

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA



FACULTAD DE CIENCIAS DEL DEPORTE (TOLEDO)

DEPARTAMENTO DE ACTIVIDAD FÍSICA Y CIENCIAS DEL DEPORTE

Programa de Doctorado en Ciencias del Deporte



**EFFECTOS DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE SOPORTE
SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y EL RENDIMIENTO
DEPORTIVO EN LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE CÉSPED ARTIFICIAL**

Tesis doctoral desarrollada por:

JAVIER SÁNCHEZ SÁNCHEZ

Dirigida por:

DRA. D^a. LEONOR GALLARDO GUERRERO

DR. D. PABLO BURILLO NARANJO

TOLEDO, 2014

A mi familia y amigos



Dra. D^a. Leonor Gallardo Guerrero, Profesora
Titular de la Universidad de Castilla-La Mancha en la
Facultad de Ciencias del Deporte de Toledo,

Certifica

Que el trabajo de Tesis Doctoral desarrollado por el
Graduado Javier Sánchez Sánchez, titulado **Efectos de
los componentes estructurales de soporte sobre el
comportamiento mecánico y el rendimiento
deportivo en los campos de fútbol de césped
artificial**, ha sido realizado bajo mi dirección. En mi
opinión, reúne los requisitos para proceder a iniciar
los trámites pertinentes para la Comisión de
Doctorado de la Universidad de Castilla-La Mancha y
su posterior defensa ante tribunal.

Y para que conste, expido la presente certificación
en Toledo, a 11 de Septiembre de 2014.

Fdo. Dra. D^a. Leonor Gallardo Guerrero



Dr. D. Pablo Burillo Naranjo, Profesor Titular de
la Universidad Camilo José Cela en el Instituto de
Ciencias del Deporte,

Certifica

Que el trabajo de Tesis Doctoral desarrollado por el
Graduado Javier Sánchez Sánchez, titulado **Efectos de
los componentes estructurales de soporte sobre el
comportamiento mecánico y el rendimiento
deportivo en los campos de fútbol de césped
artificial**, ha sido realizado bajo mi dirección. En mi
opinión, reúne los requisitos para proceder a iniciar
los trámites pertinentes para la Comisión de
Doctorado de la Universidad de Castilla-La Mancha y
su posterior defensa ante tribunal.

Y para que conste, expido la presente certificación
en Toledo, a 11 de Septiembre de 2014.

Fdo. Dr. D. Pablo Burillo Naranjo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a la Dra. D^a. Leonor Gallardo Guerrero la oportunidad que me brindó de pertenecer a un gran grupo de trabajo. Dicen que el éxito está asociado a las expectativas y confianza depositadas en ti y ella me hizo sentir importante desde el primer momento. Su entrega y persistencia durante este proyecto han eliminado los términos conformismo y resignación de mi diccionario. Por ello, además de las labores de dirección, ha ejercido de mentora lo que ha enriquecido mucho más este proceso.

Al Dr. Pablo Burillo Naranjo por acogerme desde el principio y aceptar el reto de codirigirme la Tesis. Sus consejos siempre mejoraban y animaban a seguir trabajando. Gracias por las horas de trabajo que me has dedicado dejando a un lado tus propios intereses.

A mis compañeros del Grupo IGOID, con mención especial al Dr. José Luis Felipe Hernández, contigo pasé mis inicios en este ámbito y has sabido canalizar los momentos duros en ciclos pasajeros que me han hecho más fácil el trayecto, no te imaginas lo que me has ayudado. También a Rubén Gude, Esther Ubago y los Drs. Álvaro Fernández Luna y Jorge García por hacer más amenas las largas jornadas de trabajo y por acceder a colaborar en las pruebas de este estudio que no hubiera podido llevar a cabo sin su ayuda, son amigos y la personificación del concepto de trabajo en equipo, sin una queja ni una mala cara. No me olvido de la Dra. María Plaza con la que inicié mi camino en este grupo ni los nuevos integrantes que vienen pisando fuerte desde atrás; Víctor, Sergio y Jorge, también son parte de este proyecto.

A mis compañeros y amigos de la UCAM, por haber hecho más amena la fase final de la Tesis Doctoral. No se empieza a aprender hasta que comienzas a enseñar y ellos me han dado la oportunidad de vivenciarlo este último año.

De manera muy especial a mis padres, Tomás y Lola, por representar la principal motivación para terminar esta empresa que comencé hace años, su orgullo y felicidad es la que me ha levantado en los momentos duros. A mis hermanos, Tomás, Álvaro y Sara por estar presentes cuando más los necesitaba y liberarme de cualquier tipo de presión. A mi sobrino Hugo, que estoy seguro que alcanzará todo lo que se proponga, con sólo 5 años ha sido parte importante en este trabajo, solo él era capaz de alegrarme en los días difíciles.

Por último, a mis amigos y especialmente a María, por anteponerme a todo, comprender mi situación y sacrificar su tiempo por estar a mi lado. Espero poder devolverte este esfuerzo.

Javier Sánchez Sánchez

EFECTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE SOPORTE SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y EL RENDIMIENTO DEPORTIVO EN LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE CÉSPED ARTIFICIAL

RESUMEN

La constante evolución de la 3ª Generación de campos de fútbol de césped artificial ha originado que los gestores deportivos puedan elegir entre una mayor diversidad de componentes estructurales en el diseño de la instalación. Sin embargo, la mayor parte de los estudios, centrados en el análisis de las propiedades mecánicas de este tipo de pavimentos, focalizan su interés en los componentes superficiales (fibra y relleno). La presente investigación analiza la estructura de soporte (sub-base y capa elástica) de los campos de césped artificial con el objetivo general de conocer el efecto de estos componentes sobre el comportamiento mecánico y el rendimiento deportivo en los campos de fútbol de césped artificial. Para ello, se llevaron a cabo tres estudios diferentes que combinan el análisis mecánico con la interacción real entre el jugador y la superficie de juego.

El objetivo del **Estudio 1** fue valorar *in situ* la influencia de diferentes estructuras de soporte sobre las propiedades mecánicas del césped artificial, tras el deterioro ocasionado por el desgaste durante un año. Las propiedades evaluadas fueron absorción de impactos (%), deformación vertical estándar (mm), tracción rotacional (N·m), rebote vertical (%) y rodadura horizontal de balón (m), acorde a los requerimientos de la norma EN 15330-1:2014. Los resultados constataron la influencia de la estructura base sobre el rendimiento mecánico de los campos de césped artificial, así como un deterioro significativo de las propiedades con el tiempo, oscilando entre el 3.14 % y el 8.92 % en función del sistema instalado en solo un año. Estos resultados ponen de

manifiesto que la estructura de soporte que garantiza una mayor durabilidad con un rendimiento adecuado de las propiedades mecánicas con el paso del tiempo es la constituida por una sub-base de grava compactada bajo una capa elástica.

Palabras clave: Césped artificial, sub-base, capa elástica, durabilidad, rendimiento mecánico

El objetivo del **Estudio 2** fue valorar la influencia de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial sobre el rendimiento de los jugadores de fútbol. Una batería de test físicos, fisiológicos y de percepción fue realizada en cuatro sistemas estructurales diferentes de césped artificial (Sistema 1: Sub-base de grava compactada sin capa elástica; Sistema 2: Sub-base de grava compactada con capa elástica; Sistema 3: Sub-base de asfalto sin capa elástica; Sistema 4: Sub-base de asfalto con capa elástica). La muestra estaba compuesta por 18 jugadores de fútbol (22.44 ± 1.72 años) que entrenan y compiten habitualmente sobre césped artificial. El sistema de césped artificial con menores niveles de tracción rotacional (S3) mostró tiempos totales superiores en el test de esprines repetidos (RSA) con respecto a los sistemas con valores intermedios (49.46 ± 1.75 s vs 47.55 ± 1.82 s (S1) y 47.85 ± 1.59 s (S2), respectivamente; $p < 0.001$). El rendimiento en los test de salto (countermovement jump and squat jump) y golpeo de balón a portería disminuyó después del test RSA en todos los pavimentos evaluados ($p < 0.05$), pero el sistema de césped artificial no afectó al deterioro del rendimiento ($p > 0.05$). La carga fisiológica fue similar en los cuatro sistemas de césped artificial. Sin embargo, los jugadores percibieron mayor comodidad sobre el sistema más duro y rígido (S4; Escala Visual Análoga = 70.83 ± 14.28) que en el sistema de césped artificial más blando (S2; Escala Visual Análoga = 54.24 ± 19.63). El análisis de regresión lineal reveló una influencia significativa de las propiedades mecánicas del pavimento del 16.5 %, 15.8 % y 7.1 % sobre el

tiempo medio del sprint, el mejor tiempo de sprint y la velocidad máxima media en el test RSA, respectivamente. Los resultados sugieren una heterogeneidad mecánica entre los sistemas de césped artificial que genera diferencias en el rendimiento físico y la percepción de los jugadores de fútbol.

Palabras clave: fútbol, césped artificial, propiedades mecánicas, rendimiento, sprint, salto, percepción, golpeo.

Por último, El objetivo del **Estudio 3** fue valorar la carga física y fisiológica de jugadores de fútbol amateur en una situación simulada de juego sobre diferentes sistemas de césped artificial. Para ello, 20 jugadores de fútbol (21.65 ± 3.10 años) fueron monitorizados mediante sistemas de posicionamiento global (GPS) y bandas de frecuencia cardiaca durante 45 min en un partido sobre los 4 sistemas de césped artificial seleccionados. Los resultados revelan una mayor distancia recorrida en rangos de alta velocidad sobre el sistema con menores niveles de amortiguación y mayores índices de tracción rotacional ($p < 0.05$). Además, este sistema de césped artificial evidenció un mayor número (12.65 ± 5.67) de esprines, así como picos de velocidad máxima más elevados en el último tramo del partido (28.16 ± 2.90 km/h) en contraste con los sistemas con mayor capacidad de amortiguación ($p < 0.05$). Por su parte, la carga fisiológica fue similar en los cuatro sistemas de césped artificial ($p > 0.05$). Finalmente, el análisis de regresión evidenció una influencia significativa de las propiedades mecánicas del pavimento sobre la distancia global (15.4 %), el número (12.6 %) y la velocidad máxima (16.6 %) durante las acciones de sprint. En conclusión, la variabilidad mecánica de los sistemas de césped artificial desembocó en diferencias en el perfil cinemático y la percepción de los jugadores durante un partido simulado de fútbol.

Palabras clave: sistemas de césped artificial, GPS, perfil cinemático, sprint, carga fisiológica, percepción, propiedades mecánicas.

EFFECT OF THE STRUCTURAL COMPONENTS OF SUPPORT ON THE MECHANICAL BEHAVIOR AND THE SPORT FUNCTIONALITY OF FOOTBALL FIELDS OF ARTIFICIAL TURF

ABSTRACT

The constant evolution of the 3rd Generation artificial turf football fields has caused the sport managers can choose from a wider range of structural components in the design of the facility. However, the majority of studies focused on the analysis of the mechanical properties of this type of surface guide their interest in the surface components (fiber and filler). This research analyzes the support structure (sub-base and elastic layer) of artificial turf fields with the aim to determine the effect of these components on the mechanical behavior and sport functionality of the artificial turf football fields. For this purpose, three different studies were carried out by combining the mechanical analysis with the real interaction between the football player and the playing surface.

The aim of **Study 1** was to assess *in situ* the effect of the various support structures on the mechanical properties of artificial turf after deterioration caused by wear for a year. The assessed properties were force reduction (%), standard vertical deformation (mm), rotational traction (N·m), vertical ball rebound (%), and ball roll (m), according to the requirements in norm EN 15330-1:2014. The results demonstrate the effect of the structural base on the mechanical and functional performance of football fields of artificial turf, as well as the significant deterioration of the properties over a year which varied between 3.14 % and 8.92 % with regard to the installed system. These results show that the support structure that provides the greatest durability and

adequate behaviour of the mechanical properties over time is that which has a sub-base of compacted gravel under an elastic layer

Keywords: Artificial turf, sub-base, elastic layer, durability, mechanical performance

The aim of **Study 2** was to value the influence of the mechanical properties of artificial turf systems about football players' performance. A battery of perceptive physiological and physical test were developed in four different structural systems of artificial turf (System 1: Compacted gravel sub-base without elastic layer; System 2: Compacted gravel sub-base with elastic layer; System 3: Asphalt sub-base without elastic layer; System 4: Asphalt sub-base with elastic layer). The sample was composed by 18 football players (22.44 ± 1.72 years) who typically train and compete upon artificial turf. The artificial turf system with less rotational traction (S3) showed higher total time in the RSA test regarding to the systems with intermediate values (49.46 ± 1.75 s vs 47.55 ± 1.82 s (S1) and 47.85 ± 1.59 s (S2); $p < 0.001$). The performance in jumping tests (countermovement jump and squat jump) and ball kicking to goal decreased after the RSA Test in all surfaces assessed ($p < 0.05$), since the artificial turf system did not affect to performance deterioration ($p > 0.05$). The physiological load was similar in the four artificial turf systems. However, players felt more comfort upon the system harder and more rigid (S4; Visual Analogous Scale = 70.83 ± 14.28) than the artificial turf system softer (S2; Visual Analogous Scale = 54.24 ± 19.63). The lineal regression analysis revealed a significant influence of the mechanical properties of the surface of 16.5 %, 15.8 % and 7.1 % upon the mean time of the sprint, the best sprint time and the maximum mean speed in the RSA test respectively. Results suggest a mechanical heterogeneity between the systems of artificial turf which generate differences in the physic performance and in the football players' perception.

Keywords: soccer, artificial turf, mechanical properties, performance, sprint, jump, perception, kicking.

Finally, the aim of **Study 3** was to value the physical and physiological load of amateur football players in a simulated game situation on different artificial turf systems. For this, 20 football players (21.65 ± 3.10 años) were monitored by global positioning systems (GPS) devices and heart rate bands in a match of 45 min on the 4 selected artificial turf systems. The results reveal a greater distance covered in high-speed ranges on the system with lower cushioning and higher rates of rotational traction ($p < 0.05$). Furthermore, this artificial turf system showed a higher number (12.65 ± 5.67) of sprints and higher peaks of maximum speed in the last split of the match (28.16 ± 2.90 km/h) in contrast to systems with greater cushioning ($p < 0.05$). For its part, the physiological load was similar in the four artificial turf systems ($p > 0.05$). Finally, regression analysis showed a significant influence of the mechanical properties of the surface on the distance covered (15.4 %), the number (12.6 %) and the maximum speed (16.6 %) during the sprint actions. In conclusion, the mechanical variability of artificial turf systems culminated in differences in the kinematic profile and the perception of the players during simulated football match

Keywords: artificial turf systems, GPS, kinematic profile, physiological load, perception, mechanical properties.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....21

0. INTRODUCCIÓN	23
-----------------------	----

APARTADO I. MARCO TEÓRICO GENERAL..... 29

CAPÍTULO I. ORIGEN Y COMPONENTES DEL CÉSPED ARTIFICIAL.....31

1.1. EVOLUCIÓN DEL CÉSPED ARTIFICIAL.....	33
1.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN: COMPONENTES ESTRUCTURALES.....	39
1.2.1. Sub-base	39
1.2.2. Capa elástica o PAD	44
1.2.3. Backing	45
1.2.4. Caucho	45
1.2.5. Fibra.....	48
1.3. DETERMINANTES DE LA VIDA ÚTIL	50
1.3.1. Explotación.....	53
1.3.2. Mantenimiento	54

CAPÍTULO II. COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y REGULACIÓN NORMATIVA DEL CÉSPED ARTIFICIAL.....59

2.1. EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN DEPORTIVA	61
2.1.1. Interacción del jugador con el pavimento de césped artificial.....	61
2.1.1.1. <i>Absorción de impactos</i>	63
2.1.1.2. <i>Deformación vertical</i>	65
2.1.1.3. <i>Tracción rotacional</i>	66
2.1.2. Interacción del balón con el pavimento de césped artificial	67
2.1.2.1. <i>Rebote vertical</i>	68

2.1.2.2. Rodadura horizontal.....	69
2.2. NORMATIVA VIGENTE PARA CAMPOS DE CÉSPED ARTIFICIAL.....	70

APARTADO II. ANÁLISIS EMPÍRICO77

CAPÍTULO III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.....79

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO GENERAL.....	81
3.2. TEMPORALIZACIÓN DEL ESTUDIO	83

CAPÍTULO IV. EFECTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE SOPORTE SOBRE LA PÉRDIDA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE CÉSPED ARTIFICIAL87

4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	89
4.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	92
4.3. MATERIAL Y MÉTODO.....	93
4.3.1. Características de la muestra	95
4.3.2. Procedimiento	96
4.3.3. Análisis de datos	100
4.4. RESULTADOS.....	102
4.5. DISCUSIÓN.....	106

CAPÍTULO V. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SISTEMAS DE CÉSPED ARTIFICIAL DE TERCERA GENERACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO FÍSICO, FISIOLÓGICO Y LA PERCEPCIÓN DE JUGADORES DE FÚTBOL.....111

5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	113
5.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	116
5.3. MATERIAL Y MÉTODO.....	117
5.3.1. Características de la muestra	117

5.3.2. Procedimiento	118
5.3.3. Análisis de datos	124
5.4. RESULTADOS.....	124
5.5. DISCUSIÓN	130
CAPÍTULO VI. RESPUESTA FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE JUGADORES DE FÚTBOL AMATEUR EN DIFERENTES SISTEMAS DE TERCERA GENERACIÓN DE CÉSPED ARTIFICIAL DURANTE UNA SITUACIÓN SIMULADA DE JUEGO.....	139
6.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	141
6.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	143
6.3. MATERIAL Y MÉTODO.....	144
6.3.1. Características de la muestra	144
6.3.2. Procedimiento	145
6.3.3. Análisis de datos	150
6.4. RESULTADOS.....	151
6.5. DISCUSIÓN	158
<u>APARTADO III. CONCLUSIONES Y APORTACIONES GENERALES.....</u>	<u>165</u>
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES GENERALES, LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	167
7.1. CONCLUSIONES	169
7.2. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	177
7.3. PROPUESTAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	179
CAPÍTULO VIII. LISTA DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	181
8.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	183

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS 207

ANEXOS..... 215

ANEXO 1. HOJA DE TOMA DE DATOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS217

ANEXO 2. ACEPTACIÓN DEL COMITÉ ÉTICO225

ANEXO 3. CONSENTIMIENTO INFORMADO DE PARTICIPACIÓN226

ANEXO 4. HOJA DE INFORMACIÓN DE PARTICIPACIÓN EN EL PROYECTO.....227

ANEXO 5. CUESTIONARIO VAS (CAPÍTULO V)229

ANEXO 6. CUESTIONARIO VAS (CAPÍTULO VI)230

ANEXO 7. PRINCIPALES TRABAJOS DE DIFUSIÓN232

ANEXO 8. ARTÍCULO PUBLICADO.....233

INTRODUCCIÓN

0. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el deporte ha adquirido tal relevancia económica y social que su importancia ha trascendido el ámbito estrictamente deportivo para convertirse en una esfera social que interacciona con otras (la economía, la política, la salud y la educación) y que desempeña un papel fundamental en la vida cotidiana de las personas (García-Ferrando & Llopis-Goig, 2010).

En este sentido, la promoción del deporte requiere de la correspondiente construcción y mejora de instalaciones deportivas adecuadas para alcanzar los objetivos que persigue la práctica de cada tipo de modalidad físico-deportiva. Este hecho, quedó refrendado con un crecimiento exponencial en el número y la calidad de las instalaciones deportivas, como se puede observar en el último Censo Nacional de Instalaciones Deportivas (Gallardo, 2007). Por ello, aunque el ritmo de construcción ha ido decreciendo en los últimos años con motivo de la crisis económica, los nuevos equipamientos dotados de mayores y más diversificados espacios deportivos, facilitan a las personas practicantes disponer de una mejor oferta de actividades físico-deportivas (García-Ferrando & Llopis-Goig, 2010).

En el mundo del fútbol, ese salto de calidad se hace patente con la aparición del césped artificial como una superficie alternativa a la hierba natural. La mejora en las prestaciones de este tipo de pavimentos artificiales ha propiciado que se acabe imponiendo a la hierba natural, llegándose a producir un incremento del 200 % en el número de campos de césped artificial en tan solo 4 años (Burillo, 2009). Estas mejoras se han visto motivadas por las exigencias del sector deportivo y los cambios a los que ha sido sometido, que convierten a la calidad en un factor determinante para el logro de resultados y el éxito en las organizaciones (Gallardo, García-Tascón, & Burillo, 2008). La aparición de nuevas generaciones y las evoluciones que se aplican sitúan a este

pavimento a la altura de la hierba natural en términos de calidad. Esto permite no solo garantizar una mayor protección frente a las lesiones asociadas a la superficie de juego, sino también garantizar una mejora en la calidad del deporte practicado (Pérez-Soriano, Llana-Belloch, Cartell-Tormo, & Pérez-Turpin, 2009).

Estas evoluciones han provocado que dentro de la 3ª Generación de campos de césped artificial puedan existir una gran variedad de combinaciones de los componentes estructurales que dan lugar a diferentes tipologías de pavimentos. Aunque pueda parecer un hecho sin importancia, algunos autores consideran que las diferencias entre las diversas tipologías pueden ser mayores que las existentes entre la hierba natural y el césped artificial (Potthast, Verhelst, Hughes, Stone, & De Clercq, 2010).

A pesar de ello, la mayoría de las investigaciones han obviado esta circunstancia y se han centrado principalmente en parámetros de seguridad, como las lesiones (Dragoo & Braun, 2010; Ekstrand, Timpka, & Hagglund, 2006; Williams, Hume, & Kara, 2011), así como en parámetros de rendimiento deportivo (Andersson, Ekblom, & Krusturup, 2008; Brito, Krusturup, & Rebelo, 2012).

Ha sido tal el interés en comparar el césped artificial y la hierba natural, que apenas existen estudios dedicados exclusivamente al pavimento artificial y su problemática. Por ello, prácticamente no existen evidencias científicas que aporten información o posibles soluciones para el problema más presente entre los campos de césped artificial en la actualidad, como es su reducida vida útil (Burillo et al., 2010). Un posible pretexto puede ser la disponibilidad de presupuesto de la que gozaban las administraciones para sustituir el pavimento en el momento que finalizara su vida útil.

Sin embargo, la crisis económica ha propiciado un estancamiento en la construcción de nuevas infraestructuras y por tanto, en la instalación de nuevos pavimentos artificiales. Esto ha destapado el principal problema de los campos de fútbol de césped artificial, su corto ciclo de vida útil, que oscila entre los 7 y los 8 años (Burillo et al., 2010) y que depende de la combinación de diferentes variables como veremos más adelante.

En este aspecto, ante la falta de evidencia científica, la mayor parte de los responsables de los campos de fútbol de césped artificial optan por mantener los pavimentos más allá de su vida útil, con el correspondiente riesgo añadido que eso supone para la seguridad de los jugadores durante la práctica deportiva. Una posible solución a este problema, sería el establecimiento de una normativa, de obligado cumplimiento, que regulara las propiedades de los campos de fútbol de césped artificial, con el fin de garantizar una práctica deportiva segura, puesto que las normativas existentes en la actualidad solo son obligatorias para competiciones profesionales e internacionales, como es el caso de la emitida por la *Fédération Internationale de Football Association* (FIFA, 2012). Por el momento, la única normativa que regula los pavimentos de césped artificial para deportes comunitarios, educativos y de ocio (UNE-EN 15330-1:2014) no es de obligado cumplimiento.

No obstante, la falta de liquidez actual impediría que los responsables de la instalación pudieran garantizar el cumplimiento de la normativa, lo que desembocaría en el cierre de la instalación. Por ello, en la presente tesis doctoral, se plantea el objetivo de conocer el grado de deterioro de las propiedades mecánicas ocasionado por el envejecimiento en los campos de fútbol de césped artificial. Además, se pretende profundizar en la influencia de los componentes estructurales, principalmente la sub-base y la capa elástica, sobre la durabilidad de los pavimentos artificiales con el fin de poder determinar la tipología de pavimento que mantenga un óptimo estado de sus

propiedades mecánicas durante más tiempo, incrementando de esta manera la vida útil de los campos de césped artificial y garantizando una adecuada interacción superficie-jugador durante la práctica.

En consecuencia, la presente tesis doctoral se estructura en base a los siguientes apartados:

En el **primer apartado**, dedicado a la Fundamentación Teórica, se plasman una serie de puntos de especial relevancia, que delimitan la revisión del estado de conocimiento sobre la realidad que se pretende estudiar y permiten disponer de una visión clara del contexto en el que se enmarcan los campos de fútbol de césped artificial. El **Capítulo 1** se centra en la evolución y componentes estructurales del césped artificial. Además, aporta una visión general sobre los principales factores que afectan a la vida útil de este tipo de pavimentos. Por su parte, el **Capítulo 2** profundiza en las propiedades determinantes del comportamiento mecánico de estas superficies deportivas y la regulación normativa vigente destinada a garantizar la funcionalidad y seguridad del césped artificial en función de la finalidad establecida.

El **segundo apartado**, correspondiente al análisis empírico se divide en tres capítulos. El **Capítulo 3** indaga sobre los efectos de los componentes estructurales de soporte sobre la pérdida de propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial. Este tercer capítulo pretende profundizar en la temática de la vida útil de los pavimentos de césped artificial para el fútbol, conociendo, a través de un estudio longitudinal, el grado de pérdida de las propiedades mecánicas de la superficie de juego relacionadas con la interacción superficie-jugador y superficie-balón.

El conocimiento sobre la interacción entre los componentes estructurales y el ciclo de vida útil del pavimento está basado en datos objetivos correspondientes a las 4 estructuras predominantes en los campos de fútbol de

césped artificial de Castilla-La Mancha, en relación a las posibles combinaciones de la sub-base y la capa elástica. Además, la comparación entre las diferentes estructuras estudiadas y el ajuste de cada una de ellas a las especificaciones recogidas en la Norma EN 15330-1:2014, nos permitirá conocer la tipología de pavimento idónea que combine una óptima funcionalidad deportiva y una amplia vida útil.

El **Capítulo 4** se centra en la influencia de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial de tercera generación sobre parámetros físicos y fisiológicos implicados en el rendimiento deportivo, así como sobre la percepción de los jugadores después de una serie de test analíticos adaptados a los requerimientos de la práctica del fútbol. Este cuarto capítulo parte de la heterogeneidad demostrada en el apartado anterior entre los campos de fútbol de césped artificial de tercera generación. Por ello, este estudio aporta información relevante sobre cómo esa variabilidad mecánica observada entre campos de fútbol de césped artificial afecta a la práctica del fútbol. Los resultados obtenidos facilitarán el establecimiento de los requerimientos necesarios para garantizar una óptima funcionalidad deportiva de los pavimentos.

El **Capítulo 5** continúa la progresión marcada por los estudios anteriores. En este caso, el efecto de las propiedades mecánicas de los diferentes sistemas de césped artificial es analizado en una situación simulada de juego durante 45 min en jugadores amateur. Los resultados de carga interna y externa durante el partido, recopilados mediante Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), así como la valoración personal de los jugadores suponen el paso definitivo para valorar la incidencia del pavimento sobre la práctica deportiva y permite conocer el sistema más adaptado a los requerimientos actuales de funcionalidad y seguridad.

Finalmente, el **tercer apartado** engloba dos capítulos que recopilan por un lado las principales conclusiones extraídas del proceso de investigación, junto con las limitaciones del estudio y las futuras líneas de investigación que se abren en este ámbito y por otro las referencias bibliográficas consultadas para la elaboración del este trabajo de investigación.

La presente Tesis Doctoral se completa con un apartado adicional que incluye los anexos que se han utilizado durante el desarrollo de la investigación y su posterior difusión. A modo de síntesis, el presente trabajo trata de aportar soluciones prácticas a la problemática del ciclo de vida en los campos de fútbol de césped artificial y su funcionalidad deportiva en base a sus componentes estructurales de soporte que conforman este tipo de pavimentos.

APARTADO I. MARCO TEÓRICO GENERAL

CAPÍTULO I.

ORIGEN Y COMPONENTES DEL CÉSPED ARTIFICIAL

1.1. EVOLUCIÓN DEL CÉSPED ARTIFICIAL

Esta tipología de superficie se desarrolló en los años 60 como un sustituto de la hierba natural, con el propósito de solucionar los problemas relacionados con el mantenimiento, especialmente en instalaciones cubiertas.

Según Burillo et al. (2009) la primera fibra sintética se construyó para el estadio cubierto Astrodome de Houston (Estados Unidos) en 1966 (Figura 1.1) y muy pronto, su implantación se extendió por numerosos campos de béisbol y fútbol americano de toda Norte América. Estos campos, estaban fabricados de fibras de nylon fibrilado con una altura entre 10 y 12 mm (Fleming, 2011a; Vercammen, 2007). En España, el primer campo de césped artificial se construyó en el año 1973 en Sotomontes, Madrid, diseñado por el arquitecto Díaz de Tejado y destinado a la práctica de hockey. Asimismo, el segundo campo de césped artificial para hockey fue implantado un año después en Pau Negre, Barcelona (Ortego, 2008).



Figura 1.1. Astrodome de Houston (a la izquierda con césped natural, a la derecha con césped artificial)

En los años 70, una empresa alemana desarrolla un producto similar al anterior, pero esta vez fabricado en polipropileno (PP), un material menos resistente que el nylon, pero reducía el riesgo de lesiones por abrasión de la piel. Estos productos se fabricaron con una base elástica inferior dando lugar a lo que se conoce hoy en día como el césped artificial de **primera generación** (Figura 1.2).

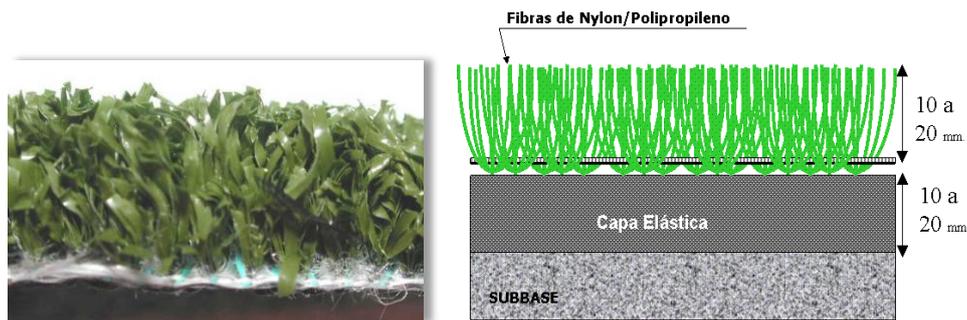


Figura 1.2. Césped artificial de 1ª generación

La **segunda generación** de césped artificial aparece a finales de la década de 1970, cuando una empresa canadiense desarrolla diferentes productos fabricados también en polipropileno (PP). Este producto, a diferencia del anterior, dividía sus fibras longitudinalmente en dos y presentaba las costuras más separadas. Además, se utiliza menos fibra que en los de primera generación por lo que se abaratan los costes (Correal, 2008). Los campos de segunda generación incorporan un relleno de arena y la fibra alcanza longitudes de hasta 30 mm (Figura 1.3).

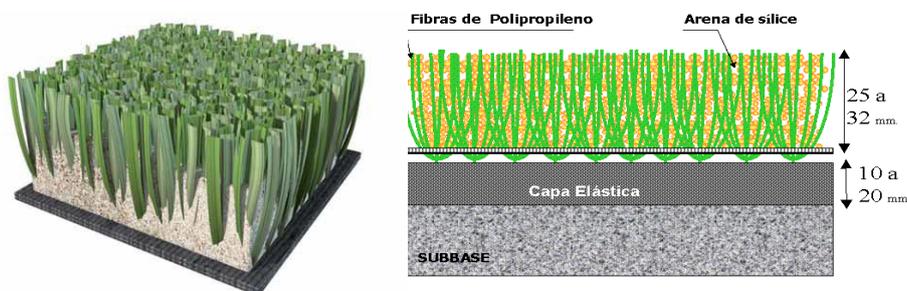


Figura 1.3. Césped artificial de 2ª generación

En estos pavimentos, la arena favorece un ligero deslizamiento del calzado y reduce el aplastamiento del pelo. Como consecuencia de su baja capacidad para la absorción de impactos, estos suelos suelen incorporar una base de capa elástica (“shock-pad”) de entre 20 y 40 mm de espesor ya sea de caucho reciclado o de otros materiales con alta capacidad de absorción de impactos. La expansión de este tipo de superficie se ve favorecida por su uso en los Juegos Olímpicos de Montreal (1976) para la modalidad de hockey, así como

su implantación en el campo de fútbol londinense del Queens Park Rangers F.C. (1981) y en otros campos de la 1ª División inglesa. En ese momento se produce un reconocimiento internacional en el mundo del deporte para ese tipo de superficies artificiales.

A pesar de esto, el diseño no era muy adecuado para la práctica del fútbol, ya que obligaba a los jugadores a utilizar un calzado diferente al usado en el césped natural y modificaba la forma de juego. Además, el bote de la pelota era distinto al natural, el balón rodaba demasiado, el césped era muy abrasivo y el tapiz se arrugaba (Correal, 2008). Todo ello provocó que el césped artificial adquiriera una mala reputación entre los jugadores y aficionados, considerando que provocaba un mayor número de lesiones que el césped natural. De manera que el uso de césped artificial fue prohibido por FIFA, UEFA y por otras muchas asociaciones nacionales de fútbol (Burillo et al., 2010).

Después de todas estas problemáticas, el césped artificial continuó su importante perfeccionamiento, buscando una superficie más blanda, más funcional y más segura para el futbolista, surgiendo a finales del siglo XX lo que se denomina **3ª generación** en el césped artificial al incluirse partículas de caucho triturado. Esta evolución permite que este tipo de pavimento vuelva a ser aceptado por la FIFA y posteriormente por la UEFA para la competición internacional (Burillo, 2009).

En el césped artificial de 3ª generación, el pelo alcanza de 50 a 70 mm de largo, tienen una menor densidad de puntadas y el relleno, en lugar de solo arena, va complementado con caucho (SBR: caucho estireno butadieno; EPDM: Etileno Propileno Dieno tipo M; TPE: elastómeros termoplásticos; relleno natural de fibra de coco, etc.). La abrasión se ve reducida por la utilización de polietilenos lubricados (PE) en lugar de polipropileno. Estos suelos tienen una mejor capacidad de absorción de impactos que las generaciones anteriores, son

más parecidos en su comportamiento a una buena hierba natural y pueden ser utilizados con los clásicos calzados con tacos de goma a los que están acostumbrados los futbolistas (Figura 1.4).

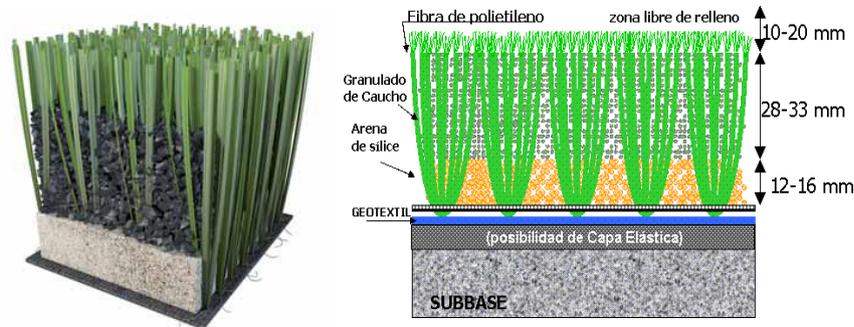


Figura 1.4. Césped artificial de 3ª generación

Ha sido la 3ª generación la que ha logrado superar parte de las barreras técnicas y de funcionalidad deportiva. Es en este tipo de pavimentos donde se igualan las prestaciones del césped natural, desapareciendo los inconvenientes derivados de las generaciones anteriores (Meyers, 2010; Meyers & Barnhill, 2004). En este sentido, la Organización Europea de Césped Artificial (ESTO, 2008) pronostica que sólo en Europa, desde el año 2000, el número de campos instalados cada año ha aumentado de 200 a más de 4500 gracias a esta mejora cualitativa.

En su último estudio, ESTO (2012) señala al incremento de las horas de uso, los ingresos adicionales generados con un buen plan de negocio, el ahorro de costes y los beneficios estratégicos del césped artificial como los principales motivos de su implantación masiva en el fútbol europeo. Estos fundamentos adquieren una mayor importancia entre los países caracterizados por unas condiciones climatológicas adversas y mayores recursos económicos para acometer la inversión inicial de este tipo de pavimentos (Figura 1.5).

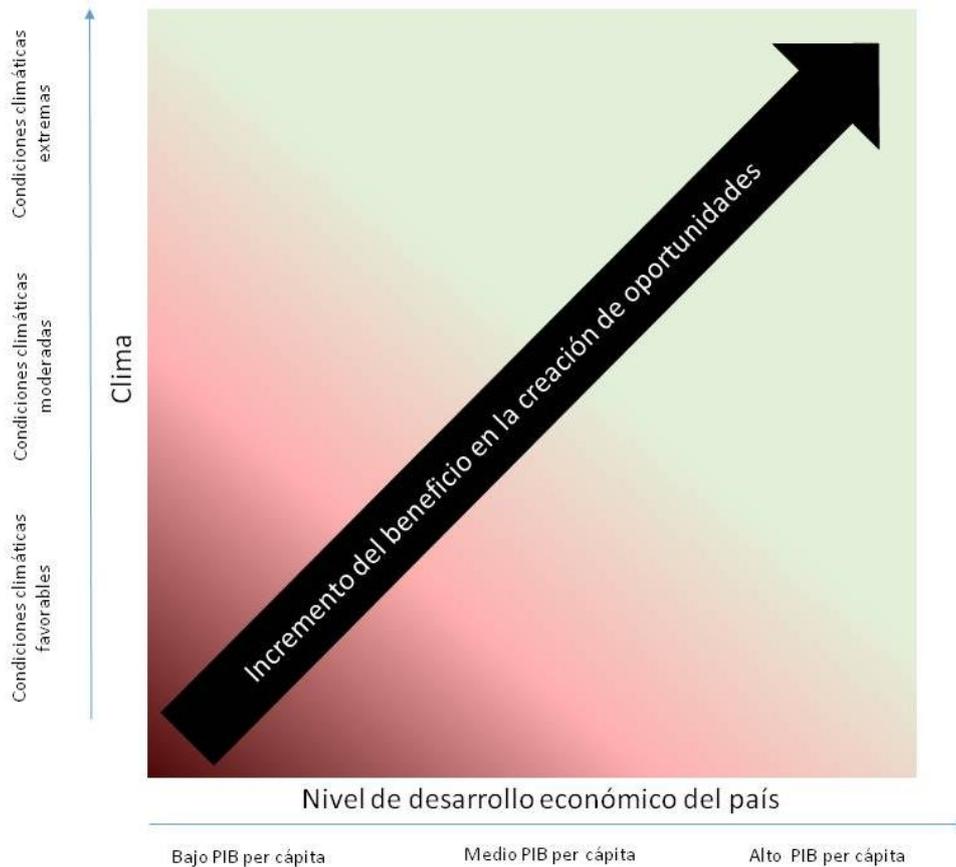


Figura 1.5. Oportunidades de generación de beneficios adicionales con la implantación de una superficie de césped artificial (ESTO, 2012)

A pesar de ello, la elevada temperatura alcanzada por este tipo de pavimentos (Petross, Twomey, & Harvey, 2014; Serensits, McNitt, & Petrunak, 2011), 20°C superior al césped natural, y la percepción negativa de los usuarios con respecto al césped natural (Andersson et al., 2008) constituyen los puntos débiles de las superficies artificiales en la actualidad. No obstante, esta última limitación parece revertirse con las mejoras cualitativas, la creciente implantación y una mayor familiarización con los campos de fútbol de césped artificial desde edades tempranas (Burillo, L. Gallardo, Felipe, & Gallardo, 2014; Hughes et al., 2013; Nédélec et al., 2013; Zanetti, 2009).

Por estos motivos, las generaciones posteriores, tratarán de mejorar las prestaciones de la hierba natural. En los últimos años han existido algunas iniciativas de mezclar el césped artificial con el terreno natural, como la llevada

a cabo sobre el estadio Santiago Bernabéu en 2002. Sin embargo esta solución no ha dado grandes resultados y fue retirado años más tarde (Burillo, 2009).

A día de hoy, todavía no existe el sistema de césped artificial de **4ª generación**. No obstante, se ha avanzado mucho en la evolución del sistema anterior. Las más modernas instalaciones de césped artificial están combinando los distintos tipos de fibras y mezclando los rellenos de caucho y arena, que provocan una mayor estabilidad, elasticidad, restitución de energía y mejoran la recuperación del aplastamiento, conocido como efecto memoria de la fibra (Burillo et al., 2010). Esta mezcla de rellenos de caucho y arena, se ha definido como la 4ª generación de pavimentos artificiales en recientes revisiones sobre la incidencia de lesiones sobre el césped artificial en comparación con el césped natural (William et al., 2011).

Del mismo modo, diferentes longitudes y morfología de fibra para mejorar sus resiliencia, junto con una estrecha separación de las mismas conforman las características de los productos que se comercializan como 4ª generación (Fleming, 2011a). Sin embargo, aún no existen evidencias que certifiquen un salto cualitativo de este tipo de pavimentos, por lo que resulta inconsistente hablar de la 4ª generación del césped artificial. Aun así, los recientes desarrollos tecnológicos sobre los sistemas de césped artificial focalizados en la capa elástica, el relleno y las fibras pretenden aportar la solución a las limitaciones del pavimento artificial. Fibras y rellenos que absorben e irradian menos calor o una amplia gama de longitudes, número, morfología, textura o densidad de las fibras para complementar las capacidades de fricción y durabilidad son algunas de las mejoras que pueden acontecer un cambio generacional en las superficies artificiales (Fleming, 2011a).

1.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN: COMPONENTES ESTRUCTURALES

Dentro de la 3ª Generación del césped artificial existe una gran diversidad de componentes estructurales (Figura 1.6) y de posibles combinaciones de los mismos que dan lugar a diferentes sistemas de pavimentos artificiales en el fútbol. En este estudio se compararán estructuras diferentes, por lo que resulta necesario conocer las características de cada componente constructivo implicado en las mismas.

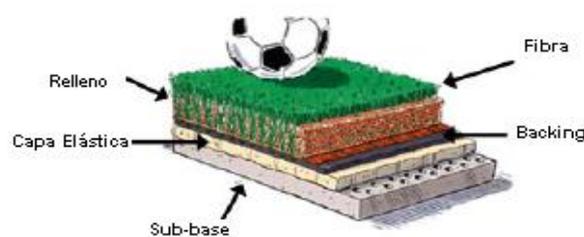


Figura 1.6. Representación esquemática de una estructura de césped artificial (Allgeuer, Torres, Bensason, Chang, & Martin, 2008)

1.2.1. *Sub-base*

Este componente conforma junto con la capa elástica la estructura de soporte de los campos de fútbol de césped artificial. Está localizado en la parte inferior del soporte base (backing) del césped artificial o de la capa elástica en caso de que el pavimento disponga de ella. Según Delaney (2009), esta sub-base puede ser de asfalto, macadán compactado (material de construcción que está constituido por un conjunto de áridos; Figura 1.7) o gravas compactadas (terreno natural). Este componente debe garantizar los requerimientos de estabilidad, soporte de carga, resistencia al hielo, planimetría y drenaje del pavimento.



Figura 1.7. Construcción de sub-base de macadán (Delaney, 2009)

La sub-base de asfalto incorpora dos capas de aglomerado asfáltico con un grosor de unos 7 cm (4+3) que se extiende hasta los 20-25 cm en el caso de una sub-base natural (Figura 1.8). En la actualidad, aparecen algunos tipos de sub-bases impermeables que incorporan geodrén para mejorar la captación y evacuación de los fluidos, aunque esta tipología de diseño no goza de una implantación significativa en España, como puede extrapolarse de los últimos estudios (Muntañola, 2013).

Según este autor, el 75 % de los campos de fútbol de césped artificial disponen de una sub-base asfáltica, seguido de un 15 % de pavimentos que incorporan una sub-base natural y un 7 % con sub-base impermeable con geodrén. El 3 % restante lo conforman superficies con prototipos experimentales de sub-base cuyas prestaciones son desconocidas. Sin embargo, los avances en la construcción y diseño de los campos de fútbol de césped artificial están provocando que las sub-bases de asfalto pierdan protagonismo en favor de las sub-bases naturales o impermeables.

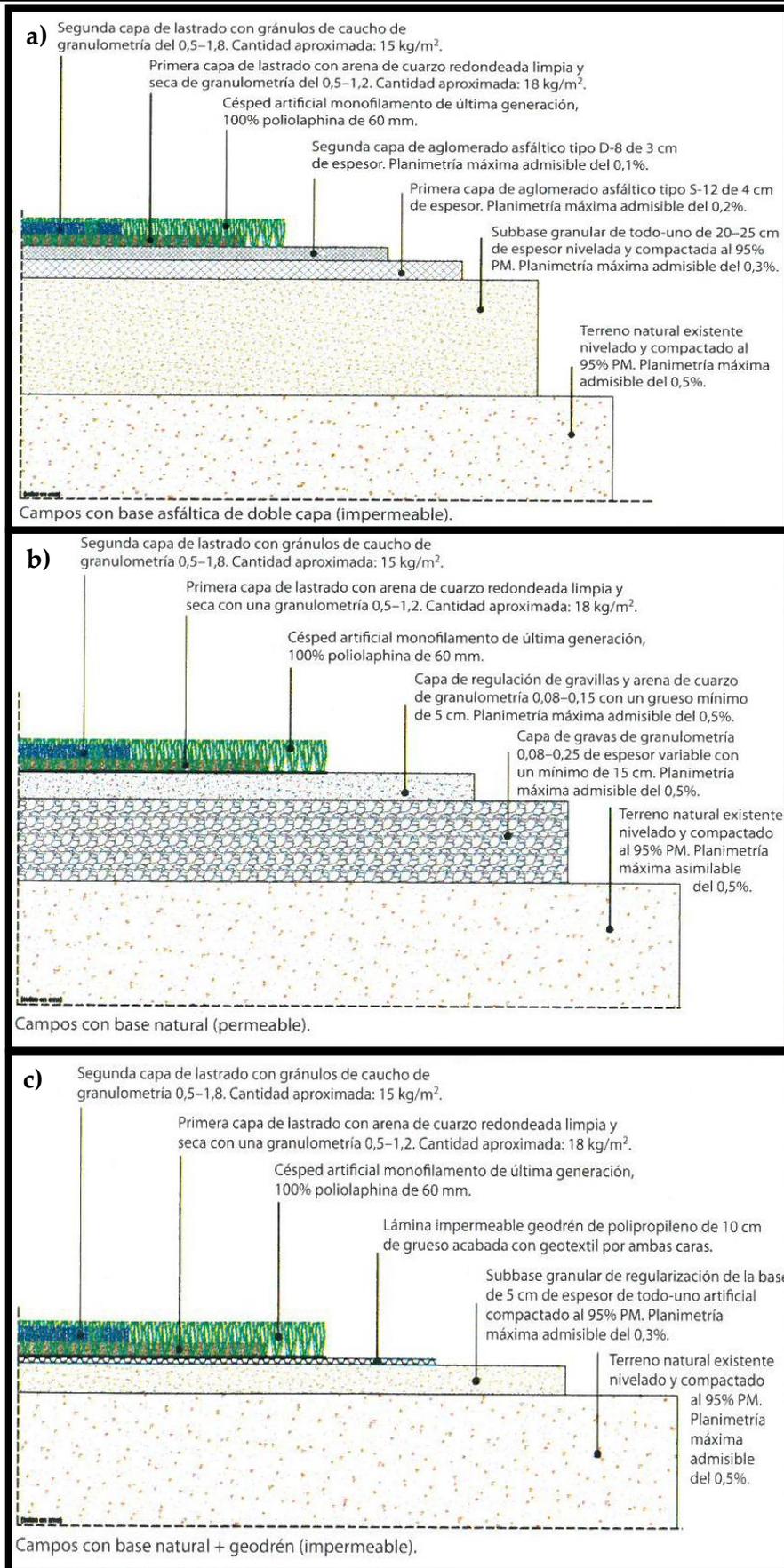


Figura 1.8. Diferentes sistemas de soporte de los campos de fútbol de césped artificial; Asfáltica(a), natural (b) y natural con geodrén (c) (Muntañola, 2013)

La sub-base debe proporcionar una plataforma estable y de buen drenaje sobre la que se ubica la superficie de césped artificial. Además, debe soportar y transmitir las cargas que se producen sobre la superficie durante el uso normal y el mantenimiento (Delaney, 2009).

Cualquier problema sobre este elemento provocaría un efecto perjudicial sobre la superficie afectando a las características del juego y llegando a aparecer irregularidades en forma de ondulaciones sobre el pavimento, lo que ocasionaría una disminución en la estabilidad de los jugadores y un mayor riesgo de lesión. Además, el drenaje del campo sería muy deficiente puesto que este elemento desempeña una función muy importante en este sentido (Delaney, 2009).

La función de drenaje está asociada a la evacuación de las aguas del pavimento, evitando la aparición de charcos y garantizando unas condiciones óptimas de funcionalidad. Una sub-base asfáltica o con lámina de geodrén impermeables) requiere de un drenaje horizontal o de superficie, mientras que en una sub-base natural (permeable) el drenaje es vertical o profundo. En el primer caso, el agua se transportará por debajo del césped y por encima de la lámina de geodrén o asfalto hasta canaletas perimetrales. En el drenaje vertical, las aguas son vaciadas a través de zanjas de drenaje conectadas a la red general de evacuación (Figura 1.9). Este sistema de drenaje se consigue a través de un entramado de pendientes que oscilan entre el 0.60 % y el 0.85 %, con un desnivel aproximado entre de 20-25 cm entre el eje longitudinal y los laterales (Muntañola, 2013).

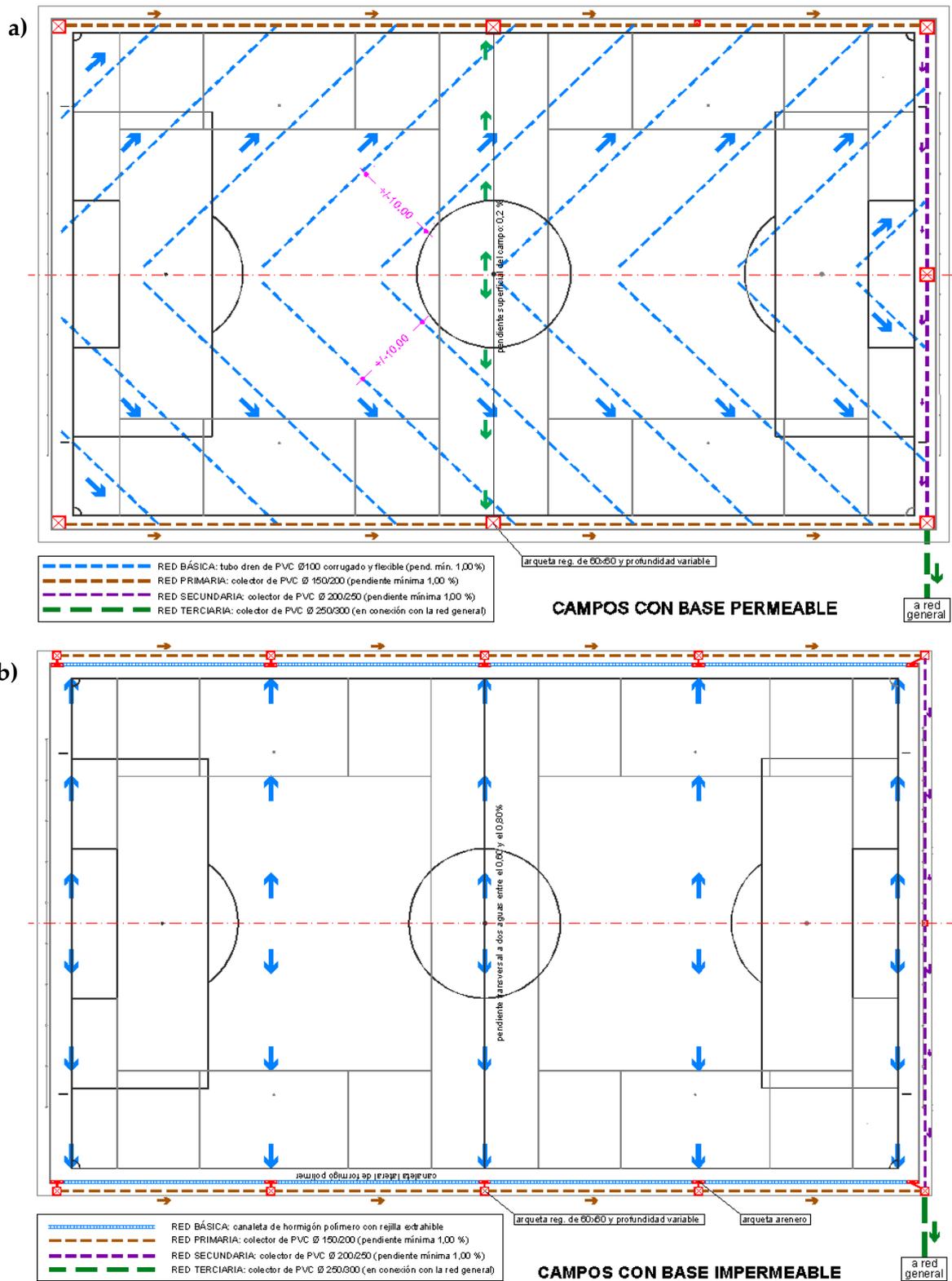


Figura 1.9. Sistemas de drenaje en campos de césped artificial con sub-base permeable (a) e impermeable (b) (Muntañola, 2014)

El tipo de sub-base seleccionada constituye un factor determinante en la funcionalidad del pavimento. Recientes estudios han evidenciado una influencia significativa sobre las cargas verticales (absorción de impactos, deformación vertical y energía de restitución) y un efecto limitado sobre los procesos horizontales en la mecánica del pavimento (Fleming, 2011a; McLaren, Fleming, & Forrester, 2012; Severn, Fleming, & Dixon, 2010; Villwock, Meyer, Powell, Fouty, & Haut, 2009a, 2009b). Por ello, la elección, diseño y construcción de este componente de soporte aportará información sobre la vida útil y funcionalidad del pavimento de césped artificial.

1.2.2. *Capa elástica o PAD*

De manera opcional se instala bajo la moqueta una capa elástica, con la intención de mantener las propiedades de rigidez y amortiguación a lo largo del tiempo de uso y evitar que disminuyan mucho debido a la compactación del relleno. Esta capa puede estar formada por mezcla de cauchos y ligantes, PVC, látex o poliuretano espumado. Un aspecto a tener en cuenta es que el material utilizado sea resistente al agua y drenante, ya que la mayoría de estos campos se instalará al aire libre. Este elemento también contribuye a mantener las propiedades dinámicas (rebote vertical, absorción de impactos y deformación vertical) de la superficie de juego (Delaney, 2009).

Allgeuer et al. (2008) concluyen que una capa elástica bien diseñada ayudará a mantener un rendimiento uniforme en toda la superficie de césped artificial, dejando sin efecto las variaciones en la altura del relleno ocasionadas por la práctica deportiva.

Por otra parte, Párraga y Sánchez (2002) formulan una serie de ventajas e inconvenientes que conlleva la instalación de la capa elástica en los campos de césped artificial de última generación (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Ventajas e inconvenientes de la instalación de la capa elástica (Párraga & Sánchez, 2002)

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Se pueden corregir los posibles errores de planimetría del asfalto	No supone una mejora en la calidad del juego
Puede ser un elemento que garantice una mayor vida al equipamiento. Contrarrestando la pérdida de elasticidad por la degradación de la fibra	Supone un mayor coste inicial. Esta inversión puede dedicarse a otros elementos que mejoran la calidad de forma más significativa
En caso de reposición del producto sólo hay que quitar y poner la alfombra	Al aumentar el grado de elasticidad del terreno lo hace más lento, dificulta los desplazamientos de los jugadores aumentando la intensidad de los esfuerzos. Se parece menos a las sensaciones del césped natural
En algunos casos puede suponer la supresión de la capa de asfalto	

1.2.3. *Backing*

El backing o Soporte base es fundamental para lograr una mayor consistencia y duración al tejido. Supone la base de lastre, por lo que adquiere una gran importancia su peso, composición y resistencia. El backing está constituido por una o dos capas de polipropileno (PP) que pueden estabilizarse con poliéster o fibra de vidrio. Debe estar perforado para garantizar el drenaje del campo. La rigidez y espesor deben facilitar la acción de enrollar la moqueta para su transporte, pero a la vez debe ser resistente. Esta resistencia viene determinada por el número de hilos empleados en la construcción (Rosa, Sanchís, Alcántara, & Zamora, 2008).

1.2.4. *Caucho*

Puede que se trate del elemento más importante de los campos de césped artificial y el que marcó el inicio de la 3ª generación de pavimentos artificiales. Para algunos autores como Catón (2008), el granulado de caucho es el corazón del sistema de césped artificial.

Este material ha cambiado las respuestas de los parámetros dinámicos, obteniéndose unos parámetros excelentes en comparación con los campos sin lastre de caucho, las principales mejoras se pueden observar en la relación de la absorción de impacto-deformación vertical, el retorno de la energía, la capacidad de tracción, el bote, la rodadura del balón y la uniformidad del terreno (Burillo et al., 2010). Por otro lado, la abrasión de la piel se ve en parte disminuida debido a la arena de sílice, reduciendo por tanto uno de los principales problemas de los campos de fútbol de césped artificial. Además, es importante mencionar que la cantidad de caucho sobre la superficie afectará a las propiedades mecánicas de los pavimentos (Burillo, 2009).

Existen diferentes tipos de granulado de caucho según sus características (Barreales, 2007):

❖ Reciclados:

- **Caucho SBR** (Estireno Butadieno Rubber), procedente de neumáticos fuera de uso (Figura 1.9). Es el caucho más utilizado en los campos de fútbol (instalado en el 90 % de los pavimentos de todo el mundo) (Notigras, 2007, julio). Entre sus ventajas podemos destacar unas buenas propiedades mecánicas, una mejora en la elasticidad del sistema, gran resistencia a UV y al ozono, respetuoso con el medioambiente, termoestable, un precio competitivo y muy seguro para el usuario. Por otra parte, algunos de sus inconvenientes son la imposibilidad de variar su formulación (material reciclado), su color negro que reduce el parecido con respecto al césped natural, el alto consumo de agua que requiere o una pisada inestable del jugador de fútbol (Ortiz, 2009). En la actualidad, la aparición de caucho SBR revestido ha demostrado una reducción de la temperatura de hasta 20°C. Sin embargo, la escasa consistencia de esta mejora y el elevado

coste de este tipo de relleno han propiciado una reducida implantación en los pavimentos artificiales.

❖ Vírgenes:

- **Caucho EPDM**, vulcanizado con peróxido, es menos común, pero tiene una mayor resistencia a la intemperie, es de color verde, muy resistente a UV y al ozono, es posible variar su formulación y también es muy respetuoso con el medioambiente, sin embargo, posee bajas propiedades mecánicas, dispone de una densidad elevada, tiene un aroma muy fuerte y un precio elevado.
- **Caucho Termoplástico (Figura 1.10)**, a base de polietileno u otros polímeros no contaminantes, presenta las mismas ventajas e inconvenientes que el caucho EPDM.



Figura 1.10. Caucho SBR (izquierda) y Termoplástico (derecha) (Delaney, 2009)

Actualmente, también se utilizan rellenos de origen natural que compiten con los rellenos artificiales ofreciendo grandes prestaciones, aunque a día de hoy, el coste de este tipo de rellenos es elevado y de baja implantación (Ortiz, 2009). Estos rellenos orgánicos simulan las propiedades de la tierra natural y disminuyen la temperatura del pavimento (Cadile, 2012). Además, no incorporan ningún material tóxico y garantizan un impacto medioambiental favorable debido a su posibilidad de reciclaje. Las limitaciones de esta tipología de relleno están asociadas a la fragilidad del material orgánico, la atracción de insectos y la compactación de este componente con el paso del tiempo. Esta

situación desemboca en una reducida vida útil del sistema de relleno y una escasa implantación entre los campos de fútbol de césped artificial (Lavorgna et al., 2011). Entre las tipologías de relleno orgánico cabe destacar (Figura 1.11):

- **Corcho:** Es el relleno orgánico más utilizado, muestra una gran funcionalidad deportiva y reduce la temperatura del pavimento en comparación a los rellenos inorgánicos. El principal inconveniente radica en su permeabilidad y posterior compactación con el exceso de agua.
- **Fibra de coco y cáscara de nuez:** Este tipo de relleno natural no garantiza una óptima funcionalidad deportiva. Asimismo, dispone de una gran capacidad de absorción de agua que deriva en un elevado riesgo de pérdida de relleno durante la lluvia y una mayor rigidez tras el secado de las fibras. La principal ventaja radica en una disminución de la temperatura en contraste con los rellenos inorgánicos.



Figura 1.11. Relleno orgánico de corcho (izquierda) y fibra de coco con cáscara de nuez (derecha)

1.2.5. *Fibra*

En relación a la fibra a instalar en los campos de césped artificial, los aspectos a tener en cuenta según Burillo et al. (2010) son:

- **Durabilidad** de la fibra en términos de resistencia mecánica (debe ser capaz de soportar el desgaste provocado por el uso y el

mantenimiento), resistencia a los rayos UV (el sol fragiliza el material y degrada el color), al agua, al frío y al calor.

- **Forma de la fibra.** Anchura, grosor, fibrilación con la presencia de nervios para mejorar la resiliencia y el aplastamiento o la pérdida de verticalidad de la misma con el uso.
- **La abrasión** producida por la fibra en la piel de los usuarios cuando estos deslizan sobre ella.
- **La resiliencia** o capacidad de la fibra para recuperar su estado natural erguida, tras períodos de aplastamiento.

En la actualidad, la mayoría de campos de reciente construcción han implantado fibras de polietileno, con alturas que oscilan entre los 50 mm y los 60 mm. La fibra suele incorporar un tratamiento de lubricación mediante el cual se reduce el efecto abrasivo que acompaña a los productos sintéticos. Por lo general, toda la materia prima utilizada tiene una óptima resistencia al desgaste y la abrasión (Catón, 2008).

A pesar de la existencia de diferentes tipos de fibras para los campos deportivos (Párraga & Sánchez, 2002), las más predominantes son:

- **Rectas-Monofilamentos.** Se caracterizan por ser monofibras libres del proceso de fibrilación. Son fibras menos densas (Figura 1.12), por lo que necesitan de un mayor número de fibras por metro cuadrado, para que la sensación sea similar a la de la hierba natural. A priori, argumentan una mayor duración de las características iniciales del producto gracias a su mayor resistencia. El tratamiento con lubricantes reduce el riesgo de abrasión de la piel. Estas fibras ofrecen una gran calidad y son muy utilizadas actualmente en el fútbol. Suelen llevar un nervio



Figura 1.12. Fibra recta-monofilamento

central o en los extremos, que permiten a la fibra recuperar su posición inicial tras un aplastamiento (efecto memoria).

- **Rectas-fibriladas.** Se caracterizan por ser fibras de gran densidad y que, por el propio uso o mediante el cepillado de las mismas, se fibrilan en múltiples partes o miofibrillas por su parte superior, haciendo que las características del césped se aproximen mucho a la hierba natural. Este tratamiento consiste en un corte seccionado longitudinal que la transforma en una tupida malla que construye un mayor entramado textil (Figura 1.13). Una excesiva fibrilación acelera el proceso de envejecimiento del pavimento, por lo que las ventajas relacionadas con una mayor semejanza al césped natural se ven contrarrestadas con la desfibrilación prematura a largo plazo.



Figura 1.13. Fibra recta-fibrilada

Las diferentes combinaciones entre los elementos que se han detallado en este apartado conforman la estructura del campo de fútbol de césped artificial. Por lo tanto, se puede afirmar que existen tantas tipologías de pavimentos como combinaciones posibles entra todos los componentes estructurales existentes en la actualidad.

1.3. DETERMINANTES DE LA VIDA ÚTIL

Antes de profundizar en los factores que determinan la vida útil de un campo de fútbol de césped artificial, es importante conocer en qué momento decimos que un pavimento artificial finaliza su ciclo de vida. Una de las consecuencias del desgaste de la superficie es la pérdida de la altura de la fibra, en base a esta reducción, es necesario reducir la capa de caucho con el fin de que la longitud de fibra que sobresale del relleno sea la adecuada para darle una apariencia al campo lo más parecida posible al césped natural (Figura 1.14).

En este sentido, la función de la capa de caucho es amortiguar los impactos que se producen durante la práctica deportiva. Debido a que el desgaste de la fibra conlleva la disminución del espesor de la capa de caucho, llegará un momento en el que dicha capa no cumplirá su función y el pavimento habrá llegado al final de su vida útil (Rosa, Sanchís, & Alcántara, 2006).

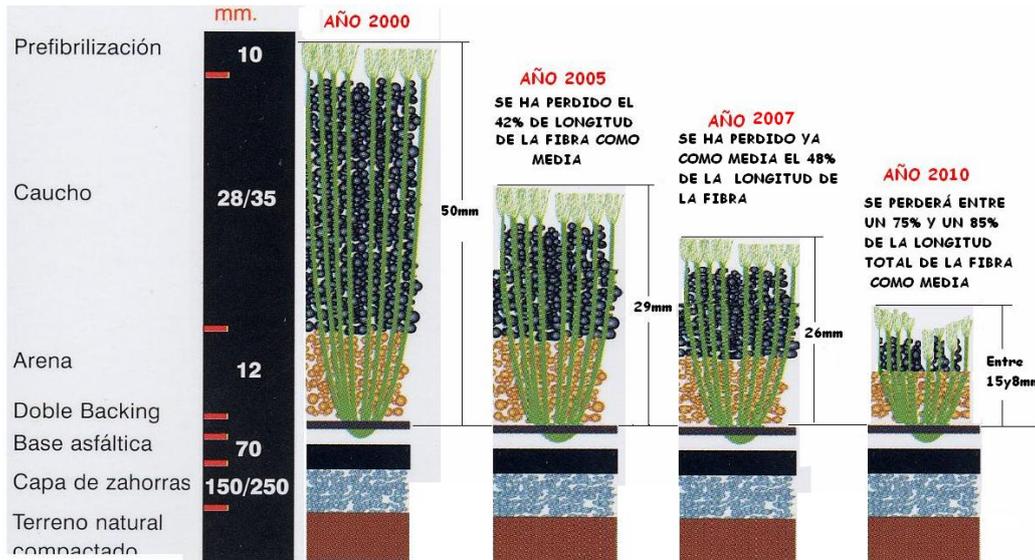


Figura 1.14. Pérdida de longitud de fibra con el paso de los años (Franco, 2008)

Una vez conocido este aspecto, para tratar de maximizar la vida útil de un pavimento artificial, es muy importante conocer todos los factores que influyen en su degradación, con el objetivo de minimizar el deterioro de la superficie con el paso del tiempo. McLaren et al. (2012) establecen un modelo de desgaste basado en los factores y mecanismos de degradación y sus efectos sobre los componentes estructurales y el sistema de césped artificial (Figura 1.15). Entre los efectos que presagian el deterioro del sistema se encuentran la permeabilidad o retención de agua ocasionada por una disminución del espacio libre en las capas de relleno de la superficie como consecuencia de la acumulación de detritus y la compactación de los gránulos de esta capa, que confluye igualmente en un aumento de la dureza de la superficie. A su vez, los mecanismos de desgaste disminuyen la resistencia a la flexión de las fibras (Schoukens, 2009) y con ello, reducen la fricción del pavimento, generando una

superficie mas resbaladiza. Por último, la fibrilación, fractura y pérdida de fibra acaba con la funcionalidad y el ciclo de vida del pavimento. Estos efectos pueden verse agravados por las condiciones climatológicas a las que se ve sometido el campo de césped artificial (McLaren et al., 2012).

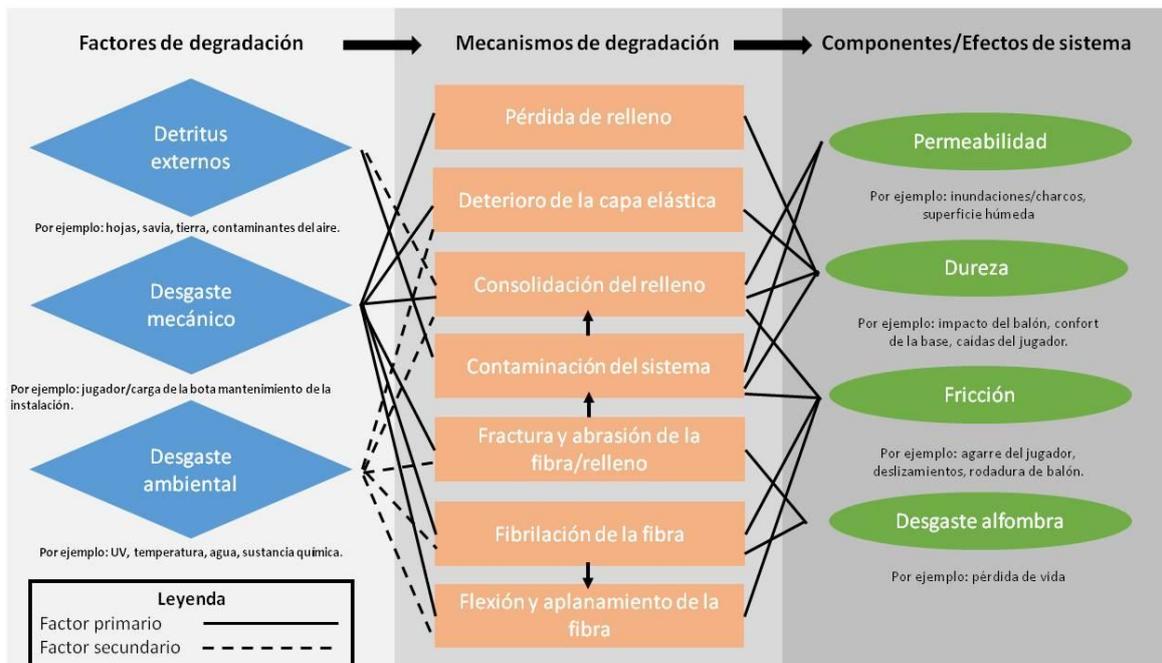


Figura 1.15. Modelo de degradación de los campos de fútbol de césped artificial (McLaren et al., 2012)

En el apartado anterior, se ha podido comprobar cómo los componentes estructurales y la combinación de los mismos son un factor clave en la durabilidad del pavimento, por lo que un diseño adecuado puede suponer un incremento en los años de vida del césped artificial (Muntañola, 2013; Párraga & Sánchez, 2002). El final de la vida útil del pavimento exige la sustitución o retirada de la alfombra, pero no todos los componentes del sistema de césped artificial presentan la misma durabilidad. De hecho, Fleming (2011a) fija en al menos 25 años la vida útil de la estructura de soporte de la superficie, 5-10 años de vida para la estructura superficial en los sistemas de tercera generación y el doble para la capa elástica, recalcando además, la incidencia de la calidad del producto y la instalación sobre la longevidad de los componentes.

Finalmente, dentro del compendio de factores, mecanismos y efectos sobre el ciclo de vida de los pavimentos artificiales, la mayor parte de las investigaciones han focalizado su interés en los procesos de explotación y mantenimiento (Burillo et al., 2012; James & McLeod, 2010). Estas variables han sido calificadas como los principales agentes de la determinación de la vida útil de la superficie deportiva.

1.3.1. Explotación

Una de las ventajas que ofrece el césped artificial sobre la hierba natural es un incremento de la intensidad de uso por unidad de área (James & McLeod, 2010). ESTO (2012) promedia un uso de los campos de fútbol de césped artificial entre las 20 y 40 horas semanales, durante 300 días al año en Europa, en contraste con el rango de 5-10 horas durante 30-70 días encontrado en los campos de césped natural. Sin embargo, una sobreexplotación del pavimento puede derivar en un deterioro prematuro de la superficie. Según Burillo (2009), un uso de más de 35 horas/semana reduce significativamente las propiedades mecánicas y la vida útil del pavimento, por lo tanto, cuanto mayor sea la utilización del pavimento menor será su durabilidad (Figura 1.16). De hecho, un uso superior a las 60 horas semanales ha sido asociado a una vida útil inferior a los 5 años, en contraste con los 9 años alcanzados con una explotación aproximada de 40 horas a la semana (Young, 2009).

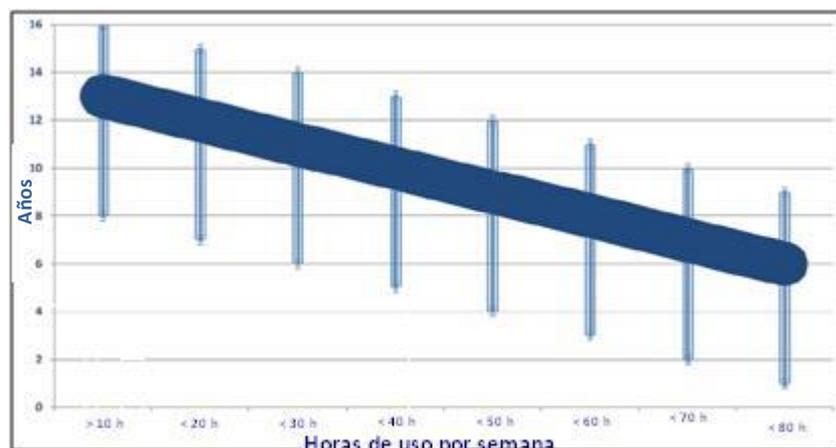


Figura 1.16.

Relación entre las horas/semana de uso y la vida útil del césped artificial (Young, 2009)

Las propiedades de los pavimentos de césped artificial cambian con el tiempo debido a la degradación mecánica y química (Severn, Fleming, Young, & James, 2007). Para Alcántara, Gámez, Rosa, y Sanchís (2009) una de las causas principales de este desgaste mecánico es el uso exhaustivo que da lugar a una compactación del relleno y a la escisión y rotura de las fibras (Figura 1.17). De forma detallada, los impactos repetidos rompen el material de relleno reduciendo el tamaño de las partículas del sistema.

Este hecho genera una disminución del espacio libre y una compactación del relleno. Además, la interacción superficie-jugador provoca una pérdida de material de relleno e incluso de fibras completas. Por último, ese uso intensivo puede repercutir en una deformación y deterioro permanente de la capa elástica (Burillo et al., 2012; Kieft, 2009; McLaren et al., 2012).



Figura 1.17. Degradación de la fibra tras su instalación ocasionado por el uso (Abbott, 2007)

1.3.2. *Mantenimiento*

Al igual que el uso intensivo, el mantenimiento del pavimento adquiere un papel fundamental en la vida útil de los campos de fútbol de césped artificial. Si se parte de la base de que la mayor parte de los pavimentos artificiales se utilizan de manera similar, la principal diferencia que origina oscilaciones en la vida útil entre pavimentos es el mantenimiento (Figura 1.18).

PROPIEDADES MECÁNICAS

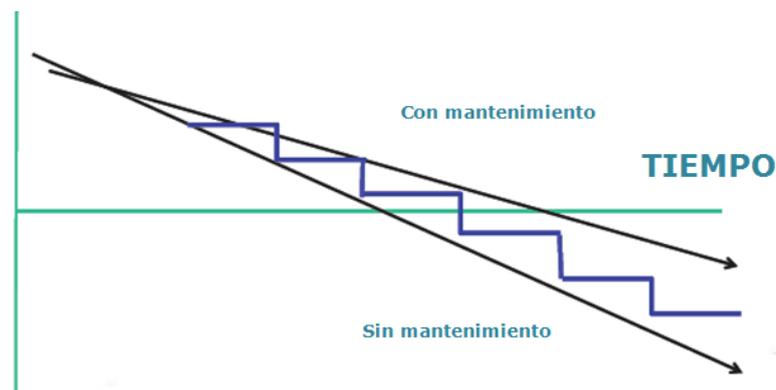


Figura 1.18. Efecto del mantenimiento sobre las propiedades mecánicas y la vida útil en los campos de césped artificial (Fleming, 2011b)

Un campo de fútbol con un correcto mantenimiento puede sobrepasar los quince años de vida, lo que significa unas 55.000 horas útiles. Se ha dado el caso de campos con 6 años ya impracticables, que no han pasado de 18.000 horas de vida útil. Está claro que proteger la inversión con un mantenimiento específico nos lleva a triplicar su vida útil (Burillo et al., 2010).

A pesar que en muchas ocasiones un menor mantenimiento en el césped artificial es considerado como una ventaja frente a la hierba natural, no se debe descuidar esta función. James y Mcleod (2008) estiman que el nivel ideal es de una hora de mantenimiento por cada diez horas de uso.

Un mantenimiento correcto origina que la longitud de la fibra pisada por los jugadores durante la práctica deportiva sea menor (por lo que se retrasa el desgaste) y permite que los campos de fútbol de césped artificial mantengan las propiedades mecánicas garantizando la seguridad de los jugadores (Fleming, 2011a, 2011b; James & McLeod 2008, 2010).

Se pueden diferenciar dos tipos de mantenimiento, por un lado el preventivo y por otro el específico o especial. En este sentido, el mantenimiento de un campo de césped artificial estará compuesto por las siguientes acciones (Burillo et al. 2010; Campaña, 2007; Franco, 2008):

❖ Mantenimiento Preventivo:

- Inspección diaria del campo: para detectar cualquier anomalía o elementos contaminantes sobre el pavimento artificial.
- Limpieza diaria de la superficie (cada 3 o 4 días): dependerá en gran parte del uso de la instalación y se puede realizar manualmente o con la ayuda de maquinaria (Figura 1.19). Lo más importante de esta limpieza rutinaria es dejar totalmente libre de contaminación la superficie y debe centrarse en vaciado de papeleras, rejillas del desagüe totalmente limpias, recogida de hojas, restos de fibra, cáscaras de pipas, papeles, y otros elementos (Venegas, 2010).
- Reparación de pequeños desperfectos surgidos como consecuencia del uso del pavimento.
- Cepillado de la superficie para mantener vertical el césped: Con el uso, las fibras del césped artificial se van tumbando y apelmazando, esto genera una pérdida de elasticidad unida a una disminución del rozamiento superficial, lo que ocasiona que el balón ruede o bote más rápido así como, un envejecimiento prematuro de la propia fibra que al estar más tiempo en contacto con la arena se desfibrila con mayor rapidez. Para evitar esta situación perjudicial se recomienda cepillar las fibras para mantenerlas verticales. Esta operación, además está dedicada a redistribuir la carga que con el uso se va acumulando en unas zonas más que en otras. Según Fleming (2011b) se deben utilizar diferentes cepillos en función del relleno y el tipo de fibra (Figura 1.20).



Figura 1.19. Sistema de limpieza del pavimento



Figura 1.20. Diferentes sistemas de cepillado

- Riego: Al no tratarse de un ser vivo, solo es requerido momentos antes del inicio de la práctica deportiva con el objetivo de limpiar la superficie, humedecerla para el juego y reducir la temperatura.
- ❖ Mantenimiento específico o especial (1 ó 2 veces al año)

- Descompactación y aireación del terreno: se requiere una máquina específica para tratar el caucho y la arena, aireándolo y evitando su compactación (Figura 1.21).



Figura 1.21. Máquina de descompactación

- Redistribución del relleno: Se trata de evitar un exceso o defecto del relleno en determinadas zonas del pavimento, para ello se emplean los medios necesarios para conseguir una distribución uniforme en todo el campo de césped artificial.
- Aporte de relleno y material elástico: Con el tiempo se produce una pérdida de material de relleno que es preciso reponer para mantener las propiedades de la superficie de juego.
- Conservación y reparación del césped.

Según Burillo et al. (2010), la ejecución correcta de todas estas tareas de mantenimiento, incrementará la vida útil de los campos de césped artificial, además de mejorar la calidad del juego, reducir el número de lesiones, aumentar la higiene de los pavimentos y abaratar los costes de reparación.

La magnitud y el coste global por año asociado a esta labor debería ser similar al acometido sobre el césped artificial, la ventaja reside en la reducción de ese coste a cada hora de uso. En este sentido, el coste relativo de mantener un campo de césped artificial es muy inferior al asociado a una superficie de hierba natural (Fleming, 2011b). La Tabla 1.2 muestra el elevado número de horas potenciales de uso por año de las tres generaciones de pavimentos de césped artificial en comparación a una superficie de césped natural. Del mismo modo, se aprecia una gran diferencia entre pavimentos al reducir los costes iniciales, de mantenimiento y de reparación a un índice relativo por hora de uso (Phillips, 2004; Young 2009).

Tabla 1.2. Coste total por hora de uso de las diferentes generaciones de césped artificial y de los pavimentos de hierba natural (Phillips, 2004)

	1 ^º Generación	2 ^º Generación	3 ^º Generación	Césped natural
Media estimada de uso (horas por año)	2000	2220	2220	150
Coste por hora (€)	62	52	35	262

CAPÍTULO II.

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y REGULACIÓN NORMATIVA DEL CÉSPED ARTIFICIAL

2.1. EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN DEPORTIVA

La función deportiva de un campo de césped artificial incluye todas aquellas propiedades que posibilitan una reducción en el riesgo de sufrir una lesión durante la práctica deportiva. Así como la capacidad de facilitar un buen rendimiento del deportista en términos de marcación o vistosidad de juego y un correcto comportamiento tanto en el bote como en la rodadura de balón (Rosa et al., 2008).

Dentro del análisis de la función deportiva, podemos distinguir los aspectos resultantes de la interacción superficie-jugador (más relacionados con la seguridad de los jugadores) y los que determinan la interacción superficie-balón (más relacionados con la espectacularidad en el juego), en el caso de deportes como el fútbol (Burillo et al., 2010). En la actualidad, estas interacciones son evaluadas mediante dispositivos mecánicos que aportan información sobre las propiedades mecánicas. Recientes estudios señalan la necesidad de combinar estos parámetros con valoraciones directas sobre los jugadores para incrementar la validez en la interpretación de los resultados (Fleming & Forrester, 2014; Hughes et al., 2013; Nédélec et al., 2013).

A continuación, se explicarán cada uno de los ensayos que componen ambas interacciones y que constituyen las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial.

2.1.1. *Interacción del jugador con el pavimento de césped artificial*

La interacción del jugador con el pavimento da lugar a una serie de variables biomecánicas que son las que finalmente determinan el riesgo de lesión y el rendimiento durante el juego (Rosa et al., 2008). Por lo tanto, unos resultados negativos indicarían un alto riesgo de lesión, así como una reducción en la funcionalidad de la superficie de juego, afectando al rendimiento de los jugadores.

Los aspectos que se evalúan dentro de la función deportiva en relación a la interacción superficie-jugador según Burillo et al. (2010) son:

- **Amortiguación**, relacionada directamente con la capacidad de protección del usuario frente a los impactos propios de la carrera, saltos o caídas.
- **Deformación vertical** estándar y deformación máxima, se relaciona directamente con la disipación de energía de un impacto sobre el pavimento. La deformación en este tipo de superficies es punto elástica, es decir, solo se deforma la zona donde se aplica la carga y no en sus alrededores.
- **Retorno de energía (energía de restitución)**. Este parámetro relaciona la energía que le es aplicado al césped artificial con la energía devuelta por el mismo, lo que influye en el comportamiento elástico de la superficie al interactuar con el deportista.
- **Tracción rotacional**, propiedad que evalúa la facilidad o dificultad que supone para el deportista girar sobre su pie de apoyo, sin que el mismo deslice o quede bloqueado.
- **Tracción lineal** y de valor de deceleración de la frenada, relacionado con el gesto que realiza el deportista cuando frena con el pie deslizando sobre el pavimento.
- **Abrasión de la piel**. Relacionado con la lesión por quemadura de la piel de los usuarios cuando deslizan sobre la hierba.

Sin embargo, tanto la norma UNE-EN 15330-1:2014, como veremos en el siguiente punto, como la establecida por el máximo organismo regulador en el fútbol (FIFA, 2012) establecen prioridades en cuanto a la evaluación de la función deportiva de los campos de fútbol de césped artificial.

A continuación, se exponen las propiedades requeridas por las diferentes normativas mencionadas y que son objeto de la presente investigación en lo referente a la interacción superficie-jugador.

2.1.1.1. Absorción de Impactos

Según Rosa et al. (2007; 2008), la absorción de impactos es la capacidad de un material, sistema o mecanismo dado, de disminuir el efecto de las fuerzas de impacto por medio de la absorción y de la disipación de energía. La falta de absorción de impactos sobre un terreno de juego podría causar daño en cartílagos, dolor de espalda y diversas lesiones en general en acciones típicas del deportista como correr o saltar. Por el contrario, una excesiva absorción de impactos afectará al rendimiento deportivo en esta superficie.

Al andar, el talón es la parte del pie que primero entra en contacto con el suelo (conocido como golpe de talón) y las fuerzas de impacto resultantes inician una onda transitoria de impacto que posteriormente viaja a través del sistema músculo-esquelético hasta la cabeza (Figura 2.1). El exceso o defecto de la magnitud de estas ondas de impacto puede tener un efecto muy adverso. Las elevadas fuerzas de impacto pueden provocar una lesión en el jugador, mientras que, unas fuerzas de impacto muy bajas pueden disminuir la densidad mineral del hueso y llevar a una pérdida de estímulos del crecimiento óseo (Burillo et al., 2010).

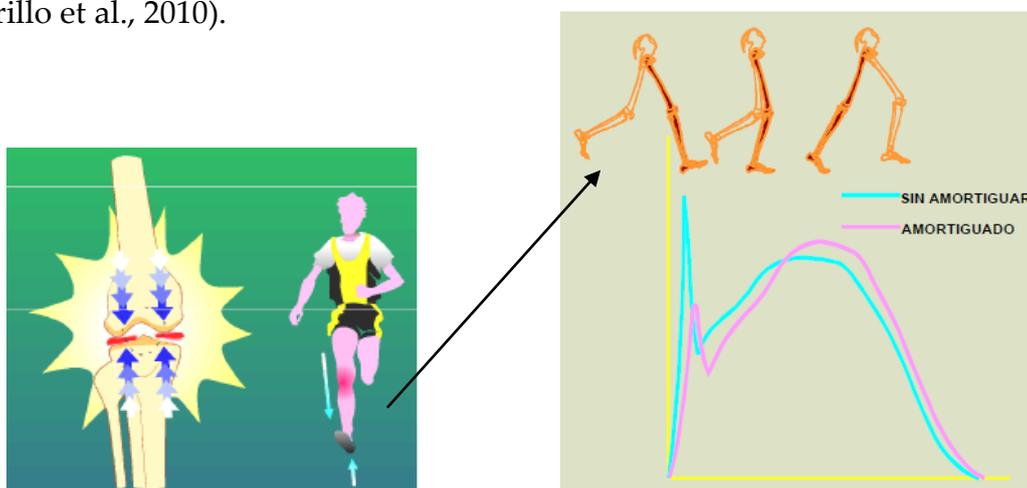


Figura 2.1. Influencia de la superficie sobre las fuerzas de impacto generadas durante la carrera (Rosa, 2009)

En este sentido, el césped artificial reduce las fuerzas transmitidas por el jugador después del impacto, por lo que la magnitud y la velocidad de la fuerza transmitida no son tan traumáticas como las generadas por una superficie rígida (Pérez-Soriano et al., 2009).

La necesidad de amortiguar golpes e impactos para evitar lesiones, parece ser inversamente proporcional al rendimiento deportivo, ya que un campo muy blando requerirá un mayor esfuerzo del deportista para continuar con el gesto una vez amortiguado. De los estudios realizados por McMahon y Greene (1979) y Bosco, Matteucci, y Locatelli (1985) se extrae que sería posible encontrar un óptimo nivel de amortiguación de impactos que no afectara a ninguno de estos aspectos, o lo que es lo mismo, establecer un nivel adecuado de absorción para evitar lesiones sin afectar al rendimiento deportivo. Sin embargo, ese grado óptimo varía en función de las características anatómicas y fisiológicas de los seres humanos.

El método empleado para evaluar la absorción de impactos del pavimento deportivo, simula el impacto que ejerce el talón del deportista sobre la superficie durante la carrera. Se realiza con un equipo de ensayo conocido como Triple A (Atleta Artificial Avanzado) (Figura 2.2). Para ello, se deja caer una masa determinada desde una altura conocida, utilizándose un muelle de rigidez controlada para simular el efecto amortiguador de las articulaciones de tobillo o rodilla, tal y como indica la Norma UNE-EN 14808:2006 para la determinación de la absorción de impactos.



Figura 2.2. Atleta Artificial Avanzado

Cuando esta masa impacta sobre el pavimento, se registra la fuerza máxima aplicada mediante la señal de una célula de carga, a partir de este valor

se calcula la reducción de fuerzas, tomando como fuerza máxima la obtenida en un pavimento de hormigón:

$$FR = \left(1 - \frac{F_{\max} \text{ pavimento}}{F_{\max} \text{ hormigón}} \right) \times 100$$

En definitiva, este parámetro es un indicador de la función protectora del campo de césped artificial puesto que recoge la capacidad del pavimento de absorber los impactos del jugador.

2.1.1.2. Deformación Vertical

La deformación de un pavimento deportivo hace referencia a cuanto se deforma el pavimento como consecuencia de una acción deportiva como puede ser el apoyo de un jugador durante la carrera. Este parámetro guarda relación con el aspecto biomecánico de la estabilidad. Alcántara (2007), lo define como el grado en el que un pavimento puede provocar pérdidas de equilibrio laterales en los deportistas, principalmente debido a un comportamiento inesperado.

La deformación del césped contribuye a amortiguar los impactos, sin embargo, puede afectar a la estabilidad en la carrera o el salto. La inestabilidad puede ocasionar movimientos articulares inesperados, produciendo lesiones, principalmente esguinces de tobillo. También puede afectar a la funcionalidad deportiva debido a irregularidades en el bote del balón (Burillo et al., 2010).

Para evaluar la deformación vertical se utiliza el mismo instrumento que para la absorción de impactos (Triple A), siguiendo en este caso la Norma UNE-EN 14809:2006/AC, en la cual se recogen las especificaciones para la determinación de este ensayo.

Se colocan sensores de desplazamiento sobre el pie de la máquina con el fin de medir el desplazamiento del mismo debido a la fuerza aplicada por la masa al dejarla caer. El parámetro de deformación vertical estándar (*StV*) se considera como un indicador de protección y confort y se calcula de la siguiente manera:

$$StV = \left(1500/F_{\max} \right) D_{\max}$$

Donde F_{\max} es el valor del pico de fuerza en Newton y D_{\max} es la deformación máxima registrada por los sensores de desplazamiento.

2.1.1.3. Tracción Rotacional

Para Rosa et al. (2008) esta propiedad está relacionada con el deslizamiento entre el calzado y el pavimento. El deportista necesita un agarre mínimo para evitar caídas y poder realizar los gestos deportivos, y al mismo tiempo, no debe ser excesivo para evitar bloqueos del pie que podrían desembocar en lesiones.

El ensayo de tracción rotacional simula la acción de un deportista cuando realiza un cambio de dirección con un giro. Este ensayo permite conocer el par torsor necesario para hacer deslizar un disco de un peso determinado en contacto con el terreno a través de una superficie con tacos (Figura 2.3). El procedimiento de ensayo, en el presente trabajo, sigue lo indicado en la Norma UNE-EN 15301-1:2007. Para campos de fútbol de césped artificial se utiliza un peso de 46 kg que se deja caer desde una altura que puede oscilar entre los 5 y 7 cm de forma que los tacos se claven en el suelo. En ese momento, se hace girar la herramienta sin presionar hasta que cede el suelo. El parámetro que se mide

es la máxima resistencia a tracción rotacional del terreno (Newton metro), o lo que es lo mismo, la resistencia al giro.



Figura 2.3. Equipo de ensayo de Tracción Rotacional

2.1.2. *Interacción del balón con el pavimento de césped artificial*

La fricción entre el balón y la superficie es la responsable de cambios en la velocidad, dirección y efecto del balón una vez que entra en contacto con la superficie (Pérez-Soriano et al., 2009).

Es importante destacar que el jugador espera una respuesta del balón cuando éste contacta con la superficie, si esta respuesta no es la adecuada, además de afectar a la calidad del juego, puede provocar lesiones por la realización de movimientos de corrección (Rosa et al., 2008).

Los aspectos que se evalúan dentro de la función deportiva son (Burillo et al., 2010):

- Rodadura del balón, permite evaluar la distancia a la que llega un balón rodando sobre el terreno de juego a una determinada velocidad.
- Rebote vertical, permite la valoración objetiva del coeficiente de restitución de la interacción entre el balón y el pavimento,

aportando información sobre su comportamiento en los diferentes botes que se produzcan.

- Bote angulado, el balón es lanzado con cierto ángulo sobre el pavimento y mediante un dispositivo se evalúa la velocidad de entrada y salida del bote.

A continuación y de manera similar al punto anterior, se procederá a realizar un análisis más exhaustivo de las pruebas incluidas dentro de las normativas más relevantes en la actualidad, relacionadas con los campos de fútbol de césped artificial.

2.1.2.1. Rebote Vertical

La valoración de esta propiedad es muy relevante por dos motivos, por un lado para que todos los campos de césped artificial se comporten de manera homogénea y por otro para que no resulte peligroso para los jugadores. Asimismo, un bote excesivo o deficiente provocará una falta de predicción por parte de los jugadores en relación al comportamiento del balón, lo que puede afectar a la vistosidad del juego (Rosa et al., 2008).

El procedimiento de ensayo para la presente investigación vendrá determinado por la norma UNE-EN 12235:2014, de forma que se deja caer el balón desde una altura determinada y mediante un micrófono se capta el sonido del primer y segundo impacto del móvil sobre el suelo (Figura 2.4).



Figura 2.4. Ensayo de Bote Vertical de balón

La diferencia de tiempos entre el primer y el segundo impacto permite conocer la altura alcanzada a partir de la siguiente expresión:

$$H = 1.23 \times (t - \Delta t^2) \times 100$$

Donde H es la altura del bote en cm, t es el tiempo entre el primer y el segundo bote y Δt es igual a 0.025 s.

2.1.2.2. Rodadura Horizontal

El deslizamiento del balón sobre el pavimento es clave para garantizar una calidad óptima del juego, una superficie deficiente en este sentido generará incertidumbre sobre los jugadores durante la práctica deportiva y una pérdida de la vistosidad y espectacularidad del juego. Con este ensayo se pretende comprobar, por un lado la distancia que la pelota es capaz de rodar sobre la superficie a una determinada velocidad y por otro la uniformidad de la superficie, de modo que la distancia alcanzada no sea resultado de las diversas pendientes del campo de fútbol de césped artificial (Rosa et al., 2008).

Entre los factores que pueden influir en este ensayo se encuentran la orientación de las fibras y la cantidad de relleno de la que dispone el pavimento, una alteración en cualquiera de estas variables podría ocasionar una deficiente rodadura horizontal (James & Mcleod, 2010)

En este caso, la norma que regula el ensayo y que se empleará en la presente investigación es la UNE-EN 12234:2014. Para su determinación, se medirá la distancia recorrida por una pelota que se deja caer por una rampa desde una distancia e inclinación fijada en la normativa (Figura 2.5). Para comprobar que las diferentes pendientes del pavimento no influyen en el

resultado final de este ensayo, se lanzará hacia tantas direcciones como pendientes disponga el campo.



Figura 2.5. Ensayo de Rodadura Horizontal de balón

Estas son las pruebas fijadas por la normativa en relación a la evaluación de la función deportiva de los campos de fútbol de césped artificial y que nos aportan información relevante sobre la interacción superficie-jugador y superficie-balón, dejando a un lado pruebas como la regularidad superficial que guarda más relación con aspectos de la construcción del pavimento.

Al tratarse de las pruebas que se han llevado a cabo en el presente trabajo, sus procedimientos de ejecución se explicarán más detalladamente en el apartado metodológico.

2.2. NORMATIVA VIGENTE PARA CAMPOS DE CÉSPED ARTIFICIAL

España ha carecido históricamente de normativa aplicable a los equipamientos deportivos y zonas de juego, lo que ha tenido una repercusión importante tanto en la calidad de estos equipamientos como en la práctica deportiva en general (Durá, Gimeno, Zamora, & Martínez, 2004). Al margen de los requisitos dimensionales que deben cumplir los campos por exigencia del reglamento de juego, en nuestro país no ha existido normativa estándar que garantice la seguridad de los pavimentos y del equipamiento deportivo.

Sin embargo, en los últimos años, la homologación de los pavimentos de juego se ha convertido en un requerimiento indispensable para los gestores deportivos, incluyéndose dentro de los pliegos de prescripciones técnicas, con el fin de garantizar su calidad (Felipe, 2011). Actualmente hay 2 tipos de sellos de certificación para césped artificial: La Norma UNE-EN para pavimentos deportivos de césped artificial y los sistemas FIFA 1 y 2 estrellas (Burillo et al., 2010).

La homologación en este apartado, tiene por objeto cumplir una serie de requisitos que precisen que el terreno de juego es apto para la práctica, seguro para los deportistas y que poseen una mínima calidad con los estándares establecidos. Principalmente se hacen pruebas en el laboratorio del sistema que se va a instalar, junto con sus capas constituyentes, así como también pruebas de campo, donde se prueba el sistema ya instalado. Estos test se encuentran normalizados, de manera que han sido adoptados por organismos nacionales e internacionales.

Los sistemas FIFA 1 y 2 estrellas están destinados al fútbol de alto rendimiento y recreativo, siendo de obligado cumplimiento para aquellos pavimentos de césped artificial sobre los que se disputen competiciones de carácter profesional o internacional (FIFA, 2012). Sin embargo, la presente investigación se centra en pavimentos destinados a competiciones amateur y de ocio, o lo que es lo mismo, no profesionales, por lo que estas normativas no responden a la finalidad de la superficie de césped artificial y no se profundizará sobre ellas. A modo informativo, es importante mencionar que cuanto mayor sea el nivel obtenido por el pavimento, mayor será su calidad, puesto que los requerimientos exigidos, para cada una de las pruebas establecidas por la normativa, son menos permisivos como se puede observar en la siguiente ilustración (Tabla 2.1).

Volviendo al estudio, la normativa que se ajusta a las características de los campos de fútbol de césped artificial seleccionados es la UNE-EN 15330-1:2014. Este binomio (UNE-EN), puede ser adoptado y ratificado como una norma española, tras haber sido elaborado por el Comité Europeo de Normalización (CEN), a través de sus comités técnicos. Con este objetivo se pretende unificar los criterios de normalización en el ámbito europeo, de tal manera que sustituyan las que existen en cada país. Por tanto deben recibir el rango de norma nacional y europea.

Tabla 2.1. Especificaciones para campos de fútbol de césped artificial según FIFA

	FIFA 1 estrella	FIFA 2 estrellas
Rebote vertical	0.6-1.0 m	0.6-0.85 m
Rodadura horizontal	4-10 m	4-8 m
Absorción impactos	55-70 %	60-70 %
Deformación vertical	4-11 mm	4-10 mm
Resistencia Rotacional	25-50 N·m	30-45 N·m
FIFA 1 estrella= recreativo; FIFA 2 estrellas= profesional		

Las normas UNE o UNE-EN, no son de obligado cumplimiento salvo que la Administración competente las haga obligatorias mediante Ley, Decreto, Reglamento o exija su cumplimiento en los Pliegos de Prescripciones Técnicas de los Proyectos de construcción o en los Contratos de Suministros (Burillo et al., 2010). La aplicación de estas normas, permitirá a los usuarios beneficiarse de la mejora de calidad y seguridad de los equipamientos deportivos.

Según Felipe (2011), las normas UNE-EN se clasifican en dos tipos: Normas de Especificaciones, o los requerimientos que tienen que cumplir los pavimentos artificiales; y Normas de Métodos de Ensayo, que recogen los

diferentes procedimientos que se deben llevar a cabo en cada una de las pruebas para la obtención de los resultados, que posteriormente se compararán con las Normas de Especificaciones. En la siguiente tabla (Tabla 2.2) aparecen sombreadas las normas que han sido empleadas y requeridas en este trabajo por estar directamente relacionadas con la interacción superficie-jugador y superficie- balón.

Tabla 2.2. Normas UNE-EN para superficies deportivas de césped artificial

SUPERFICIES DEPORTIVAS DE CÉSPED ARTIFICIAL	
REFERENCIA	TÍTULO
UNE-EN 12228:2002	Determinación de la resistencia de las juntas de los pavimentos sintéticos
UNE-EN 12229:2007	Procedimiento para preparación de muestras de ensayo de hierba sintética y textiles
UNE-EN 12234:2014	Determinación del comportamiento a la rodadura del balón
UNE-EN 12235:2014	Determinación del comportamiento vertical del balón
UNE-EN 12616:2003	Determinación de la infiltración de agua
UNE-EN 13672:2005	Determinación de resistencia a abrasión de hierba sintética sin relleno
UNE-EN 13746:2006	Determinación de cambios dimensionales debidos a los efectos de variación de las condiciones de agua, hielo y calor
UNE-EN 13864:2006	Determinación de la resistencia a tracción de las fibras sintéticas
UNE-EN 14808:2006	Determinación de absorción de impacto
UNE-EN 14809:2006	Determinación de deformación vertical
UNE-EN 14809:2006/AC	Determinación de deformación vertical
UNE-EN 14836:2006	Procedimiento de envejecimiento climático acelerado
UNE-EN 14837:2006	Determinación de la resistencia a deslizamiento
UNE-EN 15301-1:2007	Determinación de la resistencia rotacional
UNE-EN 15306:2007	Determinación de la resistencia al uso (Método Lisport)
UNE-EN 15330-1:2014	Especificaciones para superficies deportivas de hierba artificial para uso exterior

La norma UNE-EN 15330-1:2014 especifica las características de comportamiento y durabilidad de las superficies deportivas de césped artificial utilizadas principalmente en exteriores como por ejemplo los campos de fútbol.

Los requisitos que se aplican a esta Norma, son para deportes comunitarios, educativos y de ocio. Es decir, que la propia Norma UNE-EN 15330-1:2014 explica detenidamente que para niveles de competición profesionales y de élite, son los organismos de gestión de deportes internacionales (en el fútbol, FIFA) los que han publicado sus propias especificaciones, como se ha mencionado anteriormente.

Las especificaciones de esta Norma (detalladas en el Capítulo 4) están basadas en exámenes de aprobación tipo, por las Normas de Métodos de Ensayo y que están realizados en el laboratorio. Sin embargo, es en los ensayos sobre la superficie ya instalada, donde son relevantes estos resultados (Burillo et al., 2010). De manera que la Norma prescribe la evaluación de estos requerimientos *in situ* sobre las superficies instaladas. Asimismo, proporciona una serie de directrices de ensayo en las instalaciones.

Los test *in situ* se deberían realizar después de la instalación del pavimento y posteriormente una vez cada dos o tres años dependiendo de los niveles de utilización y las disposiciones locales, tal y como se plantea en esta Norma (CEN, 2014).

Así, la Norma establece que deben realizarse los siguientes ensayos en cada una de las posiciones:

- Rebote vertical del balón
- Rodadura del balón
- Absorción de impactos
- Deformación vertical
- Resistencia rotacional

➤ Regularidad de la superficie

Las posiciones de ensayo, junto con los procedimientos a seguir en cada una de las pruebas aparecen detalladas en el apartado metodológico, tan solo se excluye el ensayo de regularidad superficial al no incluirse dentro las interacciones superficie-jugador y superficie-balón.

En definitiva, el objetivo del cumplimiento de la normativa es asegurar unos parámetros de calidad y seguridad que en la mayoría de los casos no se garantizan, como se desprende del estudio de Burillo (2009), en el que ninguno de los 20 campos de césped artificial analizados cumplía con la totalidad de los requerimientos fijados en la norma.

APARTADO II. ANÁLISIS EMPÍRICO

CAPÍTULO III.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO GENERAL

La presente tesis doctoral se enmarca en una línea continuista de los estudios de césped artificial, con el objetivo de profundizar en las líneas de investigación necesarias para la mejora de los campos de fútbol de césped artificial. En este sentido, se adapta el modelo especificado en el “Mapa de Loughborough” (Figura 3.1) para contribuir a incrementar el conocimiento sobre la ciencia aplicada al estudio de las superficies deportivas (Fleming & Forrester, 2014).

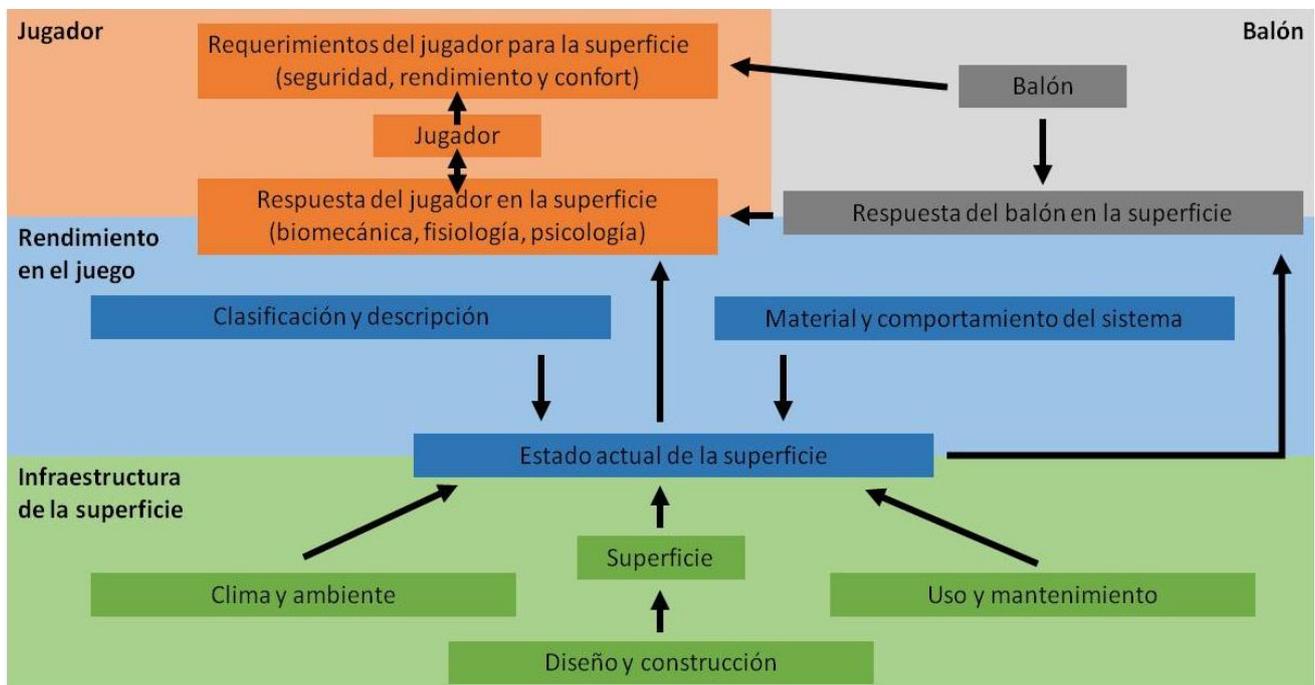


Figura 3.1. Adaptación del “Mapa de Loughborough” al diseño del estudio

Según estos autores, la inclusión en los estudios de este compendio de variables mejorará el modelo conceptual basado en los resultados de los test mecánicos de las superficies. El presente trabajo pretende abarcar una línea desconocida dentro del estudio del césped artificial. Los tres capítulos integrados en este apartado combinan test mecánicos (Capítulo 4), con mediciones de los parámetros físicos, fisiológicos y de percepción de los jugadores en test analíticos de rendimiento (Capítulo 5) y situaciones reales de

juego (Capítulo 6). Este análisis gradual y progresivo pretende aportar conocimiento sobre el efecto de diferentes sistemas y componentes estructurales de soporte en la funcionalidad deportiva del pavimento desde una triple vertiente.

Además, abre la vía a la inclusión de nuevas pruebas que verifiquen la idoneidad de las superficies artificiales para la práctica deportiva. La realización de estudios de campo sobre pavimentos ya instalados en los tres estudios cumple con las pautas establecidas en el modelo señalado anteriormente. Esto garantiza la aportación de nuevos avances al corpus teórico del césped artificial y permite extrapolar los resultados a los hallazgos de los estudios de laboratorio que han copado las investigaciones en este ámbito.

Por otro lado, el carácter amateur de la muestra enfatiza la aplicabilidad de los resultados sobre la principal finalidad de los campos de fútbol de césped artificial en la actualidad. El fin recreativo copa los principales motivos de implantación de este tipo de pavimentos y por ello, los resultados del presente trabajo pretenden aportar una mejora sobre la funcionalidad y seguridad de una superficie deportiva que alberga a una gran cantidad de practicantes.

En definitiva, el objetivo general de investigación es **conocer el efecto de los componentes estructurales de soporte sobre el comportamiento mecánico y el rendimiento deportivo de los campos de fútbol de césped artificial.**

La Figura 3.2 refleja el planteamiento de la investigación enmarcada en la presente Tesis Doctoral. La combinación de diferentes metodologías y herramientas pretende dar respuesta a la problemática descrita anteriormente e incrementar el estado de conocimiento de los pavimentos de césped artificial.

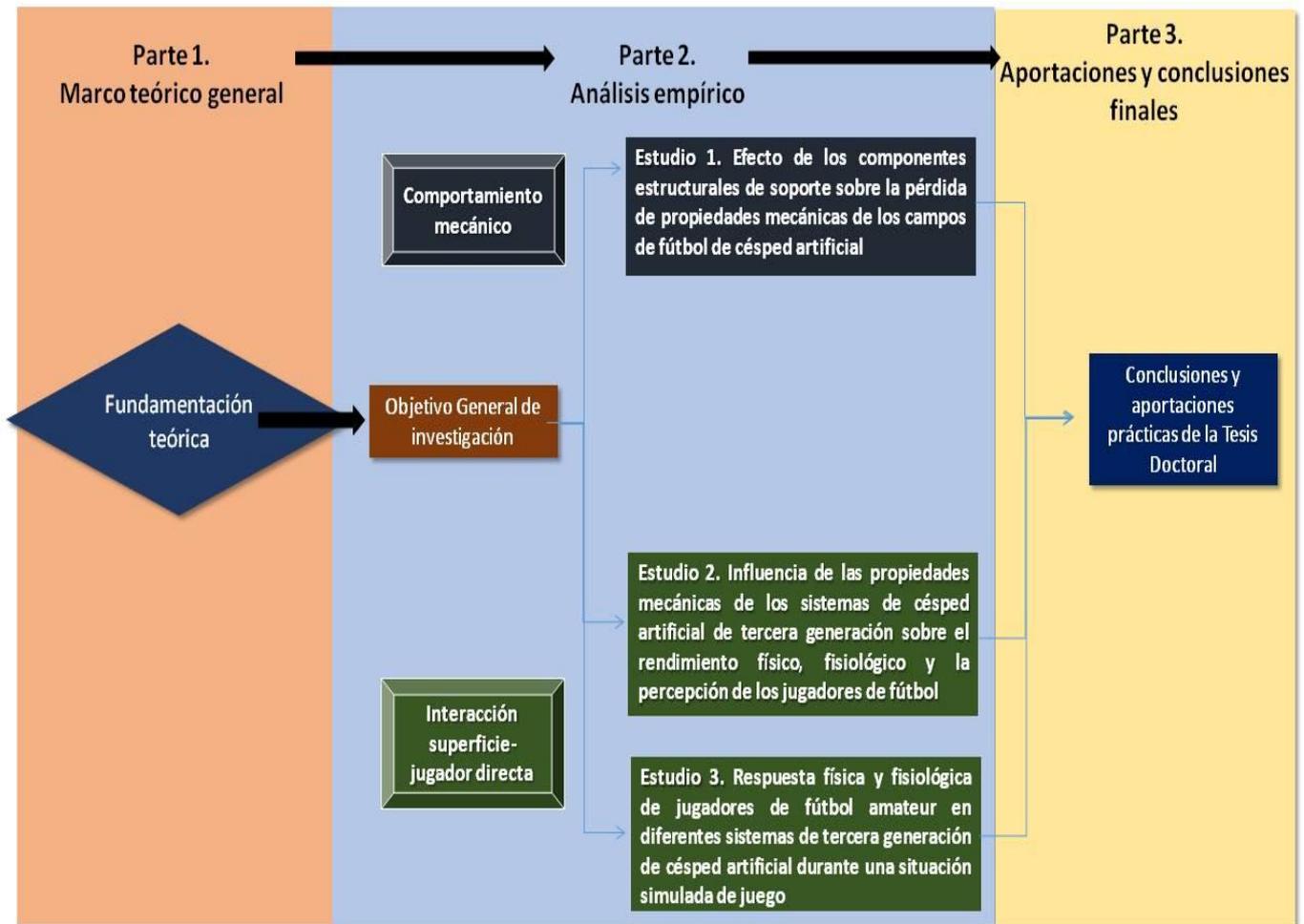


Figura 3.2. Diseño estructural de la Tesis Doctoral

3.2. TEMPORALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Una vez detallados los diferentes apartados que conforman la Tesis Doctoral, se recoge la temporalización de las diferentes fases que han englobado cada uno de los estudios (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Cronograma de los estudios incluidos en el diseño de investigación

FASES	AÑOS Y MESES																
	2011	2012												2013			
	Sept. – Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.
E 1. Efecto de los componentes estructurales de soporte sobre la pérdida de propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial																	
F 1. Definición del objeto de estudio																	
T 1.1. Revisión bibliográfica																	
T 1.2. Definición del problema de investigación																	
F 2. Desarrollo de la prueba piloto																	
T 2.1. Desarrollo de la prueba piloto																	
T 2.2. Reajuste y análisis de la situación																	
T 2.3. Elaboración de los protocolos de actuación																	
F 3. Selección de la muestra																	
T 3.1. Análisis de las fichas técnicas de los campos de CLM																	
T 3.2. Captación y selección de los campos de césped artificial																	
T 3.3. Convocatoria para los ensayos de campo																	
F 4. Evaluación inicial de las propiedades mecánicas																	
T 4.1. Recogida de datos en los campos de césped artificial																	
T 4.2. Segmentación y archivo de datos																	
T 4.3. Periodo de desgaste; Control de la situación								C	C	C	C	C	C	C	C		
F 5. Evaluación final de las propiedades mecánicas +12 meses																	
T 5.1. Recogida de datos en los campos de césped artificial																	

C- Seguimiento y control de los pavimentos analizados; Contacto con los responsables para garantizar una situación homogénea en todas las superficies.

AÑOS Y MESES FASES	2013									2014						
	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.
E 1. Efecto de los componentes estructurales de soporte sobre la pérdida de propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial																
F 6. Análisis y tratamiento de la información																
T 6.1. Creación de la base de datos																
T 6.2. Valoración e interpretación estadística de los resultados																
F 7. Elaboración del informe final y divulgación de conclusiones																
T 7.1. Informes finales del deterioro de los pavimentos																
T 7.2. Divulgación y diseminación de las conclusiones																
E 2. Influencia de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial de 3ª generación sobre el rendimiento físico, fisiológico y la percepción de los jugadores de fútbol																
F 1. Definición del objeto de estudio																
T 1.1. Revisión bibliográfica																
T 1.2. Definición del problema de investigación																
F 2. Selección de la muestra																
T 2.1. Establecimiento de requisitos y perfil del jugador																
T 2.2. Selección de los campos de césped artificial																
F 3. Desarrollo de la prueba piloto																
T 3.1. Desarrollo de la prueba piloto																
T 3.2. Reajuste y análisis de la situación																
T 3.3. Elaboración de los protocolos de actuación																
F 4. Evaluación de parámetros físicos, fisiológicos y de percepción																
T 4.1. Batería de test sobre los jugadores en los pavimentos																
T 4.2. Análisis de las propiedades mecánicas de los pavimentos																
F 5. Análisis y tratamiento de la información																
T 5.1. Creación de la base de datos																
T 5.2. Valoración e interpretación estadística de los resultados																

FASES	AÑOS Y MESES															
	2013									2014						
	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.
F 6. Elaboración del informe final y divulgación de conclusiones																
T 6.1. Informes finales de pavimentos y jugadores																
T 6.2. Divulgación y diseminación de las conclusiones																
E 3. Respuesta física y fisiológica de jugadores de fútbol amateur en diferentes sistemas de 3ª generación de césped artificial durante una situación simulada de juego																
F 1. Definición del objeto de estudio																
T 1.1. Revisión bibliográfica																
T 1.2. Definición del problema de investigación																
F 2. Selección de la muestra																
T 2.1. Establecimiento de requisitos y perfil del jugador																
T 2.2. Selección de los campos de césped artificial																
F 3. Desarrollo de la prueba piloto																
T 3.1. Desarrollo de la prueba piloto																
T 3.2. Reajuste y análisis de la situación																
T 3.3. Elaboración de los protocolos de actuación																
F 4. Evaluación del rendimiento en una situación simulada de juego																
T 4.1. Utilización de sistemas de posicionamiento global en partido																
T 4.2. Análisis de las propiedades mecánicas de los pavimentos																
F 5. Análisis y tratamiento de la información																
T 5.1. Creación de la base de datos																
T 5.2. Valoración e interpretación estadística de los resultados																
F 6. Elaboración del informe final y divulgación de conclusiones																
T 6.1. Informes finales de pavimentos y jugadores																
T 6.2. Divulgación y diseminación de las conclusiones																
F 7. Redacción de las conclusiones finales de la Tesis Doctoral																

CAPÍTULO IV.

EFFECTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE SOPORTE SOBRE LA PÉRDIDA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE CÉSPED ARTIFICIAL

CAPÍTULO IV. EFECTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE SOPORTE SOBRE LA PÉRDIDA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE CÉSPED ARTIFICIAL

4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, los inconvenientes vinculados tradicionalmente a los campos de fútbol de césped artificial han ido desapareciendo, en especial los relacionados con parámetros de seguridad y rendimiento deportivo (Brito et al., 2012; Dragoo & Braun, 2010). A su vez, las mejoras desarrolladas, sobre la tercera generación de este tipo de pavimentos, han permitido prácticamente igualar las prestaciones de la hierba natural (lesiones totales: 15.2 % sobre campos de fútbol de césped artificial *vs* 13.9 % sobre césped natural) (Meyers & Barnhill, 2004). En esta línea, un seguimiento en 10 equipos reveló un ratio total de incidencia de lesión significativamente inferior ($p=0.016$) sobre césped artificial (45.7 %) frente a la hierba natural (51.2 %) (Meyers, 2010). Estas mejoras y ventajas han incrementado su aceptación entre los diferentes agentes implicados en el mundo del fútbol (Burillo et al., 2014). Esta evolución, ha facilitado que algunos autores hablen de una cuarta generación de césped artificial, caracterizada por la mezcla intercalada de rellenos de caucho y arena (Williams et al., 2011); no obstante, todavía no existen evidencias científicas suficientes que permitan avalar esta nueva generación, por lo que los nuevos campos que se construyen siguen siendo de tercera generación.

La innovación y desarrollo en el césped artificial, ha propiciado la existencia de una gran variedad de componentes estructurales. Por ello, el diseño de los campos de fútbol puede variar en función del tipo de material utilizado en las diferentes estructuras del pavimento, siendo esto, uno de los factores clave en el rendimiento de la superficie (Fleming, 2011a). Recientes investigaciones consideran que las diferencias entre los diversos sistemas de

pavimentos artificiales, de tercera generación, pueden ser mayores a las existentes entre la hierba natural y el césped artificial (Potthast, 2010). En este sentido, el comportamiento mecánico de la superficie deportiva depende de las características del sistema de césped artificial, como el tipo de relleno, tipo de fibra, tipo de sub-base o la instalación de una capa elástica (Burillo et al., 2012). Se ha demostrado que una simple modificación, en uno de los elementos superficiales del pavimento, como la morfología del relleno de caucho, genera diferencias en el rendimiento de los campos de fútbol de césped artificial (Alcántara et al., 2009).

Sin embargo, la estructura de soporte de los pavimentos ha permanecido olvidada a pesar de constituir la base de los campos de césped artificial. En este aspecto, la sub-base, conformada por asfalto, macadam o gravas compactadas, debe proporcionar una plataforma estable y de buen drenaje sobre la que se ubica la superficie de césped artificial (James & Mcleod, 2010). Además, este componente debe soportar y transmitir las cargas que se producen sobre la superficie durante el uso normal y el mantenimiento. Cualquier problema sobre este elemento provocaría un efecto perjudicial sobre la superficie, afectando a las características del juego y llegando a aparecer irregularidades en forma de ondulaciones sobre el pavimento. Esta situación ocasionaría una disminución en la estabilidad de los jugadores y un mayor riesgo de lesión (Delaney, 2009).

Por otro lado, la capa elástica instalada de manera opcional sobre la sub-base, mantiene las propiedades de rigidez y amortiguación a lo largo de la vida útil del pavimento y evita su deterioro como consecuencia de la compactación del relleno (Delaney, 2009). Igualmente, una capa elástica bien diseñada ayuda a conservar un rendimiento uniforme en toda la superficie de césped artificial, dejando sin efecto las variaciones en la altura del relleno ocasionadas por la práctica deportiva (Allgeuer et al., 2008).

La contribución de la estructura de soporte sobre la conservación del rendimiento mecánico de los pavimentos no ha sido evidenciada científicamente. Actualmente, la reducida vida útil de los campos ha sido asociada a un uso intensivo y a un escaso mantenimiento (Burillo et al., 2012; James & Mcleod, 2010). De este modo, un uso superior a las 60 horas semanales, situaría la durabilidad del pavimento en menos de 5 años, a diferencia de los 9 años sugeridos con una utilización alrededor de las 40 horas semanales (Young, 2009). Asimismo, un mantenimiento limitado reduce, igualmente, la esperanza de vida del campo (Burillo et al., 2012). Un consenso de expertos en césped artificial estableció la regulación de una hora de mantenimiento por cada 10 horas de uso, con el propósito de garantizar una adecuada conservación de las propiedades de la superficie con el paso del tiempo (Fleming, 2011b).

Por otro lado, para asegurar la calidad y seguridad de los campos de fútbol de césped artificial, la certificación de los productos y equipamientos es un requerimiento fundamental (Bartlett, James, Ford, & Jennings-Temple, 2009). El propósito de la estandarización es garantizar que el pavimento es adecuado para la práctica deportiva y la seguridad de los jugadores al cumplir las especificaciones recogidas en la normativa. Los campos de fútbol de césped artificial pueden ser homologados en base a diferentes tipos de certificaciones. La normativa europea elaborada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) que regula este tipo de pavimentos es la EN 15330-1:2014. Este estándar especifica las características de rendimiento y durabilidad que deben cumplir los pavimentos deportivos de césped artificial al aire libre destinados a un uso recreacional, amateur o educativo, incluyendo los asignados a la práctica del fútbol. La mayor parte de los campos de fútbol de césped artificial de España y otros países europeos carecen de certificación de calidad (Burillo et al., 2012; 2014), por lo que no se puede garantizar la seguridad y funcionalidad de estos pavimentos.

De forma paralela, la investigación pretende valorar la adecuación de las estructuras seleccionadas a los estándares internacionales de calidad recogidos en la norma EN 15330-1:2014.

4.2. OBJETIVO E HIPÓTESIS

Tras el planteamiento del problema de investigación, el objetivo general de este primer estudio es:

1. Conocer la influencia de la estructura de soporte sobre el rendimiento y deterioro de las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial durante un año, mediante protocolos estandarizados de ensayos *in situ*, elaborados por el Comité Europeo de Estandarización (CEN).

De forma paralela, la investigación plasma como objetivos específicos:

2. Determinar el grado de pérdida de las propiedades mecánicas, ocasionado por el desgaste producido durante un año, en cuatro estructuras diferentes de campos de fútbol de césped artificial en Castilla-La Mancha.
3. Comparar los parámetros actuales de interacción superficie-jugador y superficie-balón en las cuatro tipologías de césped artificial seleccionadas en este estudio.
4. Verificar el cumplimiento de los requisitos fijados por la norma EN 15330-1:2014 para superficies deportivas de hierba artificial de uso exterior, en pavimentos que presentan diferencias estructurales.

Por otra parte, las hipótesis de investigación planteadas en base a los estudios precedentes son:

- A. Los campos de césped artificial que dispongan de capa elástica no sufrirán una pérdida significativa en ninguna de sus propiedades mecánicas tras el desgaste ocasionado durante un año.

- B. La estructura constituida por una sub-base de terreno natural y con capa elástica presentará el valor más reducido en cuanto al porcentaje de pérdida promedio de las propiedades mecánicas tras un año de desgaste.

- C. La estructura compuesta de una sub-base de asfalto y sin capa elástica obtendrá un valor significativamente inferior al resto de estructuras en relación a la capacidad de absorción de impactos del pavimento.

- D. Ninguna de las estructuras cumplirá en la segunda valoración con la totalidad de los requerimientos de seguridad y funcionalidad deportiva establecidos por la norma EN 15330-1:2014 para los campos de fútbol de césped artificial y que son objeto de estudio en el presente trabajo.

4.3. MATERIAL Y MÉTODO

Se llevó a cabo un estudio cuantitativo, con un diseño longitudinal basado en la realización de una serie de ensayos mecánicos *in situ*, acorde a los estándares de calidad establecidos en la norma EN 15330-1:2014 para campos de fútbol. Los ensayos fueron repetidos 12 meses después de la evaluación inicial para comprobar el deterioro de las propiedades mecánicas en cada uno de los sistemas de césped artificial seleccionados (Figura 4.1)

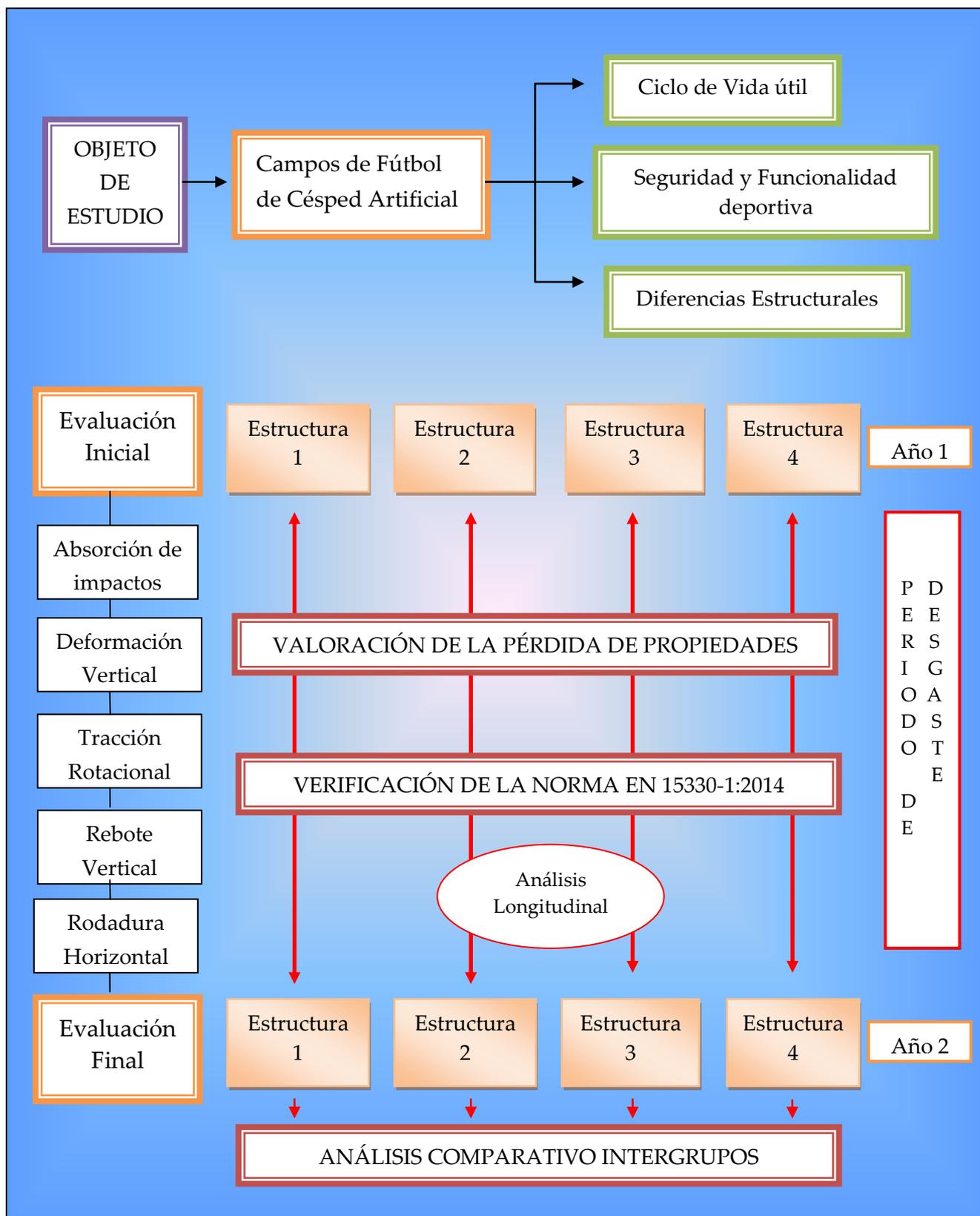


Figura 4.1. Cuadro resumen del diseño de investigación

4.3.1. Características de la muestra

La muestra del estudio estaba compuesta por cuatro campos de fútbol de césped artificial de la región de Castilla-La Mancha. Los sistemas de césped artificial seleccionados eran de tercera generación y representaban las cuatro principales combinaciones de las estructuras de soporte de los pavimentos artificiales (Figura 4.2). El análisis de las especificaciones (fichas técnicas) de todos los campos de césped artificial de la región permitió verificar que estos cuatro sistemas de soporte eran los únicos presentes en esta zona. En este sentido, las características del Sistema 3 eran similares al 80 % de los campos de fútbol de césped artificial de esta región (la más utilizada en España), mientras que las otras tres estructuras representaban el 20 % restante, abarcando el 100 % de la variabilidad de sistemas de soporte en la región de Castilla-La Mancha.

Las variables manipuladas eran la sub-base y la capa elástica. Asimismo, se establecieron unos criterios de control (tipo de relleno y fibra, antigüedad, uso y mantenimiento) con el objetivo de garantizar que las varianzas encontradas eran consecuencia de los diferentes sistemas empleados en el soporte base de los campos. Además, todos los campos seleccionados fueron construidos por la misma empresa.

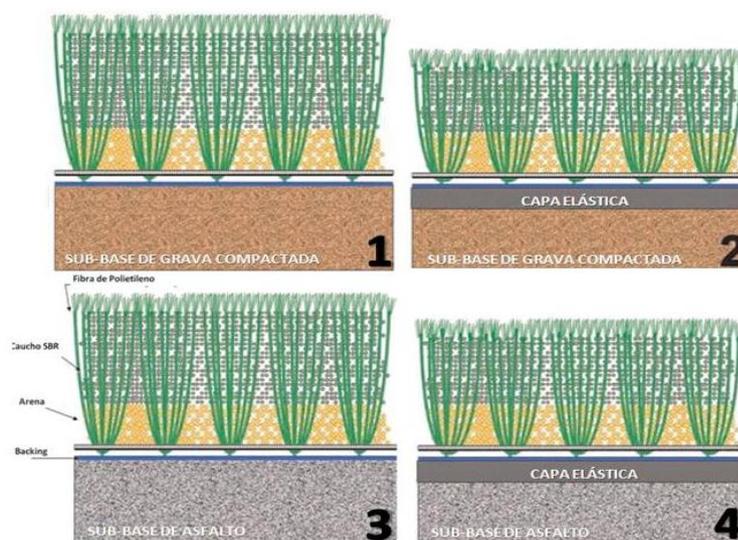


Figura 4.2. Características de los sistemas de césped artificial evaluados

De este modo, además de una estructura de soporte diferente, los sistemas de césped artificial seleccionados debían cumplir con una serie de requerimientos unificados en base a las variables categóricas empleadas en estudios previos (Burillo et al., 2012). Por ello, los pavimentos de este estudio (Tabla 4.1) disponían de una antigüedad inferior a los 5 años (2.5 ± 0.58), un uso semanal inferior a las 35 horas (30.75 ± 2.22) y una ausencia total de mantenimiento. Así como, una tipología idéntica de material de relleno (Styrene Butadiene Rubber [SBR]) y fibra (monofilamento). Acorde a las características de la estructura de soporte, los sistemas de césped artificial con capa elástica presentaban una altura de fibra inferior y menor cantidad de relleno que los sistemas que carecían de ella, independientemente del espesor de este componente.

Tabla 4.1. Características de los sistemas de césped artificial

Sistema	Sub-base	Capa Elástica	Relleno			Tipo	Fibra	
			Arena	Caucho	Espesor		Altura	Pelo libre
1	Grava Compactada	NO	Sílice	SBR	50 mm	Monofilamento	60 mm	10 mm
2	Grava Compactada	SI (23 mm)	Sílice	SBR	35 mm	Monofilamento	45 mm	10 mm
3	Capa Asfáltica	NO	Sílice	SBR	50 mm	Monofilamento	60 mm	10 mm
4	Capa Asfáltica	SI (12 mm)	Sílice	SBR	35 mm	Monofilamento	45 mm	10 mm

4.3.2. Procedimiento

La evaluación inicial de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial seleccionados fue realizada de acuerdo a los estándares de calidad presentados en la norma EN 15330-1:2014. Los parámetros relacionados con la absorción de impactos ($FR\%$), la deformación vertical estándar (StV -mm), la tracción rotacional (RT -N·m), el rebote vertical ($VBR\%$) y la rodadura horizontal (BR) del balón sobre el pavimento fueron testados *in situ* sobre las 5 posiciones exigidas por la normativa (Figura 4.3; Anexo 1). Este procedimiento se volvió a repetir transcurridos 12 meses desde la evaluación inicial,

obteniendo el grado de deterioro real de las propiedades mecánicas ocasionado por el desgaste en cada una de las estructuras.

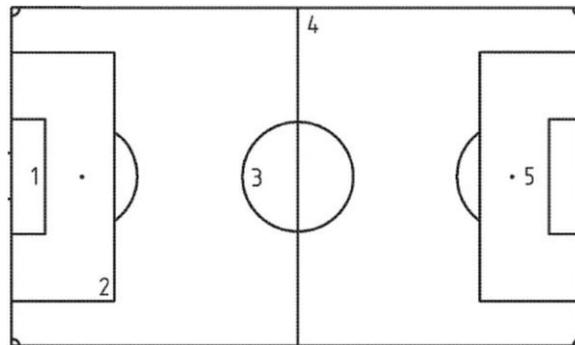


Figura 4.3. Posiciones de los ensayos de campo establecidos por EN 15330-1:2014

Todos los ensayos fueron desarrollados bajo unas condiciones meteorológicas estables, secas, con una temperatura entre 10°C y 21°C y con una velocidad del viento entre 0.0 m/s y 0.3 m/s, cumpliendo con los rangos y protocolos fijados en la norma EN 15330-1:2014. Los ensayos mecánicos fueron obtenidos de la siguiente manera:

Absorción de impactos y deformación vertical estándar

Estas variables fueron evaluadas siguiendo los protocolos establecidos en las normas EN 14808:2005 y EN 14809:2005 con su Erratum EN 14809:2005/AC, respectivamente. Para ello, un equipo de ensayo conocido como Atleta Artificial Avanzado fue utilizado. De esta manera, una masa de 20 Kg fue soltada desde una altura de 55 mm (± 0.25 mm), utilizando un muelle de rigidez controlada.

En el caso de la absorción de impactos (*FR*), cuando esta masa impacta sobre el pavimento, la fuerza máxima aplicada es registrada mediante la señal de una célula de carga (resultados en %). Este valor es transmitido mediante una caja de adquisición de datos (Data Acquisition Device Case) y transferido a una unidad portátil con el software G-Force v.3.03 (Deltecmetaal, Duiven, Holanda), donde se calcula la reducción de fuerzas con una resolución del 0.01 %.

$$FR = \left(1 - \frac{Fmax}{Fref}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

Donde %FR es la absorción de impactos en %, *Fmax* la fuerza máxima medida sobre una superficie deportiva de césped artificial en Newtons y *Fref* es la fuerza de referencia fijada en 6760 N, correspondiente al valor teórico calculado sobre una superficie de hormigón (con una resolución absoluta del equipo de 0.02 kN).

La deformación vertical estándar (*StV*) es captada mediante los dos sensores de desplazamiento situados en el Atleta Artificial con un rango de medida superior a los 20 mm. La distancia entre los sensores y el centro del pie de equipo fue mayor de 125 mm e inferior de 200 mm. Los sensores eran incorporados al equipo de forma independiente al peso de caída donde se situaba la célula de carga.

La señal individual de los dos sensores de deformación fue superpuesta antes de calcular la deformación vertical del pavimento. Medios de grabación digital fueron empleados, la amplitud de la señal no fue inferior al 25 % de la escala completa del equipamiento y la frecuencia de muestreo fue superior a los 0.5 kHz. El sensor disponía de una resolución absoluta de 0.01 mm y *StV* fue calculada a través de la siguiente ecuación (resultados en mm)

$$StV = \left(\frac{1500}{Fmax}\right) \cdot Dmax \quad (2)$$

Donde *Fmax* es el valor del pico de fuerza en Newtons y *Dmax* es la deformación máxima registrada por los sensores de desplazamiento.

Rebote vertical de balón

Los procedimientos necesarios para la valoración de este parámetros fueron extraídos de las normas EN 12235:2004 y EN 12235:2004/AC. Se dejó caer un balón desde una altura de 2.00 m sobre la superficie (± 0.01 m). La sujeción del balón se basaba en un mecanismo electromagnético, garantizando una caída sin ningún tipo de impulso. El software B-Bounce v.2.01 (Deltecmetaal, Duiven, Holanda) reproducía la altura del rebote (H) (resultados en m) a través del tiempo transcurrido entre dos botes consecutivos (t) por medio de la siguiente fórmula:

$$H = 1.23 \times (t - \Delta t^2) \times 100 \quad (3)$$

Donde Δt^2 es igual a 0.025 segundos. Posteriormente, la altura de rebote (H) fue transferida a porcentaje (VBR), tomando como referencia el valor obtenido sobre una superficie de hormigón ($H_c = 1.35 \pm 0.03$ m).

$$VBR = \frac{H}{H_c} \times 100 \quad (4)$$

Tracción Rotacional

La norma EN 15301-1:2007 fue tomada como referencia para la determinación de este ensayo. Una masa de 46 Kg con una base de tacos (15 tacos de plástico de 11 mm de longitud) en su extremo inferior se soltó desde una altura de 60 mm (± 5 mm). Una vez fijado en la superficie, una llave dinamométrica era girada 45° a una velocidad de rotación nominal de 12 revoluciones/minuto. El valor obtenido en cada ensayo representaba el par torsor necesario para girar la masa adherida a la superficie en Newtons por metro (N·m).

Rodadura horizontal de balón

El procedimiento de este ensayo fue obtenido de las normas EN 12234:2002 y EN 12234:2003 Erratum. Un balón se deslizó por una rampa con una inclinación predeterminada de $45^\circ (\pm 2^\circ)$, desde una altura de 1 m (± 0.005 m) y se dejaba rodar sobre la superficie hasta el momento de su inmovilización. Posteriormente, la distancia ubicada entre el primer punto de contacto del balón con la superficie y el eje central del balón era medida con una cinta métrica calibrada.

4.3.3. Análisis de datos

Los programas informáticos SPSS 19.0 y Stata 12 fueron empleado para el análisis de datos. En primer lugar, los estadísticos descriptivos (media y desviación estándar) de todas las variables fueron obtenidos y posteriormente, comparados con los requerimientos exigidos en la norma EN 15330-1:2014 (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Requerimientos de la norma europea EN 15330-1:2014 para campos de fútbol de césped artificial de uso exterior

Test de Campo	EN 15330-1:2014
Absorción de Impactos	55 – 70 %
Deformación Vertical	4 – 10 mm
Tracción Rotacional	25 – 50 N·m
Rebote Vertical de Balón	45 – 75 %
Rodadura Horizontal de Balón	4 – 10 m

El siguiente paso fue aplicar la prueba Kolmogorov-Smirnov para determinar la normalidad de la distribución. La tipología paramétrica de las variables analizadas, orientó la realización de la prueba *t* de Student de muestras relacionadas ($p < 0.05$) con el objetivo de valorar el comportamiento de las propiedades mecánicas en cada uno de los sistemas de césped artificial, después de un año de desgaste. Además, el porcentaje de variación ($\Delta\%$), entre

la evaluación inicial (v_1) y la segunda valoración (v_2), fue calculado para estandarizar, en una misma unidad de medida, todos los parámetros analizados y conocer el tamaño de las diferencias.

$$\Delta\% = \left| \frac{v_1 - v_2}{v_1} \right| \times 100 \quad (5)$$

Un análisis de la varianza (ANOVA) de dos vías, fue realizado aplicando un Modelo Lineal General de Medidas Repetidas y un análisis post hoc de Bonferroni ($p < 0.05$) para determinar el efecto de la estructura de soporte de los campos sobre el rendimiento mecánico de los pavimentos. Un nivel de confianza del 95 % fue establecido durante todo el análisis.

Por otro lado, se realizó un análisis de regresión lineal utilizando las propiedades mecánicas como variables dependientes y la sub-base (0 = grava compactada; 1 = asfalto), las capa elástica (0 = no instalada; 1 = instalada) y el año de evaluación (0 = primer año; 1 = segundo año) como variables independientes.

Finalmente, los estimadores de densidad Kernel aproximaron la densidad $f(x)$ de las observaciones sobre la variable x , resultando en una figura similar a un histograma que emplea líneas en lugar de barras para proveer la información. Esta figura aplica una función Kernel (Epanechnikov) y un ancho de banda que es el valor que determina como los valores son incluidos en la estimación de la densidad de cada punto.

4.4. RESULTADOS

Los estadísticos descriptivos de los ensayos *in situ*, mostraron limitaciones en *BR* en todos los sistemas de césped artificial analizados, acorde al cumplimiento de los requisitos especificados en la norma EN 15330-1:2014 (Tabla 4.3). Si *BR* fuera descartado, dos de los sistemas seleccionados cumplirían todos los requerimientos. Además, el Sistema 2 supera mínimamente las especificaciones recogidas para *FR* (70.3 %), con una disminución del 0.3 % de este parámetro, podría decirse que tres de los cuatro sistemas de césped artificial cumplen con los requerimientos normativos y solo uno presenta importantes limitaciones.

Por otro lado, el desgaste ocasionado en los campos durante un año, generó variaciones significativas en determinadas propiedades mecánicas, dependiendo de la estructura de soporte del pavimento (Tabla 4.4). La tendencia observada después del periodo de desgaste fue una reducción de la *FR* y *StV*, así como, un incremento en *RT*, *VBR* y *BR*.

El porcentaje de variación de los parámetros analizados fue diferente en cada uno de los sistemas de césped artificial. De este modo, la estructura compuesta por una sub-base asfáltica y sin capa elástica presentó los mayores índices de deterioro para los ensayos de *StV* (20.23 %) y *VBR* (9.33 %). Por su parte, el mayor porcentaje de variación en *FR* (6.06 %) fue localizado en el sistema constituido por una sub-base de grava compactada sin capa elástica. En el ensayo de *RT*, el deterioro más significativo (11.49 %) fue focalizado sobre una sub-base asfáltica con una capa elástica incorporada. A su vez, el pavimento conformado sobre un soporte de grava compactada bajo una capa elástica mostró el menor promedio de deterioro total (3.14 %) de todos los sistemas de césped artificial evaluados, aunque la degradación de *BR* (8.14 %) fue superior al resto de sistemas.

Tabla 4.3. Resultados de los ensayos mecánicos sobre los cuatro sistemas de césped artificial testados

Sistema	Sub-base	Capa Elástica	Año	<i>FR</i> (%)	<i>StV</i> (mm)	<i>RT</i> (N·m)	<i>VBR</i> (%)	<i>BR</i> (m)
1	Grava Compactada	NO	1	48.83* ±3.10	3.65* ±0.38	46.36 ±3.65	75.75* ±2.18	11.00* ±1.45
1	Grava Compactada	NO	2	45.87* ±2.83	3.57* ±0.26	49.44 ±4.77	76.03* ±1.88	11.88* ±1.78
2	Grava Compactada	SI	1	70.30* ±1.47	7.34 ±0.43	39.40 ±2.60	47.17 ±4.91	10.94* ±2.21
2	Grava Compactada	SI	2	69.83 ±2.51	7.12 ±0.36	39.96 ±2.94	48.36 ±3.79	11.83* ±2.37
3	Capa Asfáltica	NO	1	64.77 ±2.84	5.85 ±0.46	41.64 ±3.96	58.73 ±6.79	10.04* ±1.74
3	Capa Asfáltica	NO	2	63.13 ±2.06	4.67 ±0.43	39.72 ±1.17	64.21 ±5.18	10.85* ±1.83
4	Capa Asfáltica	SI	1	61.03 ±2.55	5.46 ±0.41	40.40 ±3.61	70.70 ±2.20	12.37* ±3.09
4	Capa Asfáltica	SI	2	59.97 ±2.36	4.55 ±0.67	45.04 ±1.84	71.32 ±2.61	12.85* ±2.24

* Incumplimiento de las especificaciones de la norma EN 15330-1:2014

Tabla 4.4. Porcentaje de variación de las propiedades mecánicas

Ensayo	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Promedio
Absorción de impactos	6.06 %*	0.67 %	2.38 %*	1.74 %	2.71 %
Deformación vertical	2.19 %	2.95 %*	20.23 %*	16.61 %*	10.50 %
Tracción rotacional	6.64 %*	1.42 %	4.61 %*	11.49 %*	6.04 %
Rebote Vertical	0.38 %	2.52 %*	9.33 %*	0.88 %	3.28 %
Rodadura Horizontal	8.04 %*	8.14 %*	8.07 %*	3.88 %	7.03 %
Promedio de Estructura	4.66 %	3.14 %	8.92 %	6.92 %	5.91 %

* Δ% es significativo al nivel de 0.05

El ANOVA de Medidas Repetidas volvió a evidenciar la existencia de diferencias entre los sistemas para todos los parámetros que valoran el rendimiento mecánico del pavimento. Así, el Sistema 2, presentó valores significativamente superiores ($p < 0.05$) al resto de estructuras en los ensayos de *FR* y *StV*. En consecuencia, el *VBR* sobre este sistema de césped artificial obtuvo los valores más reducidos. El parámetro de *RT* reveló la existencia de un grupo homogéneo ($p = 0.84$) constituido por dos campos de fútbol muy diferentes en lo referente a la estructura de soporte (sub-base asfáltica sin capa elástica y sub-base de grava compactada con capa elástica). Del mismo modo, no hubo diferencias significativas ($p = 1.00$) en los valores de *BR* entre las superficies con sub-base de grava compactada, como puede apreciarse en la Figura 4.4 que muestra las densidades Kernel de las variables estudiadas.

Los resultados del análisis de regresión lineal revelaron una relación significativa entre los componentes estructurales de soporte, el año de evaluación y las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial. La Tabla 4.5 refleja los coeficientes de regresión con respecto a la variable omitida; estos resultados evidencian una influencia significativa de la capa elástica sobre todos los parámetros mecánicos excepto *VBR*. Por otro lado, *BR* está directamente influenciado por las características superficiales del pavimento como la resistencia, fricción y orientación de las fibras (que están muy expuestas al desgaste con el paso del tiempo), pero el análisis de regresión lineal también muestra una pequeña influencia de la estructura de soporte del pavimento. En relación a la *FR* y *StV*, la sub-base, la capa elástica y el año de evaluación explican el 35.6 % y el 43.6 % de estas variables, respectivamente.

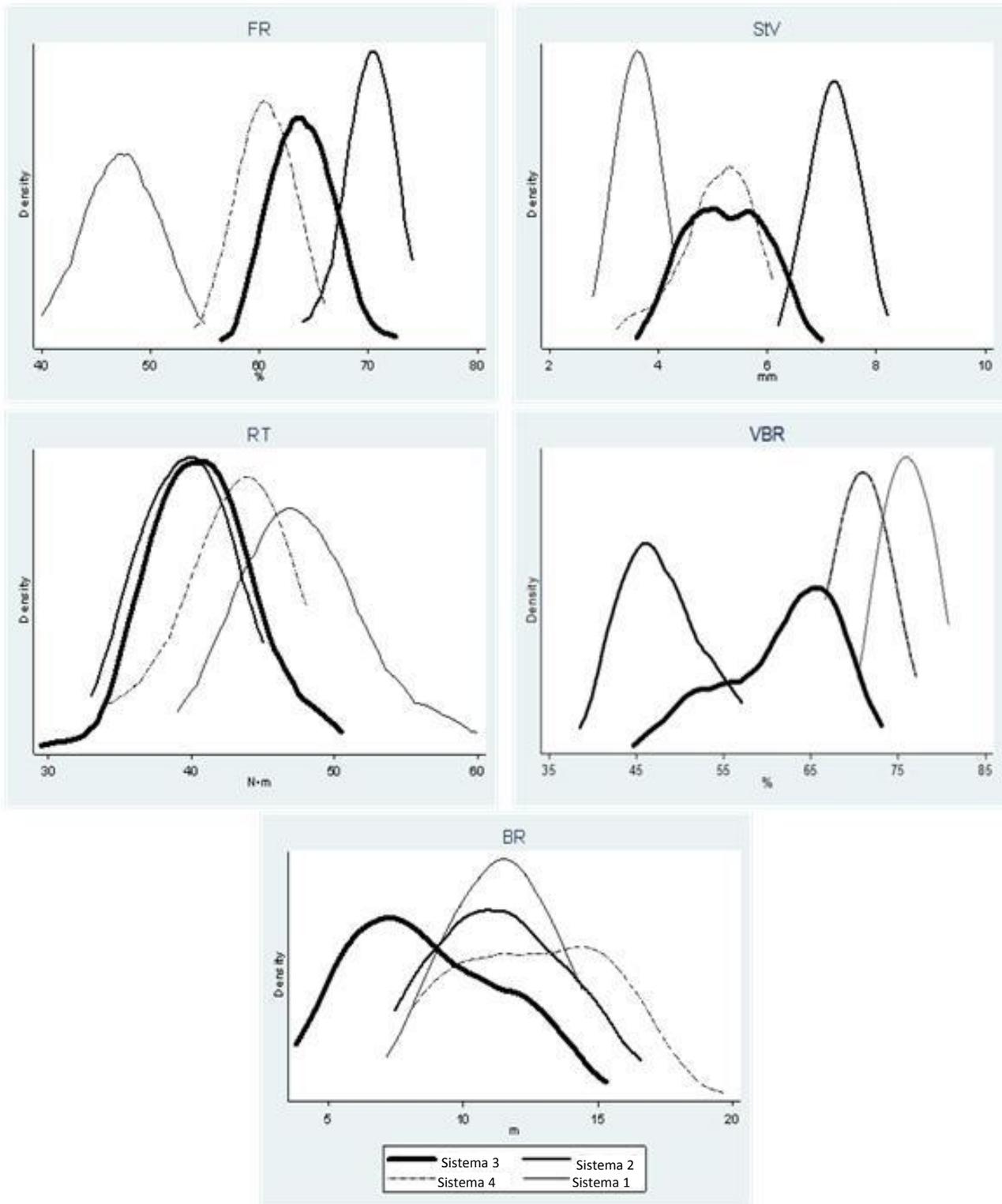


Figura 4.4. Gráficos Kernel de las propiedades mecánicas de las cuatro estructuras seleccionadas

Tabla 4.5. Coeficientes de regresión de los componentes estructurales de soporte y el año de evaluación

	<i>FR</i>	<i>StV</i>	<i>RT</i>	<i>VBR</i>	<i>BR</i>
Sub-base asfalto	2.967	1.055**	-1.400	0.938	-2.981***
Capa elástica	7.333**	1.578***	-6.120***	-6.325	4.757***
Año	-2.483	-0.183	0.810	1.725	1.832***
Sub-base asfalto*año	0.367	-0.897***	-0.460	2.316	1.486***
Capa elástica*año	1.533	0.070	2.020*	-1.978	-1.890***
Constante	57.617***	4.856***	44.120***	63.885***	7.704***
R ²	0.356	0.436	0.195	0.210	0.277
N. de observaciones	240	240	200	200	800

* $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

4.5. DISCUSIÓN

Actualmente, hay una creciente variabilidad entre los diseños de los campos de fútbol de césped artificial, con una amplia gama de tipos de fibras, materiales de relleno, capas elásticas o perfiles de construcción de sub-base, destinados a reducir costes, incrementar la durabilidad y mejorar el rendimiento mecánico de la superficie (James & Mcleod, 2010) y la percepción de los jugadores (Felipe et al., 2013). Sin embargo, la ausencia de evidencia científica ha generado incertidumbre en cuanto a la elección de los componentes estructurales que deben constituir el pavimento.

El presente trabajo de investigación aporta soluciones en cuanto a la influencia de las estructuras de soporte del césped artificial. Las valoraciones *in situ* constatan el efecto de la estructura sobre las propiedades mecánicas y su deterioro ocasionado por el desgaste. El análisis longitudinal muestra una reducción significativa de la *FR* en las estructuras que carecen de capa elástica, probablemente debido a que este componente compensa la pérdida de elasticidad ocasionada por la reducción de la fibra con el paso del tiempo (Párraga & Sánchez, 2002). Este hallazgo resalta la importancia de la capa elástica en la conservación de las propiedades del pavimento y en consecuencia, en el incremento de la vida útil de la instalación. Este componente estructural

también sufre un deterioro continuado pero la protección de las capas de relleno y la moqueta minimizan su desgaste (McLaren et al., 2012). Los resultados del análisis de regresión sugieren un rol significativo de la capa elástica en los parámetros mecánicos del campo, mostrando una mayor influencia que la sub-base y el año de evaluación.

La instalación de una capa elástica, que atenúa la intensidad de los impactos, sobre una sub-base de grava compactada provocó un incumplimiento de los requerimientos establecidos por la Norma EN 15330-1:2014, como consecuencia de un exceso de amortiguación. Sin embargo, el deterioro en la *FR*, ocasionado por el desgaste del pavimento durante un año, solventó este problema. Por ello, la degradación de la *FR* en el tiempo no siempre deriva en un inadecuado nivel de amortiguación del pavimento. El mantenimiento ralentiza esta degradación, pero el deterioro de esta propiedad con el paso del tiempo es irreversible. Además, los campos de césped artificial con una finalidad meramente recreacional rara vez incluyen labores de mantenimiento, por lo que la degradación es más acelerada.

Por el contrario, el sistema de césped artificial compuesto por una sub-base de grava compactada sin capa elástica evidenció una *FR* por debajo de los límites establecidos en la normativa, la causa principal puede ser una mala compactación de la sub-base que inhibe su efecto amortiguador (Naunheim, Parrott, & Standeven, 2004).

Los valores de *StV* siguieron una tendencia similar a la *FR* en cada uno de los sistemas evaluados. En relación al rendimiento mecánico del pavimento, este parámetro (*StV*) volvió a certificar las deficiencias de una sub-base de grava compactada, con un diseño inadecuado y sin capa elástica, al no cumplir con los mínimos exigidos en el estándar. No obstante, los bajos porcentajes de deterioro de esta estructura podrían confirmar la ralentización del desgaste, es decir, a medida que los campos de césped artificial disminuyen su rendimiento

mecánico, los índices de deterioro anuales son menores. Sin embargo, estudios longitudinales de mayor duración son necesarios para corroborar esta teoría.

El resto de estructuras presentaron valores óptimos de deformación en base a los criterios normativos. La comparación de estos tres sistemas de césped artificial evidenció una mayor capacidad de amortiguación de la sub-base de grava compactada, así como la relevancia del espesor de la capa elástica en términos de rendimiento. La capa elástica con poco espesor parece no afectar al porcentaje de absorción del pavimento. Sin embargo, el deterioro de *StV* (así como *FR*) fue inferior en los dos pavimentos que incluían capa elástica sobre la sub-base, asegurando una mayor durabilidad de las superficies con este componente. Estos hallazgos coinciden con las afirmaciones de que el incremento de la dureza de la superficie con el deterioro, será mayor sobre los sistemas de césped artificial que no incorporan capa elástica (McLaren et al., 2012).

A su vez, el *VBR* mostró una relación inversa con el resto de propiedades mecánicas relacionadas con las fuerzas verticales (*FR* y *StV*), de modo que cuanto más blando era el campo, el rebote del balón era menor. El desgaste de los campos ocasionó un incremento del rebote vertical en todas las estructuras, coincidiendo con estudios previos (Alcántara et al., 2009; Pérez-Soriano et al., 2009). De nuevo, este deterioro fue mayor en el Sistema 3. Además, la otra estructura sin capa elástica presentó unos niveles de rebote superiores a los exigidos por la normativa. Por estos motivos, los componentes estructurales de soporte también constituyen uno de los factores de influencia en términos de funcionalidad.

En definitiva, la sub-base y la capa elástica ejercen una influencia directa sobre las propiedades mecánicas relacionadas con cargas verticales, pero estos componentes también afectan indirectamente al resto de variables. La estructura de soporte puede explicar entre el 19 % y el 28 % de esas propiedades mecánicas (*RT*, *VBR* y *BR*). En este aspecto, los sistemas con mayor capacidad

de amortiguación no diferían significativamente en sus valores de *RT*. Asimismo, los porcentajes de deterioro de esta variable fueron inferiores al resto de estructuras. Por lo tanto, una adecuada *FR*, derivada de la estructura de soporte, disminuye el daño de las fuerzas verticales sobre las fibras y el material de relleno, que según recientes investigaciones, son los factores que inciden directamente sobre la resistencia al giro del pavimento (Severn et al., 2010; Villwock et al., 2009a; 2009b). La menor influencia de la estructura de soporte sobre este parámetro es evidenciada con el cumplimiento de los requerimientos de la norma EN 15330-1:2014 por parte de los cuatro sistemas de césped artificial. Para este ensayo, los problemas de diseño en la estructura constituida por una sub-base de grava compactada sin capa elástica son probablemente compensados por el correcto estado del relleno y la fibra del pavimento, aunque estos componentes no han sido objeto del presente estudio.

Los valores de *BR* reflejaron un incremento de la distancia de deslizamiento del balón con el desgaste de la superficie. Este hecho ocasionó un incumplimiento de los requerimientos normativos en las cuatro estructuras analizadas, corroborando la limitada influencia de los componentes estructurales de soporte sobre procesos predominantemente horizontales (Fleming, 2011a). La resistencia a la flexión, la fricción y la orientación de las fibras son los factores que afectan directamente a este parámetro (McLaren et al., 2012). No obstante, la ausencia de diferencias significativas entre las estructuras con sub-base de grava compactada (Sistemas 1 y 2) y los resultados del análisis de regresión lineal sugieren que este componente tiene efectos determinantes sobre la *BR*. El principal motivo de esta homogeneidad reside en la ausencia de pendientes destinadas al drenaje horizontal del agua de lluvia o riego de los campos con sub-base de asfalto. Esta circunstancia afecta principalmente a los Sistemas 3 y 4 que tienen una sub-base artificial impermeable, por lo que necesitan un sistema de drenaje horizontal. Este sistema incluye pendientes entre 0.6 % y 0.85 % que van desde el eje

longitudinal al lateral del campo, provocando una *BR* más heterogénea sobre estos sistemas de césped artificial. Por su parte, los Sistemas 1 y 2 disponen de un sistema de drenaje vertical sin ninguna pendiente como consecuencia de la permeabilidad de la sub-base de grava compactada.

Esta investigación fue realizada sobre sistemas de césped artificial instalados, lo que ha permitido conocer el rendimiento y deterioro real de las propiedades mecánicas de la superficie. Un estudio similar a corto plazo (Joosten, 2003) durante el primer año de instalación de seis campos de césped artificial mostró porcentajes de variación muy superiores a los obtenidos en la presente investigación. Las diferencias pueden ser debidas a la antigüedad de los campos lo que demuestra que los pavimentos sin un mantenimiento específico sufren un deterioro muy acelerado de sus propiedades durante el primer año. Este ritmo de degradación no es homogéneo con el paso de los años y se minimiza conforme disminuye el rendimiento mecánico de los campos de fútbol de césped artificial como es observado en estudios a largo plazo (Kieft, 2009).

Las variables de control utilizadas (tipo de relleno y fibra, antigüedad, horas de uso y mantenimiento) se ajustaron a la muestra disponible y permitieron unificar criterios con el objetivo de conocer el efecto de la estructura de soporte. Además, la selección de campos construidos por el mismo fabricante reduce la incertidumbre latente en los estudios de campo de este tipo, al garantizar la presencia de los mismos materiales superficiales en los cuatro sistemas de césped artificial. Este estudio confiere una mayor importancia a la elección y el diseño de la estructura de soporte de los campos de fútbol de césped artificial. Asimismo, la reducida vida útil de los pavimentos artificiales debería impulsar nuevas investigaciones con el objetivo de conservar el rendimiento mecánico del campo durante más tiempo. Nuevas técnicas de mantenimiento y combinaciones de componentes estructurales más resistentes al desgaste facilitarán la mejora cualitativa de esta superficie deportiva.

CAPÍTULO V.

INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SISTEMAS DE CÉSPED ARTIFICIAL DE TERCERA GENERACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO FÍSICO, FISIOLÓGICO Y LA PERCEPCIÓN DE LOS JUGADORES DE FÚTBOL

CAPÍTULO V. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SISTEMAS DE CÉSPED ARTIFICIAL DE TERCERA GENERACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO FÍSICO, FISIOLÓGICO Y LA PERCEPCIÓN DE LOS JUGADORES DE FÚTBOL

5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El fútbol es un deporte caracterizado por periodos de alta intensidad con fases de recuperación donde son intercaladas acciones de salto, carrera y golpes con frecuentes aceleraciones y cambios de dirección (J.C. Barbero-Álvarez, Coutts, Granda, Barbero-Álvarez, & Castagna, 2009; Bloomfield, Polman, & O'Donoghue, 2007; Carling, Bloomfield, Nelsen, & Reilly, 2008; Chamari et al., 2008). La repercusión internacional de este deporte ha derivado en un elevado número de estudios sobre los factores internos al jugador que inciden en su rendimiento. Así, parámetros físicos (Castagna, Impellizzeri, Cecchini, Rampinini, & Barbero-Álvarez, 2009; Figueiredo, Gonçalves, Coelho e Silva, & Malina, 2009; Rebelo et al., 2013), fisiológicos (Kalapotharakos et al., 2006; Rampinini, Impellizzeri, et al., 2007) y psicológicos (Greig, Marchant, Lovell, Clough, & McNaughton, 2007) han demostrado ser variables internas influyentes en el rendimiento del futbolista. Por otro lado, la incidencia de variables externas como los suplementos nutricionales (Goedecke et al., 2013), los tratamientos de recuperación (Buchheit, Horobeanu, Méndez-Villanueva, Simpson, & Bourdon, 2011), la temperatura (Mohr, Nybo, Grantham, & Racinais, 2012) o las variables situacionales (Lago, Casais, Domínguez, & Sampaio, 2010) son cada vez más estudiadas en el fútbol.

Otra de estas variables externas que influye en el juego es la superficie deportiva. Se ha puesto de manifiesto que el estado del terreno de juego es un factor que afecta igualmente al rendimiento del futbolista (Hughes et al., 2013). La interacción superficie-jugador ha sido vinculada a la asociación entre diferentes tipos de superficies y calzados deportivos (De Clercq, 2014; Hennig, 2014; Kuhlman, Sabick, Pfeiffer, Cooper, & Forhan, 2010; McGhie & Ettema,

2013; Müller, Sterzing, Lange & Milani, 2010). Los primeros estudios comparativos entre superficies focalizaron su interés en los menores ratios de lesión identificados sobre césped natural con respecto a los pavimentos de césped artificial (Ekstrand, Hägglund, & Fuller, 2011; Ekstrand et al., 2006; Powell & Schootman, 1992). Sin embargo, las mejoras cualitativas sufridas por este tipo de pavimentos artificiales han conseguido igualar los índices de lesiones entre ambas superficies (Dragoo & Braun, 2010; Fuller, Dick, Corlette, & Schmalz, 2007), aunque la percepción de los jugadores profesionales continúa asociando un mayor riesgo de lesión al césped artificial (Poulos et al., 2014). A pesar de ello, una fibra más larga, la mejora de las propiedades del relleno de la superficie y el perfeccionamiento de los componentes estructurales de soporte, han sido suficientes para que la FIFA y CEN apoyen este tipo de superficies para la práctica de fútbol con los pertinentes test de control de la calidad ajustados a unos rigurosos requerimientos (CEN, 2014; FIFA, 2012a; FIFA, 2012b).

La controversia suscitada entre los pavimentos naturales y artificiales en la práctica del fútbol derivó en estudios sobre la incidencia en el rendimiento del deportista (Andersson et al., 2008; Di Michele, Di Renzo, Ammazalorso, & Merni, 2009; Ford et al., 2006; Gains, Swedenhjelm, Mayhew, Bird, & Houser, 2010; Hughes et al., 2013; Kanaras et al., 2014; Nédélec et al., 2013). En acciones de sprint, estas investigaciones revelaron unos tiempos y velocidades similares entre ambas superficies (Andersson et al., 2008; Ford et al., 2006; Gains et al., 2010; Hughes et al., 2013) o incluso mejores sobre césped artificial (Kanaras et al., 2014). Además, los ejercicios aislados sobre césped artificial no inducen a una mayor fatiga o retraso en la recuperación (Hughes et al., 2013; Nédélec et al., 2013). A pesar de ello, algunos estudios han desvelado un mayor esfuerzo físico percibido por los jugadores cuando juegan sobre césped artificial (Andersson et al., 2008; Burillo et al., 2014; Zanetti, 2008), así como mayores niveles de lactato y frecuencia cardiaca en carreras submaximas sobre esta

superficie (Di Michele et al., 2009). En cuanto a los parámetros técnicos, los partidos jugados sobre césped artificial evidenciaron una disminución de los deslizamientos y un incremento en el número de pases cortos (Andersson et al., 2008). La velocidad de golpeo de balón es otra de las variables técnicas afectadas por el tipo de superficie (Potthast, 2010). Brito et al. (2012) ampliaron el marco de estudio a superficies de tierra, asfalto y césped artificial. Este trabajo reveló una mayor carga física sobre tierra con respecto al césped artificial y el asfalto, debido a una menor capacidad para correr a alta velocidad sobre este tipo de superficies (Giatsis, Kollias, Panoutsakopoulos, & Papaiakevou, 2004). El origen de estos estudios nace en las diferencias entre las propiedades mecánicas características de cada tipo de superficie y su incidencia en el rendimiento. De hecho, incrementos en el coeficiente de tracción de hasta 0.82 entre el calzado y el pavimento han demostrado una mejora del rendimiento del futbolista en aceleraciones lineales y esprints circulares (Luo & Stefanyshyn, 2011). Investigaciones similares muestran que una mayor energía de restitución asociada a una mayor rigidez contribuye a mejorar la economía de carrera (Kerdok, Biewener, McMahon, Weyand, & Herr, 2002; Schrier, Wannop, Lewinson, Worobets, & Stefanyshyn, 2014). Por último, McGhie y Etemma (2013) resaltan la absorción de impactos como un factor importante en el rendimiento y la seguridad de los futbolistas debido a la reducción de los picos de impacto durante las acciones propias del deporte.

En este sentido, la evolución de los campos de fútbol de césped artificial ha derivado en una gran heterogeneidad en las estructuras de construcción de los pavimentos artificiales de tercera generación (Burillo et al., 2012). En consecuencia, Potthast et al. (2010) revelaron que las diferencias entre sistemas de césped artificial pueden ser mayores que aquellas entre césped natural y artificial. Estudios recientes han demostrado la influencia de los componentes estructurales sobre las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial, mostrando diferentes niveles de absorción de impactos,

deformación vertical y tracción rotacional en función del sistema implantado (Alcántara et al., 2009; Sánchez-Sánchez, Felipe, Burillo, Del Corral, & Gallardo, 2014). A pesar de ello, ninguna investigación ha comparado la incidencia de esta variabilidad mecánica de los campos de césped artificial sobre las respuestas fisiológicas y el rendimiento de los jugadores de fútbol.

5.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Tras el planteamiento del problema de investigación, el objetivo general de este segundo estudio es:

1. Conocer la influencia de las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial con diferentes estructuras constructivas sobre el rendimiento físico, fisiológico y la percepción de jugadores de fútbol amateur.

De forma paralela, la investigación plasma como objetivos específicos:

2. Verificar la heterogeneidad mecánica de los campos de fútbol de césped artificial con diferentes estructuras de soporte.
3. Valorar la respuesta física y fisiológica de los jugadores en diferentes sistemas de césped artificial durante un test de esprines repetidos.
4. Determinar la incidencia de las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial sobre diferentes test de salto.
5. Comprobar los niveles de fatiga inducidos por acciones propias del fútbol en diferentes sistemas de césped artificial.

Por otra parte, las hipótesis de investigación planteadas en base a los estudios precedentes son:

- A. Los sistemas de césped artificial analizados presentarán diferencias en sus propiedades mecánicas en función de la estructura de soporte implantada.
- B. La variabilidad mecánica de los sistemas de césped artificial derivará en diferencias en el rendimiento físico y fisiológico de los jugadores de fútbol.
- C. Las propiedades mecánicas vinculadas a la amortiguación del pavimento generarán diferentes grados de fatiga durante el test RSA en los sistemas de césped artificial.
- D. La percepción de los jugadores sobre la superficie de juego variará significativamente en base al sistema de césped artificial.

5.3. MATERIAL Y MÉTODO

5.3.1. Características de la muestra

18 jugadores de fútbol amateur masculino del mismo equipo participaron en el estudio (22.44 ± 1.72 años; 73.74 ± 8.47 kg; 174.72 ± 5.99 cm; 14.74 ± 4.15 % de grasa corporal). Todos los participantes tenían una experiencia previa de al menos 5 años de práctica del fútbol sobre césped artificial (6.28 ± 0.82 años) y entrenaban 2 horas al día, 3-4 días a la semana con una competición semanal. Ningún participante tenía antecedentes cardiopulmonares ni tomaba algún tipo de medicación durante el estudio. Además, todos acreditaban haber superado un reconocimiento médico necesario para la práctica del fútbol.

Inicialmente, la muestra estaba compuesta por 20 jugadores, los dos porteros fueron descartados del estudio debido a las diferencias presentes con respecto a los jugadores de campo. El resto de jugadores completaron todas las pruebas del estudio. Todos los jugadores fueron informados de los posibles riesgos asociados al estudio y firmaron el consentimiento informado para participar en el proyecto (Anexo 3 y 4). El comité ético institucional aprobó el estudio en base a la última versión de la Declaración de Helsinki (Anexo 2).

5.3.2. Procedimiento

Se realizó una prueba piloto sobre un campo de césped artificial para que los jugadores se habituaran a las diferentes pruebas incluidas en el protocolo del estudio. Cada jugador repitió las pruebas en cada uno de los cuatro sistemas de césped artificial de tercera generación seleccionados, siguiendo la secuencia marcada por la numeración de los pavimentos. Los cuatro campos de césped artificial seleccionados presentaban diferencias en los componentes estructurales de soporte (sub-base y capa elástica). La Tabla 5.1 muestra las características de los sistemas de césped artificial seleccionados.

Tabla 5.1. Características de los sistemas de césped artificial seleccionados

Características	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Fibra				
Material	Polietileno	Polietileno	Polietileno	Polietileno
Tipo	Monofilamento	Monofilamento	Monofilamento	Monofilamento
Altura del pelo	60 mm	45 mm	60 mm	45 mm
Dtex	12000	12000	12000	12000
Relleno				
Arena	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo
Granulometría	0.3-0.8 mm	0.3-0.8 mm	0.3-0.8 mm	0.3-0.8 mm
Cantidad	20 Kg/m ²	15 Kg/m ²	20 Kg/m ²	15 Kg/m ²
Caucho	SBR	SBR	SBR	SBR
Granulometría	0.5-2.5 mm	0.5-2.5 mm	0.5-2.5 mm	0.5-2.5 mm
Cantidad	13 Kg/m ²	8 Kg/m ²	13 Kg/m ²	8 Kg/m ²
Estructura soporte				
Sub-base	Grava compactada	Grava compactada	Asfalto	Asfalto
Capa elástica	No	Si	No	Si
Espesor capa elástica	-	23 mm	-	12 mm

Las propiedades mecánicas relacionadas con la interacción superficie-jugador fueron evaluadas en los cuatro sistemas de césped artificial seleccionados para este estudio (difieren de los seleccionados en el capítulo IV). Los test *in situ* sobre los pavimentos siguieron los protocolos y las especificaciones recogidas en la norma EN 15330-1:2014 y en estudios previos (Alcántara et al., 2009, Sánchez-Sánchez et al., 2014). Las variables analizadas fueron absorción de impactos ($FR\%$), deformación vertical estándar ($StV\text{-mm}$), energía de restitución ($ER\%$) y tracción rotacional ($RT\text{-N}\cdot\text{m}$). Las tres primeras variables están relacionadas con la respuesta del pavimento ante un impacto y fueron evaluadas mediante el Atleta Artificial Avanzado (Deltec Metaal, Duiven, Holland), siguiendo los procedimientos indicados en las Normas EN 14808:2005 y EN 14809:2005.

La última variable informa sobre la resistencia ofrecida por el pavimento para realizar un giro en Newtons por metro ($\text{N}\cdot\text{m}$). Para este ensayo fue utilizado el Rotational Resistance Tester (Deltec Metaal, Duiven, Holland), siguiendo el protocolo descrito en la Norma EN 15301-1:2007. Las zonas de ensayo fueron las indicadas por la Norma EN 15330-1:2014 (Figura 5.1).

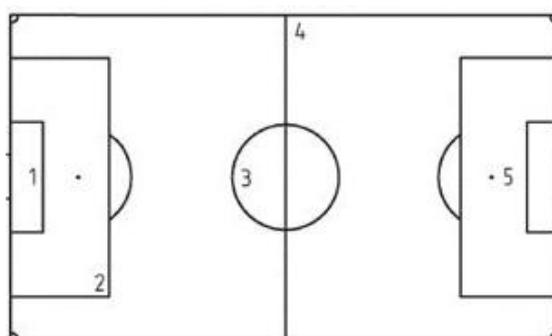


Figura 5.1. Zonas de ensayo según la norma EN 15330-1:2014

La proximidad geográfica de los cuatro campos de fútbol de césped artificial garantizaba unas condiciones climáticas similares en cada uno de los ensayos. Se estableció un plazo de 72 h entre las diferentes sesiones para asegurar la recuperación completa de los jugadores. Los test se llevaron a cabo

bajo unas condiciones climáticas de 18-22.5 °C de temperatura y 20-35 % de humedad.

Protocolo experimental

El día anterior a la prueba experimental se requirió a los jugadores no realizar ningún tipo de actividad extenuante, así como a mantener unos hábitos alimenticios similares y utilizar las mismas botas de fútbol en los cuatro sistemas evaluados. Los jugadores llegaban a los campos de fútbol seleccionados a las 09.00 a.m. Un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, Spi Pro X, GPSports, Australia) era incorporado en la parte alta de la espalda de cada jugador. Antes de iniciar los diferentes test, los participantes llevaron a cabo un calentamiento estandarizado que incluía: 5 min de carrera continua a velocidad controlada, 5 min de ejercicios de movilidad articular y tres esprines de 30 m incrementando la intensidad con una recuperación de 2 min entre cada ensayo. No se realizó ningún tipo de estiramiento estático durante el calentamiento. A las 10.00 a.m los jugadores iniciaban los diferentes test de rendimiento siendo instruidos verbalmente para realizar el máximo esfuerzo durante los mismos.

Test de esprines repetidos (RSA)

Antes de realizar el test RSA, los jugadores realizaron tres esprines máximos de 30 m con puntos intermedios de medida en 5 y 10 m. El mejor tiempo de los tres esprines fue seleccionado para el análisis.

Después de 15 min de recuperación, los jugadores realizaron el test RSA. El test consistió en 6 esprines de 40 m (20+20 m) (Ferrari Bravo et al., 2008). Los participantes esprintaban 20 m, pisaban una línea con el pie y volvían a la línea de salida a la máxima intensidad. La desaceleración se producía un metro después de cruzar la línea de llegada. Después de 20 s de recuperación pasiva, los futbolistas repetían el mismo procedimiento, 5 s antes de iniciar el siguiente

sprint, ellos debían situarse en el punto de salida y el investigador realizaba la cuenta atrás. La zona de sprint incorporaba un sistema de cuatro pares de fotocélulas (Microgate, Bolzano, Italy) que recogían tiempos a los 5, 10, 20, 30 y 40 m con una sensibilidad de 0.001 s. Si el tiempo del primer sprint del test RSA era superior (incremento mayor del 5 %) al mejor sprint individual realizado antes del inicio del test, éste no se consideraba válido, siguiendo el procedimiento descrito en estudios previos (Castagna et al., 2008; Chaouachi et al., 2010; Spencer, Bishop, Dawson, & Goodman, 2005) y los sujetos debían repetir el test después de 5 min de recuperación. El mejor tiempo de sprint (RSA_{MEJOR}), el tiempo medio (RSA_{MEDIO}), el tiempo total (RSA_{TT}), el porcentaje de decrecimiento (%Dec) y de diferencia entre el mejor y el peor sprint (%Dif) durante el test RSA fueron calculados de manera similar a investigaciones anteriores (Chaouachi et al., 2010; Ferrari Bravo et al., 2008; Fitzsimons, Dawson, Ward, & Wilkinson, 1993; Rampinini, Bishop, et al., 2007). El %Dec ($((\text{tiempo medio/mejor tiempo} \times 100) - 100)$) ha sido identificado como el método más válido y fiable para evaluar la fatiga en este tipo de test (Buchheit, 2010; Glaister et al., 2008), mientras que estudios recientes han demostrado una correlación alta con el %Dif (Chaouachi et al., 2010). El pico máximo de velocidad (V_{max}), la velocidad máxima media (V_{media}) de carrera y la frecuencia cardiaca de los jugadores durante el RSA era monitorizada con los GPS de 10 Hz que han demostrado ser una herramienta válida y fiable en el registro de estas variables (Barbero-Álvarez et al., 2009; Varley, Fairweather, & Aughey, 2012).

Un minuto después de finalizar el test RSA, un investigador especializado tomaba una muestra de 5- μ L de lactato sanguíneo de la punta del dedo de los participantes mediante un dispositivo portátil (Lactate Scout, SensLab GmbH, Leipzig, Germany). Este procedimiento era repetido a los 3 min de finalizar el test RSA como en estudios previos (Castagna, Impellizzeri, Chaouachi, & Manzi, 2013).

Salto vertical

Saltos con contramovimiento (CMJ) y Squat (SJ) fueron realizados antes y después del test RSA usando un sistema de laser infrarrojo (Optojump Next, Microgate, Bolzano, Italy). Los participantes debían mantener las manos sobre las caderas para eliminar el efecto del movimiento de los brazos sobre el rendimiento del salto. Cada uno de los jugadores realizaron 2 saltos de cada modalidad antes (con 2 min de recuperación entre saltos) y después del test RSA. El mejor de los 2 saltos fue seleccionado para el análisis estadístico.

Del mismo modo, los jugadores realizaron el test de saltos máximos de 15 s para valorar el deterioro del rendimiento en la acción de salto. Para este test, los participantes se situaban erguidos con los pies separados a la altura de los hombros y las manos en las caderas del mismo modo que en el CMJ. A la señal de inicio, los sujetos flexionaban las rodillas y realizaban saltos máximos durante 15 s cayendo con los dos pies al mismo tiempo. La altura máxima en cm, el %Dec ($100 - (\text{media de saltos/mejor salto} \times 100)$) (Buchheit, 2010) y la potencia de salida $[(62.5 \times \text{altura de salto} + 50.3 \times \text{masa corporal}) - 2184.7] \times \text{número de saltos}$ (Lara et al., 2006) fueron calculados para este test.

Lanzamiento a portería

Los jugadores golpearon con la mayor velocidad posible un balón parado situado sobre el punto de penalti a 11 m de la portería. El balón utilizado para este test disponía de la certificación *FIFA Approved* y unos niveles de presión acordes a los estándares establecidos por este organismo. Los jugadores ejecutaron dos lanzamientos antes y después del test RSA con 1 min de descanso entre cada lanzamiento, seleccionando el que más velocidad alcanzó en cada una de las rondas para el posterior análisis. La velocidad del balón (Km/h) fue registrada mediante un radar Stalker ATS System™ (Radar Sales, MN, US) situado detrás de la portería y apuntando al balón.

Escala Visual Análoga (VAS)

El esfuerzo percibido y la fatiga en cada uno de los sistemas de césped artificial fue evaluado mediante cuestionarios de Escala Visual Análoga (VAS) utilizados en estudios previos (Andersson et al., 2008; Brito et al., 2012). El cuestionario incluía 6 preguntas (Anexo 5) y era aplicado una vez finalizada la sesión en cada uno de los sistemas de césped artificial. Los jugadores respondían sobre una línea horizontal de 100 mm donde 0 era “nada duro/cansado/cómodo/difícil” y 100 era “muy duro/cansado/cómodo/difícil”. Las preguntas eran: “¿Cómo puedes clasificar el esfuerzo realizado durante la sesión?” (VAS1); “¿Cómo estás de cansado en este momento?” (VAS2); “¿Qué dificultad has encontrado al realizar un giro o cambio de dirección?” (VAS3); “¿Cómo te has encontrado a la hora de realizar saltos?” (VAS4); “¿Cómo te has sentido durante la carrera?” (VAS5); “En general, ¿Cómo te has sentido a lo largo de la sesión?” (VAS6).

5.3.3. Análisis estadístico

Los resultados son presentados como media y desviación estándar (SD). La verificación de la normalidad y la homogeneidad de las varianzas se asumieron mediante el test de Kolmogorov-Smirnov y el estadístico de Levene. La influencia de los sistemas de césped artificial sobre las variables seleccionadas fueron evaluadas mediante análisis de las varianzas (ANOVA) y las diferencias entre medias fueron identificadas mediante el procedimiento post hoc de Bonferroni. La comparación entre los resultados obtenidos antes y después del RSA en los test de salto vertical y lanzamiento a portería fue realizada mediante un ANOVA de dos vías (sistema de césped artificial x tiempo). Un análisis de regresión lineal fue realizado utilizando las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial como variables independientes, omitiendo la *StV* por su alta correlación con *FR* ($r=0.99$; $p<0.0001$), eliminando

posibles problemas de multicolinealidad y los resultados de los diferentes test de rendimiento como variables dependientes. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SPSS v 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). El nivel de significación fue establecido en $p < 0.05$.

5.4. RESULTADOS

Propiedades mecánicas de la superficie

La Tabla 5.2 muestra las diferencias mecánicas entre los cuatro sistemas de césped artificial seleccionados. El Sistema 2 (compuesto por sub-base de grava compactada y capa elástica) presentó los valores más elevados de FR (69.83 ± 1.18 %) y StV (6.56 ± 0.37 mm) en comparación con el resto de sistemas ($F=451.63$ y $F=326.92$; $p < 0.001$). Los resultados más elevados de ER y RT fueron identificados en el Sistema 4 (50.50 ± 2.19 % y 54.60 ± 4 N·m, respectivamente) que incorporaba sub-base de asfalto y capa elástica.

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial seleccionados

	Sistema 1 (a)	Sistema 2 (b)	Sistema 3 (c)	Sistema 4 (d)	F	p
FR (%)	51.30 (2.52) ^{b,c}	69.83 (1.18)	60.10 (2.04) ^b	48.07 (3.67) ^{a,b,c}	451.63	< 0.001
StV (mm)	3.63 (0.43) ^{b,c}	6.56 (0.37)	4.68 (0.45) ^b	3.43 (0.48) ^{b,c}	326.92	< 0.001
ER (%)	42.63 (1.50) ^{c,d}	42.07 (1.46) ^{c,d}	43.90 (1.45) ^d	50.50 (2.19)	161.26	< 0.001
RT (N·m)	45.56 (2.84) ^{b,c,d}	42.44 (3.14) ^{a,d}	41.72 (2.81) ^{a,d}	54.60 (4)	83.81	< 0.001

^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p < 0.05$).

Test de esprints repetidos (RSA)

El análisis global del rendimiento en el test RSA (Tabla 5.3) sobre los 4 Sistemas de césped artificial seleccionados reveló un RSA_{MEDIO} de sprint y RSA_{TT} significativamente inferior ($F=4.214$ y $F=4.216$; $p < 0.01$), en los Sistemas 1 y 2 en comparación con el Sistema 3 que presentaba los niveles más bajos de RT . Por otro lado, el tiempo del mejor sprint fue 7.38 ± 0.35 s en el Sistema 1 y 7.74 ± 0.29 s en el Sistema 3 ($F=4.002$; $p < 0.05$). Los parámetros de velocidad de carrera y frecuencia cardíaca durante el test RSA no fueron afectados por el sistema de

césped artificial. Del mismo modo, el deterioro del rendimiento en el test RSA fue similar en los cuatro sistemas de césped artificial ($p>0.05$).

Tabla 5.3. Valores de tiempo, velocidad y frecuencia cardíaca en el test RSA en los cuatro

	Sistemas de césped artificial				<i>F</i>	<i>p</i>
	Sistema 1 (a)	Sistema 2 (b)	Sistema 3 (c)	Sistema 4 (d)		
Tiempo						
RSA _{MEDIO} (s)	7.93 (0.30) ^c	7.97 (0.26) ^c	8.24 (0.29)	8.02 (0.25)	4.214	0.009
RSA _{MEJOR} (s)	7.38 (0.35) ^c	7.50 (0.26)	7.74 (0.29)	7.51 (0.32)	4.002	0.011
RSA _{TT} (s)	47.55 (1.82) ^c	47.85 (1.59) ^c	49.46 (1.75)	48.14 (1.48)	4.216	0.009
% Dec Sprint 40 m	7.44 (1.74)	6.40 (2.45)	6.53 (2.10)	6.90 (2.85)	0.681	0.567
% Dif Sprint 40 m	13.42 (2.99)	12.20 (4.63)	11.37 (3.87)	12.08 (4.03)	0.782	0.508
Velocidad						
V _{max} (km/h)	26.84 (1.06)	27.13 (1.66)	26.69 (2.28)	26.72 (1.22)	0.267	0.849
V _{media} (km/h)	24.78 (0.71)	24.67 (1.06)	24.19 (0.72)	24.44 (0.78)	1.635	0.190
% Dec Velocidad	7.62 (2.55)	8.94 (3.29)	9.02 (4.62)	8.45 (2.24)	0.649	0.586
% Dif Velocidad	14.52 (3.48)	15.99 (4.80)	15.71 (5.36)	15.39 (4.14)	0.342	0.795
Frecuencia cardíaca						
Pico FC (l.p.m)	184.00 (12.90)	185.18 (12.48)	183.13 (13.19)	184.78 (11.72)	0.083	0.969

^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p<0.05$). Los datos son presentados como Media (SD) en 18 jugadores de fútbol

En la comparación analítica por número de sprint, los tiempos alcanzados en los cuatro primeros sprint del test RSA fueron significativamente superiores en el sistema con sub-base asfáltica y sin capa elástica (Sistema 3) que en los Sistemas 1 y 2 (Figura 5.2; $p<0.05$). En este sentido, la velocidad máxima alcanzada en el cuarto sprint fue 23.23 ± 0.78 km/h en el Sistema 3 y 24.32 ± 1.05 km/h en el Sistema 1 ($F=3.552$; $p<0.05$). La ausencia de diferencias significativas en las variables de %Dif y %Dec indica que la superficie de juego no tiene un efecto adicional en el desarrollo de la fatiga durante el test RSA ($p>0.05$).

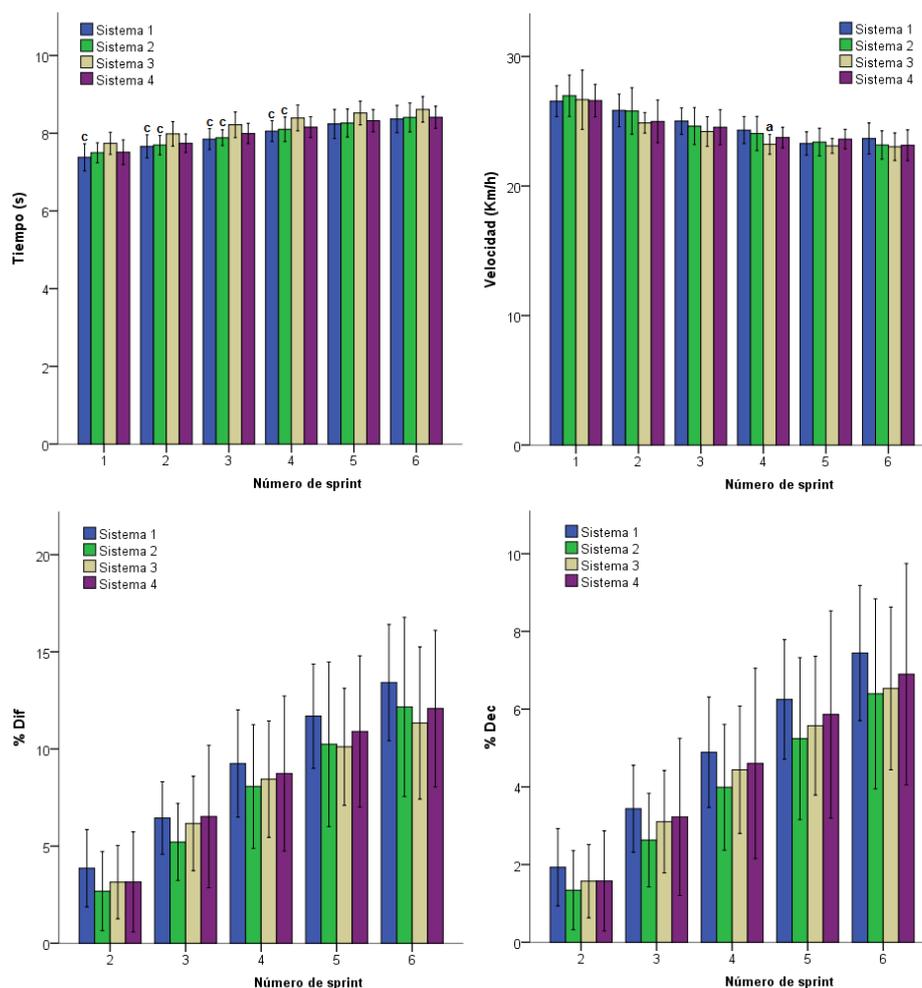


Figura 5.2. Perfil de tiempo, velocidad y deterioro del rendimiento en los esprints (%Dif y %Dec) del test RSA (6x40 m). ^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p < 0.05$)

El estudio por tramos de distancia del test RSA reveló tiempos superiores en el Sistema 3 con respecto al resto de sistemas de césped artificial. Estas diferencias fueron más significativas a partir de los 20 m ($p < 0.001$; Figura 5.3). El cambio de dirección presentó tiempos significativamente inferiores en los Sistemas 1 y 2 que evidencian valores intermedios de RT con respecto a los Sistemas 3 y 4 con valores de tracción situados en los extremos superior e inferior de la muestra (4.35 ± 0.34 s y 4.38 ± 0.27 s vs 4.59 ± 0.34 s y 4.50 ± 0.32 s; $F = 11.553$; $p < 0.001$). Nuevamente, los índices de fatiga (%Dif y %Dec) no diferían significativamente entre los sistemas de césped artificial en los tramos evaluados ($p > 0.05$), eliminando el efecto de la superficie de juego sobre esta variable.

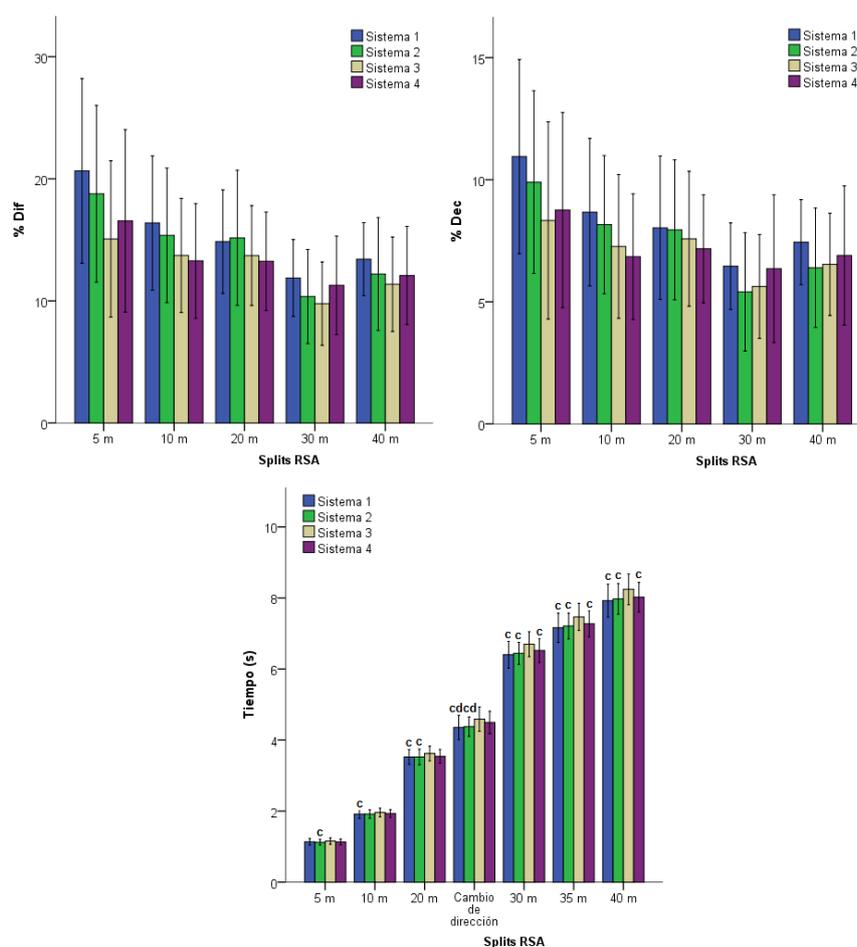


Figura 5.3. Tiempos y porcentaje de deterioro del rendimiento (%Dec y %Dif) en los esprines del test RSA especificados por tramos de distancia. ^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p < 0.05$)

Los valores de lactato en sangre posteriores al test RSA no se vieron afectados por la superficie de juego. Las muestras tomadas 1 min (S1: 12.92 ± 2.27 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; S2: 12.44 ± 2.42 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; S3: 11.04 ± 2.31 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; S4: 11.80 ± 2.53 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) y 3 min después de finalizar el test RSA (S1: 12.98 ± 2.51 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; S2: 12.97 ± 2.98 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; S3: 11 ± 1.86 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; S4: 11.06 ± 2.46 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) fueron similares en los cuatro sistemas de césped artificial analizados ($p > 0.05$).

Salto vertical

El sistema de césped artificial no generó ningún efecto sobre la altura de salto, ni en la potencia generada en los test de salto CMJ, SJ y test de 15 s ($p > 0.05$; Tabla 5.4). Después del test RSA, un deterioro significativo de la altura de salto y la potencia generada en CMJ y SJ fue detectado en todos los sistemas

de césped artificial evaluados ($p < 0.05$). La interacción del sistema de césped artificial y el deterioro del rendimiento reveló diferencias significativas en el índice de fatiga (%Dif) en la prueba ANOVA en el CMJ ($F=2.942$; $p < 0.05$) y en el SJ ($F=3.539$; $p < 0.05$). Los resultados mostraron un mayor índice de fatiga en los sistemas con mayores niveles de *FR* y *StV*. Sin embargo, el análisis post-hoc no confirma diferencias significativas entre pares ($p > 0.05$). Por otro lado, en el test de salto de 15 s, los jugadores acreditaron un deterioro de la altura de salto significativamente superior sobre el sistema con mayor *ER* (Sistema 4; $F=3.188$; $p < 0.05$). Finalmente, el porcentaje de variación de la potencia ejercida (%Dif Potencia) en los test CMJ y SJ después del test RSA no estuvo afectado por el sistema de césped artificial ($p > 0.05$).

Tabla 5.4. Valoración de los test de salto CMJ, SJ y 15 s sobre los diferentes sistemas de césped artificial.

	Sistema 1 (a)	Sistema 2 (b)	Sistema 3 (c)	Sistema 4 (d)	<i>F</i>	<i>p</i>
CMJ						
Altura CMJ _{PRE} (cm)	36.53 (4.40)*	35.46 (5.38)*	36.36 (5.72)*	36.92 (5.11)*	0.249	0.862
Altura CMJ _{POST} (cm)	28.31 (4.46)	26.03 (4.87)	26.53 (5.21)	30.09 (5.85)	2.248	0.091
% Dif altura CMJ	22.49 (7.45)	26.12 (10.67)	27.05 (7.62)	18.47 (11.26)	2.942	0.040
Potencia _{PRE} (W)	3809.35 (515.98)*	3697.76 (491.98)*	3852.28 (553.17)*	3832.01 (528.95)*	0.294	0.830
Potencia _{POST} (W)	3295.37 (527.67)	3108.42 (492.59)	3237.83 (547.07)	3404.92 (577.83)	0.919	0.437
% Dif Potencia	13.66 (5.13)	15.91 (7.14)	16.09 (5.24)	11.25 (7.10)	2.286	0.087
SJ						
Altura SJ _{PRE} (cm)	28.49 (4.39)*	29.69 (4.03)*	29.30 (5.46)*	29.60 (4.55)*	0.238	0.869
Altura SJ _{POST} (cm)	24.57 (4.28)	23.22 (4.35)	23.14 (4.69)	25.09 (3.53)	0.922	0.436
% Dif altura SJ	13.74 (7.50)	21.71 (9.86)	20.72 (9.85)	14.66 (8.50)	3.539	0.019
Test 15 s						
Media altura de salto (cm)	28.68 (3.66)	28.25 (4.51)	28.55 (4.92)	29.34 (3.65)	0.211	0.888
Número de saltos (n)	17.18 (2.13)	15.53 (1.33)	16.56 (2.10)	15.94 (1.80)	2.554	0.063
Potencia (W)	57030.07 (11577.78)	50598.42 (9234.74)	55574.10 (10710.92)	53522.08 (9962.71)	1.218	0.310
% Dec saltos	10.58 (2.84)	10.37 (2.86) ^d	11.57 (3.93)	13.66 (4.26)	3.188	0.030

Los datos son presentados como Media (SD) en 18 jugadores de fútbol

*Diferencias significativas entre pre y post RSA ($p < 0.05$)

^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p < 0.05$)

Lanzamiento a portería

El test RSA generó un deterioro significativo de la velocidad de golpeo de balón en cada uno de los cuatro sistemas de césped artificial (S1: 7.34 ± 5.18 %; S2: 11.62 ± 7.67 %; S3: 11.79 ± 6 %; S4: 7.55 ± 6 ; $p < 0.05$). Sin embargo, no hubo una interacción significativa entre la superficie de juego y la velocidad de golpeo de los jugadores de fútbol ($p > 0.05$), mostrando una media entre los cuatro sistemas de 102.54 ± 8.87 km/h antes del test RSA y 92.85 ± 8.96 km/h una vez finalizado el test.

Escala Visual Análoga (VAS)

Una vez finalizada la sesión, la percepción de los jugadores en los parámetros de esfuerzo (VAS1), fatiga (VAS2), dificultad en cambios de dirección (VAS3), saltos (VAS4) y carrera (VAS5) no mostró diferencias entre los sistemas de césped artificial ($p > 0.05$; Figura 5.4). Por el contrario, a nivel general los jugadores reportaron una mayor comodidad durante la sesión desarrollada sobre el sistema con menor *FR* y *StV*, así como mayores niveles de *ER* y *RT* (Sistema 4), en comparación con el Sistema 2 que presentaba la mayor *FR* y *StV* unidas a la menor *ER* de los cuatro sistemas (VAS6: 70.83 ± 14.28 u.a. vs 54.24 ± 19.63 u.a., respectivamente; $F = 3.413$; $p < 0.05$).

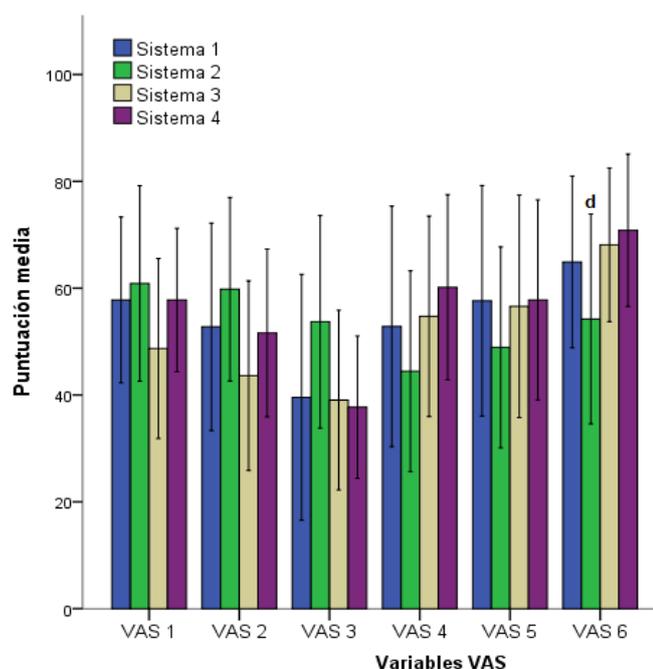


Figura 5.4. Resultados de la Escala Visual Análoga (VAS) posterior a la sesión en los sistemas de césped artificial
^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p < 0.05$)

El análisis de regresión lineal evidenció un efecto significativo de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial sobre el rendimiento en el test RSA ($p < 0.05$; Tabla 5.5). Concretamente, la *ER* presentó una influencia positiva sobre el RSA_{MEDIO} , RSA_{TT} y RSA_{MEJOR} ($p < 0.001$) y negativa respecto a la velocidad máxima media de este test ($p < 0.05$). Por su parte, la *RT* mostró un efecto negativo sobre los tiempos del test RSA ($p < 0.01$). En este sentido, destaca como las propiedades mecánicas evaluadas (*FR*, *ER* y *RT*) manifestaron un efecto significativo del 16.5 %, 15.8 % y 16.5 % del RSA_{MEDIO} , RSA_{MEJOR} y RSA_{TT} , respectivamente. Por último, una mayor *FR* fue asociada a una menor comodidad percibida por los jugadores sobre el sistema de césped artificial ($p < 0.05$).

5.5. DISCUSIÓN

Esta investigación es la primera que asocia el efecto directo de las propiedades mecánicas de la superficie de juego sobre los resultados obtenidos en un batería de test físicos. En este sentido, estudios previos defienden una ausencia de correspondencia de los dispositivos mecánicos con respecto a las propiedades mecánicas reales percibidas por el jugador debido a la ausencia de la autorregulación propia del movimiento humano (Dixon & Stiles, 2003; McGhie & Ettema, 2012). Sin embargo, FIFA y el CEN continúan incluyendo estos procedimientos para valorar la seguridad y funcionalidad de los pavimentos artificiales (CEN, 2007; FIFA, 2012a). La valoración mecánica de los pavimentos de césped artificial reveló diferencias significativas entre los sistemas analizados.

Tabla 5.5. Análisis de regresión lineal de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial sobre los parámetros de salto, sprint y percepción

	CMJ (cm)	Fatiga CMJ	SJ (cm)	Fatiga SJ	Potencia test de salto 15 s (W)	% Dec Saltos 15s	RSAMEDIO (s)	RSAMEJOR (s)	RSATT (s)	% Dec Sprint	V _{max} RSA (km/h)	V _{media} RSA (Km/h)	% Dec Velocidad	VAS 6
FR (%)	-0.075 (0.142)	-0.025 (0.260)	0.071 (0.127)	0.277 (0.246)	-513.887 (285.729)	-0.029 (0.097)	-0.013 (0.008)	-0.009 (0.008)	-0.079 (0.046)	-0.044 (0.064)	0.032 (0.044)	0.020 (0.023)	0.042 (0.090)	-1.001* (0.455)
ER (%)	0.136 (0.611)	0.843 (1.120)	0.160 (0.547)	1.299 (1.060)	321.772 (1229.840)	0.570 (0.418)	0.114*** (0.033)	0.120** (0.036)	0.684*** (0.196)	-0.191 (0.276)	-0.110 (0.190)	-0.217* (0.098)	0.341 (0.386)	3.247 (1.997)
RT (N·m)	-0.102 (0.510)	-1.189 (0.935)	0.008 (0.456)	-0.930 (0.885)	-851.791 (1027.172)	-0.167 (0.349)	-0.093** (0.027)	-0.093** (0.030)	-0.558** (0.164)	0.091 (0.230)	0.094 (0.159)	0.159 (0.082)	-0.191 (0.323)	-2.528 (1.653)
Constante	39.199* (16.119)	42.006 (29.543)	17.627 (14.417)	-13.480 (27.956)	108482.935** (32440.648)	-4.629 (11.028)	7.981*** (0.864)	6.992*** (0.952)	47.882*** (5.183)	13.704 (7.278)	25.660*** (5.019)	25.742*** (2.598)	-0.397 (10.190)	93.033 (52.703)
R ²	0.012	0.121	0.011	0.142	0.054	0.130	0.165	0.158	0.165	0.031	0.012	0.071	0.030	0.144

Influencia significativa * $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

La superficie con sub-base de grava compactada y capa elástica (Sistema 2) obtuvo los mayores niveles de *FR* y *StV*, coincidiendo con estudios previos que analizaron la influencia de los componentes estructurales de soporte sobre las propiedades mecánicas del pavimento (Sánchez-Sánchez et al., 2014), aunque en este caso el sistema no excedía los requerimientos normativos. Asimismo, el limitado efecto de una capa elástica de menor espesor (Sánchez-Sánchez et al., 2014) y la relevancia de una mayor cantidad de relleno y altura de la fibra (McGhie & Ettema, 2012) han sido reafirmados con el reducido porcentaje de *FR* detectado en el Sistema 4. La inclusión de la *ER* aporta más detalles sobre la dureza y la capacidad de absorción de la superficie. Esta propiedad presenta una relación inversa con la absorción de impactos ($r=-0.665$; $p<0.01$) y difiere en función del sistema de césped artificial implantado, debido a la heterogeneidad y estado de conservación de los componentes estructurales utilizados (Allgeuer et al., 2008; Naunheim et al., 2004). La menor amortiguación del Sistema 4 (sub-base de asfalto y capa elástica) fue constatada con la obtención de los mayores niveles de retorno de energía por parte de esta superficie. La presencia de coeficientes de *RT* más elevados en este sistema puede ser explicada por un incremento del daño de las fuerzas verticales sobre los componentes superficiales (fibra y relleno), que según recientes estudios, son los factores que determinan la resistencia al giro ofrecida por el pavimento (Severn et al., 2010; Villwock et al., 2009a).

En cuanto a los test físicos, este estudio incluyó una combinación de medidas de rendimiento y respuestas fisiológicas similar a las últimas investigaciones que comparaban el césped artificial con la hierba natural (Hughes et al., 2013; Nédélec et al., 2013). Sin embargo, este es el primer trabajo que aplica esas medidas sobre diferentes sistemas de césped artificial. McGhie y Ettema (2013) evidenciaron un efecto de diferentes tipologías de césped artificial sobre las fuerzas de impacto y el tiempo de contacto de jugadores de fútbol en dos test de carrera, pero no tuvieron en cuenta las propiedades de

tracción del pavimento. Los resultados de la presente investigación exponen diferencias en el rendimiento en el test RSA entre los diferentes sistemas de césped artificial. Los tiempos medios, totales y más rápidos, identificados como los principales indicadores del rendimiento en este test (Oliver, 2009; Pyne, Saunders, Montgomery, Hewitt, & Sheehan, 2008; Spencer, Fitzsimons, Dawson, Bishop, & Goodman, 2006) mostraron diferencias significativas en base a la superficie evaluada. Los sistemas con valores intermedios y adaptados a los requerimientos normativos (especificados en la EN 15330-1:2014) para *RT* presentaron tiempos (medio, total y mejor) más rápidos de sprint que el sistema con menores índices de *RT* y el Sistema 4 que superaba el límite de 50 N·m especificado en la regulación. En este sentido, Luo y Stefanyshyn (2011) concluyeron que incrementos en los niveles de tracción hasta un determinado umbral proveían ventajas sistemáticas en el rendimiento de esprines y aceleraciones, pero a partir de ese límite no eran detectadas mejoras en el rendimiento como se observa con el Sistema 4 de este trabajo. Además, elevados niveles de *RT* constituyen un factor de riesgo de lesión en las extremidades inferiores en futbolistas (Villwock et al., 2009b). La inclusión de un cambio de dirección de 180° y el análisis por tramos del test RSA demostró que niveles óptimos de *RT* mejoran el rendimiento lineal de los esprines, pero también facilitan la capacidad de cambiar de dirección, ya que las diferencias entre sistemas de césped artificial fueron más evidentes a partir del giro de 180°. Investigaciones previas explican esta mejora como consecuencia de un menor deslizamiento de los jugadores sobre los pavimentos con una adecuada tracción rotacional (Ford et al., 2006; Livesay, Reda, & Nauman, 2006; Pérez-Soriano et al., 2009). Gains et al. (2010) identificaron velocidades de sprint similares entre césped artificial y natural, pero cambios de dirección más rápidos sobre las superficies artificiales. Los datos de este trabajo muestran la misma tendencia entre sistemas de césped artificial de tercera generación, puesto que los tiempos obtenidos en el cambio de dirección del test RSA presentaron diferencias

significativas entre sí sin apreciarse cambios en la velocidad de los jugadores. Sin embargo, el análisis de regresión lineal reveló una influencia negativa de la *ER* del pavimento sobre la V_{media} . Además, la suma de las propiedades mecánicas analizadas en el presente estudio ha demostrado incidir en un 7.1 % de la V_{media} alcanzada por los jugadores durante el test RSA. Este análisis ha permitido cuantificar la reducida influencia de las propiedades mecánicas del pavimento sobre la velocidad máxima que fue descubierta en estudios anteriores que comparaban césped natural y artificial (Hughes et al., 2013). La comparación con este tipo de estudios pone en evidencia que las diferencias entre césped natural y artificial son incluso inferiores a las encontradas entre sistemas de césped artificial de tercera generación.

La regresión lineal también mostró una influencia de la *ER* sobre el rendimiento en el test RSA. En este caso, el análisis reveló que un exceso de rigidez provoca un incremento en los tiempos de este test. Sin embargo, la *FR* no constituyó una variable determinante sobre el rendimiento en esprints repetidos. Esto sugiere que los porcentajes de *FR* no eran suficientemente elevados para generar un incremento en los tiempos derivado de la reducción de las fuerzas de reacción, como consecuencia de la absorción parcial de la energía aplicada (Bishop, 2003). La ausencia de diferencias en el rendimiento, fatiga y respuesta fisiológica en el test RSA entre los sistemas de césped artificial con mayor y menor capacidad de amortiguación de los impactos rechaza la hipótesis de un mayor coste de energía asociado a las superficies más blandas (Hardin, Van Den Bogert, & Hamill, 2004; Pinnington & Dawson, 2001); probablemente debido a la reducida magnitud de las diferencias en los niveles de absorción de impactos entre sistemas. Los estudios que exponen una menor eficiencia músculo-tendinosa (Lejeune, Willems, & Heglund, 1998), o una mayor flexión de la cadera y la rodilla (Pinnington, Lloyd, Besier, & Dawson, 2005), como argumentos de un mayor gasto de energía en las superficies con mayor absorción de impactos, fueron realizados sobre arena con niveles de

absorción muy superiores a los detectados en el césped artificial. Estudios recientes sobre césped artificial y natural presentan resultados dispares. Hughes et al. (2013) no detectaron diferencias en los niveles de lactato en sangre y frecuencia cardíaca después de un partido simulado. Sin embargo, Di Michele et al. (2009) evidenciaron diferencias en estos parámetros en un test de carrera.

En nuestro caso, las muestras de lactato en sangre se obtuvieron después de un test RSA, por lo que los resultados deben ser comparados con cautela, ya que diversos autores han demostrado que las concentraciones de lactato están influenciadas por la actividad previa a la obtención de la muestra (Krustrup & Bangsbo, 2001). La carga fisiológica similar entre los sistemas de césped artificial contrasta con la percepción de los jugadores una vez finalizada la sesión. En términos de esfuerzo general percibido, los participantes reportaron una mayor comodidad sobre el sistema con menores niveles de *FR* respecto al sistema con mayor capacidad de amortiguación. Además, la regresión demostró que la *FR* fue la única variable que influía significativamente sobre la percepción de los usuarios. El efecto negativo observado manifiesta que las superficies más blandas provocan una menor comodidad de los jugadores durante las diferentes acciones desarrolladas sobre el pavimento, aunque no existan diferencias entre sistemas en las respuestas fisiológicas de los participantes. Este hallazgo coincide con Brito et al. (2012) que manifestaron que las demandas percibidas estaban más relacionadas con la dificultad para correr (carga externa) que con la respuesta fisiológica (carga interna), a pesar de que las acciones previas a la valoración de la percepción de los jugadores fueron diferentes en ambos estudios. En este sentido, Nédélec et al. (2013) recurrieron al protocolo utilizado y la familiarización con el césped artificial para justificar la ausencia de diferencias entre césped natural y artificial en la percepción de los jugadores que fue manifestada en otros estudios (Andersson et al., 2008). Sin embargo, en el presente estudio todos los jugadores estaban familiarizados con

esta superficie y mostraron diferentes niveles de comodidad percibida en función del sistema de césped artificial.

Independientemente del esfuerzo percibido, las propiedades mecánicas evaluadas mostraron una influencia del 16.5 %, 15.8 % y 16.5 %, sobre el RSA_{MEDIO} , RSA_{MEJOR} y RSA_{TT} , respectivamente. Estos resultados resaltan la importancia de incluir la *ER* como parámetro evaluables de la funcionalidad de los campos de fútbol de césped artificial, así como la necesidad de evaluar las propiedades mecánicas de la superficie en los estudios comparativos entre diferentes pavimentos.

La velocidad de golpeo de balón a portería no presentó diferencias entre los cuatro sistemas de césped artificial analizados. En todos los sistemas, los jugadores sufrieron un deterioro significativo de la velocidad de golpeo después del test RSA. Sin embargo, la ausencia de interacción entre la superficie y el momento de golpeo indica que el sistema de césped artificial no tiene ningún efecto adicional en el desarrollo de la fatiga. Por el contrario, Potthast (2010) encontró diferencias en la velocidad, precisión y parámetros biomecánicos del golpeo de balón entre dos sistemas diferentes de césped artificial. La utilización de dos sistemas diferentes de relleno (caucho o caucho y arena) en ese estudio puede ser el motivo principal de esta discrepancia, ya que en el presente trabajo la tipología de los componentes estructurales superficiales (fibra y relleno) era igual en los cuatro sistemas de césped artificial. A pesar de ello, más estudios con parámetros biomecánicos son necesarios para establecer los factores determinantes del golpeo de balón.

Por último, los diferentes test de salto (CMJ y SJ) realizados antes y después del test RSA evidenciaron un deterioro significativo del rendimiento en los cuatro sistemas de césped artificial sin interacción entre el sistema de pavimento y el momento del salto. Esto sugiere una menor capacidad de salto de los jugadores después de una sucesión de esprines, independientemente del sistema de césped artificial de tercera generación utilizado. Esta conclusión es

similar a la obtenida en estudios previos después de la aplicación de un protocolo simulado de fútbol sobre césped natural y artificial (Hughes et al., 2013). El test de salto de 15 s evidenció un mayor deterioro del rendimiento (%Dec) sobre el sistema de césped artificial más duro y rígido. Este sistema presentaba unas propiedades mecánicas muy alejadas de los requerimientos normativos, por lo que, estos resultados destacan la importancia del cumplimiento de la normativa para garantizar unos parámetros óptimos de funcionalidad deportiva. Por otro lado, no hay ningún sistema que exceda, por el límite superior, las especificaciones normativas establecidas para las propiedades de amortiguación del pavimento. Esto sugiere que las desventajas ofrecidas por una superficie blanda (Brito et al., 2012; Hardin et al., 2004; Pinnington & Dawson, 2001; Pinnington et al., 2005) no son evidentes hasta un determinado límite, de forma similar a la *RT*, aunque más estudios sobre la influencia de la superficie en la capacidad de saltos repetidos son necesarios para aceptar esta hipótesis.

La variedad de test físicos, fisiológicos y de percepción incluidos en el presente estudio ha permitido comparar los efectos de los diferentes sistemas de césped artificial y sus propiedades mecánicas sobre el rendimiento de los jugadores. Los test se han centrado en las principales acciones desarrolladas durante la práctica del fútbol como secuencias repetidas de movimientos explosivos, esprines con cambios de dirección y saltos máximos (Buchheit, 2010; Spencer et al., 2005). Sin embargo, sería necesario comprobar estas variables durante una situación real de juego para comprobar si los resultados obtenidos son extrapolables a un partido. Estudios futuros sobre sistemas de césped artificial, deberían incluir una mayor variabilidad de sistemas en base a los componentes superficiales, así como diferentes rangos de propiedades mecánicas para conocer el punto exacto en el que comienza el deterioro del rendimiento y el incremento del riesgo de lesión.

En conclusión, los diferentes sistemas de césped artificial seleccionados en base a sus componentes estructurales de soporte evidenciaron una heterogeneidad mecánica que tuvo influencia sobre parámetros físicos implicados en el rendimiento en fútbol. Esta variabilidad mecánica situó a los sistemas de césped artificial en diferentes niveles de cumplimiento de los requerimientos normativos especificados para los campos de fútbol de césped artificial. El rendimiento físico en acciones de sprint y salto estuvo influenciado por los parámetros de tracción, rigidez y absorción del sistema de césped artificial. Sin embargo, la carga fisiológica permaneció invariable entre los diferentes sistemas, aunque los jugadores perciben menor comodidad sobre superficies más blandas. Las diferencias encontradas entre los sistemas de césped artificial son similares a la variabilidad existente entre césped natural y artificial, por lo que el control de las propiedades mecánicas de la superficie de juego es esencial para garantizar una adecuada funcionalidad deportiva. Futuros estudios deberían incorporar parámetros técnicos y biomecánicos entre diferentes sistemas para complementar las conclusiones del presente estudio.

CAPÍTULO VI.

RESPUESTA FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE JUGADORES DE FÚTBOL AMATEUR EN DIFERENTES SISTEMAS DE TERCERA GENERACIÓN DE CÉSPED ARTIFICIAL DURANTE UNA SITUACIÓN SIMULADA DE JUEGO

CAPÍTULO VI. RESPUESTA FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE JUGADORES DE FÚTBOL AMATEUR EN DIFERENTES SISTEMAS DE TERCERA GENERACIÓN DE CÉSPED ARTIFICIAL DURANTE UNA SITUACIÓN SIMULADA DE JUEGO.**6.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El fútbol es un deporte complejo que combina periodos de alta intensidad y fases de recuperación intercaladas con frecuentes aceleraciones y cambios de dirección, así como con acciones de salto, carrera y golpeo (Barbero-Álvarez et al., 2009; Bloomfield et al., 2007; Carling et al., 2008; Chamari et al., 2008). Una de las acciones más requeridas durante un partido de fútbol es la repetición de esprines máximos de corta duración (1-7 s) con breves periodos de recuperación (Bradley et al., 2009). Por ello, la capacidad de repetir esprines o realizar acciones de alta intensidad es uno de los requisitos más relevantes para el rendimiento físico de los jugadores durante la competición (Impellizzeri et al., 2008). De hecho, las acciones de alta intensidad de los jugadores de fútbol son consideradas como un factor clave en el fútbol de élite (Rampinini et al., 2009). En este sentido, Faude, Koch y Meyer (2012) revelaron que los esprines lineales eran las acciones más frecuentes en situaciones de gol, resaltando la importancia de la potencia y la velocidad en los momentos decisivos del juego.

La monitorización de los patrones de movimiento y las acciones de alta intensidad pueden revelar resultados importantes para el rendimiento en el fútbol. Una de las opciones que ha revolucionado el cuerpo de conocimiento sobre el perfil cinemático de los jugadores en el fútbol es la tecnología GPS (Buchheit et al., 2011; Buchheit, Méndez-Villanueva, Simpson, & Bourdon, 2010; Randers et al., 2010). Los sistemas de posicionamiento global son lo suficientemente válidos y fiables para detectar alteraciones en los patrones de carrera durante un partido, entre partidos y en función del nivel de competición (Aughey, 2011).

Estos dispositivos han sido definidos como una herramienta válida para evaluar la carga externa en deportes intermitentes con capacidad para registrar datos en tiempo real sobre parámetros de tiempo, velocidad, distancia, posición, altitud y dirección (Folgado, Gonçalves, Abade, & Sampaio, 2014). Esta tecnología ha sido validada a diferentes frecuencias (5 y 10 Hz) (Barbero-Álvarez et al., 2009; Johnston et al., 2012; Varley et al., 2012) y ampliamente utilizada en deportes de equipo (Cunniffe, Proctor, Baker, & Davies, 2009; Higgins, Naughton, & Burgess, 2009; MacLeod, Morris, Nevill, & Sunderland, 2009). En el fútbol, muchos estudios han sido llevados a cabo para cuantificar las demandas físicas y fisiológicas de los jugadores mediante dispositivos GPS (Abade, Gonçalves, Leite, & Sampaio, 2014; Buchheit et al., 2011; Buchheit et al., 2010; Castellano, Blanco-Villaseñor, & Álvarez, 2011). Esta información contribuye a un mejor entendimiento del rendimiento de los jugadores y la complejidad del fútbol (Gonçalves, Figueira, Maçãs, & Sampaio, 2014; Sampaio, Lago, Gonçalves, Maçãs, & Leite, 2014). Además, la portabilidad y el reducido coste en comparación con otros sistemas han facilitado su implantación. Sin embargo, la ausencia de adaptación a espacios cerrados y la imposibilidad de uso en competición son algunas de las limitaciones de esta tecnología (Folgado et al., 2014).

Por otro lado, la sensibilidad de estos dispositivos permite detectar alteraciones en el rendimiento ocasionadas por variables externas (Aughey, 2011). En este sentido, la superficie de juego ha sido identificada como un parámetro de influencia sobre el rendimiento de los jugadores de fútbol (Andersson et al. 2008; Brito et al., 2012; Dragoo & Braun, 2010). Los efectos de la heterogeneidad latente entre los pavimentos de hierba natural y césped artificial ha copado el mayor número de investigaciones sobre pavimentos de juego (Andersson et al., 2008; Di Michele et al., 2009; Ford et al., 2006; Gains et al., 2010; Hughes et al., 2013; Kanaras et al, 2014; Nédélec et al., 2013). Sin embargo, los últimos hallazgos revelan resultados similares en acciones de

sprint (Andersson et al., 2008; Ford et al., 2006; Gains et al., 2010) y tareas específicas donde la fatiga o el retraso en la recuperación no se alteraban entre ambas superficies (Hughes et al., 2013; Nédélec et al., 2013)

Esta ausencia de diferencias contrasta con la variabilidad presente entre los campos de césped artificial de tercera generación debido a los últimos avances cualitativos acontecidos sobre esta tipología de pavimentos (Burillo et al., 2012; Potthast et al., 2010). En este sentido, McGhie y Ettema (2012) consideran la necesidad de analizar este tipo de superficies desde una perspectiva individual y no como un grupo uniforme. De hecho, recientes estudios han evidenciado una influencia significativa de los componentes estructurales sobre las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial (Alcántara et al., 2009; Sánchez-Sánchez et al., 2014) y las acciones de sprint de los jugadores (McGhie & Ettema, 2012). Sin embargo, no existen estudios sobre el efecto de esta variabilidad mecánica sobre el perfil cinemático y fisiológico de los jugadores durante un situación de juego.

6.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Tras el planteamiento del problema de investigación, el objetivo general de este tercer estudio es:

1. Evaluar el efecto de la variabilidad mecánica de diferentes sistemas de césped artificial sobre el perfil cinemático de jugadores de fútbol amateur en una situación simulada de juego.

De forma paralela, la investigación plasma como objetivos específicos:

2. Determinar el sistema de césped artificial más adecuado a los requerimientos implícitos en la práctica del fútbol.
3. Cuantificar el grado de influencia de las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial sobre los parámetros de rendimiento físico en una situación simulada de juego.

4. Examinar la incidencia de los sistemas de césped artificial sobre la carga interna del jugador en una situación simulada de juego.
5. Analizar la percepción subjetiva de jugadores amateur sobre los diferentes sistemas de césped artificial después de una situación de juego de 45 min.

Por otra parte, las hipótesis de investigación planteadas en base a los estudios precedentes son:

- A. Las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial mostrarán una influencia significativa sobre el perfil cinemático de los jugadores.
- B. Los sistemas de césped artificial con mayores niveles de absorción de impactos presentarán un menor número de acciones de alta intensidad durante la situación simulada de juego.
- C. Los pavimentos con valores óptimos de tracción rotacional revelarán ventajas significativas sobre la carga interna y externa de los jugadores de fútbol en 45 min de juego.
- D. Elevados niveles de energía de restitución en el pavimento provocarán un deterioro del rendimiento en las acciones de sprint.
- E. La absorción de impactos constituirá una variable determinante en la percepción de los jugadores sobre los sistemas de césped artificial.

6.3. MATERIAL Y MÉTODO

6.3.1. Características de la muestra

22 jugadores amateur de categoría masculina fueron invitados a participar en el estudio. De ellos, 20 futbolistas (21.65 ± 3.10 años; 176.45 ± 4.75 cm;

69.38±3.84 kg; 11.46±4.23 % de grasa corporal) fueron seleccionados para formar parte activa de la investigación, ya que los dos porteros no fueron incluidos en el análisis debido a las diferencias en sus movimientos con respecto a los jugadores de campo. Todos los participantes tenían una experiencia previa de al menos 5 años de práctica del fútbol sobre césped artificial (7.24±2.85 años) y entrenaban 2 horas al día, 3-4 días a la semana con una competición semanal. Ningún participante tenía antecedentes cardiopulmonares ni tomaba algún tipo de medicación durante el estudio. Además, todos acreditaban haber superado un reconocimiento médico necesario para la práctica del fútbol.

Los jugadores fueron informados de los posibles riesgos asociados al estudio antes de firmar el consentimiento informado. La investigación fue aprobada por el comité ético institucional en base a la última versión de la Declaración de Helsinki.

6.3.2. Procedimiento

Se realizó una prueba piloto sobre un campo de césped artificial de tercera generación para que los jugadores se habituaran al material adherido al cuerpo durante una situación simulada de juego. Los participantes fueron evaluados durante los primeros 45 min de un partido de fútbol disputado sobre cuatro sistemas diferentes de césped artificial de tercera generación acorde a la estructura de soporte (S1: Sub-base de grava compactada sin capa elástica; S2: Sub-base de grava compactada con capa elástica; S3: Sub-base asfáltica sin capa elástica; S4: Sub-base asfáltica con capa elástica), siguiendo la secuencia marcada por la numeración de los pavimentos. La Tabla 5.1 (Capítulo V) recoge las características de los campos de césped artificial seleccionados.

Antes del inicio del estudio, las propiedades mecánicas de los pavimentos fueron evaluadas según los requerimientos recogidos en la norma EN 15330-1:2014 y los protocolos especificados en el capítulo anterior. Las

variables resultantes fueron absorción de impactos ($FR\%$), deformación vertical ($StV\text{-mm}$), energía de restitución ($ER\%$) y tracción rotacional ($RT\text{-N}\cdot\text{m}$).

Protocolo experimental

Previamente al inicio del estudio los jugadores completaron un test Yo-Yo de recuperación intermitente – Nivel 1 (1686.32 ± 306.16 m) con el objetivo de determinar la frecuencia cardiaca máxima (FC_{max}) de cada uno (Bangsbo, Iaia, & Krusturup, 2008; Krusturup et al., 2003). El test consistió en esfuerzos repetidos de carrera de ida y vuelta (2×20 m) al ritmo de unos pitidos emitidos por un dispositivo sonoro externo. Cada ciclo de ida y vuelta finalizaba con un periodo de recuperación activa de 10 s en el que los jugadores debían recorrer por partida doble un espacio de 5 m (Figura 6.1). La velocidad de carrera se incrementaba progresivamente conforme avanzaban los diferentes niveles establecidos en el test. La prueba finalizaba cuando el jugador no alcanzaba la línea de llegada en el momento indicado por el pitido dos veces consecutivas. En ese momento, la distancia recorrida era registrada y utilizada como resultado del test. La frecuencia cardiaca fue monitorizada durante el test mediante pulsómetros (Polar Team System, Kempele, Finland) adheridos al pecho de cada participante.

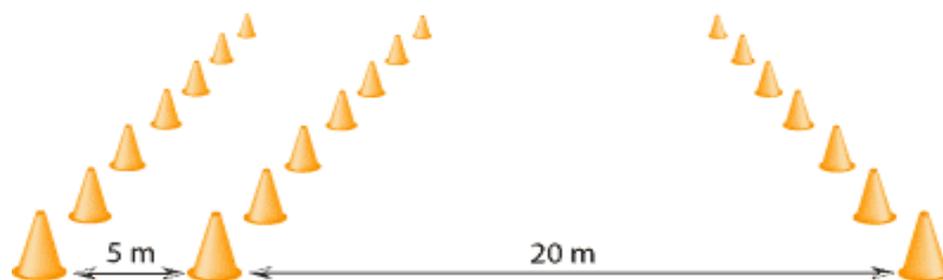


Figura 6.1. Protocolo del test Yo-Yo de recuperación intermitente-Nivel 1 (Bangsbo et al., 2008)

Una vez identificada la FC_{max} de todos los participantes, cada jugador participó en cuatro partidos de fútbol 11 de 45 min bajo condiciones ambientales similares (temperatura: 21.78 ± 1.99 °C; humedad relativa: 54 ± 3.37 %). Todos los partidos fueron disputados entre las 10 y las 11 a.m. en

condiciones secas. Los jugadores debían llevar el mismo calzado deportivo durante todo el estudio. Entre cada partido se estableció un periodo mínimo de recuperación de 72 h.

Los equipos estaban constituidos por los mismos jugadores en cada una de las posiciones durante todo el estudio, empleando un sistema 1-4-4-2 en ambos equipos con un portero, dos defensas centrales, dos laterales, dos medio centros, dos interiores y dos delanteros. El formato de partido se mantuvo constante para minimizar la variabilidad en el rendimiento de los participantes, evitando la incidencia de los estilos de juego, la táctica y las características físicas de los adversarios como es estudios previos (Casamichana, San Román, Castellano, & Calleja-González, 2012; Castellano et al., 2011; Rampinini, Coutts, Castagna, Sassi, & Impellizzeri, 2007).

Los partidos fueron disputados bajo la supervisión de un árbitro siguiendo las reglas establecidas por la Federación Internacional de Fútbol (FIFA). 8 balones adicionales estaban disponibles en las porterías y los laterales del campo para remplazar el utilizado durante el partido en caso de salirse fuera de la zona de juego.

El perfil cinemático y fisiológico de los jugadores fue registrado mediante la colocación de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) con una frecuencia de muestreo de 10 Hz (Spi Pro X, GPSports, Australia) en la parte superior de la espalda y bandas de frecuencia cardiaca (Polar Team System, Kempele, Finland) ajustadas a la altura del pecho mediante bandas elásticas. Posteriormente, los datos eran descargados a un ordenador personal y analizados mediante el software proporcionado por el fabricante (Team AMS R1 2013.22, GPSports, Australia). Los jugadores llevaron el mismo dispositivo GPS durante todo el estudio para evitar posibles alteraciones (Coutts & Duffield, 2010; Duffield, Reid, Baker, & Spratford, 2010). Recientes estudios han evidenciado la validez y fiabilidad de esta tecnología para el análisis de

partidos (Aughey, 2011; Castellano, Casamichana, Calleja-González, San Roman, & Ostojic, 2011; Varley et al., 2012).

Patrones de movimiento-carga externa

Los GPS adheridos a los jugadores proporcionaron información sobre la distancia total recorrida durante el partido (DT), la velocidad máxima (V_{\max}) y media (V_{media}) alcanzada en los 45 min y en intervalos de 15 min, así como la distancia recorrida en cada una de las seis categorías locomotoras con rangos de velocidad adaptados de estudios previos (Brito et al., 2012; Casamichana, Castellano, Calleja-Gonzalez, San Román, & Castagna, 2013; Randers et al., 2010): parado (0-2 km/h), andando (2-7 km/h), carrera suave (7-13 km/h), carrera rápida (13-18 km/h), carrera de alta velocidad (18-21 km/h) y sprint (>21 km/h). Las acciones superiores a 13 km/h (carrera rápida, carrera de alta velocidad y sprint) fueron agrupadas y definidas como carreras de alta intensidad. La distancia absoluta (m) y relativa (%) con respecto a la distancia total recorrida fueron seleccionadas para su análisis posterior. El software del GPS (Team AMS R1 2013.22, GPSports, Australia) también aportó información sobre el número, distancia media y velocidad máxima media de las acciones de sprint.

Del mismo modo, los dispositivos GPS registraron el pico máximo de aceleración, así como el número de aceleraciones de los jugadores en diferentes rangos de intensidad empleados en estudios previos (Cunniffe et al., 2009): 1.5 y 2 m/s²; 2 y 2.5 m/s²; 2.5 y 2.75 m/s²; >2.75 m/s². Los datos de pico máximo y número de impactos durante el juego fueron obtenidos a través del acelerómetro triaxial de 100 Hz incorporado en cada uno de los dispositivos GPS y clasificados en 6 categorías en base a las fuerzas G alcanzadas (1 G= 9.81 m/s²) (Cunniffe et al., 2009): pequeño impacto (5-6 G), impacto suave/moderado (6-6.5 G), impacto moderado/fuerte (6.5-7 G), impacto fuerte (7-8 G), impacto muy fuerte (8-10 G), impacto severo (>10 G).

Al igual que en la variable anterior, la carga del jugador se obtiene a partir de la combinación de las aceleraciones detectadas en los tres planos de movimientos corporales (vertical [y], horizontal [x] y antero-posterior [z]) (Aguiar, Botelho, Gonçalves, & Sampaio, 2013) mediante el software del dispositivo GPS. Los datos son presentados en unidades arbitrarias (u.a.). La validez y fiabilidad de los dispositivos GPS para la cuantificación de esta variable ha sido ampliamente demostrada en otros modelos por Boyd, Ball y Aughey (2011).

Por último, dentro de este apartado se ha incluido el ratio trabajo:descanso (Cunniffe et al., 2009), resultante del cociente entre la distancia recorrida a velocidades superiores a 4 km/h (fase de trabajo) y la distancia alcanzada por el jugador a velocidades inferiores a 4 km/h (fase de descanso) (Casamichana et al., 2012; Casamichana et al., 2013).

Parámetros de frecuencia cardiaca-carga interna

El valor máximo de FC obtenido en el test Yo-Yo de recuperación intermitente (FC_{max}) fue tomado como valor de referencia para el establecimiento de las diferentes categorías de intensidad definidas en estudios anteriores (Brito et al., 2012; Cunniffe et al., 2009; Krstrup et al., 2009): <70 % FC_{max} , 70-80 % FC_{max} , 80-90 % FC_{max} , 90-95 % FC_{max} y >95 % FC_{max} . El software de los dispositivos GPS (Team AMS R1 2013.22, GPSports, Australia) sincronizado con las bandas de FC recogió el tiempo empleado por el jugador en cada una de las zonas detalladas anteriormente. Los datos son presentados como porcentaje relativo sobre el total del tiempo jugado. Por otro lado, los valores pico y medios de frecuencia cardiaca alcanzados durante el partido y en intervalos de 15 min son presentados en términos absolutos (l.p.m.) y relativos (% FC_{max}).

Escala Visual Análoga (VAS)

El esfuerzo percibido, la fatiga y la dificultad para la ejecución de determinadas acciones técnicas, en cada uno de los sistemas de césped artificial,

fue evaluado mediante cuestionarios de Escala Visual Análoga (VAS) adaptados de estudios previos (Andersson et al., 2008; Brito et al., 2012). El cuestionario incluía 14 preguntas (Anexo 6) y era aplicado una vez finalizada la sesión. Los jugadores respondían sobre una línea horizontal de 100 mm donde 0 era “nada duro/cansado/cómodo; ninguna dificultad” y 100 era “muy duro/cansado/cómodo; mucha dificultad”. Las preguntas eran: “¿Cómo puedes clasificar el esfuerzo realizado durante el juego?” (VAS1); “¿Cómo estás de cansado en este momento?” (VAS2); “¿Qué dificultad has percibido al realizar un pase preciso?” (VAS3); “¿Cómo has percibido la velocidad del balón tras realizar un pase?” (VAS4); “¿Qué dificultad has percibido para realizar un control de balón?” (VAS5); “¿Qué dificultad has percibido para realizar un tiro a portería?” (VAS6); “¿Qué dificultad has percibido para realizar un regate?” (VAS7); “¿Qué dificultad has encontrado al realizar un giro o cambio de dirección?” (VAS8); “¿Cómo te has encontrado a la hora de realizar saltos?” (VAS9); “¿Cómo te has sentido al realizar una entrada o tackle?” (VAS10); “¿Cómo te has sentido durante la carrera conduciendo balón?” (VAS11); “¿Cómo te has sentido durante la carrera sin balón?” (VAS12); “¿Cómo has percibido el bote del balón en la superficie de juego?” (VAS13); “En general, ¿Cómo te has sentido a lo largo de la sesión?” (VAS14).

6.3.3. Análisis de datos

Los datos son presentados como media y desviación estándar (SD). Posteriormente se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov para verificar el supuesto de normalidad y el estadístico de Levene para la homogeneidad de las varianzas. Las diferencias entre los cuatro sistemas de césped artificial fueron evaluadas mediante el análisis de la varianza (ANOVA) de una vía. Además, el análisis pormenorizado por intervalos de 15 min implicó la realización de un ANOVA de dos vías (campo x intervalo). El test post hoc de Bonferroni fue

aplicado en aquellas variables que mostraron diferencias significativas entre los sistemas de césped artificial. Finalmente, se llevó a cabo una regresión lineal para valorar el efecto de las propiedades mecánicas sobre las variables dependientes detalladas anteriormente, omitiendo la StV por su alta correlación con FR ($r=0.99$; $p<0.0001$) para evitar posibles problemas de multicolinealidad. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico SPSS v 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). El nivel de significación fue establecido en $p<0.05$.

6.4. RESULTADOS

Indicadores globales de rendimiento

El análisis global de la distancia recorrida, el ratio trabajo descanso y la carga del jugador durante los 45 min de juego no reveló diferencias significativas entre los cuatro sistemas de césped artificial (Tabla 6.1; $p>0.05$). Del mismo modo, la heterogeneidad mecánica entre sistemas, constatada en la Tabla 5.2 del capítulo V, no afectó al pico de V_{max} alcanzado en el partido ($F=2.044$; $p=0.115$). Por último, los valores absolutos y relativos de frecuencia cardiaca media y pico fueron homogéneos en las superficies analizadas ($p>0.05$).

Tabla 6.1. Distancia recorrida, indicadores de carga y valores de frecuencia cardiaca durante los 45 min de juego en los cuatro sistemas de césped artificial

	Sistema 1 (a)	Sistema 2 (b)	Sistema 3 (c)	Sistema 4 (d)	<i>F</i>	<i>p</i>
Perfil de movimiento						
Distancia total (m)	4980.49 (424.65)	4904.46 (377.05)	4849.01 (449.25)	5049.86 (510.48)	0.735	0.535
Ratio trabajo:descanso	9.05 (2.79)	8.67 (2.56)	8.41 (2.55)	9.17 (2.64)	0.329	0.804
Carga jugador (u.a./min)	7.15 (2.29)	7.05 (1.79)	6.49 (1.84)	7.12 (2.57)	0.421	0.739
Pico V_{max} (km/h)	28.92 (2.30)	27.87 (2.16)	27.97 (1.85)	29.58 (3.37)	2.044	0.115
Frecuencia cardiaca						
FC media (% FC_{max})	81.18 (6.09)	79.70 (8.69)	81.03 (6.13)	79.65 (6.66)	0.265	0.850
FC media (l.p.m.)	162.95 (12.30)	160.05 (18.26)	162.30 (12.50)	159.65 (14.34)	0.234	0.873
Pico FC (% FC_{max})	95.35 (3.86)	96.42 (4.12)	96.91 (4.13)	96.13 (3.21)	0.556	0.646
Pico FC (l.p.m.)	191.42 (8.55)	193.55 (9.13)	194.15 (9.40)	192.59 (6.07)	0.384	0.765

Los datos son presentados como Media (SD) en 20 jugadores de fútbol

^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p<0.05$).

La segmentación del tiempo en intervalos de 15 min evidenció resultados similares a los descritos anteriormente, en la distancia recorrida y los indicadores de frecuencia cardiaca (Figura 6.2; $p>0.05$). Sin embargo, el Sistema con menores índices de *FR* y mayores niveles de *ER* y *RT* (S4) reveló picos de V_{max} más elevados en el tercer intervalo del tiempo (30-45 min) en comparación a los Sistemas 2 y 3 (28.16 ± 2.90 km/h vs 25.73 ± 2.84 km/h y 25.58 ± 2.90 km/h, respectivamente; $F=3.174$; $p<0.05$).

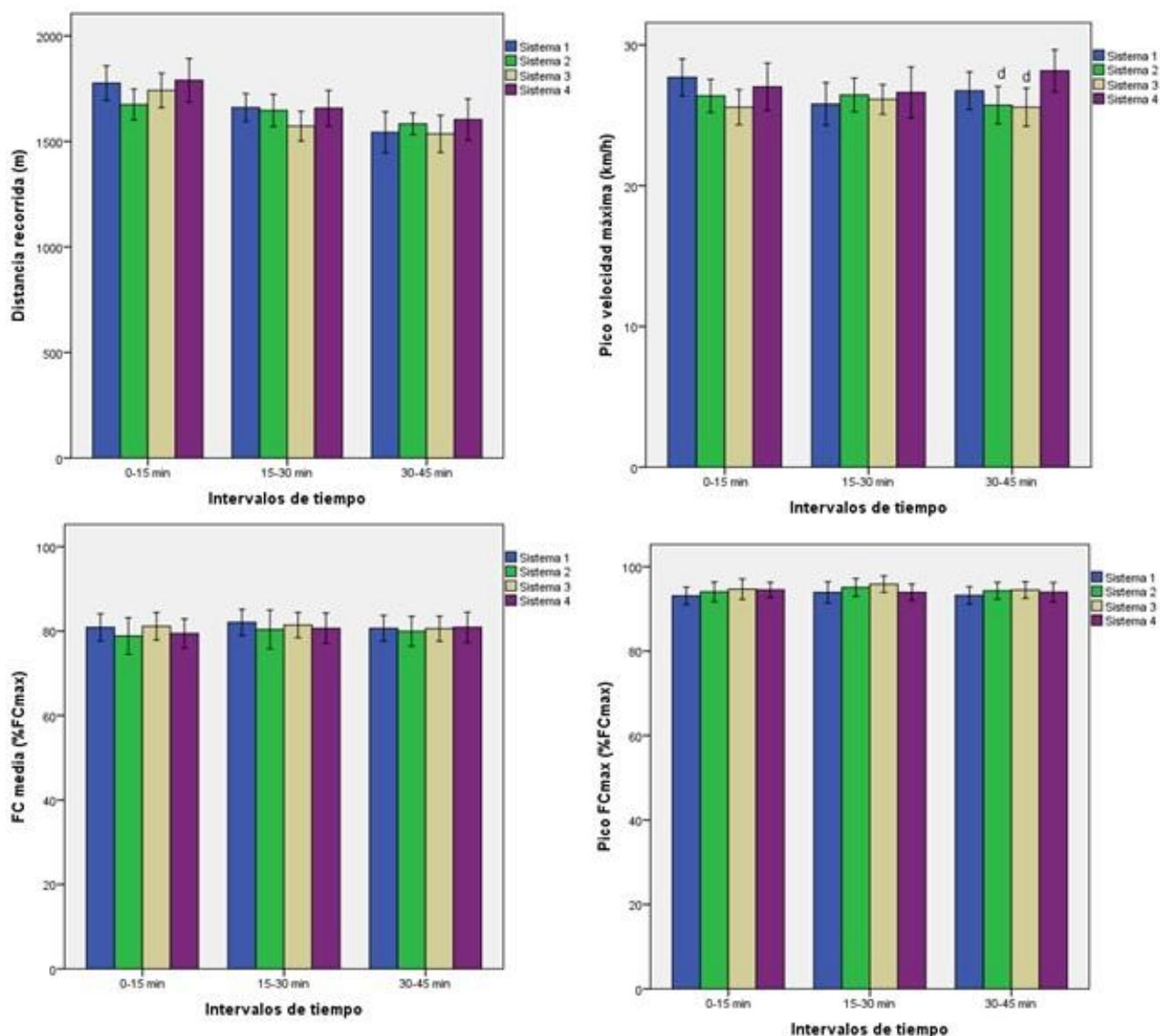


Figura 6.2. Distancia recorrida, pico de V_{max} e indicadores de frecuencia cardiaca en intervalos de 15 min durante un partido de fútbol simulado en los cuatro sistemas de césped artificial.

^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p<0.05$)

Perfil de actividad

La distancia recorrida en las cuatro primeras categorías de actividad no mostró diferencias significativas entre los cuatro sistemas de césped artificial evaluados ($p>0.05$). Por el contrario, la distancia recorrida a alta velocidad (18-21 km/h) fue significativamente mayor en el Sistema 4 en contraste a los Sistemas 1 y 2 (S4: 5.27 ± 1.13 % vs S1: 4.05 ± 1.46 % y S2: 3.99 ± 1.15 %; $F= 4.104$; $p<0.05$). Del mismo modo, la distancia alcanzada en sprint (>21 km/h) sobre el Sistema 4 fue significativamente superior a las distancias evidenciadas en el resto de sistemas de césped artificial para esta categoría de velocidad (S4: 4.96 ± 2.28 % vs S1: 3.28 ± 1.36 %; S2: 3.12 ± 1.67 % y S3: 3.38 ± 1.50 %; $F=4.375$; $p<0.01$; Figura 6.3).

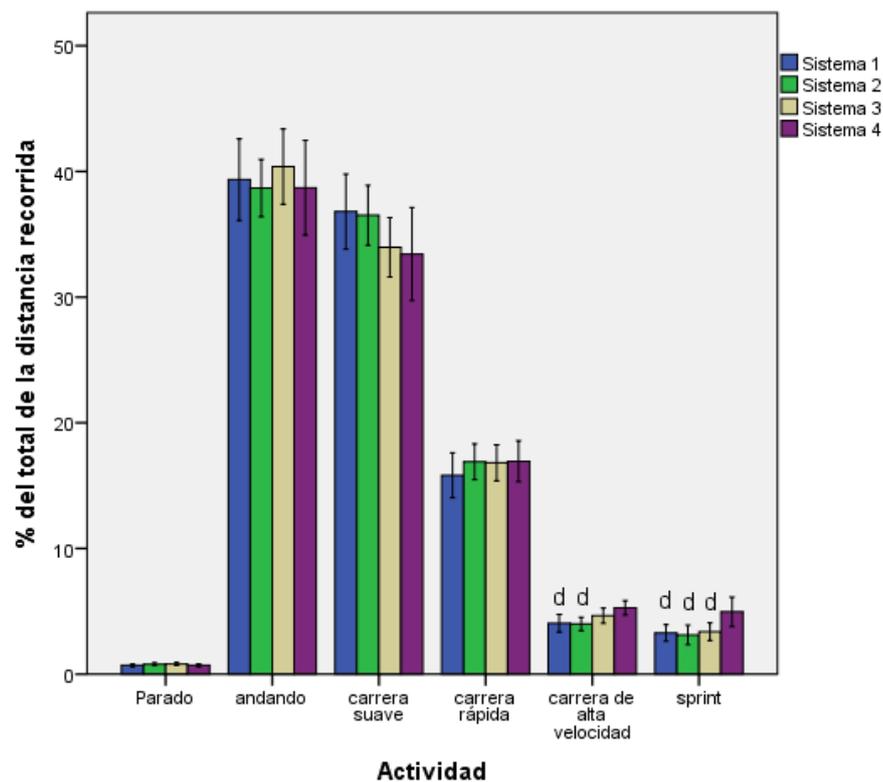


Figura 6.3. Perfil de actividad durante un partido simulado de fútbol de 45 min en los cuatro sistemas de césped artificial, expresado como porcentaje de la distancia total recorrida en diferentes categorías locomotoras. ^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p<0.05$)

Acciones de alta intensidad

El sistema de césped artificial no generó ningún efecto sobre la distancia de alta intensidad (>13km/h) en términos absolutos (m), ni en términos relativos (%Distancia total) durante el partido simulado ($F=1.683$ y $F=2.202$, respectivamente; $p>0.05$; Tabla 6.2). Por el contrario, el número de esprines realizados sobre el Sistema 4 fue significativamente mayor en comparación a los Sistemas 1 y 2 (S4: 12.65 ± 5.67 vs S1: 8.53 ± 3.98 y S2: 8.40 ± 4.19 ; $F=3.489$; $p<0.05$). Por otro lado, la media de V_{\max} de sprint fue 25.26 ± 0.92 en el Sistema 1 y 24.48 ± 0.77 y 24.43 ± 0.73 en los Sistemas 2 y 3, respectivamente ($F=4.787$; $p<0.01$). La duración y la distancia de los esprines presentan una tendencia superior en los sistemas con menor FR y mayor RT (Sistemas 1 y 4), pero estas diferencias no fueron significativas ($F=2.300$ y $F=2.730$; $p=0.085$ y $p=0.051$, respectivamente). Por su parte, los picos de aceleración máxima alcanzados durante los 45 min de partido fueron similares en los cuatro sistemas de césped artificial ($p=0.120$).

Tabla 6.2. Acciones de alta intensidad durante los 45 min en los cuatro sistemas de césped artificial

	Sistema 1 (a)	Sistema 2 (b)	Sistema 3 (c)	Sistema 4 (d)	<i>F</i>	<i>p</i>
Distancia alta intensidad (%Distancia total)	23.15 (5.69)	24.02 (4.04)	24.85 (4.39)	27.17 (5.46)	2.202	0.095
Distancia de alta intensidad (m)	1167.70 (356.05)	1184.55 (267.28)	1217.03 (293.10)	1382.10 (354.86)	1.683	0.178
Número de esprines (n)	8.53 (3.98) ^d	8.40 (4.19) ^d	9.25 (4.10)	12.65 (5.67)	3.489	0.020
Duración de sprint (s)	2.69 (0.67)	2.44 (0.30)	2.37 (0.50)	2.71 (0.49)	2.300	0.085
Media V_{\max} de sprint (km/h)	25.26 (0.92)	24.48 (0.77) ^a	24.43 (0.73) ^a	25.04 (0.87)	4.787	0.004
Distancia media de sprint (m)	17.91 (4.87)	15.77 (2.21)	15.38 (3.24)	17.94 (3.64)	2.730	0.051
Pico de aceleración máxima (m/s ²)	4.15 (0.31)	4.32 (0.29)	4.22 (0.36)	4.41 (0.37)	2.011	0.120

Los datos son presentados como Media (SD) en 20 jugadores de fútbol

^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p<0.05$).

Aceleraciones

La heterogeneidad mecánica de los cuatro sistemas de césped artificial no afectó al número de aceleraciones realizadas en los diferentes rangos establecidos ($p>0.05$; Tabla 6.3). Del mismo modo, los valores obtenidos en las categorías de desaceleración durante los 45 min de partido fueron similares en los sistemas evaluados ($p>0.05$).

Tabla 6.3. Número de aceleraciones y desaceleraciones en los cuatro sistemas de césped artificial

	Sistema 1 (a)	Sistema 2 (b)	Sistema 3 (c)	Sistema 4 (d)	F	p
Aceleraciones						
Acel. entre 1.5 y 2 m/s ² (n)	68.21 (15.62)	73.65 (17.53)	64.05 (14.01)	67.59 (17.75)	1.190	0.320
Acel. entre 2.0 y 2.5 m/s ² (n)	42.47 (8.85)	42.55 (9.45)	38.20 (7.96)	38.82 (7.07)	1.462	0.232
Acel. entre 2.5 y 2.75 m/s ² (n)	14.05 (4.67)	13.30 (4.59)	12.45 (3.78)	12.53 (5.35)	0.505	0.680
Acel. > 2.75 m/s ² (n)	26.16 (7.38)	25.15 (6.53)	26.05 (8.11)	28.88 (7.66)	0.840	0.477
Desaceleraciones						
Desacel. entre 1.5 y 2 m/s ² (n)	113.53 (21.20)	116.95 (22.36)	107.70 (19.66)	113.18 (18.94)	0.686	0.563
Desacel. entre 2.0 y 2.5 m/s ² (n)	76.11 (16.05)	73.55 (14.45)	68.25 (15.90)	69.35 (15.96)	1.053	0.374
Desacel. entre 2.5 y 2.75 m/s ² (n)	26.58 (8.37)	28 (7.12)	26.30 (7.77)	28.88 (8.44)	0.434	0.729
Desacel. > 2.75 m/s ² (n)	45.63 (13.40)	47.20 (14.35)	42.95 (12.12)	45.35 (12.59)	0.355	0.785

Los datos son presentados como Media (SD) en 20 jugadores de fútbol
^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p < 0.05$).

Impactos

Durante el transcurso del partido, los jugadores evidenciaron un elevado número de impactos en los cuatro sistemas de césped artificial (S1: 1796.37±554.93; S2: 1799.35±467.76; S3: 1632.05±453.96; S4: 1791.18±649.32; $F=0.467$; $p > 0.05$; Tabla 6.4). En este sentido, los resultados obtenidos en el análisis de varianza evidenciaron una ausencia de diferencias significativas entre los cuatro sistemas de césped artificial en las diferentes categorías de magnitud de los impactos acontecidos durante la práctica ($p > 0.05$). Del mismo modo, el sistema de césped artificial no perturbó el pico máximo de impacto obtenido durante el partido ($F=0.516$; $p > 0.05$).

Tabla 6.4. Número de impactos en los diferentes sistemas de césped artificial

	Sistema 1 (a)	Sistema 2 (b)	Sistema 3 (c)	Sistema 4 (d)	F	p
Impactos pequeños (5-6 G) (n)	652.89 (183.66)	669.90 (180.63)	624.25 (178.94)	647.06 (193.32)	0.210	0.889
Impactos suave/moderados (6-6.5 G) (n)	251.63 (75.08)	253.80 (74.75)	234.85 (70.21)	251.47 (101.51)	0.236	0.871
Impactos moderados/fuertes (6.5-7 G) (n)	217.90 (92.77)	227.40 (72.46)	196.90 (66.13)	216.35 (91.46)	0.499	0.684
Impactos fuertes (7-8 G) (n)	431.11 (234.46)	430.80 (209)	358.30 (157.42)	447.53 (251.53)	0.670	0.573
Impactos muy fuertes (8-10 G) (n)	225.42 (143.85)	205.40 (96.23)	201.80 (105)	216.12 (129.89)	0.156	0.926
Impactos severos (>10 G) (n)	17.42 (19.44)	12.05 (10.51)	15.95 (14.78)	12.65 (11.50)	0.605	0.614
Número total de impactos (n)	1796.37 (554.93)	1799.35 (467.76)	1632.05 (453.96)	1791.18 (649.32)	0.467	0.706
Pico máximo de impacto (G)	11.86 (0.81)	11.76 (0.90)	11.84 (0.94)	11.56 (0.70)	0.516	0.672

Los datos son presentados como Media (SD) en 20 jugadores de fútbol
^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p < 0.05$).

Respuesta fisiológica

La Figura 6.4 muestra la distribución de la frecuencia cardiaca expresada como porcentaje del tiempo total de juego en los diferentes rangos de la FC_{max} . El análisis de la varianza reveló una ausencia de diferencias en todas las zonas de frecuencia cardiaca entre los cuatro sistemas de césped artificial evaluados ($p>0.05$). El tiempo empleado en los intervalos de alta intensidad ($>90\%$ FC_{max}) fue ligeramente superior en el Sistema con mayores niveles de FR (S2: $20.79\pm 24.82\%$) pero las diferencias con el resto de sistemas no fueron significativas (S1: $17.27\pm 23.58\%$; S3: $18.61\pm 19.25\%$; S4: $15.47\pm 21.77\%$; $F=0.185$; $p>0.05$).

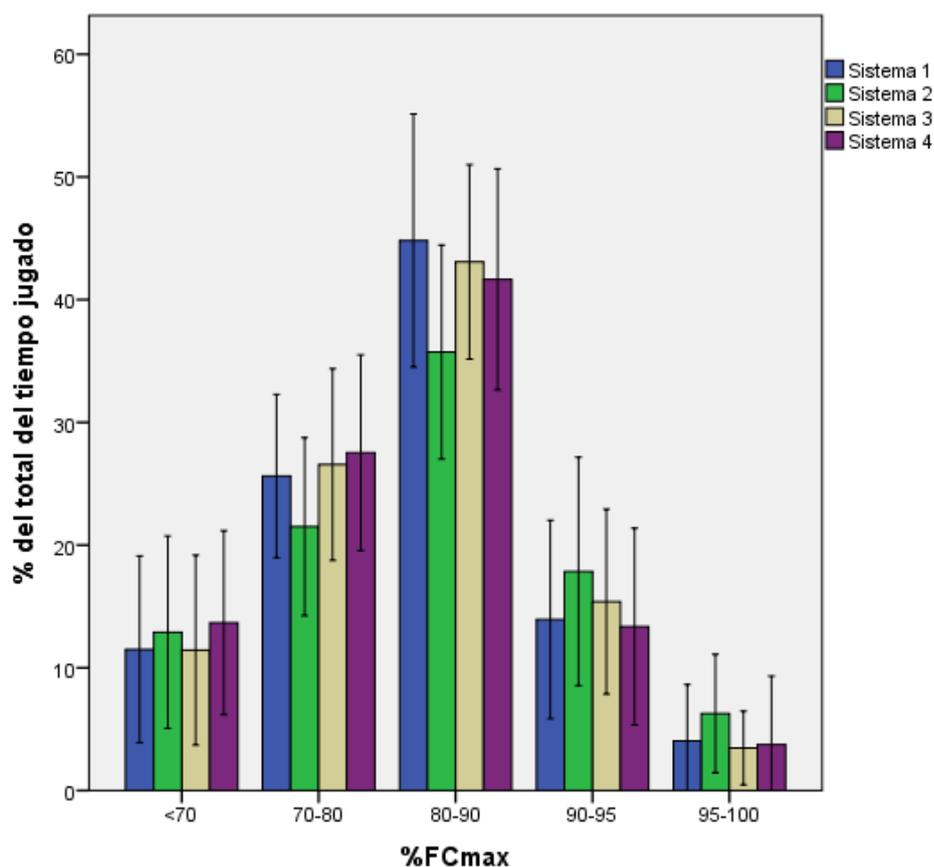


Figura 6.4. Distribución de la frecuencia cardiaca expresada en porcentaje de tiempo de juego empleado en los diferentes rangos de FC_{max} durante una situación simulada de juego de 45 min en cuatro sistemas de césped artificial. ^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p<0.05$)

Escala Visual Análoga (VAS)

Una vez finalizado el partido, los jugadores percibieron una mayor velocidad del balón durante el juego sobre el sistema con menor *FR* y *StV*, así como mayores niveles de *ER* y *RT* (Sistema 4) en comparación con el resto de sistemas ($F=23.286$; $p<0.001$; Tabla 6.5). Del mismo modo, los jugadores reportaron una mayor comodidad para realizar un tackle sobre el Sistema 4 con respecto a los Sistemas 2 y 3 (S4: 64.76 ± 17.64 u.a. vs S2: 46.65 ± 23.06 y S3: 44.75 ± 22.40 ; $F=3.520$; $p<0.05$). El resto de parámetros técnicos, físicos y mecánicos fueron percibidos de manera homogénea entre los cuatros sistemas de césped artificial evaluados ($p>0.05$). A nivel general, los jugadores percibieron una mayor comodidad sobre el Sistema 4, pero el nivel de significación no fue consistente ($F=1.062$; $p>0.05$).

Tabla 6.5. Resultados de la Escala Visual Análoga (VAS) posterior a la sesión en los sistemas de césped artificial

	Sistema 1 (a)	Sistema 2 (b)	Sistema 3 (c)	Sistema 4 (d)	<i>F</i>	<i>p</i>
VAS1: esfuerzo percibido (u.a.)	60.89 (21.37)	61.30 (21.57)	60.65 (21.45)	49.47 (22.06)	1.246	0.300
VAS2: nivel de fatiga (u.a.)	52.37 (23.81)	52.65 (27.42)	65.70 (21.39)	55.71 (22.29)	1.354	0.264
VAS3: dificultad pase preciso (u.a.)	39.47 (24.08)	33.20 (19.35)	46.70 (23.20)	49.71 (25.60)	1.957	0.128
VAS4: velocidad del balón tras pase (u.a.)	61.15 (19.27) ^d	42.10 (18.43) ^{a,d}	32.85 (18.57) ^{a,d}	79.65 (17.45)	23.286	<0.001
VAS5: dificultad control de balón (u.a.)	44.74 (20.99)	36.10 (19.93)	38.25 (19.01)	51 (22.44)	1.970	0.126
VAS6: dificultad tiro a portería (u.a.)	37.79 (21.04)	37.05 (24.37)	49.85 (25.60)	46.24 (23.43)	1.382	0.255
VAS7: dificultad regate (u.a.)	41.63 (20.38)	38.85 (24.87)	50.70 (21.98)	44.59 (27.02)	0.922	0.435
VAS8: dificultad cambio de dirección (u.a.)	38.74 (20.39)	45.70 (22.43)	42.15 (22.15)	36.71 (25.91)	0.569	0.637
VAS9: capacidad de salto (u.a.)	63.58 (19.68)	54.40 (18.41)	64.75 (16.47)	62.53 (22.48)	1.183	0.322
VAS10: dificultad entrada o tackle (u.a.)	55.32 (19.29)	46.65 (23.06) ^d	44.75 (22.40) ^d	64.76 (17.64)	3.520	0.019
VAS11: dificultad en conducción de balón (u.a.)	66.26 (14.70)	56.20 (20.78)	54.50 (19.38)	63.12 (24.64)	1.494	0.223
VAS12: dificultad en carrera sin balón (u.a.)	65.84 (20.53)	53.75 (26.56)	61.40 (20.02)	68.41 (20.03)	1.609	0.195
VAS13: percepción bote de balón (u.a.)	58.21 (24.31)	46.40 (21.35)	43.50 (23.11)	57.82 (25.37)	2.008	0.120
VAS14: percepción general de la superficie (u.a.)	64.26 (20.88)	57.75 (23.64)	55.10 (21.35)	65.82 (20.05)	1.062	0.371

Los datos son presentados como Media (SD) en 20 jugadores de fútbol. VAS1 y VAS2 (0-Nada duro/cansado; 100-Muy duro/cansado); De VAS3 a VAS 8 (0-Ninguna dificultad; 100-Mucha dificultad); De VAS9 a VAS 14 (0-Nada cómodo; 100-Muy cómodo); VAS 4 (0-Muy lento; 100-Muy rápido); VAS 13 (0-Muy malo; 100-Muy bueno)

^{a,b,c,d} Diferencias significativas con el Sistema señalado ($p<0.05$).

El análisis de regresión lineal reveló una influencia significativa de las propiedades mecánicas sobre determinados parámetros del perfil cinemático de los jugadores durante un partido simulado ($p < 0.05$; Tabla 6.6). La distancia de carrera a alta velocidad (18-21 km/h; $F = 3.667$; $p < 0.05$) y la distancia de carrera en sprint (> 21 km/h; $F = 4.356$; $p < 0.01$) evidenciaron un efecto positivo de la *ER* sobre estos parámetros. Concretamente, la interacción de las propiedades mecánicas evaluadas reveló un efecto significativo del 13.3 % sobre la distancia de carrera a alta velocidad y 15.4 % sobre la distancia en sprint. En este sentido, la regresión lineal constató la contribución de los parámetros mecánicos de la superficie de juego sobre el número ($R^2 = 0.126$; $F = 3.454$; $p < 0.05$), la media de V_{\max} ($R^2 = 0.166$; $F = 4.781$; $p < 0.01$) y la distancia media ($R^2 = 0.103$; $F = 2.754$; $p < 0.05$) de los esprints realizados en los 45 min, siendo la *ER* y la *RT* las propiedades más determinantes.

6.5. DISCUSIÓN

El presente estudio es el primero en investigar los efectos de la variabilidad mecánica de los sistemas de césped artificial de tercera generación sobre el rendimiento en un partido de fútbol simulado. El principal hallazgo fue la denotada influencia de las propiedades mecánicas de la superficie de juego sobre las acciones de alta intensidad a lo largo de un partido. La duración del partido fue de 45 min, por lo que las comparaciones con otros estudios deben hacerse con cautela debido a este factor, al carácter recreativo de la práctica (Brito et al., 2012), a los dispositivos utilizados para el registro de las variables cinemáticas y fisiológicas (Coutts & Duffield, 2010; Duffield et al., 2010; Portas, Harley, Barnes, & Rush, 2010; Randers et al., 2010), al procedimiento evaluado (Di Michele et al., 2009; Nédélec et al., 2013) y a la tipología de las superficies deportivas seleccionadas (McGhie & Ettema, 2012; Potthast et al., 2010).

Tabla 6.6. Análisis de regresión lineal de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial sobre el perfil cinemático y fisiológico de los jugadores durante una situación simulada de juego

	Distancia recorrida (m)	Pico V_{\max} (km/h)	Pico de impacto (G)	Carga interna (u.a/min)	Distancia carrera alta velocidad (%)	Distancia carrera de sprint (%)	Tiempo en 90-95 % FC_{\max} (%)	Tiempo en >95 % FC_{\max} (%)	Aceleración máxima (m/s^2)	Número de esprines (n)	Duración media de sprint (s)	Media V_{\max} de sprint (km/h)	Distancia media de sprint (m)	Ratio trabajo: descanso
<i>FR</i> (%)	5.986 (11.021)	-0.026 (0.061)	-0.023 (0.021)	0.023 (0.053)	-0.011 (0.032)	0.010 (0.043)	0.184 (0.432)	0.178 (0.237)	0.010 (0.008)	0.019 (0.113)	0.000 (0.012)	-0.021 (0.021)	-0.025 (0.090)	0.036 (0.066)
<i>ER</i> (%)	-45.521 (48.035)	-0.122 (0.267)	0.033 (0.090)	-0.202 (0.233)	0.258* (0.132)	0.150** (0.188)	0.035 (1.874)	-0.463 (1.028)	0.027 (0.037)	0.491 (0.492)	-0.079 (0.054)	-0.197* (0.090)	-0.599 (0.393)	-0.275 (0.287)
<i>RT</i> (N·m)	49.442 (39.860)	0.171 (0.222)	-0.071 (0.074)	0.181 (0.193)	-0.098 (0.116)	0.059 (0.156)	-0.028 (1.574)	0.433 (0.863)	0.008 (0.030)	0.035 (0.408)	0.072 (0.045)	0.144* (0.065)	0.516* (0.326)	0.265 (0.238)
Constante	4361.374* (1309.625)	27.673*** (7.292)	14.874*** (2.447)	6.321 (6.354)	-2.195 (3.802)	-6.301 (5.131)	4.259 (50.038)	-5.091 (27.434)	2.138* (0.997)	-15.014 (13.404)	2.828 (1.478)	28.379*** (2.454)	21.191* (10.722)	6.856 (7.835)
r^2	0.035	0.079	0.030	0.014	0.133	0.154	0.011	0.012	0.068	0.126	0.089	0.166	0.103	0.021

Influencia significativa * $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

Los parámetros globales de rendimiento no reflejaron ninguna diferencia significativa entre los sistemas de césped artificial analizados. Sin embargo, los campos más blandos o con mayor capacidad de amortiguación mostraron una menor distancia recorrida y carga corporal, así como un ratio trabajo:descanso inferior que los sistemas más duros. Estas diferencias fueron constatadas en el análisis por intervalos de tiempo, donde el Sistema con menores niveles de *FR* y mayores índices de *ER* y *RT* evidenció mayores picos de V_{\max} en el tramo final de los 45 min del partido (30-45 min). Randers et al. (2010) emplean el análisis por intervalos para determinar el índice de fatiga a lo largo de una situación de juego. En este sentido, los resultados del presente trabajo podrían sugerir una menor fatiga sobre el sistema de césped artificial con menor capacidad de amortiguación, debido a una mayor economía de carrera (Kerdok et al., 2002), o un mayor aprovechamiento de la energía generada (Arampatzis, Stafilidis, Morey-Klapsing, & Brüggemann, 2004; Di Michele et al., 2009; Hardin et al., 2004). Sin embargo, más estudios con partidos completos de 90 min son requeridos para confirmar esta teoría, ya que estudios previos sitúan la aparición o desarrollo de la fatiga en los últimos 15 min de un partido, como consecuencia de una reducción de la distancia recorrida a alta intensidad y sprint (Bangsbo & Mohr, 2005; Bangsbo, Mohr, & Krusturup, 2006; Mohr, Krusturup, & Bangsbo, 2005).

Por su parte, el análisis del perfil de actividad reveló una mayor distancia recorrida a alta velocidad (18-21 km/h) y en sprint (>21 km/h) sobre el sistema de césped artificial más duro, rígido y con mayor *RT*. Este hallazgo coincide con los obtenidos por Brito et al. (2012) que sugieren una mayor dependencia de la utilización de fosfato de creatina sobre el pavimento más duro, aunque las superficies deportivas comparadas (césped artificial, tierra y asfalto) presentan una mayor heterogeneidad en contraste con el presente trabajo. Por lo tanto, la menor capacidad para correr a altas velocidades sobre una superficie blanda y más inestable ratifica los resultados obtenidos en

investigaciones previas (Brito et al., 2012; Giatsis et al., 2004). Este resultado es de especial relevancia ya que la distancia recorrida a alta intensidad constituye la variable de éxito más determinante del rendimiento de los jugadores de fútbol (Gains et al., 2010; Mujika, Santisteban, Impellizzeri, & Castagna, 2009). Por ello, un aumento de la distancia recorrida en las zonas de mayor velocidad sobre el sistema más duro puede representar una ventaja sustancial para los jugadores de fútbol.

La incorporación de la carrera rápida (13-18 km/h) eliminó las diferencias entre sistemas en relación a la distancia recorrida en rangos de velocidad de alta intensidad. Sin embargo, el número y la media de V_{\max} de los esprines volvieron a evidenciar valores más elevados sobre las superficies con mayores niveles de *ER* y *RT*. En este sentido, el análisis de regresión confirmó a la *ER* y *RT* como las variables determinantes del rendimiento en las acciones de sprint en la misma línea que recientes investigaciones (McGhie & Ettema, 2012; Schrier et al., 2014), resaltando la importancia de la energía obtenida del pavimento dentro de las propiedades de amortiguación la superficie. Además, la absorción de impactos del pavimento (*FR*) reflejó una correlación negativa sobre la duración ($r=-0.238$) y distancia de estos esprines ($r=-0.267$), por lo que el trabajo sobre diferentes sistemas de césped artificial podría afectar a los efectos alcanzados durante el entrenamiento sobre el sistema neuromuscular (Brito et al., 2012). El incremento de las fuerzas de impacto y la disminución del tiempo de contacto durante la carrera sobre los sistemas de césped artificial con menor *FR* (McGhie & Ettema, 2012; Meijer, Dethmers, Savelberg, Willems, & Wijers, 2006; Smith, Dyson, & Janaway, 2004), así como la menor reutilización de la energía elástica almacenada (Miyama & Nosaka, 2004) o la reducción de las fuerzas de reacción (Bishop, 2003) de los sistemas de césped artificial con mayor capacidad de amortiguación pueden explicar las diferencias encontradas en las acciones de sprint en el presente trabajo. Estos hallazgos ponen en evidencia la necesidad

de complementar el análisis cinemático del jugador con el estudio mecánico de las propiedades del sistema de césped artificial.

A pesar de ello, la mayor velocidad y número de esprines durante el partido no alteró significativamente la respuesta fisiológica de los jugadores en los diferentes sistemas de césped artificial. Esto coincide con estudios previos, que comparaban diferentes tipologías de superficies deportivas en simulaciones controladas específicas de fútbol (Hughes et al., 2013; Nédélec et al., 2013). No obstante, los jugadores evidenciaron un mayor porcentaje de tiempo empleado en intensidades superiores al 90 % FC_{max} sobre el sistema con mayor capacidad de amortiguación, como consecuencia de un mayor coste de energía asociado a las superficies más blandas (Pinnington & Dawson, 2001).

Otra de las variables esenciales en el rendimiento de los deportes de equipo son las aceleraciones (Casamichana et al., 2012; Cunniffe et al., 2009; Varley & Aughey, 2013). La capacidad de acelerar rápidamente es muy importante en la práctica del fútbol. En este caso, la variabilidad mecánica de los sistemas de césped artificial no afectó a este parámetro, por lo que la superficie deportiva parece no interferir en la capacidad de aceleración. Del mismo modo, el número y la magnitud de los impactos acontecidos durante el partido de fútbol fue similar en los cuatro sistemas evaluados. Este parámetro ha sido poco estudiado en el fútbol a pesar de constituir una variable implícita en la carga externa del jugador y el riesgo de lesión durante la práctica deportiva (Arruda et al., 2014; Cunniffe et al., 2009; Naunheim, Standeven, Richter, & Lewis, 2000). Uno de los principales motivos que puede justificar la ausencia de diferencias entre los sistemas de césped artificial es la inclusión de todos los impactos acontecidos durante el partido, y no únicamente los resultantes de la interacción entre el jugador y la superficie de juego.

Los resultados del análisis de la percepción de los jugadores revelaron una mayor dificultad para la realización de un tackle sobre los sistemas más blandos. Una posible explicación reside en que el grado de deslizamiento

permitido por la superficie está relacionado con la capacidad del pavimento para absorber fuerzas ante un impacto (Stiles & Dixon, 2007). Por ello, las superficies con mayor capacidad de amortiguación reportan mayor dificultad, al disminuir el deslizamiento del jugador ante una entrada. La importancia de estos resultados radica en la influencia de este parámetro sobre el estilo de juego (Andersson et al., 2008) y la fatiga central de los jugadores (Nédélec et al., 2013). La reticencia para ejecutar tackles sobre césped artificial constituye el principal factor diferenciador con respecto a la hierba natural, debido al riesgo de quemaduras y otras lesiones (Meyers & Barnhill, 2004); por lo que los resultados obtenidos en este estudio permitirán minimizar estas desventajas. Por otro lado, los jugadores constataron una mayor velocidad del balón sobre los sistemas con menor capacidad de amortiguación. En este sentido, Andersson et al. (2008) advierten de un incremento en la dificultad para ejecutar un control como consecuencia de una mayor velocidad del balón, desembocando finalmente en cambios en el estilo de juego. El mayor deslizamiento como consecuencia de una menor absorción de impactos (Stiles & Dixon, 2007), y una peor conservación de la estructura superficial del pavimento, como consecuencia de una mayor incidencia de las fuerzas verticales (Sánchez-Sánchez et al., 2014), son las posibles causantes de este fenómeno. Por último, la percepción general de los jugadores no mostró diferencias entre los sistemas de césped artificial. Sin embargo, los resultados reflejan una menor comodidad de los jugadores sobre el sistema con mayores niveles de amortiguación, que adicionalmente presentaban una mayor carga fisiológica.

En definitiva, el pavimento con menores niveles de *FR* y *StV* y mayores índices de *ER* y *RT* mostró mejores resultados en las acciones de alta intensidad. Sin embargo, elevados niveles de dureza y tracción rotacional en el pavimento han sido identificados como una de las principales causas de lesión en el fútbol (Dragoo & Braun, 2010; Fuller et al., 2007; Hägglund, Zwerver, & Ekstrand,

2011; Orchard, 2002; Villwock et al., 2009a), por lo que es necesario establecer rangos normativos más cerrados que garanticen la seguridad del jugador y una óptima funcionalidad deportiva.

La ausencia de diferencias entre superficies de hierba natural y césped artificial (Andersson et al., 2008; Gains et al., 2010; Jastrzębski, Bichowska, Rompa, Radzimiński, & Dargiewicz, 2014) y la heterogeneidad evidenciada en el presente trabajo entre sistemas de césped artificial de tercera generación, reafirman la necesidad de evaluar los campos de fútbol de césped artificial como una base individual a diferencia de como un grupo uniforme (McGhie & Ettema, 2013; Potthast et al., 2010). Además, la mejora cualitativa de los sistemas de césped artificial de tercera generación, y la incorporación de componentes estructurales complementarios en la amplia diversidad de pavimentos, precisan el control de las propiedades mecánicas de los pavimentos, para garantizar una funcionalidad deportiva homogénea entre los campos de fútbol de césped artificial.

El amplio número de variables analizadas, unido a la evaluación del comportamiento mecánico del pavimento, avalan el estudio de la interacción superficie-jugador en los diferentes sistemas de césped artificial y reduce las limitaciones vinculadas al uso exclusivo de los dispositivos mecánicos para la evaluación de esta interacción (Dixon & Stiles, 2003). En este sentido, el estudio *in situ* de sistemas de césped artificial ya instalados respalda la validez y aplicabilidad de los resultados y elimina las dificultades de simular las condiciones de práctica en el laboratorio (McGhie & Ettema, 2013). Los campos seleccionados constituyen una pequeña parte de la amplia selección presente en la actualidad. Sin embargo, los estudios previos sobre los componentes superficiales (fibra y caucho), la combinación de los componentes estructurales de soporte y la variabilidad mecánica, presente en este estudio, permiten extrapolar los hallazgos realizados a prácticamente la totalidad de los sistemas de tercera generación.

*APARTADO III. CONCLUSIONES Y
APORTACIONES GENERALES*

CAPÍTULO VII.

CONCLUSIONES GENERALES, LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. CONCLUSIONES

A continuación se enumeran las principales conclusiones extraídas de los diferentes estudios llevados a cabo a lo largo de la presente investigación.

CAPÍTULO IV. Efecto de los componentes estructurales de soporte sobre la pérdida de propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial.

Contraste de hipótesis

- A. Los campos de césped artificial que dispongan de capa elástica no sufrirán una pérdida significativa en ninguna de sus propiedades mecánicas tras el desgaste ocasionado durante un año.**

Se rechaza. El deterioro acontecido sobre estos pavimentos fue inferior al resto de sistemas, pero aún así la pérdida de propiedades mecánicas en un año fue significativa.

- B. La estructura constituida por una sub-base de terreno natural y con capa elástica presentará el valor más reducido en cuanto al porcentaje de pérdida promedio de las propiedades mecánicas tras un año de desgaste.**

Se acepta. El Sistema 2 mostró un deterioro mecánico significativamente inferior al resto de sistemas.

- C. La estructura compuesta de una sub-base de asfalto y sin capa elástica obtendrá un valor significativamente inferior al resto de estructuras en relación a la capacidad de absorción de impactos del pavimento.**

Se rechaza. La posible descompactación de la sub-base de grava compactada sin capa elástica y el reducido espesor de la capa elástica en el sistema con sub-base asfáltica generaron valores de absorción de impactos inferiores al resto de sistemas.

D. Ninguna de las estructuras cumplirá en la segunda valoración con la totalidad de los requerimientos de seguridad y funcionalidad deportiva establecidos por la norma EN 15330-1:2014 para los campos de fútbol de césped artificial y que son objeto de estudio en el presente trabajo.

Se acepta. Ninguno de los sistemas de césped artificial cumplió con la totalidad de los requerimientos normativos en la segunda valoración.

Conclusiones

1. Los componentes estructurales de soporte constituyen un factor influyente sobre las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial y su conservación con el paso del tiempo.
2. La capa elástica garantiza una mayor conservación de las propiedades mecánicas, que valoran la funcionalidad deportiva de los pavimentos de césped artificial.
3. El grado de deterioro de las propiedades mecánicas, en campos de césped artificial sin un mantenimiento específico, oscila entre el 3 % y el 9 % anual en base a los componentes estructurales del pavimento.
4. La estructura compuesta por una sub-base de grava compactada y con capa elástica, asegura la mayor vida útil posible del pavimento. Si bien, ocasiona una excesiva amortiguación del pavimento y un reducido bote del balón que se compensa a medida que se desgasta el pavimento.
5. La sub-base de asfalto sin capa elástica ocasiona un ritmo acelerado de deterioro de las propiedades mecánicas del campo de césped artificial.
6. La sub-base de grava compactada y sin capa elástica representa una estructura poco funcional e insegura para la práctica deportiva.
7. Los campos con sub-base de asfalto aseguran una óptima interacción del jugador y el balón con la superficie desde el inicio de su vida útil.

8. Los componentes estructurales de soporte inciden principalmente sobre las fuerzas verticales, determinando un 35.6 % y un 43.6 % de la absorción de impactos y la deformación vertical de un campo de césped artificial, respectivamente.
9. Ninguna estructura garantiza una óptima rodadura horizontal del balón, en términos normativos, con el paso del tiempo.

En definitiva, esta investigación ha permitido definir la estructura de campo de césped artificial que mejor compagina una adecuada funcionalidad deportiva con una apropiada conservación de todas las propiedades mecánicas, estando constituida por una sub-base de terreno natural y una capa elástica incorporada de 23 mm.

CAPÍTULO V. Influencia de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial de tercera generación sobre el rendimiento físico, fisiológico y la percepción de los jugadores de fútbol.

Contraste de hipótesis

- A. Los sistemas de césped artificial analizados presentarán diferencias en sus propiedades mecánicas en función de la estructura de soporte implantada.**

Se acepta. La heterogeneidad estructural evidenció diferencias en el comportamiento mecánico entre los sistemas de tercera generación seleccionados.

- B. La variabilidad mecánica de los sistemas de césped artificial derivará en diferencias en el rendimiento físico y fisiológico de los jugadores de fútbol.**

Se rechaza. La variabilidad mecánica influye sobre determinados parámetros físicos como la velocidad de sprint. Sin embargo, la carga fisiológica permanece inalterable entre los sistemas de césped artificial.

C. Las propiedades mecánicas vinculadas a la amortiguación del pavimento generarán diferentes grados de fatiga durante el test RSA en los sistemas de césped artificial.

Se rechaza. Los indicadores de fatiga durante el test RSA no mostraron diferencias significativas entre los cuatro sistemas de césped artificial analizados.

D. La percepción de los jugadores sobre la superficie de juego variará significativamente en base al sistema de césped artificial.

Se acepta. Los jugadores percibieron mayor comodidad sobre el sistema de césped artificial con menores niveles de absorción de impactos, en contraste con la superficie que presentaba una mayor capacidad de amortiguación.

Conclusiones

1. La sub-base de grava compactada con capa elástica ofrece los mayores niveles de absorción de impactos y deformación vertical, dentro de los requerimientos normativos.
2. La energía de restitución presenta una correlación negativa con la absorción de impactos del pavimento de césped artificial.
3. La heterogeneidad mecánica de los sistemas de césped artificial no afecta a la respuesta fisiológica de los jugadores en un test de esprints repetidos.
4. Niveles de tracción rotacional elevados, dentro de los rangos normativos, mejoran los tiempos de sprint y cambio de dirección en acciones repetidas.

5. Elevados niveles de energía de restitución muestran una influencia negativa sobre la media de velocidad máxima y el rendimiento en un test RSA.
6. Los jugadores constataron mayores niveles de comodidad sobre los sistemas con menores índices de absorción de impactos.
7. Las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial determinan un 16.5 % del tiempo total en un test RSA.
8. La variabilidad estructural en los sistemas de césped artificial no genera ninguna alteración sobre la acción técnica de golpeo de balón.
9. Los campos de césped artificial con niveles elevados de dureza y rigidez derivan en un mayor deterioro del rendimiento en saltos repetidos.
10. El deterioro de la capacidad de salto después de una acción de esprines repetidos no está afectada por las propiedades mecánicas de la superficie de juego.

En definitiva, esta investigación constata la variabilidad mecánica de los sistemas de césped artificial en base a los componentes estructurales de soporte, y resalta la importancia de las especificaciones normativas para evitar un deterioro en el rendimiento de los jugadores. En este sentido, las propiedades mecánicas de la superficie de juego han demostrado constituir una variable determinante en el rendimiento de test equiparables a las acciones de juego durante la práctica del fútbol.

CAPÍTULO VI. Respuesta física y fisiológica de jugadores de fútbol amateur en diferentes sistemas de tercera generación de césped artificial durante una situación simulada de juego.

Contraste de hipótesis

A. Las propiedades mecánicas de los campos de fútbol de césped artificial mostrarán una influencia significativa sobre el perfil cinemático de los jugadores.

Se acepta. El análisis de perfil cinemático reveló una mayor distancia recorrida en carrera a alta velocidad (18-21 km/h) y en sprint (+21 km/h) sobre el sistema de césped artificial con menor capacidad de amortiguación.

B. Los sistemas de césped artificial con mayores niveles de absorción de impactos presentarán un menor número de acciones de alta intensidad durante la situación simulada de juego.

Se acepta. El sistema de césped artificial con mayor capacidad de absorción de impactos reflejó un menor número de esprines, así como, un menor promedio en la velocidad máxima de los mismos a lo largo de los 45 min de partido, en contraste con la superficie más rígida.

C. Los pavimentos con valores óptimos de tracción rotacional revelarán ventajas significativas sobre la carga interna y externa de los jugadores de fútbol en 45 min de juego.

Se rechaza. El sistema con niveles de tracción rotacional superiores a los especificados por la norma EN 15330-1:2014 evidenció, significativamente, mejores resultados en el perfil cinemático y en las acciones de alta intensidad, en comparación con los sistemas que ofrecían valores de tracción adecuados a los rangos normativos. Además, la tendencia observada en la carga interna no reveló diferencias significativas entre los sistemas de césped artificial.

D. Elevados niveles de energía de restitución en el pavimento provocarán un deterioro del rendimiento en las acciones de sprint.

Se rechaza. Los jugadores mostraron un mayor pico de velocidad máxima en el último tramo del partido disputado sobre el sistema de césped artificial con mayores niveles de energía de restitución.

E. La absorción de impactos constituirá una variable determinante en la percepción de los jugadores sobre los sistemas de césped artificial.

Se acepta. Los jugadores percibieron una mayor lentitud del balón, así como una mayor dificultad para la ejecución de un tackle sobre los sistemas de césped artificial con mayor capacidad de amortiguación.

Conclusiones

1. El sistema de césped artificial no afectó a la distancia recorrida global de los jugadores de fútbol durante los 45 min de partido.
2. La carga del jugador y el ratio trabajo:descanso fueron similares en las cuatro tipologías de superficies artificiales seleccionadas.
3. Los sistemas con mayores niveles de amortiguación y menor tracción rotacional reportaron picos de velocidad máxima más reducidos en el último tramo del partido.
4. La variabilidad mecánica de los sistemas de césped artificial no alteró los parámetros de aceleración e impactos acontecidos por los jugadores.
5. La distancia recorrida a alta velocidad y en sprint fue superior sobre el sistema con menores niveles de amortiguación y mayor tracción rotacional.
6. La respuesta fisiológica de los jugadores no reveló alteraciones significativas entre los cuatro sistemas de césped artificial.
7. Elevados índices de dureza, rigidez y resistencia al giro evidenciaron un incremento en el número y velocidad máxima de las acciones de sprint.

8. Los jugadores reportaron una mayor velocidad del balón sobre el sistema con mayores índices de dureza y tracción rotacional.
9. La dificultad percibida para la realización de un tackle fue superior sobre los sistemas de césped artificial con mayores niveles de amortiguación.
10. La energía de restitución y la tracción rotacional fueron reafirmadas como las propiedades mecánicas más determinantes del rendimiento sobre césped artificial.

En definitiva, una capa elástica de espesor reducido, unida a una menor altura de la fibra y cantidad de relleno, genera elevados niveles de dureza, rigidez y resistencia al giro que aportan ventajas sustanciales al rendimiento, pero incrementan los riesgos de lesión.

Como conclusión, la heterogeneidad estructural de los campos de fútbol de césped artificial desemboca en una variabilidad en el comportamiento mecánico y la funcionalidad deportiva que altera el rendimiento de los jugadores.

7.2. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo de investigación se centra en una temática poco desarrollada en la comunidad científica. Sin embargo, el constante crecimiento y evolución de los campos de césped artificial ha generado la necesidad de incluir a este pavimento como una unidad individual y heterogénea en los estudios comparativos de superficies deportivas.

En el ámbito del césped artificial, muy pocas investigaciones tienen en cuenta las especificaciones técnicas y las propiedades mecánicas de las superficies. Además, la mayoría de estudios han centrado su interés en la estructura superficial de los pavimentos y el análisis comparativo con respecto a la hierba natural. Los componentes estructurales de soporte y su influencia sobre el comportamiento mecánico y el rendimiento deportivo de los campos de fútbol de césped artificial han permanecido olvidados en el ámbito científico, por lo que la comparación de los resultados de este estudio con los obtenidos por otros autores ha reportado grandes dificultades.

En este sentido, una serie de limitaciones han sido detectadas y expuestas para que sean tenidas en cuenta en futuras investigaciones:

- La especificidad requerida, el seguimiento longitudinal y los estrictos criterios de selección provocaron una reducida muestra de sistemas de césped artificial. Sin embargo, el exhaustivo control garantiza la validez de los resultados y la extrapolación de las conclusiones obtenidas sobre los efectos de los componentes estructurales de soporte. La inclusión de diferentes combinaciones de relleno y fibras permitirá solventar esta limitación en futuros estudios.
- La escasa disponibilidad de los responsables de la instalación y el excesivo tiempo requerido para el desarrollo de los ensayos, provocó que no se

podieran realizar de manera simultánea las pruebas mecánicas de los sistemas de césped artificial y los diferentes test aplicados sobre los jugadores. La utilización de los mismos pavimentos en los **Estudios 2 y 3** implicó que el comportamiento mecánico de los sistemas de césped artificial fuera evaluado en el periodo de tiempo comprendido entre ambos estudios.

- Las pruebas de evaluación de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial responden a las especificadas por la normativa europea (EN 15330-1:2014) y del máximo organismo regulador del fútbol (FIFA Quality Concept for Football Turf) para la interacción superficie-jugador. No obstante, otras variables como la fricción lineal o el coeficiente de abrasión podrían haber sido incluidas para valorar su efecto sobre los parámetros de rendimiento evaluados.
- El **Estudio 3** presenta una limitación común a los estudios que incluyen una situación de juego como método de evaluación, debido a la gran cantidad de factores que pueden alterar el rendimiento durante un partido. Sin embargo, la utilización de los mismos jugadores, en las mismas posiciones y con un sistema de juego idéntico en todas las situaciones de juego minimiza las posibles alteraciones derivadas de esta limitación.

7.3. PROPUESTAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Las conclusiones obtenidas en la presente investigación abren la vía de nuevas líneas de investigación encaminadas a continuar la mejora cualitativa de los campos de fútbol de césped artificial y con ello, facilitar las condiciones para una óptima práctica deportiva. Estas líneas de investigación focalizan el interés sobre las principales limitaciones de este tipo de pavimentos y la apertura a nuevos deportes y superficies deportivas. Entre ellas, podemos destacar:

- Un estudio más exhaustivo que incluya diversas combinaciones de componentes estructurales para poder determinar el efecto real de cada uno de ellos. El objetivo de esta línea sería comprobar los componentes más determinantes sobre el comportamiento mecánico y la funcionalidad deportiva de los pavimentos, de cara a concentrar propuestas de mejora sobre los factores limitantes identificados.
- Conocido el porcentaje de pérdida anual de las propiedades mecánicas en cada una de las estructuras en el **Estudio 1**, sería conveniente incidir sobre parámetros de mantenimiento, uso o incluso incorporar componentes adicionales al césped artificial para intentar reducir ese porcentaje de pérdida e incrementar la vida útil del pavimento.
- La principal limitación del césped artificial es la elevada temperatura alcanzada por el pavimento. Por ello, un estudio termográfico aportaría las evidencias necesarias para solventar o minimizar el impacto negativo generado por esta variable sobre la percepción y el rendimiento de los jugadores. Además, esta alternativa permitiría identificar el efecto de la temperatura de la superficie sobre el perfil cinemático y fisiológico del jugador, lo que permitiría introducir un nuevo parámetro en la evaluación y certificación de los campos de fútbol de césped artificial.

- Numerosos estudios que analizan la incidencia lesional de la tipología de superficie deportiva, vinculan un incremento del riesgo de lesión a la dureza de la superficie y las propiedades de tracción. Sin embargo, ninguno de estos estudios aún relaciona los ratios de lesión al comportamiento mecánico del pavimento. La heterogeneidad demostrada en el presente estudio obliga a vincular estos resultados a las características mecánicas del pavimento, para tratar de reducir el porcentaje de lesiones asociadas al estado de la superficie deportiva. La inclusión de análisis biomecánicos y de presiones plantares sobre los diferentes sistemas de césped artificial sería una adecuada alternativa para ahondar en este ámbito.
- En relación a otros deportes, sería interesante extrapolar el presente diseño de investigación a los pavimentos de césped artificial destinados a la práctica de otras modalidades deportivas como el pádel, hockey o rugby. El objetivo sería demostrar si la variabilidad en el rendimiento provocada por la heterogeneidad de los sistemas de césped artificial en fútbol es generalizable a otros deportes.

CAPÍTULO VIII.

LISTA DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abade, E. A., Gonçalves, B. V., Leite, N. M., & Sampaio, J. E. (2014). Time-motion and physiological profile of football training sessions performed by under-15, under-17, and under-19 elite portuguese players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(3), 463-470.
- Abbot, M. (2007). *The importance of maintenance*. Comunicación presentada en la 1st SportSURF Conference: Science, Technology and Research into Sport Surfaces of Loughborough University, Loughborough.
- Aguiar, M. V. D., Botelho, G. M. A., Gonçalves, B. S. V., & Sampaio, J. E. (2013). Physiological responses and activity profiles of football small-sided games. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(5), 1287-1294.
- Alcántara, E. (2007). *Aspectos biomecánicos de los pavimentos deportivos de hierba natural y artificial*. Comunicación presentada en el I Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- Alcántara, E., Gámez, J., Rosa, D., & Sanchís, M. (2009). Analysis of the influence of rubber infill morphology on the mechanical performance of artificial turf surfaces for soccer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 223(1), 1-9.
- Allgeuer, T., Torres, E., Bensason, S., Chang, A., & Martin, J. (2008). Study of shockpads as energy absorption layer in artificial turf surfaces. *Sports Technology*, 1(1), 29-33.
- Andersson, H., Ekblom, B., & Krstrup, P. (2008). Elite football on artificial turf versus natural grass: Movement patterns, technical standards, and player impressions. *Journal of Sports Sciences*, 26(2), 113-122.

- Arampatzis, A., Stafilidis, S., Morey-Klapsing, G., & Brüggemann, G. P. (2004). Interaction of the human body and surfaces of different stiffness during drop jumps. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(3), 451-459.
- Arruda, A. F., Carling, C., Zanetti, V., Aoki, M. S., Coutts, A. J., & Moreira, A. (in press). Effects of a very congested match schedule on body load impacts, accelerations, and running measures in youth soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. doi: <http://dx.doi.org/10.1123/ijsp.2014-0148>
- Aughey, R. J. (2011). Applications of GPS technologies to field sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 295-310.
- Bangsbo, J., Iaia, F. M., & Krstrup, P. (2008). The Yo-Yo intermittent recovery test. *Sports Medicine*, 38(1), 37-51.
- Bangsbo, J., & Mohr, M. (2005). Variations in running speeds and recovery time after a sprint during Top-class soccer matches. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(5), S87.
- Bangsbo, J., Mohr, M., & Krstrup, P. (2006). Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. *Journal of Sports Sciences*, 24(7), 665-674.
- Barbero-Álvarez, J. C., Coutts, A., Granda, J., Barbero-Álvarez, V., & Castagna, C. (2009). The validity and reliability of a global positioning satellite system device to assess speed and repeated sprint ability (RSA) in athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2), 232-235.
- Bartlett, M. D., James, I. T., Ford, M., & Jennings-Temple, M. (2009). Testing natural turf sports surfaces: the value of performance quality standards. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 223(1), 21-29.

- Barreales, L. (2009). *Reciclado y reutilización del césped artificial, más vida después del fútbol*. Comunicación presentada en el III Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- Bishop, D. (2003). A comparison between land and sand-based tests for beach volleyball assessment. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 43(4), 418-423.
- Bloomfield, J., Polman, R., & O'Donoghue, P. (2007). Physical demands of different positions in FA Premier League soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6(1), 63-70.
- Bosco, C., Matteucci, E., & Locatelli, E. (1985). Pista dura, pista morbida, come cambia l'elasticita SDS. *Rivista di Cultura Sportiva*, 4, 54-59.
- Boyd, L. J., Ball, K., & Aughey, R. J. (2011). The reliability of MinimaxX accelerometers for measuring physical activity in Australian football. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 311-321.
- Bradley, P. S., Sheldon, W., Wooster, B., Olsen, P., Boanas, P., & Krustup, P. (2009). High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 159-168.
- Brito, J., Krustup, P., & Rebelo, A. (2012). The influence of the playing surface on the exercise intensity of small-sided recreational soccer games. *Human Movement Science*, 31(4), 946-956.
- Buchheit, M. (2010). Performance and physiological responses to repeated-sprint and jump sequences. *European Journal of Applied Physiology*, 110(5), 1007-1018.

- Buchheit, M., Horobeanu, C., Mendez-Villanueva, A., Simpson, B. M., & Bourdon, P. C. (2011). Effects of age and spa treatment on match running performance over two consecutive games in highly trained young soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 29(6), 591-598.
- Buchheit, M., Méndez-Villanueva, A., Simpson, B. M., & Bourdon, P. C. (2010). Repeated-sprint sequences during youth soccer matches. *International Journal of Sports Medicine*, 31(10), 709-716.
- Burillo, P. (2009). *Los campos de fútbol de césped artificial en Castilla-La Mancha. Hacia un modelo de seguridad, funcionalidad deportiva y satisfacción de sus usuarios*. Tesis Doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo.
- Burillo, P., Felipe, J. L., Gallardo, A., Gallardo, L., Sanchís, M., Pérez, V., . . . Rosa, D. (2010). *El césped artificial. La revolución del pavimento en el fútbol*. Tarancón: Trisorgar, S.L.
- Burillo, P., Gallardo, L., Felipe, J. L., & Gallardo, A. M. (2012). Mechanical assessment of artificial turf football pitches: The consequences of no quality certification. *Scientific Research and Essays*, 7(28), 2457-2465.
- Burillo, P., Gallardo, L., Felipe, J. L., & Gallardo, A. M. (2014). Artificial turf surfaces: Perception of safety, sporting feature, satisfaction and preference of football users. *European Journal of Sport Science*, 14(sup1), S437-S447.
- Cadile, M. (2012). The Business Side: Planning to Go Green? Consider the Alternatives. *ACSM's Health and Fitness Journal*, 16(1), 35-36.
- Campaña, J. (2007). Técnicas para la instalación de campos de deportivos de césped artificial. Mantenimiento. Principales problemas y soluciones. *Mantenimiento de instalaciones deportivas: piscinas y césped artificial*, Armilla: Instituto Andaluz del Deporte.

- Carling, C., Bloomfield, J., Nelsen, L., & Reilly, T. (2008). The role of motion analysis in elite soccer. *Sports Medicine*, 38(10), 839-862.
- Casamichana, D., Castellano, J., Calleja-Gonzalez, J., San Román, J., & Castagna, C. (2013). Relationship Between Indicators of Training Load in Soccer Players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(2), 369-374.
- Casamichana, D., San Román, J., Castellano, J., & Calleja-González, J. (2012). Demandas físicas y fisiológicas en jugadores absolutos no profesionales durante partidos de fútbol 7: un estudio de caso. *Cultura, Ciencia y Deporte*, 7(20), 115-123.
- Castagna, C., Abt, G., Manzi, V., Annino, G., Padua, E., & D'Ottavio, S. (2008). Effect of recovery mode on repeated sprint ability in young basketball players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(3), 923-929.
- Castagna, C., Impellizzeri, F., Cecchini, E., Rampinini, E., & Barbero Álvarez, J. C. (2009). Effects of intermittent-endurance fitness on match performance in young male soccer players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(7), 1954-1959.
- Castagna, C., Impellizzeri, F. M., Chaouachi, A., & Manzi, V. (2013). Preseason variations in aerobic fitness and performance in elite-standard soccer players: a team study. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(11), 2959-2965.
- Castellano, J., Blanco-Villaseñor, A., & Alvarez, D. (2011). Contextual variables and time-motion analysis in soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 32(6), 415-421.
- Castellano, J., Casamichana, D., Calleja-González, J., San Román, J., & Ostojic, S. M. (2011). Reliability and accuracy of 10 Hz GPS devices for short-distance exercise. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10(1), 233-234.

- Catón, J. (2008). *Características y mantenimiento del césped artificial. Investigaciones relacionadas con las fibras del césped artificial*. Comunicación presentada en el II Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- EN 15330-1:2014. (2014). *Surfaces for sports areas - synthetic turf and needle-punched surfaces primarily designed for outdoor use*. Bruselas: CEN.
- Chamari, K., Chaouachi, A., Hambli, M., Kaouech, F., Wisløff, U., & Castagna, C. (2008). The five-jump test for distance as a field test to assess lower limb explosive power in soccer players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(3), 944-950.
- Chaouachi, A., Manzi, V., Wong, D.P., Chaalali, A., Laurencelle, L., Chamari, K., & Castagna, C. (2010). Intermittent endurance and repeated sprint ability in soccer players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2663-2669.
- Consejo Superior de Deportes. (2012). *Seguridad y mantenimiento de los campos de fútbol de césped artificial*. Madrid: Creaimpresion 2000.
- Correal, J. (2008). *Situación actual y perspectivas del césped artificial como superficie deportiva*. Comunicación presentada en el II Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- Coutts, A. J., & Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1), 133-135.
- Cox, A. (2009). *Maintenance of synthetic turf surfaces*. Comunicación presentada en el III Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.

- Cunniffe, B., Proctor, W., Baker, J. S., & Davies, B. (2009). An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using global positioning system tracking software. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(4), 1195-1203.
- De Clercq, D., Debuyck, G., Gerlo, J., Rambour, S., Segers, V., & Van Caekenberghe, I. (2014). Cutting performance wearing different studded soccer shoes on dry and wet artificial turf. *Footwear Science*, 6(2), 81-87.
- Delaney, J. (2009). *Guidance notes on the construction, maintenance and performance of artificial turf pitches*. Dublin: Football Association of Ireland.
- Di Michele, R., Di Renzo, A. M., Ammazalorso, S., & Merni, F. (2009). Comparison of physiological responses to an incremental running test on treadmill, natural grass, and synthetic turf in young soccer players. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(3), 939-945.
- Dixon, S. J., & Stiles, V. H. (2003). Impact absorption of tennis shoe-surface combinations. *Sports Engineering*, 6(1), 1-9.
- Dragoo, J. L., & Braun, H. J. (2010). The effect of playing surface on injury rate. *Sports Medicine*, 40(11), 981-990.
- Duffield, R., Reid, M., Baker, J., & Spratford, W. (2010). Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of movement patterns in confined spaces for court-based sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5), 523-525.
- Durá, J. V., Gimeno, S., Zamora, T., & Martínez, A. (2004). Normalización de los equipamientos para el deporte. Seguridad y calidad en la gestión de instalaciones deportivas. *Ingeniería y Territorio*, 66, 52-59.

- Ekstrand, J., Hägglund, M., & Fuller, C. W. (2011). Comparison of injuries sustained on artificial turf and grass by male and female elite football players. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21(6), 824-832.
- Ekstrand, J., Timpka, T., & Hägglund, M. (2006). Risk of injury in elite football played on artificial turf versus natural grass: a prospective two-cohort study. *British Journal of Sports Medicine*, 40(12), 975-980.
- ESTO. (2008). *Football Turf Today and Tomorrow*. Comunicación presentada en el 1st European Synthetic Turf Organisation Conference, Brussels.
- ESTO. (2012). *Synthetic turf study in Europe*. Bruselas: ESTO.
- Faude, O., Koch, T., & Meyer, T. (2012). Straight sprinting is the most frequent action in goal situations in professional football. *Journal of Sports Sciences*, 30(7), 625-631.
- Felipe, J. L. (2011). *Presente y futuro del césped artificial según deportistas, entrenadores, gestores y arquitectos. Una visión cualitativa*. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo.
- Felipe, J. L., Gallardo, L., Burillo, P., Gallardo, A., Sánchez-Sánchez, J., Plaza-Carmona, M. (2013). Artificial turf football fields: a qualitative vision for professionals players and coaches. *South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation*, 35(2), 105-120.
- Ferrari-Bravo, D.F., Impellizzeri, F.M., Rampinini, E., Castagna, C., Bishop, D., & Wisloff, U. (2008). Sprint vs. interval training in football. *International Journal of Sports Medicine*, 29(8), 668-674.

- FIFA. (2012a). *FIFA Quality Concept for Football Turf. Handbook of test method*. Zurich: Fédération Internationale de Football Association.
- FIFA. (2012b). *FIFA Quality Concept for Football Turf. Handbook of Requirements*. Zurich: Fédération Internationale de Football Association.
- Figueiredo, A. J., Gonçalves, C. E., Coelho e Silva, M. J., & Malina, R. M. (2009). Characteristics of youth soccer players who drop out, persist or move up. *Journal of Sports Sciences*, 27(9), 883-891.
- Fitzsimons, M., Dawson, B., Ward, D., & Wilkinson, A. (1993). Cycling and running tests of repeated sprint ability. *Australian Journal of Science and Medicine in Sport*, 25, 82-82.
- Fleming, P. (2011a). Artificial turf systems for sport surfaces: current knowledge and research needs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 225(2), 43-63.
- Fleming, P. (2011b). Maintenance best practice and recent research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 225(3), 159-170.
- Fleming, P., & Forrester, S. (2014). Artificial Turf Research at Loughborough University. *Procedia Engineering*, 72, 925-930.
- Folgado, H., Gonçalves, B., Abade, E., & Sampaio, J. (2014). Breve Reseña de Investigación y de las Aplicaciones que Utilizan con Datos Posicionales de Futbolistas. *Kronos*, 13(1), 1-12.
- Ford, K. R., Manson, N. A., Evans, B. J., Myer, G. D., Gwin, R. C., Heidt Jr, R. S., & Hewett, T. E. (2006). Comparison of in-shoe foot loading patterns on natural grass and synthetic turf. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 9(6), 433-440.

- Franco, D. (2008). *Mantenimiento y problemática de los campos de césped artificial*. Comunicación presentada en el II Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- Fuller, C. W., Dick, R. W., Corlette, J., & Schmalz, R. (2007). Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on grass and new generation artificial turf by male and female football players. Part 1: match injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 41(1), 20-26.
- Gains, G. L., Swedenhjelm, A. N., Mayhew, J. L., Bird, H. M., & Houser, J. J. (2010). Comparison of speed and agility performance of college football players on field turf and natural grass. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2613-2617.
- Gallardo, L. (2007). *Censo Nacional de Instalaciones Deportivas de España-2005*. Madrid: Consejo Superior de Deportes. Ministerio de Educación y Ciencia.
- Gallardo, L., García-Tascón, M., & Burillo, P. (2008). New sports management software: a needs analysis by a panel of spanish experts. *International Journal of Information Management*, 8(4), 235-245.
- García-Ferrando, M., & Llopis-Goig, R. (2011). *Ideal democrático y bienestar personal. Encuesta sobre los hábitos deportivos en España 2010*. Valencia: Consejo Superior de Deportes y Centro de Investigaciones Sociológicas.
- Giatsis, G., Kollias, I., Panoutsakopoulos, V., & Papaiakovou, G. (2004). Biomechanical differences in elite beach-volleyball players in vertical squat jump on rigid and sand surface. *Sports Biomechanics*, 3(1), 145-158.
- Glaister, M., Howatson, G., Pattison, J.R., & McInnes, G. (2008). The reliability and validity of fatigue measures during multiple-sprint work: an issue

- revisited. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(5), 1597-1601.
- Goedecke, J. H., White, N. J., Chicktay, W., Mahomed, H., Durandt, J., & Lambert, M. I. (2013). The Effect of Carbohydrate Ingestion on Performance during a Simulated Soccer Match. *Nutrients*, 5(12), 5193-5204.
- Gonçalves, B. V., Figueira, B. E., Maças, V., & Sampaio, J. (2014). Effect of player position on movement behaviour, physical and physiological performances during an 11-a-side football game. *Journal of Sports Sciences*, 32(2), 191-199.
- Greig, M., Marchant, D., Lovell, R., Clough, P., & McNaughton, L. (2007). A continuous mental task decreases the physiological response to soccer-specific intermittent exercise. *British Journal of Sports Medicine*, 41(12), 908-913.
- Häggglund, M., Zwerver, J., & Ekstrand, J. (2011). Epidemiology of patellar tendinopathy in elite male soccer players. *The American Journal of Sports Medicine*, 39(9), 1906-1911.
- Hardin, E. C., Van den Bogert, A. J., & Hamill, J. (2004). Kinematic adaptations during running: effects of footwear, surface, and duration. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(5), 838-844.
- Hennig, E. M. (2014). Plantar pressure measurements for the evaluation of shoe comfort, overuse injuries and performance in soccer. *Footwear Science*, 6(2), 119-127.
- Higgins, T., Naughton, G. A., & Burgess, D. (2009). Effects of wearing compression garments on physiological and performance measures in a

- simulated game-specific circuit for netball. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(1), 223-226.
- Hughes, M. G., Birdsey, L., Meyers, R., Newcombe, D., Oliver, J. L., Smith, P. M., . . . Kerwin, D. G. (2013). Effects of playing surface on physiological responses and performance variables in a controlled football simulation. *Journal of Sports Sciences*, 31(8), 878-886.
- Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Castagna, C., Bishop, D., Ferrari Bravo, D., Tibaudi, A., & Wisloff, U. (2008). Validity of a repeated-sprint test for football. *International Journal of Sports Medicine*, 29(11), 899-905.
- James, I. T., & McLeod, A. (2008). *Maintaining synthetic turf: Sand filled systems*. Cranfield: Cranfield University.
- James, I. T., & McLeod, A. J. (2010). The effect of maintenance on the performance of sand-filled synthetic turf surfaces. *Sports Technology*, 3(1), 43-51.
- Jastrzębski, Z., Bichowska, M., Rompa, P., Radzimiński, Ł., & Dargiewicz, R. (2014). Influence of different types of surfaces on the results of running speed tests in young soccer players. *Central European Journal of Sport Sciences and Medicine*, 5(1), 5-14.
- Johnston, R. J., Watsford, M. L., Pine, M. J., Spurrs, R. W., Murphy, A. J., & Pruyn, E. C. (2012). The validity and reliability of 5-Hz global positioning system units to measure team sport movement demands. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(3), 758-765.
- Joosten, T. (2003). *Players' experiences of artificial turf*. Paper presented at the Stadia Turf Summit, Amsterdam.

- Kalapotharakos, V. I., Strimpakos, N., Vithoulka, I., Karvounidis, C., Diamantopoulos, K., & Kapreli, E. (2006). Physiological characteristics of elite professional soccer teams of different ranking. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 46(4), 515-519.
- Kanaras, V., Metaxas, T. I., Mandroukas, A., Gissis, I., Zafeiridis, A., Riganas, C. S., . . . Vrabas, I. S. (2014). The Effect of Natural and Artificial Grass on Sprinting Performance in Young Soccer Players. *American Journal of Sports Science*, 2(1), 1-4.
- Kerdok, A. E., Biewener, A. A., McMahon, T. A., Weyand, P. G., & Herr, H. M. (2002). Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses. *Journal of Applied Physiology*, 92(2), 469-478.
- Kieft, G. J. (2009). *Quality monitoring of 50 artificial turf football field. A study of the correlation between field properties, usage and maintenance*. Comunicación presentada en el SportSURF 7th workshop of Loughborough University, Loughborough.
- Krustrup, P., & Bangsbo, J. (2001). Physiological demands of top-class soccer refereeing in relation to physical capacity: effect of intense intermittent exercise training. *Journal of Sports Sciences*, 19(11), 881-891.
- Krustrup, P., Mohr, M., Amstrup, T., Rysgaard, T., Johansen, J., Steensberg, A., . . . Bangsbo, J. (2003). The yo-yo intermittent recovery test: physiological response, reliability, and validity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(4), 697-705.
- Krustrup, P., Nielsen, J. J., Krustrup, B. R., Christensen, J. F., Pedersen, H., Randers, M. B., . . . Bangsbo, J. (2009). Recreational soccer is an effective health-promoting activity for untrained men. *British Journal of Sports Medicine*, 43(11), 825-831.

- Kuhlman, S., Sabick, M., Pfeiffer, R., Cooper, B., & Forhan, J. (2010). Effect of loading condition on the traction coefficient between shoes and artificial turf surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 224(2), 155-165.
- Lago, C., Casais, L., Dominguez, E., & Sampaio, J. (2010). The effects of situational variables on distance covered at various speeds in elite soccer. *European Journal of Sport Science*, 10(2), 103-109.
- Lara, A.J., Abián, J., Alegre, L.M., Jiménez, L., & Aguado, X. (2006). Assessment of power output in jump tests for applicants to a sports sciences degree. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 46(3), 419-424.
- Lavorgna, J., Song, J., Beattie, W., Riley, M., Beil, C., Levchenko, K., & Shofar, S. (2011). *A review of benefits and issues associated with natural and artificial turf rectangular stadium fields Montgomery*. Staff work group: Montgomery county public schools.
- Lejeune, T. M., Willems, P. A., & Heglund, N. C. (1998). Mechanics and energetics of human locomotion on sand. *The Journal of Experimental Biology*, 201(13), 2071-2080.
- Livesay, G. A., Reda, D. R., & Nauman, E. A. (2006). Peak Torque and Rotational Stiffness Developed at the Shoe-Surface Interface The Effect of Shoe Type and Playing Surface. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(3), 415-422.
- Low, D., & Dixon, S. (2010). *The influence of shock pad density on biomechanical measurements associated with overuse injury*. Comunicación presentada en el 2nd SportSURF Conference: Science Technology and Research into Sport Surfaces of Loughborough University, Loughborough.

- Luo, G., & Stefanyshyn, D. (2011). Identification of critical traction values for maximum athletic performance. *Footwear Science*, 3(3), 127-138.
- MacLeod, H., Morris, J., Nevill, A., & Sunderland, C. (2009). The validity of a non-differential global positioning system for assessing player movement patterns in field hockey. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 121-128.
- McGhie, D., & Ettema, G. (2013). Biomechanical analysis of surface-athlete impacts on third-generation artificial turf. *The American Journal of Sports Medicine*, 41(1), 177-185.
- McLaren, N., Fleming, P., & Forrester, S. (2012). Artificial grass: A conceptual model for degradation in performance. *Procedia Engineering*, 34, 831-836.
- McMahon, T. A., & Greene, P. R. (1979). The influence of track compliance on running. *Journal of Biomechanics*, 12, 893-904.
- McNitt, A. S. (2005). Synthetic turf in the USA—trends and issues. *International Turfgrass Society Research Journal*, 10, 27-33.
- McNitt, A. S., Landschoot, P. J., & Petrukak, D. M. (2004). Evaluation of the playing surface hardness of an infilled synthetic turf system. In P. A. Nektarios (Ed.), *Proceedings of the first international conference on turfgrass management and science for sports fields* (pp. 559-569). Athens: International Society for Horticultural Science (ISHS).
- Meijer, K., Dethmers, J., Savelberg, H., Willems, P., & Wijers, B. (2006). Biomechanical Analysis of Running on Third Generation Artificial Soccer Turf. *The Engineering of Sport* 6(2), 29-34.
- Meyers, M. C., (2010). Incidence, mechanisms and severity of game-related college football injuries on FieldTurf versus natural grass: a 3-year

- prospective study. A 3-Year Prospective Study. *American Journal of Sports Medicine*, 38(4), 687-697.
- Meyers, M., & Barnhill, B. (2004). Incidence, causes, and severity of high school football injuries on FieldTurf vs. natural grass: A 5-year prospective study. *American Journal of Sports Medicine*, 32(7), 1626-1638.
- Mohr, M., Krstrup, P., & Bangsbo, J. (2005). Fatigue in soccer: a brief review. *Journal of sports sciences*, 23(6), 593-599.
- Mohr, M., Nybo, L., Grantham, J., & Racinais, S. (2012). Physiological responses and physical performance during football in the heat. *PloS One*, 7(6), e39202.
- Mujika, I., Santisteban, J., Impellizzeri, F. M., & Castagna, C. (2009). Fitness determinants of success in men's and women's football. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 107-114.
- Müller, C., Sterzing, T., Lange, J., & Milani, T. L. (2010). Comprehensive evaluation of player-surface interaction on artificial soccer turf. *Sports Biomechanics*, 9(3), 193-205.
- Muntañola, J. (2013). La construcción de bases y subbases para campos de césped artificial. *Instalaciones Deportivas Hoy*, 2(2), 64-72.
- Muntañola, J. (2014). *Diseño y construcción de campos de fútbol*. Paper presented at the Curso online de especialista en gestión y mantenimiento de instalaciones deportivas: Piscinas y campos de fútbol, Universidad de Castilla-La Mancha.
- Naunheim, R., Parrott, H., & Standeven, J. (2004). A Comparison of Artificial Turf. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 57(6), 1311-1314.

- Naunheim, R., Standeven, J., Richter, C., & Lewis, L. M. (2000). Comparison of impact data in hockey, football, and soccer. *Journal of Trauma-Injury, Infection, and Critical Care*, 48(5), 938-941.
- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Le Gall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2013). Physical performance and subjective ratings after a soccer-specific exercise simulation: Comparison of natural grass versus artificial turf. *Journal of Sports Sciences*, 31(5), 529-536.
- Notigras. (2007, julio). El caucho reciclado, más ecológico que nunca. *Notigras*. Recuperado de: <http://www.notigras.es/seccion.aspx?id=28>
- O'Donnell, E. (2008). *Design issues for synthetic turf surfaces*. Comunicación presentada en el 5th SportSURF workshop of Loughborough University, Loughborough.
- Olaso, J. (2009). *Interacción biomecánica entre la bota de fútbol y el terreno*. Comunicación presentada en el III Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- Oliver, J. L. (2009). Is a fatigue index a worthwhile measure of repeated sprint ability? *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(1), 20-23.
- Orchard, J. (2002). Is there a relationship between ground and climatic conditions and injuries in football? *Sports Medicine*, 32(7), 419-432.
- Ortego, G. (2008). *Perspectivas del césped: Sistemas de césped y aspectos constructivos*. Comunicación presentada en el II Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.

- Ortiz, L. (2009). *La importancia de la elección de la base elástica y el relleno de los campos de fútbol de césped artificial*. Comunicación presentada en el III Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- Párraga, J. A., & Sánchez, A. (2002). Estudio comparativo sobre los costes de mantenimiento y rentabilidad económica, social y deportiva entre campo de fútbol con pavimentos de césped natural y artificial en el ámbito universitario. *Revista Motricidad*, 8, 21-46.
- Pérez-Soriano, P., Llana-Belloch, S., Cortell-Tormo, J. M., & Pérez-Turpin, J. (2009). Biomechanical factors to be taken into account to prevent injuries and improve sporting performance on artificial turf. *Journal of Human Sport and Exercise*, 4(2), 79-92.
- Petrass, L. A., Twomey, D. M., & Harvey, J. T. (2014). Understanding how the components of a synthetic turf system contribute to increased surface temperature. *Procedia Engineering*, 72, 943-948.
- Phillips, R. (2004) *Cost benefit analysis of natural and artificial turf sports pitches*. Tesis Doctoral. Universidad de Loughborough, Reino Unido.
- Pinnington, H. C., & Dawson, B. (2001). The energy cost of running on grass compared to soft dry beach sand. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 4(4), 416-430.
- Pinnington, H. C., Lloyd, D. G., Besier, T. F., & Dawson, B. (2005). Kinematic and electromyography analysis of submaximal differences running on a firm surface compared with soft, dry sand. *European Journal of Applied Physiology*, 94(3), 242-253.
- Portas, M. D., Harley, J. A., Barnes, C. A., & Rush, C. J. (2010). The validity and reliability of 1-Hz and 5-Hz global positioning systems for linear,

- multidirectional, and soccer-specific activities. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(4), 448-458.
- Potthast, W. (2010). Motion differences in goal kicking on natural and artificial soccer turf systems. *Footwear Science*, 2(1), 29-35.
- Potthast, W., Verhelst, R., Hughes, M., Stone, K., & De Clercq, D. (2010). Football-specific evaluation of player-surface interaction on different football turf system. *Sports Technology*, 3(1), 5-12.
- Poulos, C. C. N., Gallucci, J., Gage, W. H., Baker, J., Buitrago, S., & Macpherson, A. K. (2014). The perceptions of professional soccer players on the risk of injury from competition and training on natural grass and 3rd generation artificial turf. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 6(1), 1-7.
- Powell, J. W., & Schootman, M. (1992). A multivariate risk analysis of selected playing surfaces in the National Football League: 1980 to 1989 An epidemiologic study of knee injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 20(6), 686-694.
- Pyne, D. B., Saunders, P. U., Montgomery, P. G., Hewitt, A. J., & Sheehan, K. (2008). Relationships between repeated sprint testing, speed, and endurance. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(5), 1633-1637.
- Rampinini, E., Bishop, D., Marcora, S.M., Bravo, D.F., Sassi, R., & Impellizzeri, F.M. (2007). Validity of simple field tests as indicators of match-related physical performance in top-level professional soccer players. *International Journal of Sports Medicine*, 28(3), 228-235.
- Rampinini, E., Coutts, A. J., Castagna, C., Sassi, R., & Impellizzeri, F. M. (2007). Variation in top level soccer match performance. *International Journal of Sports Medicine*, 28(12), 1018-1024.

- Rampinini, E., Impellizzeri, F. M., Castagna, C., Abt, G., Chamari, K., Sassi, A., & Marcora, S. M. (2007). Factors influencing physiological responses to small-sided soccer games. *Journal of Sports Sciences*, 25(6), 659-666.
- Rampinini, E., Sassi, A., Morelli, A., Mazzoni, S., Fanchini, M., & Coutts, A. J. (2009). Repeated-sprint ability in professional and amateur soccer players. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 34(6), 1048-1054.
- Randers, M. B., Mujika, I., Hewitt, A., Santisteban, J., Bischoff, R., Solano, R., . . . Mohr, M. (2010). Application of four different football match analysis systems: A comparative study. *Journal of Sports Sciences*, 28(2), 171-182.
- Rebelo, A., Brito, J., Maia, J., Coelho-e-Silva, M. J., Figueiredo, A. J., Bangsbo, J., . . . Seabra, A. (2013). Anthropometric characteristics, physical fitness and technical performance of under-19 soccer players by competitive level and field position. *International Journal of Sports Medicine*, 34(4), 312-317.
- Rosa, D. (2009). *Aspectos biomecánicos de los pavimentos deportivos. Hierba artificial*. Comunicación presentada en el III Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- Rosa, D., Sanchís, M., & Alcántara, E. (2006). Efecto de las operaciones de mantenimiento sobre las propiedades de los campos de hierba artificial. *Revista de Biomecánica*, 124, 36-39.
- Rosa, D., Sanchís, M., Alcántara, E., & Zamora, T. (2007). Avances en el estudio de campos de hierba artificial, aportaciones biomecánicas. En P. Pérez y S. Llana (Eds.), *Biomecánica aplicada a la actividad física y al deporte* (pp. 405-429). Valencia: Ayuntamiento de Valencia.
- Rosa, D., Sanchis, M., Alcántara, E., & Zamora, T. (2008). Contribuciones de la Biomecánica al estudio de los terrenos de juego de hierba artificial. En M.

- Izquierdo (Ed.), *Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte* (pp. 469-488). Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Sampaio, J. E., Lago, C., Gonçalves, B., Maçãs, V. M., & Leite, N. M. (2014). Effects of pacing, status and unbalance in time motion variables, heart rate and tactical behaviour when playing 5-a-side football small-sided games. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(2), 229-233.
- Sánchez-Sánchez, J., Felipe, J. L., Burillo, P., del Corral, J., & Gallardo, L. (2014). Effect of the structural components of support on the loss of mechanical properties of football fields of artificial turf. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 228(3), 155-164.
- Schoukens, G. (2009). Developments in textile sports surfaces. *Advances in Carpet Manufacture*, 87, 102-137.
- Schrier, N. M., Wannop, J. W., Lewinson, R. T., Worobets, J., & Stefanyshyn, D. (2014). Shoe traction and surface compliance affect performance of soccer-related movements. *Footwear Science*, 6(2), 69-80.
- Serensits, T. J., McNitt, A. S., & Petrunak, D. M. (2011). Human health issues on synthetic turf in the USA. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 225(3), 139-146.
- Severn, K. A., Fleming, P. R., & Dixon, N. (2010). Science of synthetic turf surfaces: Player-surface interactions. *Sports Technology*, 3(1), 13-25.
- Severn, K. A., Fleming, P. R., Young, C., & James, I. T. (2007). The play performance of six water based field hockey pitches—spatial and temporal changes. En P. R. Fleming, C. Young, S. J. Dixon, M. J. Carre & I.

- T. James (Eds.), *First international conference on science technology and research into sport surfaces*. Loughborough: Loughborough University.
- Shorten, M., Hudson, B., & Himmelsbach, J. (2003). *Shoe-surface traction of conventional and in-filled synthetic turf football surfaces*. Comunicación presentada en el XIX International Congress of Biomechanics, Dunedin.
- Smith, N., Dyson, R., & Janaway, L. (2004). Ground reaction force measures when running in soccer boots and soccer training shoes on a natural turf surface. *Sports Engineering*, 7(3), 159-167.
- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., & Goodman, C. (2005). Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities. *Sports Medicine*, 35(12), 1025-1044.
- Spencer, M., Fitzsimons, M., Dawson, B., Bishop, D., & Goodman, C. (2006). Reliability of a repeated-sprint test for field-hockey. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 9(1), 181-184.
- Steffen, K., Andersen, T. E., & Bahr, R. (2007). Risk of injury on artificial turf and natural grass in young female football players. *British Journal of Sports Medicine*, 1, 1-6.
- Stiles, V., & Dixon, S. (2007). Biomechanical response to systematic changes in impact interface cushioning properties while performing a tennis-specific movement. *Journal of Sports Sciences*, 25(11), 1229-1239.
- Varley, M. C., & Aughey, R. J. (2013). Acceleration profiles in elite Australian soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 34(1), 34-39.
- Varley, M. C., Fairweather, I. H., & Aughey, R. J. (2012). Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration,

- deceleration, and constant motion. *Journal of Sports Sciences*, 30(2), 121-127.
- Venegas, C. (2010). Mantenimiento campos artificiales y su problemática actual, *Mantenimiento integral de instalaciones deportivas: el césped artificial*, Umbrete: Instituto Andaluz del Deporte.
- Vercammen, M. (2007). *¿Césped natural o artificial?*. Comunicación presentada en el I Curso de Experto Universitario en Gestión del Césped Deportivo Natural y Artificial de la UCLM y RFEF, Las Rozas.
- Villwock, M. R., Meyer, E. G., Powell, J. W., Fouty, A. J., & Haut, R. C. (2009a). Football playing surface and shoe design affect rotational traction. *The American Journal of Sports Medicine*, 37(3), 518-525.
- Villwock, M. R., Meyer, E. G., Powell, J. W., Fouty, A. J., & Haut, R. C. (2009b). The effects of various infills, fibre structures, and shoe designs on generating rotational traction on an artificial surface. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 223(1), 11-19.
- Williams, S., Hume, P. A., & Kara, S. (2011). A review of football injuries on third and fourth generation artificial turfs compared with natural turf. *Sports Medicine*, 41(11), 903-923.
- Young, C. (2009). *Maintenance: cost benefits*. Comunicación presentada en el 7th SportSURF workshop of Loughborough University, Loughborough.
- Zanetti, E.M. (2009). Amateur football game on artificial turf: Players' perceptions. *Applied Ergonomics*, 40(3), 485-490.

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I. ORIGEN Y COMPONENTES DEL CÉSPED ARTIFICIAL

Tabla 1.1. Ventajas e inconvenientes de la instalación de la capa elástica.....	45
Tabla 1.2. Coste total por hora de uso de las diferentes generaciones de césped artificial y de los pavimentos de hierba natural.....	58

CAPÍTULO II. COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y REGULACIÓN NORMATIVA DEL CÉSPED ARTIFICIAL

Tabla 2.1. Especificaciones para campos de fútbol de césped artificial según FIFA ..	72
Tabla 2.2. Normas UNE-EN para superficies deportivas de césped artificial	73

CAPÍTULO III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

Tabla 3.1. Cronograma de los estudios incluidos en el diseño de investigación.....	84
---	----

CAPÍTULO IV. EFECTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE SOPORTE SOBRE LA PÉRDIDA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE CÉSPED ARTIFICIAL

Tabla 4.1. Características de los sistemas de césped artificial	96
Tabla 4.2. Requerimientos de la norma europea EN 15330-1:2014 para campos de fútbol de césped artificial de uso exterior.....	100
Tabla 4.3. Resultados de los ensayos mecánicos sobre los cuatro sistemas de césped artificial testados.....	103
Tabla 4.4. Porcentaje de variación de las propiedades mecánicas	103
Tabla 4.5. Coeficientes de regresión de los componentes estructurales de soporte y el año de evaluación.....	106

CAPÍTULO V. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SISTEMAS DE CÉSPED ARTIFICIAL DE TERCERA GENERACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO FÍSICO, FISIOLÓGICO Y LA PERCEPCIÓN DE JUGADORES DE FÚTBOL

Tabla 5.1. Características de los sistemas de césped artificial seleccionados 118

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial seleccionados 125

Tabla 5.3. Valores de tiempo, velocidad y frecuencia cardiaca en el test RSA en los cuatro sistemas de césped artificial..... 125

Tabla 5.4. Valoración de los test de salto CMJ, SJ y 15 s sobre los diferentes sistemas de césped artificial..... 128

Tabla 5.5. Análisis de regresión lineal de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial sobre los parámetros de salto, sprint y percepción 131

CAPÍTULO VI. RESPUESTA FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE JUGADORES DE FÚTBOL AMATEUR EN DIFERENTES SISTEMAS DE TERCERA GENERACIÓN DE CÉSPED ARTIFICIAL DURANTE UNA SITUACIÓN SIMULADA DE JUEGO

Tabla 6.1. Distancia recorrida, indicadores de carga y valores de frecuencia cardiaca durante los 45 min de juego en los cuatro sistemas de césped artificial 151

Tabla 6.2. Acciones de alta intensidad durante los 45 min en los cuatro sistemas de césped artificial 154

Tabla 6.3. Número de aceleraciones y desaceleraciones en los cuatro sistemas de césped artificial 155

Tabla 6.4. Número de impactos en los diferentes sistemas de césped artificial 155

Tabla 6.5. Resultados de la Escala Visual Análoga (VAS) posterior a la sesión en los sistemas de césped artificial..... 157

Tabla 6.6. Análisis de regresión lineal de las propiedades mecánicas de los sistemas de césped artificial sobre el perfil cinemático y fisiológico de los jugadores durante una situación simulada de juego..... 159

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I. ORIGEN Y COMPONENTES DEL CÉSPED ARTIFICIAL

Figura 1.1. Astrodome de Houston	33
Figura 1.2. Césped artificial de 1ª Generación	34
Figura 1.3. Césped artificial de 2ª Generación	34
Figura 1.4. Césped artificial de 3ª Generación	36
Figura 1.5. Oportunidades de generación de beneficios adicionales con la implantación de una superficie de césped artificial	37
Figura 1.6. Representación esquemática de una estructura de césped artificial	39
Figura 1.7. Construcción de sub-base de macadán	40
Figura 1.8. Diferentes sistemas de soporte de los campos de fútbol de césped artificial	41
Figura 1.9. Sistemas de drenaje en campos de césped artificial con sub-base permeable o impermeable.....	43
Figura 1.10. Caucho SBR y termoplástico.....	47
Figura 1.11. Relleno orgánico de corcho y fibra de coco con cáscara de nuez.....	48
Figura 1.12. Fibra recta-monofilamento	49
Figura 1.13. Fibra recta-fibrilada	50
Figura 1.14. Pérdida de longitud de fibra con el paso de los años.....	51
Figura 1.15. Modelo de degradación de los campos de fútbol de césped artificial	52
Figura 1.16. Relación entre horas/semana de uso y la vida útil del césped artificial .	53
Figura 1.17. Desgaste de la fibra tras su instalación ocasionado por el uso	54
Figura 1.18. Efecto del mantenimiento sobre las propiedades mecánicas y la vida útil de los campos de césped artificial.....	55
Figura 1.19. Sistema de limpieza del pavimento	56
Figura 1.20. Diferentes sistemas de cepillado	57

Figura 1.21. Máquina de descompactación	57
CAPÍTULO II. COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y REGULACIÓN NORMATIVA DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
Figura 2.1. Influencia de la superficie sobre las fuerzas de impacto generadas durante la carrera	63
Figura 2.2. Atleta Artificial Avanzado	64
Figura 2.3. Equipo de ensayo de tracción rotacional.....	67
Figura 2.4. Ensayo de bote vertical de balón	68
Figura 2.5. Ensayo de rodadura horizontal de balón.....	70
CAPÍTULO III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	
Figura 3.1. Adaptación del “Mapa de Loughborough” al diseño del estudio	81
Figura 3.2. Diseño estructural de la tesis doctoral.....	83
CAPÍTULO IV. EFECTO DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE SOPORTE SOBRE LA PÉRDIDA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE CÉSPED ARTIFICIAL	
Figura 4.1. Cuadro resumen del diseño de investigación	94
Figura 4.2. Características de los sistemas de césped artificial evaluados.....	95
Figura 4.3. Posiciones de los ensayos de campo establecidas por EN 15330-1:2014...	97
Figura 4.4. Gráficos Kernel de las propiedades mecánicas de las cuatro estructuras seleccionadas.....	105
CAPÍTULO V. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SISTEMAS DE CÉSPED ARTIFICIAL DE TERCERA GENERACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO FÍSICO, FISIOLÓGICO Y LA PERCEPCIÓN DE JUGADORES DE FÚTBOL	
Figura 5.1. Zonas de ensayo según la norma EN 15330-1:2014	120

Figura 5.2. Perfil de tiempo, velocidad y deterioro del rendimiento (%Dif y %Dec) del test RSA (6 X 40 m) 126

Figura 5.3. Tiempos y porcentaje de deterioro del rendimiento (%Dec y %Dif) en los esprines del test RSA especificados por tramos de distancia..... 127

Figura 5.4. Resultados de la Escala Visual Análoga (VAS) posterior a la sesión en los sistemas de césped artificial..... 129

CAPÍTULO VI. RESPUESTA FÍSICA Y FISIOLÓGICA DE JUGADORES DE FÚTBOL AMATEUR EN DIFERENTES SISTEMAS DE TERCERA GENERACIÓN DE CÉSPED ARTIFICIAL DURANTE UNA SITUACIÓN SIMULADA DE JUEGO

Figura 6.1. Protocolo del test Yo-Yo de recuperación intermitente-Nivel 1 146

Figura 6.2. Distancia recorrida, pico de V_{max} e indicadores de frecuencia cardiaca en intervalos de 15 min durante un partido de fútbol simulado en los cuatro sistemas de césped artificial 152

Figura 6.3. Perfil de actividad durante un partido simulado de fútbol de 45 min en los cuatro sistemas de césped artificial..... 153

Figura 6.4. Distribución de la frecuencia cardiaca expresada en porcentaje de tiempo de juego empleado en los diferentes rangos de FC_{max} durante una situación simulada de juego de 45 min en los cuatro sistemas de césped artificial 156

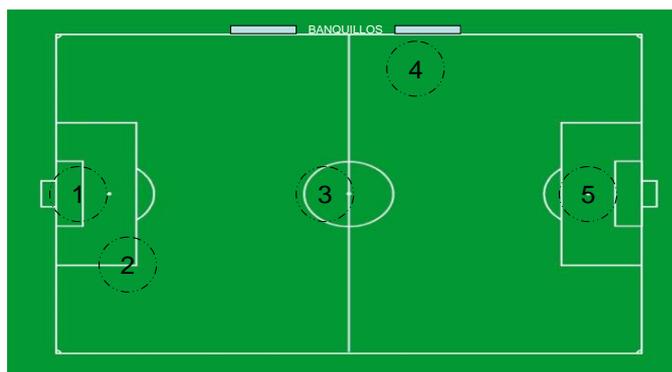
ANEXOS

ANEXO 1. HOJA DE TOMA DE DATOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS

HOJA DE TOMA DE DATOS

ENSAYOS REALIZADO SEGÚN	
Norma UNE-EN 15330-1:2008 Ensayos "in situ". Anexo A, apartado A3. Fútbol	<input type="checkbox"/>
Otra _____	<input type="checkbox"/>

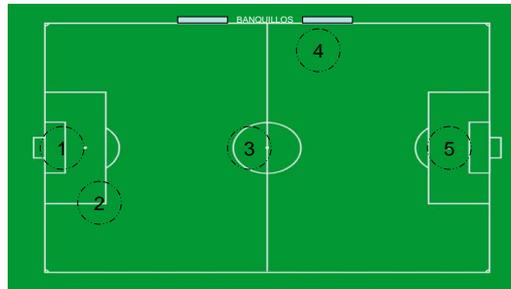
Nº PROYECTO: _____



LOCALIDAD	
PROVINCIA	
NOMBRE INSTALACIÓN	
ORIENTACIÓN	
FECHA DE ENSAYO	
TEMPERATURA INICIO	
TEMPERATURA FINAL	
CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	
HORA INICIO ENSAYOS	
HORA FINAL ENSAYOS	
HUMEDAD RELATIVA ENSAYO	

Resistencia Rotacional		
ZONA 1	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 2	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 3	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 4	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 5	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 6	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	

ENSAYO REALIZADO SEGÚN	
Norma UNE-EN 15301-1:2007	<input type="checkbox"/>
Otra _____	<input type="checkbox"/>



OBSERVACIONES

ENSAYO REALIZADO POR		

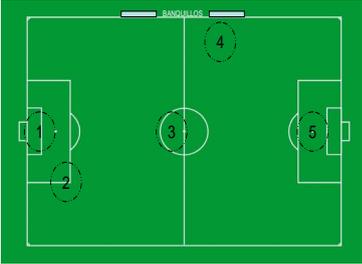
HOJA DE TOMA DE DATOS

LOCALIDAD	
PROVINCIA	
NOMBRE INSTALACIÓN	
ORIENTACIÓN	
FECHA DE ENSAYO	
TEMPERATURA INICIO	
TEMPERATURA FINAL	
CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	
HORA INICIO ENSAYOS	
HORA FINAL ENSAYOS	
HUMEDAD RELATIVA ENSAYO	

Rebote Vertical		
ZONA 1	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 2	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 3	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 4	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 5	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	
ZONA 6	R1	
	R2	
	R3	
	R4	
	R5	

Calibración de Balón		HORA INICIO
Calibración	R1	
	R2	
	R3	HORA FINAL
	R4	
	R5	

ENSAYO REALIZADO SEGÚN	
Norma UNE-EN 12235:2006	<input type="checkbox"/>
Otra _____	<input type="checkbox"/>



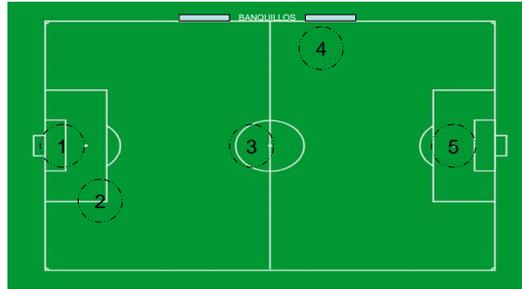
OBSERVACIONES

ENSAYO REALIZADO POR		

LOCALIDAD	
PROVINCIA	
NOMBRE INSTALACIÓN	
ORIENTACIÓN	
FECHA DE ENSAYO	
TEMPERATURA INICIO	
TEMPERATURA FINAL	
CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	
HORA INICIO ENSAYOS	
HORA FINAL ENSAYOS	
HUMEDAD RELATIVA ENSAYO	

Absorción de impactos		
ZONA 1	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 2	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 3	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 4	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 5	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 6	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3

ENSAYO REALIZADO SEGÚN	
Norma UNE-EN 14808:2006	<input type="checkbox"/>
Otra _____	<input type="checkbox"/>



OBSERVACIONES

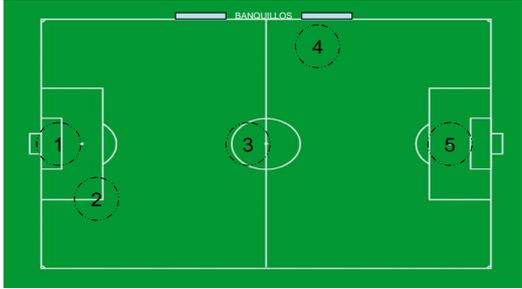
ENSAYO REALIZADO POR		

HOJA DE TOMA DE DATOS

LOCALIDAD	
PROVINCIA	
NOMBRE INSTALACIÓN	
ORIENTACIÓN	
FECHA DE ENSAYO	
TEMPERATURA INICIO	
TEMPERATURA FINAL	
CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	
HORA INICIO ENSAYOS	
HORA FINAL ENSAYOS	
HUMEDAD RELATIVA ENSAYO	

Deformación vertical		
ZONA 1	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 2	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 3	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 4	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 5	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3
ZONA 6	E1	R1
		R2
		R3
	E2	R1
		R2
		R3
	E3	R1
		R2
		R3

ENSAYO REALIZADO SEGÚN
Norma UNE-EN 14809:2006 <input type="checkbox"/>
Otra _____ <input type="checkbox"/>



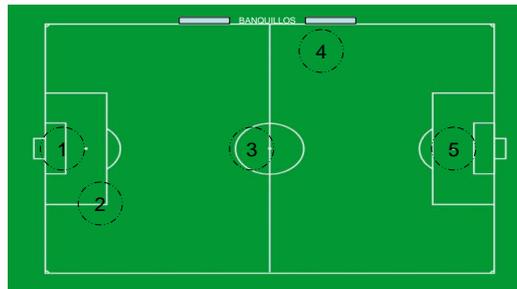
OBSERVACIONES

ENSAYO REALIZADO POR		

LOCALIDAD	
PROVINCIA	
NOMBRE INSTALACIÓN	
ORIENTACIÓN	
FECHA DE ENSAYO	
TEMPERATURA INICIO	
TEMPERATURA FINAL	
CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	
HORA INICIO ENSAYOS	
HORA FINAL ENSAYOS	
HUMEDAD RELATIVA ENSAYO	

RODADURA HORIZONTAL

ENSAYO REALIZADO SEGÚN	
Norma UNE-EN 14808:2006	<input type="checkbox"/>
Otra _____	<input type="checkbox"/>



OBSERVACIONES

ENSAYO REALIZADO POR		

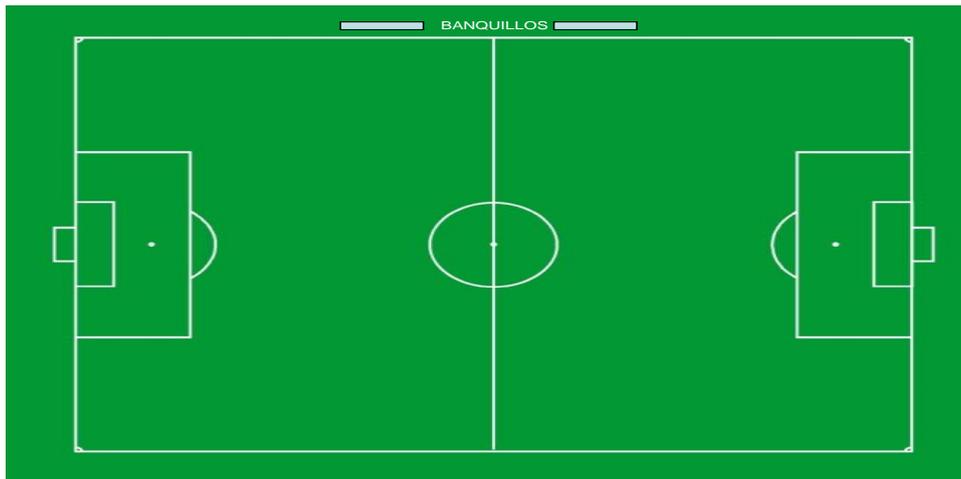
HOJA DE TOMA DE DATOS

RODADURA HORIZONTAL							
ZONA 1	D1	R1		ZONA 4	D1	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D2	R1			D2	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D3	R1			D3	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D4	R1			D4	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
ZONA 2	D1	R1		ZONA 5	D1	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D2	R1			D2	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D3	R1			D3	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D4	R1			D4	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
ZONA 3	D1	R1		ZONA 6	D1	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D2	R1			D2	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D3	R1			D3	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	
	D4	R1			D4	R1	
		R2				R2	
		R3				R3	
		R4				R4	
		R5				R5	

LOCALIDAD	
PROVINCIA	
NOMBRE INSTALACIÓN	
ORIENTACIÓN	
FECHA DE ENSAYO	
TEMPERATURA INICIO	
TEMPERATURA FINAL	
CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	
HORA INICIO ENSAYOS	
HORA FINAL ENSAYOS	
HUMEDAD RELATIVA ENSAYO	

REGULARIDAD SUPERFICIAL

ENSAYO REALIZADO SEGÚN	
Norma UNE-EN 13036-7:2004	<input type="checkbox"/>
Otra _____	<input type="checkbox"/>



OBSERVACIONES

ENSAYO REALIZADO POR		



COMPLEJO
HOSPITALARIO
UNIVERSITARIO
DE ALBACETE

Bbox: P-143, 37 03008 ALBACETE Telf: 967 50 10 00

 	
12 DIC 2012	
ENTRADA Nº	SALIDA Nº
	4520

sescam

Servicio de Salud de Castilla-La Mancha



Albacete, 12 de diciembre de 2012

FACULTAD CIENCIAS DEL DEPORTE
LEONOR GALLARDO GUERRERO
Ayda. Carlos III S/n
45071 TOLEDO

Título del estudio: EFECTOS DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE SOPORTE SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y EL RENDIMIENTO DEPORTIVO EN LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE CÉSPED ARTIFICIAL. **Investigador principal:** LEONOR GALLARDO GUERRERO.

El C.E.I.C. del Complejo Hospitalario Universitario de Albacete, en su reunión del día 3 de diciembre de 2012 ha considerado que el mencionado proyecto se ajusta a las normas éticas esenciales utilizadas en este ámbito.

Fdo.: Consuelo Martínez
Unidad de Gestión de la Investigación



ANEXO 3. CONSENTIMIENTO INFORMADO DE PARTICIPACIÓN



Título del Proyecto: Efectos de los componentes estructurales de soporte sobre el comportamiento mecánico y el rendimiento deportivo en los campos de fútbol de césped artificial.

D.....,
con fecha de nacimiento:..... y con DNI nº

Manifiesta que ha sido convenientemente informado por el investigador Dr. Pablo Burillo Naranjo, quien le ha explicado las actividades que se van a realizar y ha resuelto todas sus dudas por lo que afirma que es conocedor de lo que su participación supone, incluyendo todos los beneficios que podría suponer su participación en este estudio.

Además, he sido informado de que los riesgos derivados de mi participación se limitan a la posibilidad de lesión en la realización de las pruebas, por algún accidente que pudiese acontecer en la realización de las mismas, los cuales se minimizarán al máximo, estableciendo un calentamiento dirigido y realizando las mismas con las mayores medidas de seguridad posible.

Afirma, igualmente que ha sido también informado de que sus datos personales serán protegidos e incluidos en un fichero que deberá estar sometido a y con las garantías de la ley 15/1999 de 13 de diciembre.

Por ello, su firma en el presente documento significa que participa voluntariamente en los procedimientos experimentales explicados en la hoja informativa y que OTORGA su CONSENTIMIENTO para el uso de sus datos y muestras obtenidas, con el único fin de cubrir los objetivos especificados del presente estudio.

Madrid, a..... de..... de 2013.

Fdo. D. _____

ANEXO 4. HOJA DE INFORMACIÓN DE PARTICIPACIÓN EN EL PROYECTO



Título del Proyecto

Efectos de los componentes estructurales de soporte sobre el comportamiento mecánico y el rendimiento deportivo en los campos de fútbol de césped artificial.

Introducción: La evolución acontecida entre los campos de fútbol de césped artificial ha originado la existencia de diferentes tipologías de pavimentos en base a los componentes estructurales que los conforman. Esta diversidad afecta principalmente a las propiedades mecánicas de la superficie deportiva, especialmente en términos de interacción superficie-jugador y superficie-balón. La presente investigación pretende esclarecer si esa influencia se extiende a parámetros vinculados con el rendimiento deportivo durante la práctica del fútbol.

Protocolo experimental:

Si decides participar en el estudio, podrás entrar a formar parte del grupo de tratamiento sobre el que se realizarán las diferentes mediciones de parámetros físicos, fisiológicos y psicológicos en cada uno de los campos de césped artificial seleccionados.

Las mediciones se llevarán a cabo con material sofisticado y específico para cada uno de los ensayos. Asimismo, las pruebas realizadas estarán supervisadas por investigadores especialistas en los diferentes campos que engloba el presente proyecto.

El tiempo total que se estima que necesitarás para llevar a cabo todas las actividades es de 3 horas en cada uno de los campos de césped artificial evaluados. El trabajo de campo se reduce a 4 estructuras diferentes de pavimentos de césped artificial, a lo que se suma la prueba piloto.

Riesgos y beneficios derivados de tu participación:

El beneficio derivado de tu participación será:

- A nivel individual, la posibilidad de obtener información sobre tus parámetros e indicadores de rendimiento físico, fisiológico y psicológico en la práctica del fútbol pudiendo tener, por tanto, si así lo solicitas, tus resultados de composición corporal, índice de fatiga, altura de salto, velocidad y tiempo de sprint, concentración de lactato en sangre, frecuencia cardiaca y esfuerzo percibido. Así como, el análisis de la distancia recorrida, velocidad media o número de carreras de alta velocidad durante el desarrollo de un partido de fútbol.
- A nivel social, la obtención de información muy útil para establecer las condiciones estándar en el diseño de los campos de fútbol de césped artificial, con el objetivo de mejorar la calidad de este tipo de pavimentos, situándolos a la altura del césped natural.

Los riesgos derivados de tu participación se limitan a:

- Posibilidad de lesión en la realización de las pruebas, por algún accidente que pudiese acontecer en la realización de las mismas, los cuales se minimizarán al máximo, estableciendo un calentamiento dirigido y realizando las mismas con las mayores medidas de seguridad posible.

Voluntariedad Tu participación es totalmente voluntaria por lo que en cualquier momento puedes decidir abandonar el estudio.

Anonimato: Todos tus datos serán tratados de forma confidencial, asignando un código numérico a tus datos y tus muestras. Por ello, todo el proceso será estrictamente confidencial asegurando, además, que tu nombre no será utilizado en ningún informe cuando los resultados de la investigación sean publicados.

Compensaciones económica: Dado que se trata de una investigación científica cuyo único objetivo es obtener información veraz y segura que, con el mínimo riesgo para los participantes, aporte beneficios individuales y sociales, y dado que se requiere para la objetividad de los resultados una colaboración imparcial y no sesgada, no es posible realizar compensaciones económicas a los participantes, quedando por ello, muy agradecidos de tu generosa aportación.

Datos de contacto

Para cualquier cuestión que desees aclarar o comentarnos la persona de contacto será:

- Pablo Burillo Naranjo. Universidad Camilo José Cela. Instituto de Ciencias del Deporte. Teléfono: 91 815 31 31 ext. 1610; Correo electrónico: pburillo@ucjc.edu
- Javier Sánchez Sánchez. Universidad de Castilla-La Mancha. Facultad de Ciencias del Deporte. Teléfono: 925 26 88 00 ext. 5544; Correo electrónico: becario.jsanchez@uclm.es

ANEXO 5. CUESTIONARIO VAS (CAPÍTULO V)



Nombre y apellidos: _____ Localidad del campo: _____

Responda a las siguientes preguntas colocando una “X” en el lugar de la línea horizontal que Ud. considere apropiado respecto a su percepción sobre la sesión de hoy:

1. ¿Cómo puedes clasificar el esfuerzo realizado durante el juego?

Nada duro Muy duro

2. ¿Cómo estás de cansado en este momento?

Nada cansado Muy cansado

3. ¿Qué dificultad has encontrado al realizar un giro o cambio de dirección?

Ninguna dificultad Mucha dificultad

4. ¿Cómo te has encontrado a la hora de realizar saltos?

Nada cómodo Muy cómodo

5. ¿Cómo te has sentido durante la carrera sin balón?

Nada cómodo Muy cómodo

6. En general, ¿Cómo te has sentido a lo largo de la sesión?

Nada cómodo Muy cómodo

7. Le gustaría hacer alguna observación del campo de césped artificial (positiva o negativa) en el cual se ha desarrollado la sesión de hoy:

Gracias por su colaboración

ANEXO 6. CUESTIONARIO VAS (CAPÍTULO VI)

Nombre y apellidos: _____ Localidad del campo: _____

Responda a las siguientes preguntas colocando una “X” en el lugar de la línea horizontal que Ud. considere apropiado respecto a su percepción sobre la sesión de hoy:

1. ¿Cómo puedes clasificar el esfuerzo realizado durante el juego?

Nada duro Muy duro

2. ¿Cómo estás de cansado en este momento?

Nada cansado Muy cansado

3. ¿Qué dificultad has percibido para realizar un pase preciso?

Ninguna dificultad Mucha dificultad

4. ¿Cómo has percibido la velocidad del balón tras realizar un pase?

Muy lento Muy rápido

5. ¿Qué dificultad has percibido para realizar un control del balón?

Ninguna dificultad Mucha dificultad

6. ¿Qué dificultad has percibido para realizar un tiro a portería?

Ninguna dificultad Mucha dificultad

7. ¿Qué dificultad has percibido para realizar un regate?

Ninguna dificultad Mucha dificultad

8. ¿Qué dificultad has encontrado al realizar un giro o cambio de dirección?

Ninguna dificultad

Mucha dificultad

9. ¿Cómo te has encontrado a la hora de realizar saltos?

Nada cómodo

Muy cómodo

10. ¿Cómo te has sentido al realizar una entrada o tackle?

Nada cómodo

Muy cómodo

11. ¿Cómo te has sentido durante la carrera conduciendo balón?

Nada cómodo

Muy cómodo

12. ¿Cómo te has sentido durante la carrera sin balón?

Nada cómodo

Muy cómodo

13. ¿Cómo has percibido el bote del balón en la superficie de juego?

Muy malo

Muy bueno

14. En general, ¿Cómo te has sentido a lo largo de la sesión?

Nada cómodo

Muy cómodo

15. Le gustaría hacer alguna observación del campo de césped artificial (positiva o negativa) en el cual se ha desarrollado la sesión de hoy:

Gracias por su colaboración

ANEXO 7. PRINCIPALES TRABAJOS DE DIFUSIÓN

Título	Revista o Congreso	Factor de impacto	Situación
Effect of the structural components of support on the loss of mechanical properties of football fields of artificial turf	Journal of Sports Engineering and Technology	ISI-JCR (0.690)	Publicado
Influence of the mechanics properties of artificial turf systems of third generation on the physiological and physical performance and the football players' perceptions	PLos One	ISI-JCR (3.534)	Aceptado
Physical and physiological response of amateur football player in different third generation systems of artificial turf during a simulated football match	Journal of Sport Sciences	ISI-JCR (2.095)	En revisión
Influence of estructural components of artificial turf surface on technical performance in amateur soccer	EASM Conference 2013	-	Presentada
Satisfacción percibida sobre los campos de césped artificial en jugadores españoles amateurs	II Congreso Internacional de Psicología Aplicada al Fútbol	-	Presentada
Cómo afectan las diferentes estructuras de campos de fútbol de césped artificial al rendimiento de los jugadores	Instalaciones deportivas Hoy	-	Publicado

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology

<http://pip.sagepub.com/>

Effect of the structural components of support on the loss of mechanical properties of football fields of artificial turf

Javier Sánchez-Sánchez, José L Felipe, Pablo Burillo, Julio del Corral and Leonor Gallardo

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology 2014 228:

155 originally published online 24 March 2014

DOI: 10.1177/1754337114527276

The online version of this article can be found at:

<http://pip.sagepub.com/content/228/3/155>

Published by:



<http://www.sagepublications.com>

On behalf of:



[Institution of Mechanical Engineers](http://www.imechE.org)

Additional services and information for *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* can be found at:

Email Alerts: <http://pip.sagepub.com/cgi/alerts>

Subscriptions: <http://pip.sagepub.com/subscriptions>

Reprints: <http://www.sagepub.com/journalsReprints.nav>

Permissions: <http://www.sagepub.com/journalsPermissions.nav>

Citations: <http://pip.sagepub.com/content/228/3/155.refs.html>

>> [Version of Record](#) - Aug 18, 2014

[OnlineFirst Version of Record](#) - Mar 24, 2014

[What is This?](#)

Effect of the structural components of support on the loss of mechanical properties of football fields of artificial turf

Proc IMechE Part P:
J Sports Engineering and Technology
2014, Vol. 228(3) 155–164
© IMechE 2014
Reprints and permissions:
sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav
DOI: 10.1177/1754337114527276
pip.sagepub.com


Javier Sánchez-Sánchez¹, José L Felipe², Pablo Burillo³, Julio del Corral⁴
and Leonor Gallardo⁵

Abstract

Football fields of artificial turf are in constant evolution. The resulting improvements have given rise to a large diversity of structural components. There are various types of infill and fibre for artificial turf and different designs and materials for the support structure (sub-base and elastic layer). The design of the sub-base and the presence or absence of the elastic layer can influence turf performance and the surface's useful lifetime. The aim of this study was to assess in situ the effect of the various support structures on the mechanical properties of artificial turf after deterioration caused by wear for a year. The assessed properties were force reduction (%), standard vertical deformation (mm), rotational traction (N·m), vertical ball rebound (%), and ball roll (m), according to the requirements in norm EN 15330-1:2007. The results demonstrate the effect of the structural base on the mechanical and functional performance of football fields of artificial turf, as well as the significant deterioration of the properties over a year which varied between 3.14% and 8.92% with regard to the installed system. These results show that the support structure that provides the greatest durability and adequate behaviour of the mechanical properties over time is that which has a sub-base of compacted gravel under an elastic layer.

Keywords

Artificial turf, sub-base, elastic layer, durability, mechanical performance

Date received: 9 July 2013; accepted: 10 February 2014

Introduction

In recent years, the problems that traditionally beset football fields of artificial turf have been disappearing, especially those related to parameters of safety and sport performance.^{1,2} At the same time, the improvements in the third generation of this type of surface have rendered it practically the same as natural grass (total injury: 15.2% on football fields of artificial turf vs 13.9% on football fields of natural grass).³ Furthermore, an analysis per 10 team games indicated significantly lower total injury incidence rates ($p = 0.016$) on football fields of artificial turf (45.7%) versus natural grass (51.2%).⁴ The advantages of and improvements to football fields of artificial turf have increased their acceptance by the various agents in the world of football.⁵ This evolution has facilitated talk about a fourth generation of artificial turf, characterised by mixed layers of rubber and sand;⁶ however, there is currently no scientific evidence that allows us

to endorse this new generation, so the new fields that are constructed continue to be third generation.

The innovation and development of artificial turf have paved the way for a wide variety of structural components. The design of football fields can vary according to the type of material utilised in the different

¹Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, UCAM – Universidad Católica San Antonio de Murcia, Murcia, Spain

²School of Sport Sciences, Universidad Europea, Madrid, Spain

³Sport Sciences Institute, Universidad Camilo José Cela, Madrid, Spain

⁴Department of Finance and Economic Analysis, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, Spain

⁵IGOID Research Group, Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, Spain

Corresponding author:

Javier Sánchez-Sánchez, Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, UCAM-Universidad Católica San Antonio de Murcia, Campus de los Jerónimos s/n 30107 Guadalupe, Murcia, Spain.

Email: jssanchez@ucam.edu

playing surfaces, which is one of the key factors in the performance of the surface.⁷ A recent study considers the differences between the various systems of third-generation artificial surfaces to be greater than those between natural grass and artificial turf.⁸ Along these lines, the mechanical behaviour of the sport surface depends on the characteristics of the system of artificial turf, such as the type of infill, type of fibre, type of sub-base, or the installation of an elastic layer.⁹ It has been demonstrated that a simple modification in one of the superficial elements of the playing surface, such as the morphology of the rubber infill, results in differences in the performance of football fields of artificial turf.¹⁰

The support structure of the surfaces has often been ignored despite its importance. In this regard, the sub-base, made up of asphalt, macadam, or compacted gravel, should provide a stable platform with good drainage on which the surface of the artificial turf is placed.¹¹ The sub-base should support and transmit the loads that are produced on the surface during normal use and maintenance. Any problems in this area have a harmful effect on the surface, affecting the characteristics of the game and causing irregularities in the form of waves on the playing surface. This situation decreases the stability of the players and constitutes a greater risk of injury.¹²

The elastic layer, optionally installed over the sub-base, is supposed to maintain the properties of stiffness and shock absorption throughout the useful lifetime of the playing surface and prevent its deterioration as a consequence of the compaction of the infill.¹² A well-designed elastic layer helps to conserve a uniform performance on the entire surface of the artificial turf, overruling the effect of variations in the height of the infill caused by sporting practice.¹³

The contribution of the support structure to maintaining the mechanical performance of the surface has not been scientifically demonstrated. Currently, the short useful lifetime of the field is associated with intensive use and low maintenance.^{9,11} Use of more than 60 h per week offers surface durability of fewer than 5 years, compared with the suggested 9 years when the turf is utilised for approximately 40 h per week.¹⁴ Furthermore, insufficient maintenance also reduces the lifetime of the field.⁹ Expert consensus suggests 1 h of maintenance per 10 h of use, with the aim of providing adequate conservation of the properties of the surface over time.¹⁵

To ensure the quality and safety of football fields of artificial turf, the certification of products and fittings is a fundamental requirement.¹⁶ The purpose of such standardisation is to ensure that the pitch is suitable for playing on, safe for the players, and meets the minimum set standards. Football fields of artificial turf may be standardised according to various certifications. The European norm drawn up by the European Committee for Standardization (CEN) is EN 15330-1:2007.¹⁷ This standard specifies performance and durability characteristics for synthetic sports surfaces used

outdoors, including those for football. The standard is recommended for surfaces used for amateur, educational, and recreational sport. Quality certification proposals for the properties of most Spanish football fields of artificial turf, and probably those of other European countries, have not been pursued;^{5,9} thus, it remains unknown whether they comprise safe and functional surfaces for players.

The aim of this study was to assess the effect of the support structure on the performance and deterioration of the mechanical properties of football fields of artificial turf over a year through standardised protocols of in situ tests elaborated by the CEN. This study attempted to assess the suitability of the selected structures with regard to the international standards for quality enshrined in the EN 15330-1:2007 norm.

Materials and methods

A quantitative study was carried out with a longitudinal design based on the execution of a series of mechanical in situ tests and according to the standards of quality established by norm EN 15330-1:2007 for football fields. The tests were repeated 12 months after the initial assessment to test the deterioration of the mechanical properties in each of the selected systems of artificial turf.

Characteristics of the sample

The sample was composed of four football fields of artificial turf in the region of Castilla-La Mancha, in central Spain. The selected systems of artificial turf were third generation, and they represented the four primary combinations of the support structures of artificial surfaces (Figure 1) since after analysing all specifications (technical standards) of football fields of artificial turf in this region, we could demonstrate that these support structures were the only ones in existence. We selected the artificial turf structures depending on the four representative structures of the total population of artificial turf football fields since the characteristics of Structure 1 are very similar to 80% of the football fields of artificial turf in this region (the most common in Spain), and the other three structures represent the remaining 20%, together representing 100% of the range of variability of football fields in the region of Castilla-La Mancha (and they probably also represent a high percentage of systems of artificial turf in Spain).

The manipulated variables were the sub-base and the elastic layer. Some control criteria (type of infill and fibre, age of field, use, maintenance, and climate area) were established, in order to ensure that the variances found were a consequence of the various systems employed in the support base of the fields. All fields were constructed by the same manufacturer.

In addition to a different support structure, the selected systems of artificial turf should fulfil a series of

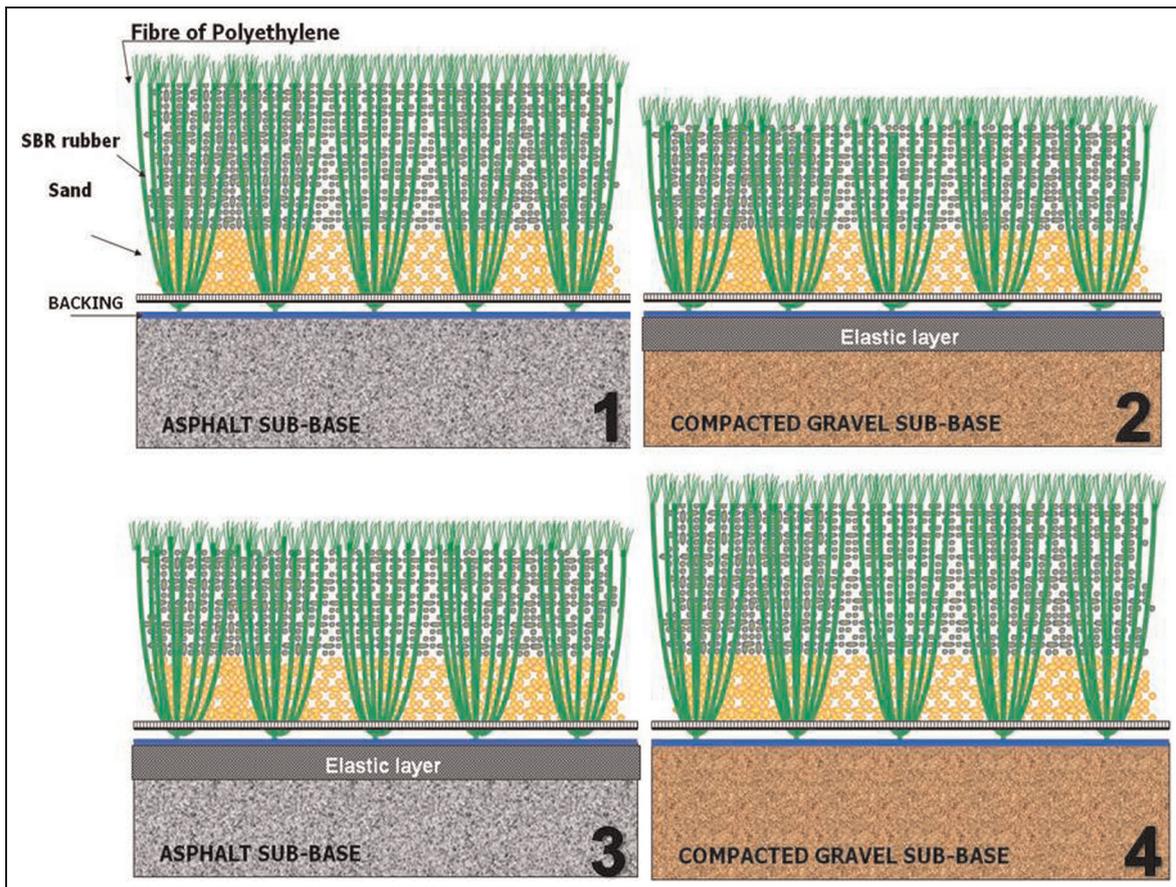


Figure 1. Characteristics of the system of artificial turf that were assessed.
SBR: styrene butadiene rubber.

Table 1. Characteristics of the systems of artificial turf.

Structure	Sub-base	Elastic layer	Infill			Fibre		
			Sand	Rubber	Thickness (mm)	Type	Height (mm)	Free pile (mm)
1	Asphalt	No	Silica	SBR	50	Monofilament	60	10
2	Compacted gravel	Yes (23 mm)	Silica	SBR	35	Monofilament	45	10
3	Asphalt	Yes (12 mm)	Silica	SBR	35	Monofilament	45	10
4	Compacted gravel	No	Silica	SBR	50	Monofilament	60	10

unified requirements on the basis of the categorical variables employed in previous studies.⁹ The playing fields in this study (Table 1) were 3 years old, had a weekly use of fewer than 35 h (30.75 ± 2.22 h), and suffered a complete lack of maintenance. Furthermore, the four football fields of artificial turf had the same type of infill material (styrene butadiene rubber (SBR)) and fibre (monofilament). According to the characteristics of the support structure, the systems of artificial turf with elastic layer have shorter fibres and less infill, regardless of the thickness of the elastic layer.

Procedure

The initial assessment of the mechanical properties of the selected systems of artificial turf was carried out

according to the quality standards presented in norm EN 15330-1:2007. The parameters related to force reduction (*FR*), standard vertical deformation (*StV*), rotational traction (*RT*), vertical ball rebound (*VBR*), and ball roll (*BR*) on the surface were tested in situ on the five positions required by the regulations (Figure 2). This procedure was repeated 12 months after the initial assessment to establish the degree of deterioration of the mechanical properties owed to wear for each of the structures.

All the tests were carried out under stable and dry meteorological conditions, with a temperature between 10 °C and 21 °C and a wind speed between 0.0 and 0.3 m/s. These conditions are within the ranges and protocol set out in norm EN 15330-1:2007. The mechanical tests were performed in the following manner.

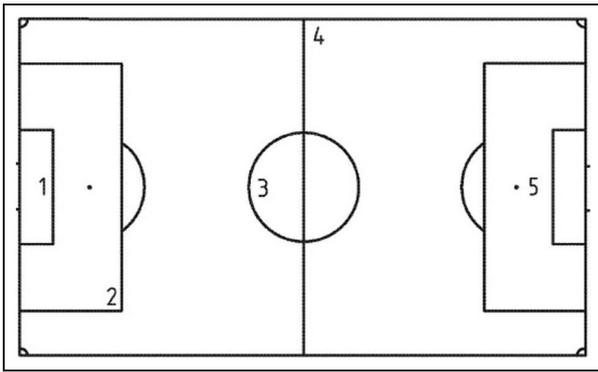


Figure 2. Positions of the field tests established by EN 15330-1:20072007.

Force reduction and standard vertical deformation. These variables were evaluated by following the protocols established in norms EN 14808:2005 and EN 14809:2005 with its erratum EN 14809:2005/AC, respectively. An Artificial Athlete device was utilised. Specifically, a mass of 20 kg was dropped from a height of 55 mm (± 0.25 mm), which utilised a spring with controlled stiffness.

In the case of force reduction (FR), when this mass hits the surface, the maximum applied force is recorded by the signal of a load cell (results in %). This value is transmitted through a data acquisition box (*data acquisition device case*) and transferred to a portable unit with the G-Force v.3.03 software (Deltec Metaal, Duiven, Holland), where the reduction of force was calculated with a resolution of 0.01%

$$\%FR = \left(1 - \frac{F_{max}}{F_{ref}}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

where $\%FR$ is the force reduction in %, F_{max} is the maximum force measured on the sport surface of artificial turf in Newtons, and F_{ref} is the reference force fixed to 6760 N corresponding to the theoretical value calculated for a concrete surface (with an absolute resolution of the apparatus of 0.02 kN).

The standard vertical deformation (StV) was captured by utilising movement sensors of the Artificial Athlete; two displacement sensors (standard part of the Artificial Athlete) with a measuring range of no less than 20 mm. The distance between the sensors and the centre of the test foot was greater than 125 mm and less than 200 mm. The sensors were mounted on a separate stand from the falling weigh.

The channel frequency class of the conditioning amplifier for the force signal was ≥ 500 Hz. It incorporated a low-pass filter having a second-order Butterworth characteristic with a -3 dB frequency of 120 Hz. Filtration was implemented in software. The signal conditioner for the deformation signal was a -1 dB measuring range of minimum 100 Hz (-1 dB upper frequency response). The individual signals of

the two deformation sensors were superposed before calculating the vertical deformation. Where digital recording means was employed, the word length was ≥ 12 bits, the amplitude of the signal was not less than 25% of the equipment full scale, and the sampling frequency was ≥ 0.5 kHz. The sensor had an absolute resolution of 0.01 mm and StV was calculated through the following equation (results in mm)

$$StV = \left(\frac{1500}{F_{max}}\right) \cdot D_{max} \quad (2)$$

where F_{max} is the value of the force peak in Newtons and D_{max} is the maximum deformation recorded by the movement sensors.

Vertical ball rebound and ball roll. The necessary procedures for the assessment of vertical rebound parameters were adopted from EN 12235:2004 and EN 12235:2004/AC. A ball was dropped onto the surface from a height of 2.00 m (± 0.01 m). The ball was held in place through an electromagnetic mechanism, ensuring it would fall without any type of impulse. B-Bounce v.2.01 software (Deltec Metaal) reproduced the height (H) (results in m) of the rebound through the time (t) that passed between two consecutive bounces, obtained by means of the following equation

$$H = 1.23 \times (t - \Delta t^2) \times 100 \quad (3)$$

where Δt^2 is equal to 0.025 s. Next, the height (H) of the rebound was turned into a percentage (VBR), taking the value that was obtained on a concrete surface as a reference ($H_c = 1.35 \pm 0.03$ m).

$$VBR = \frac{H}{H_c} \times 100 \quad (4)$$

The procedure for the ball roll test (BR) was obtained from norms EN 12234:2002 and EN 12234:2003 (erratum). A ball slid down a ramp with a predetermined inclination of 45° ($\pm 2^\circ$), from a height of 1 m (± 0.005 m), and it rolled along the surface until it stopped on its own. Next, the distance between the first point of contact between the ball and the surface and the central axis of the ball was measured with a calibrated tape measure.

RT. Norm EN 15301-1:2007 was used as a reference for this test. A mass of 46 kg with a base of football studs (15 plastic studs measuring 11 mm in length) on the bottom surface was dropped from a height of 60 mm (± 5 mm). Once it settled on the surface, a dynamometric key was turned 45° at a nominal rotation speed of 12 r/min. The value that was obtained in each test represented the torque needed to turn the mass that was attached to the surface in Newtons per metre.

Statistical analysis

SPSS 19.0 and Stata 12 programs were utilised for the data analysis. All variables were compared with the requirements in norm EN 15330-1:2007 (Table 2).

Student’s *t*-test for related samples ($p \leq 0.05$) was carried out, with the aim of assessing the behaviour of the mechanical properties after 1 year of wear. The percentage of variation ($\Delta\%$) between the initial assessment ($v1$) and the second assessment ($v2$) was calculated in order to standardise all the analysed parameters in the same unit of measurement and calculate the size of the effect

$$\Delta\% = \left| \frac{v1 - v2}{v1} \right| \times 100 \tag{5}$$

An analysis of variance (ANOVA) was carried out to determine the effect of the support structure of the fields on the mechanical performance of the playing surfaces ($p \leq 0.05$).

A linear regression analysis was performed using the mechanical properties as separate dependent variables and sub-base (0 = compacted gravel; 1 = asphalt), elastic layer (0 = no; 1 = yes), and evaluation year (0 = first year; 1 = second year) as independent variables.

Kernel density estimators approximate the density $f(x)$ from observations on variable x , resulting in a figure similar to a histogram which uses a line instead of bars to provide the information. In doing so, it applies

a kernel function (e.g. Epanechnikov) and a bandwidth which is a value that determines how many values are included in estimation of the density at each point.

Results

The descriptive statistics of the in situ tests demonstrated limitations of *BR* for all the analysed systems of artificial turf, when verifying the fulfilment of the requirements specified in EN 15330-1:2007 (Table 3). If *BR* is disregarded, two systems of artificial turf fulfilled all the requirements. Moreover, Structure 2 was barely above the standard for *FR* at 70.3%, so with 0.3% less of this parameter, we can say that three of the four systems of artificial turf fulfilled the requirements and only one demonstrated important limitations.

The wear on the fields that occurred during the year resulted in significant variations in certain mechanical properties, depending on the support structure of the playing surface (Table 4). The tendency observed after this period of wear was a reduction in *FR* and *StV* as well as an increase in *RT* (except Structure 1), *VBR*, and *BR*.

The percentage of variation of the analysed parameters was different for each of the systems of artificial turf. The structure composed of an asphalted sub-base and without an elastic layer presented the highest indices of deterioration for the tests of *StV* (20.23%) and *VBR* (9.33%). The highest percentage of variation for *FR* (6.06%) was found in the system consisting of a sub-base of compacted gravel without an elastic layer. For the *RT* test, the most significant deterioration (11.49%) was for an asphalted sub-base with an incorporated elastic layer. At the same time, the sub-base made up of a support layer of compacted gravel under an elastic layer demonstrated the lowest average total deterioration (3.14%) of all the assessed systems of artificial turf, although the degradation of *BR* (8.14%) was higher than for the rest of the systems of artificial turf.

Table 2. Requirements in the European norm EN 15330-1:2007 for outdoor football fields of artificial turf.

Field test	EN 15330-1:2007
Force reduction	55%–70%
Vertical deformation	4–10 mm
Rotational traction	25–50 N·m
Vertical ball rebound	45%–75%
Horizontal ball roll	4–10 m

Table 3. Results of the mechanical tests on the four assessed systems of artificial turf.

Structure	Sub-base	Elastic layer	Year	<i>FR</i> (%)	<i>StV</i> (mm)	<i>RT</i> (N·m)	<i>VBR</i> (%)	<i>BR</i> (m)					
1	Asphalt	No	1	64.77	±2.84	5.85	±0.46	41.64	±3.96	58.73	±6.79	10.04 ^a	±1.74
1	Asphalt	No	2	63.13	±2.06	4.67	±0.43	39.72	±1.17	64.21	±5.18	10.85 ^a	±1.83
2	Compacted gravel	Yes	1	70.30 ^a	±1.47	7.34	±0.43	39.40	±2.60	47.17	±4.91	10.94 ^a	±2.21
2	Compacted gravel	Yes	2	69.83	±2.51	7.12	±0.36	39.96	±2.94	48.36	±3.79	11.83 ^a	±2.37
3	Asphalt	Yes	1	61.03	±2.55	5.46	±0.41	40.40	±3.61	70.70	±2.20	12.37 ^a	±3.09
3	Asphalt	Yes	2	59.97	±2.36	4.55	±0.67	45.04	±1.84	71.32	±2.61	12.85 ^a	±2.24
4	Compacted gravel	No	1	48.83 ^a	±3.10	3.65 ^a	±0.38	46.36	±3.65	75.75 ^a	±2.18	11.00 ^a	±1.45
4	Compacted gravel	No	2	45.87 ^a	±2.83	3.57 ^a	±0.26	49.44	±4.77	76.03 ^a	±1.88	11.88 ^a	±1.78

^aSpecifications in norm EN 15330-1:2007 are not fulfilled.

Table 4. Percentage of variation of the mechanical properties.

Test	Structure 1	Structure 2	Structure 3	Structure 4	Average
<i>FR</i> (%)	2.38*	0.67	1.74	6.06*	2.71
<i>StV</i> (%)	20.23*	2.95*	16.61*	2.19	10.50
<i>RT</i> (%)	4.61*	1.42	11.49*	6.64*	6.04
<i>VBR</i> (%)	9.33*	2.52*	0.88	0.38	3.28
<i>BR</i> (%)	8.07*	8.14*	3.88	8.04*	7.03
Structure average (%)	8.92	3.14	6.92	4.66	5.91

* $\Delta\%$ is significant, $p < 0.05$.

Repeated-measures ANOVA also demonstrated differences between the structures for all the parameters that assessed the mechanical performance of the football fields of artificial turf. Structure 2 presented significantly higher values ($p \leq 0.05$) than the rest of the structures for the *FR* and *StV* tests. Consequently, the *VBR* on this system of artificial turf resulted in the lowest values. The parameter of *RT* revealed the existence of a homogeneous group ($p = 0.84$) despite its two very different support structures (asphalted sub-base without an elastic layer and sub-base of compacted gravel with an elastic layer). There were no significant differences ($p = 1.00$) for the values of *BR* between the surfaces with a sub-base of compacted gravel, as can be seen in Figure 3 which shows the kernel densities of the studied variables.

The results of linear regression analysis revealed a significant relationship between the structural components, evaluation year, and mechanical properties of football fields of artificial turf. Table 5 summarises the regression coefficients with regard to the omitted variables; it is evident that the elastic layer influences all mechanical parameters significantly except *VBR*. On the other hand, *BR* is directly influenced by surface characteristics such as resistance, friction, and orientation of the fibres (which are very exposed to wear over time), but the linear regression analysis also shows a small influence of support structure. Concerning *FR* and *StV*, sub-base, elastic layer, and evaluation year explain 35.6% and 43.6% of these parameters, respectively.

Discussion

There is growing variability in the design of football fields of artificial turf, with a wide range of types of fibres, infill materials, elastic layers, and profiles of sub-base construction, all designed to reduce costs, increase durability, and improve the mechanical performance of the surface¹¹ and the perception of the players.¹⁸ The absence of scientific evidence has generated uncertainty, however, with regard to the selection of the structural components.

This research study provides explanations with regard to the effect of the support structure of football fields of artificial turf. The in situ assessments

demonstrate the effect of the support structure on the mechanical properties and its deterioration caused by wear. The longitudinal analysis demonstrates a significant reduction in the *FR* for the structures that lack an elastic layer, probably because this component compensates for the loss of elasticity caused by the reduction in the fibre over time.¹⁹ This finding highlights the importance of the elastic layer in the conservation of the properties and, consequently, in the increase in the useful lifetime of the surface. This structural component also suffers continuous deterioration but the protection of the infill layers and the carpet minimises its wear.²⁰ The results of regression analysis suggest the significant role of the elastic layer in the mechanical parameters of the field. It is more influential than sub-base and evaluation year.

The installation of an elastic layer which attenuates the intensity of impacts over a sub-base of compacted gravel did not meet the established requirements of norm EN 15330-1:2007, as a consequence of excessive cushioning. The decrease in the *FR*, caused by the wear on the field during a year, solved this problem. Therefore, the degradation of the *FR* over time is not always derived from inadequate cushioning of football fields of artificial turf. Maintenance slows this degradation, but the decrease in the *FR* over time is irreversible. In this context, fields for recreational sports are rarely maintained, so degradation is more accelerated.

The system of artificial turf composed of a sub-base of compacted gravel without an elastic layer demonstrated an *FR* below the norm's established limits. The primary cause may be poor compaction of the sub-base that inhibits its cushioning effect.²¹

The values of *StV* followed a similar tendency to the *FR* in each of the assessed systems of artificial turf. Regarding the mechanical performance of the surface, this parameter (*StV*) again certifies the deficiencies of a sub-base of compacted gravel, with an inadequate design and without an elastic layer, as it does not fulfil the minimum demands. Nonetheless, the low percentages of deterioration of this structure confirmed the slowing down of the wear, that is, as the football fields of artificial turf decrease their mechanical performance, the annual indices of deterioration are smaller. However, longitudinal studies of longer duration are necessary to corroborate this.

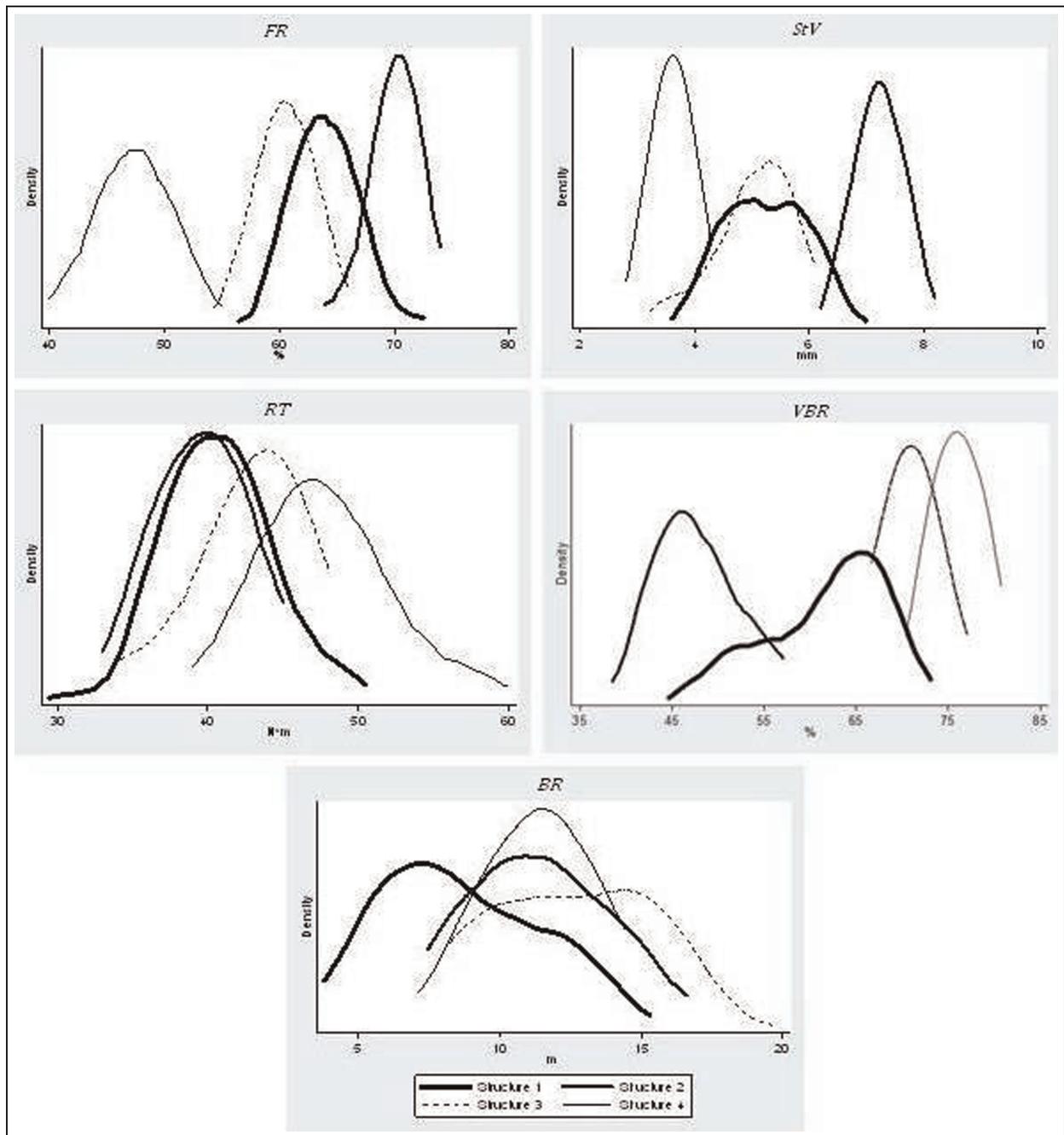


Figure 3. Kernel graphics of mechanical properties.

The rest of the structures presented optimal values of deformation based on the normative criteria. The comparison of these three systems of artificial turf demonstrated a greater capacity for cushioning by the sub-base of compacted gravel as well as the relevance of the thickness of the elastic layer in terms of performance. An elastic layer with little thickness does not seem to affect the percentage of force reduction of the surface. The deterioration of *StV* (as well as *FR*) was lower for the two surfaces that included an elastic layer over the sub-base, ensuring greater durability of the surfaces with this component.

The *VBR* demonstrated an inverse relationship with the rest of the mechanical properties related to the

vertical forces (*FR* and *StV*), such that the softer the field, the smaller the ball's rebound. The wear of the football fields of artificial turf caused an increase in the vertical rebound on all the structures, in agreement with previous studies.^{10,22} Again, this deterioration was greater in Structure 1. The other structure without an elastic layer presented levels of rebound that were higher than those required by the norms. For this reason, the structural components of support also comprise an influential factor in terms of functionality.

The sub-base and the elastic layer directly affect the mechanical properties related to vertical loads. These components indirectly affect the rest of the variables. Support structure can explain between 19% and 28%

Table 5. Regression coefficients for structural components and evaluation year.

	FR	StV	RT	VBR	BR
Asphalt	2.967	1.055**	-1.400	0.938	-2.981***
Elastic layer	7.333**	1.578***	-6.120***	-6.325	4.757***
Year	-2.483	-0.183	0.810	1.725	1.832***
Asphalt × year	0.367	-0.897***	-0.460	2.316	1.486***
Elastic layer × year	1.533	0.070	2.020*	-1.978	-1.890***
Constant	57.617***	4.856***	44.120***	63.885***	7.704***
R ²	0.356	0.436	0.195	0.210	0.277
No. of observations	240	240	200	200	800

* $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

of these mechanical properties (*RT*, *VBR*, and *BR*). In this regard, the structures with greater capacity for cushioning do not significantly differ in their values of *RT*. The percentages of deterioration for this variable were lower than for the rest of the structures. Therefore, an adequate *FR*, derived from the support structure, decreases the harm caused by the vertical forces on the fibres and the infill material, which according to recent studies are factors that directly affect the surface's resistance to turning.^{23–25} The smaller effect of the support structure on this parameter is demonstrated with the fulfilment of the requirements of norm EN 15330-1:2007 by the four systems of artificial turf. For this test, the problems of design in a structure composed of a sub-base of compacted gravel without an elastic layer are probably compensated by the correct state of the infill and the fibre of the playing surface, although these components were not the focus of this study.

The values of *BR* reflect an increase in the distance of ball slide with the wear of the surface. This resulted in the requirements not being met by the four analysed structures, corroborating the limited effect of the support structure's components on predominantly horizontal processes.¹⁵ Resistance to bending, friction, and orientation of the fibres are the factors that directly affect this parameter.²⁰ The lack of significant differences between the structures with a sub-base of compacted gravel (Structures 2 and 4) and the results of linear regression analysis suggest, however, that the sub-base has significant effects on the *BR*. The main cause of this homogeneity lies in the lack of inclined angles aimed at better horizontal drainage of rain or irrigation water for fields with an asphalted sub-base. This mainly affects to Structure 1 and 3 which have a waterproof artificial sub-base, so they need a horizontal drain system. This system involves implanting a slope between 0.6% and 0.85% ranging from the longitudinal axis to the side of the field, making the *BR* more heterogeneous on these systems of artificial turf. Structures 2 and 4 have a vertical drain system without any slope because the sub-base of compacted gravel is permeable.

This study was carried out in situ on installed football fields of artificial turf, which has allowed us to assess the performance and real deterioration of the

mechanical properties of the surface. A similar short-term study²⁶ carried out during the first year of installation of six fields of football fields of artificial turf demonstrated percentages of variation much higher than those obtained in this study. The differences may be owed to the age of the fields and demonstrate that surfaces without specific maintenance suffer much accelerated deterioration of their properties during the first year. This rhythm of degradation is not homogeneous with the passing of time, and it is minimised as the mechanical performance of the football fields of artificial turf decreases, as observed in long-term studies.²⁷

The control variables utilised (type of infill and fibre, age of field, hours of use, and maintenance) were adjusted to the available sample and they allowed us to unify criteria with the goal of assessing the effect of the support structure. The selection of football fields of artificial turf constructed by the same manufacturer reduces the latent uncertainty in field studies of this type, as it ensures the presence of the same superficial materials for the four systems of artificial turf.

Conclusion

The support structure's components of the football fields of artificial turf directly affect the mechanical properties that involve vertical loads. The different combinations of sub-base and elastic layer induce a collateral effect on the variables related to horizontal processes or those of rotation. Regarding structures, an asphalted sub-base provides an optimal mechanical behaviour, although it also sees an accelerated deterioration of its properties. The incorporation of an elastic layer reduces the effects of wear, increasing the surface's lifetime.

The sub-base of compacted gravel under a thick elastic layer offers high levels of cushioning that is regulated with the seasonal wear of the surface. This type of sub-base is more susceptible to compaction problems, such as those observed in Structure 4, resulting in a mechanical performance far from the requirements found in norm EN 15330-1:2007.⁹ The lack of an agreed standard has resulted in numerous installations with poor-quality gravel that is either hard to

grade to the desired tolerances or that allows little internal drainage after compaction. This can be solved by incorporating an elastic layer.²⁸

The ball roll is the element least affected by type of structure. It is much more influenced by the resistance to bending, friction, and orientation of the fibres and the wear of the surface on football fields of artificial turf without specific maintenance. The reason is how far away they are from the ranges set by the regulations, regardless of the support structure.

The best structure in terms of conservation of the mechanical properties (durability) is composed of a sub-base of well-compacted gravel with an elastic layer. The low degradation of the mechanical properties of this surface provides greater conservation of the performance of this system of artificial turf over time. However, more long-term studies are necessary to confirm this.

This study has importance for the selection and design of the support structure of football fields of artificial turf. The examined components and the evaluation year can explain between 19.5% and 43.6% of the mechanical behaviour of such football fields of artificial turf.

The short useful lifetime of artificial surfaces should compel new studies with the goal of conserving the mechanical performance of fields for longer. New maintenance techniques and combinations of structural components that are more resistant to wear will facilitate a qualitative improvement in the sporting surface.

Declaration of conflicting interests

The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

References

1. Dragoo JL and Braun HJ. The effect of playing surface on injury rate. A review of the current literature. *Sports Med* 2010; 40(11): 981–990.
2. Brito J, Krustup P and Rebelo A. The influence of the playing surface on the exercise intensity of small-sided recreational soccer games. *Hum Mov Sci* 2012; 31: 946–956.
3. Meyers M and Barnhill B. Incidence, causes, and severity of high school football injuries on FieldTurf vs. natural grass: a 5-year prospective study. *Am J Sport Med* 2004; 32(7): 1626–1638.
4. Meyers MC. Incidence, mechanisms, and severity of game-related college football injuries on FieldTurf versus natural grass: a 3-year prospective study. *Am J Sports Med* 2010; 38: 687–697.
5. Burillo P, Gallardo L, Felipe JL, et al. Artificial turf surfaces: perception of safety, sporting feature, satisfaction and preference of football users. *Eur J Sport Sci* 2014; 14: S437–S447.
6. Williams S, Hume PA and Kara S. A review of football injuries on third and fourth generation artificial turfs compared with natural turf. *Sports Med* 2011; 41(11): 903–923.
7. Fleming P. Artificial turf systems for sport surfaces: current knowledge and research needs. *Proc IMechE, Part P: J Sports Engineering and Technology* 2011; 225(2): 43–63.
8. Potthast W, Verhelst R, Hughes M, et al. Football-specific evaluation of player-surface interaction on different football turf system. *Sports Tech* 2010; 3(1): 5–12.
9. Burillo P, Gallardo L, Felipe JL, et al. Mechanical assessment of artificial turf football pitches: the consequences of no quality certification. *Sci Res Essays* 2012; 7(28): 2457–2465.
10. Alcántara E, Gámez J, Rosa D, et al. Analysis of the influence of rubber infill morphology on the mechanical performance of artificial turf surfaces for soccer. *Proc IMechE, Part P: J Sports Engineering and Technology* 2009; 223(1): 1–9.
11. James IT and Mcleod AJ. The effect of maintenance on the performance of sand-filled synthetic turf surfaces. *Sports Tech* 2010; 3(1): 43–51.
12. Delaney J. *Guidance notes on the construction, maintenance and performance of artificial turf pitches*. Dublin: Football Association of Ireland, 2009.
13. Allgeuer T, Torres E, Bensason S, et al. Study of shockpads as energy absorption layer in artificial turf surfaces. *Sports Tech* 2008; 1(1): 29–33.
14. Young C. Maintenance: Cost Benefits. In: *Proceedings of the SportSURF seminar on maintaining performance of synthetic surfaces*, Loughborough University, Loughborough, 4 March 2009. Available at: <http://sportsurf.lboro.ac.uk>
15. Fleming P. Maintenance best practice and recent research. *Proc IMechE, Part P: J Sports Engineering and Technology* 2011; 225(3): 159–170.
16. Bartlett MD, James IT, Ford M, et al. Testing natural turf sports surfaces: the value of performance quality standards. *Proc IMechE, Part P: J Sports Engineering and Technology* 2009; 223(1): 21–29.
17. Comité Européen de Normalisation (CEN). EN 15330-1:2007 Surfaces for sports areas—synthetic turf and needle-punched surfaces primarily designed for outdoor use - part 1. Specification for synthetic turf. Brussels: CEN, 2007.
18. Felipe JL, Gallardo L, Burillo P, et al. Artificial turf football fields: a qualitative vision for professional players and coaches. *S Afr J Res Sport Ph* 2013; 35(2): 105–120.
19. Párraga JA and Sánchez A. Estudio comparativo sobre los costes de mantenimiento y rentabilidad económica, social y deportiva entre campos de fútbol con pavimentos de césped natural artificial en el ámbito Universitario. *Mot Eur J Hum Mov* 2002; 8: 21–46.
20. McLaren N, Fleming P and Forrester S. Artificial grass: a conceptual model for degradation in performance. *Proced Eng* 2012; 34: 831–836.
21. Naunheim R, Parrott H and Standeven J. A comparison of artificial turf. *J Trauma* 2004; 57(6): 1311–1314.
22. Pérez-Soriano P, Llana-Belloch S, Cortell-Tormo JM, et al. Biomechanical factors to be taken into account to prevent injuries and improve sporting performance on artificial turf. *J Hum Sport Exerc* 2009; 4(2): 79–92.
23. Villwock MR, Meyer EG, Powell JW, et al. The effects of various infills, fibre structures, and shoe designs on

- generating rotational traction on an artificial surface. *Proc IMechE, Part P: J Sports Engineering and Technology* 2009; 223(1): 11–19.
24. Villwock MR, Meyer EG, Powell JW, et al. Football playing surface and shoe design affect rotational traction. *Am J Sport Med* 2009; 37(3): 518–525.
 25. Severn KA, Fleming PR and Dixon N. Science of synthetic turf surfaces: player–surface interactions. *Sports Tech* 2010; 3(1): 13–25.
 26. Joosten T. Players' experiences of artificial turf. In: *Proceedings of Stadia Turf Summit*, Amsterdam, 7 March 2003. International Association for Sports Surfaces Sciences (ISSS). Available at : <http://www.issss.de>
 27. Kieft GJ. Quality monitoring of 50 artificial turf football fields. In: *Proceedings of SportSURF seminar on maintaining performance of synthetic surfaces*, Loughborough University, Loughborough, 4 March 2009. SportSURF (Sport Surfaces Research Forum). Loughborough University. Available at: <http://sportsurf.lboro.ac.uk>
 28. McNitt AS. Synthetic turf in the USA – trends and issues. *Int Turfgrass Soc* 2005; 10: 27–33.

Appendix I

Notation

<i>BR</i>	ball roll
<i>Dmax</i>	maximum deformation
<i>Fmax</i>	maximum force
<i>FR</i>	force reduction
<i>H</i>	bounce height
<i>Hc</i>	bounce height on concrete
<i>RT</i>	rotational traction
<i>StV</i>	standard vertical deformation
<i>t</i>	time between bounces
<i>VBR</i>	vertical ball rebound