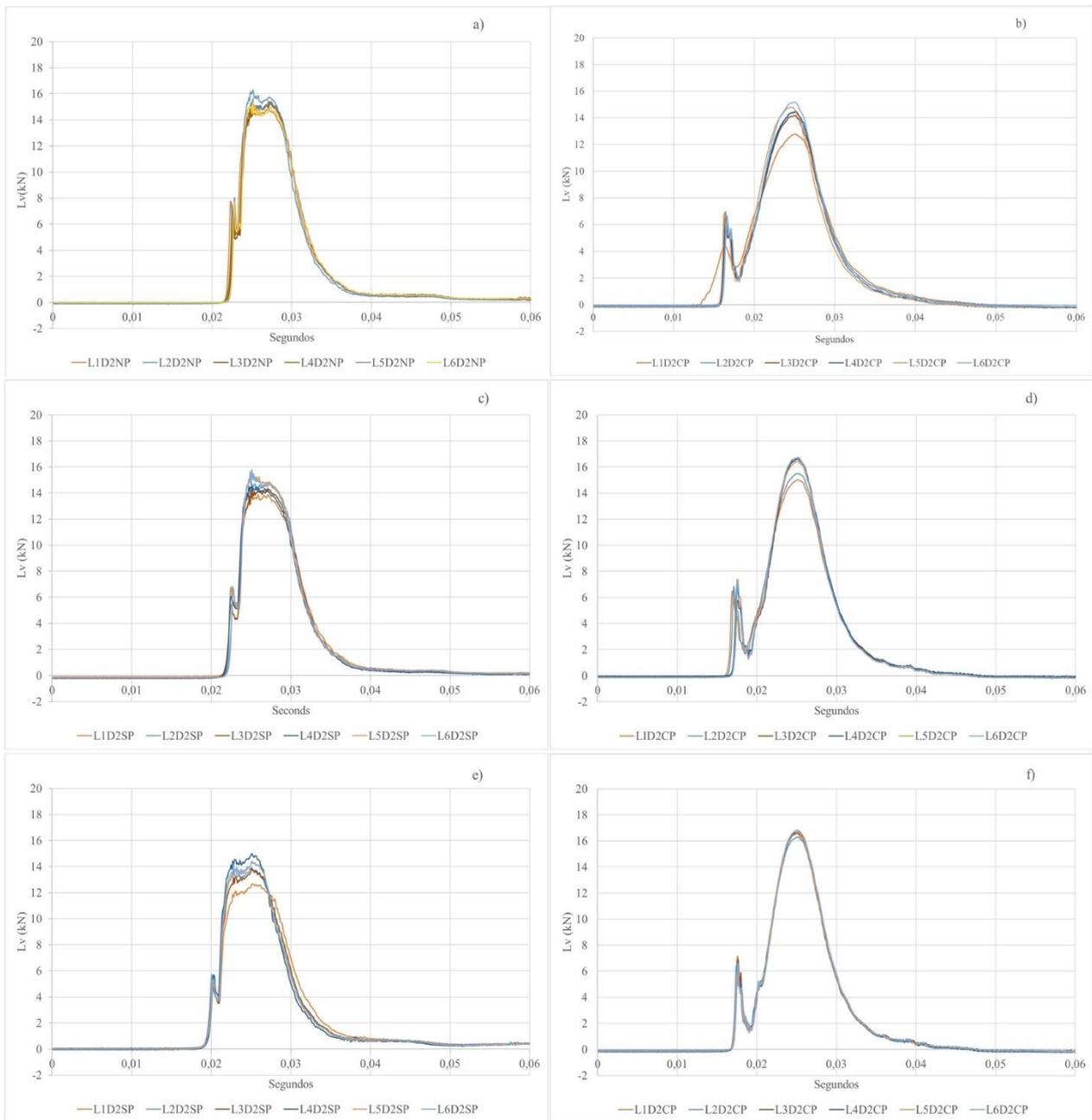


Figura E2. Amortiguación (L_v) a lo largo del tiempo (segundos) a), b) y c) seis ubicaciones (L_{1-6}) (repeticiones) del segundo lanzamiento (D_2) sin pad al 20-23-25 % CVH, d), e) y f) seis ubicaciones (L_{1-6}) del segundo lanzamiento (D_2) con pad a 20-23-25 % CVH. El área bajo la curva representa el impulso.

Amortiguación total por cada % CVH para cada lanzamiento - 3er lanzamiento

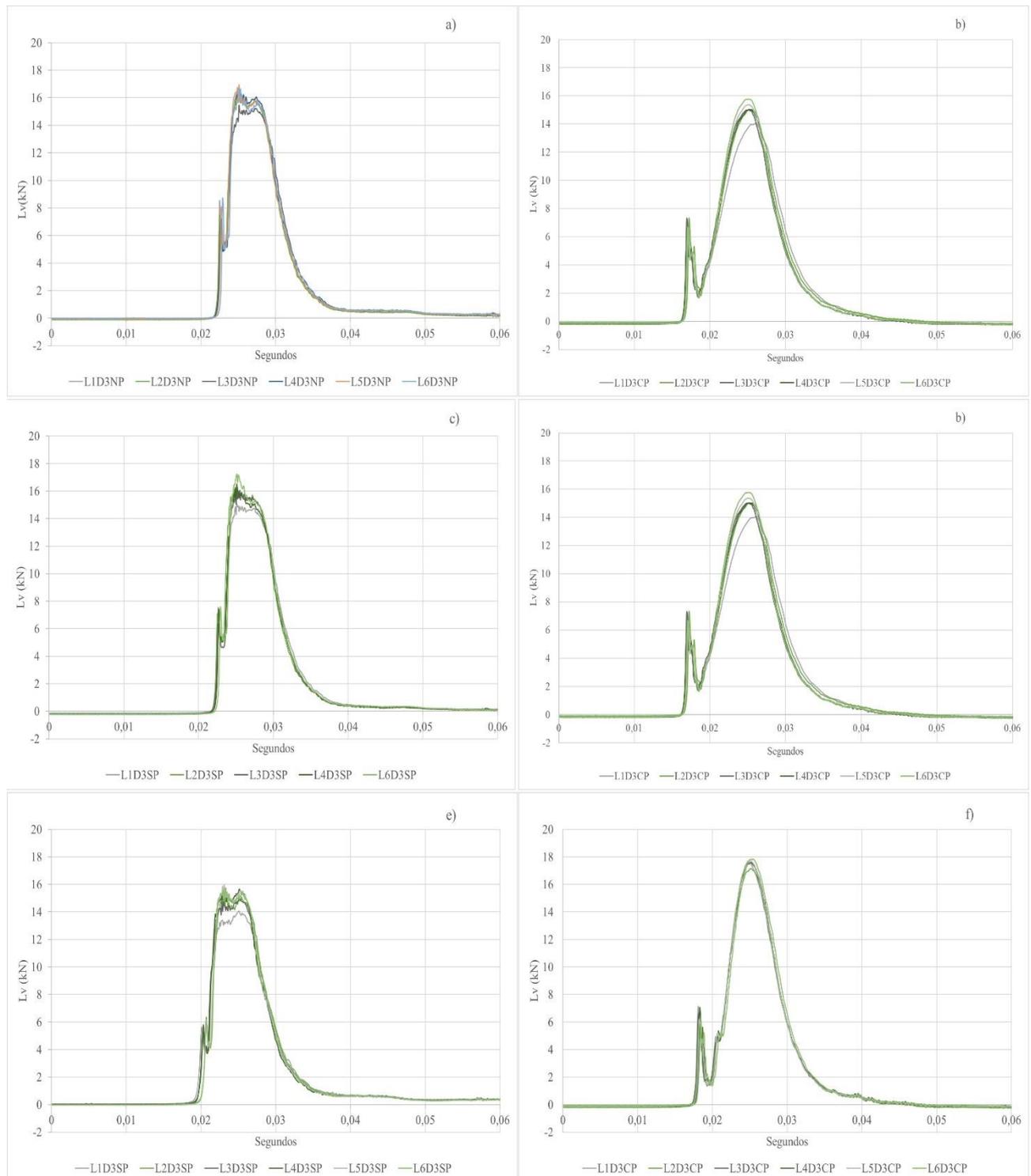


Figura E3. Amortiguación (L_v) a lo largo del tiempo (segundos) a), b) y c) seis ubicaciones (L_{1-6}) (repeticiones) del tercer lanzamiento (D_3) sin pad al 20-23-25 % CVH, d), e) y f) seis ubicaciones (L_{1-6}) del tercer lanzamiento (D_3) con pad a 20-23-25 % CVH. El área bajo la curva representa el impulso.