



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE FIRMES PERMEABLES

Trabajo realizado por:
Javier González Fernández

Dirigido:
Jorge Rodríguez Hernández

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Santander, septiembre de 2016

TRABAJO FINAL DE GRADO

Estudio de Alternativas para la Construcción de Firmes Permeables

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Civil, Mención en Construcciones Civiles, septiembre 2016

Autor: Javier González Fernández

Director: Jorge Rodríguez Hernández

Centro: ETSICCP de Santander (Universidad de Cantabria)

Palabras clave: sostenibilidad, pavimentos permeables, multicriterio, ELECTRE

INTRODUCCIÓN

Este trabajo fin de grado (TFG) ha sido redactado gracias a los conocimientos adquiridos en las asignaturas propias del grado cursado.

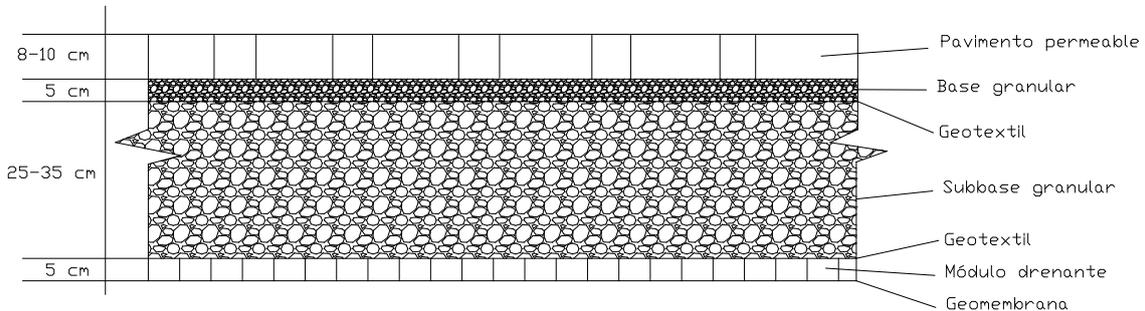
Este TFG cumple con la normativa de la escuela en materia de TFG, y queda encuadrado en la tipología de proyecto básico (estudio informativo). De esta manera no se estructura como un proyecto constructivo (memoria, planos, PPTP y presupuesto).

Los períodos de lluvia generan problemas como son las inundaciones. Esto es debido a la excesiva extensión de superficie impermeable que existe en los núcleos urbanos, que evitan que el agua se filtre al terreno natural o al menos llegue hasta la sub-base para su almacenamiento temporal y posterior uso o para la conexión a un sistema de drenaje, lo que para ciertas altas intensidades de aguacero provocan una escorrentía superficial tal que se alcanza el colapso de los sistemas de drenaje convencionales. En el caso particular de un aparcamiento horizontal (también en aceras horizontales) pueden generarse los conocidos como charcos, que provocan dificultad en el tránsito de los peatones por el mismo, con el consiguiente riesgo de caladura y posterior catarro. Los firmes permeables evitan estos problemas ya que el agua penetra a su través y además en algunos casos posibilitan un nuevo uso del agua captada.

Este TFG comienza con la definición de firme permeable en base a la establecida por (Rodríguez Hernández, 2008), seguidamente se explica la gestión del agua y se incluye una figura que clarifica la definición de firme en general. También se habla de algunas desventajas de los firmes permeables y de las medidas adoptadas para su mitigación (empleo de geotextiles como filtro).

Se citan y se caracterizan los principales materiales utilizados en la construcción de firmes permeables, que son hormigón poroso (hidráulico y asfáltico) y áridos. Además se incluyen los elementos prefabricados de plástico, se ha generado un catálogo de productos de las marcas Atlantis e HidroStank que son de aplicación tanto en capas superficiales como en capas de sub-base.

Para cerrar esta primera parte del trabajo se ha establecido una clasificación de las superficies artificiales según su pendiente y según su permeabilidad. Se recogen las clasificaciones de C Pratt, S Wilson y P Cooper (2002); Ferguson (2005); McCormarck (2006); Caltrans (2007) y Rodríguez Hernández (2008).



Como paso previo a la selección multicriterio se hace una propuesta de 4 alternativas que serán evaluadas y que son césped reforzado, asfalto poroso, hormigón poroso y adoquines con ranuras. Se justifica esta propuesta en base a que son las más utilizadas, son aptas para tráfico rodado y aparcamientos, su puesta en obra es sencilla y el método Electre presenta una buena práctica que limita a 4 las alternativas evaluadas manualmente.

METODOLOGÍA

Se definen los métodos multicriterio en un párrafo y a continuación se enumeran los principales métodos multicriterio empleados en la construcción. El procedimiento es citar las siglas del método, explicar su significado y mencionar sus principales aplicaciones. Acto seguido se procede a la elección de un método multicriterio en el que se basará la selección de alternativas y que resulta ser el método Electre, se razona dicha elección y se hace una breve reseña histórica del método Electre. Este método necesita unos criterios que dan lugar a las calificaciones de las alternativas y que se muestran en las correspondientes matrices de pesos y calificaciones. Estas matrices además de las citadas calificaciones también recogen los pesos de cada criterio según su importancia o preferencia.

Posteriormente se definen los criterios para la toma de decisión. En este apartado se trata de identificar las principales variables a tener en cuenta para la toma de decisión, de la forma más sostenible posible, para la cual se toman como referencia los tres pilares fundamentales del drenaje sostenible: economía, medio ambiente y sociedad.



Son 14 los aparcamientos en los que se proyecta la construcción de firmes permeables, y en cuyo proyecto se trata de buscar la alternativa óptima para su ejecución, 13 de ellos pertenecientes al campus universitario de Las Llamas, más uno más perteneciente al parque de Las Llamas. En base a la información recogida en (Agüero Lanza, 2015) y realizando aportaciones originales se elabora una lista de todos ellos configurada por una fotografía a la que acompaña una tabla en la que se muestran los valores del área, la pendiente, el número de plazas de aparcamiento en línea y el número de plazas de aparcamiento en batería. Estos datos permiten una zonificación en función de las variables para la toma de decisión en 3 zonas. La zona 1 o zona general que incluye todos los aparcamientos y en la que el criterio con el mayor peso es la seguridad. La zona 2 o zona de alta visibilidad donde el criterio con el mayor peso es la estética y la zona 3 o zona de pendiente $\neq 0$ en la que el criterio con el mayor peso son los costes.

Para cada zona se desarrolla el método Electre con el siguiente modus operandi:

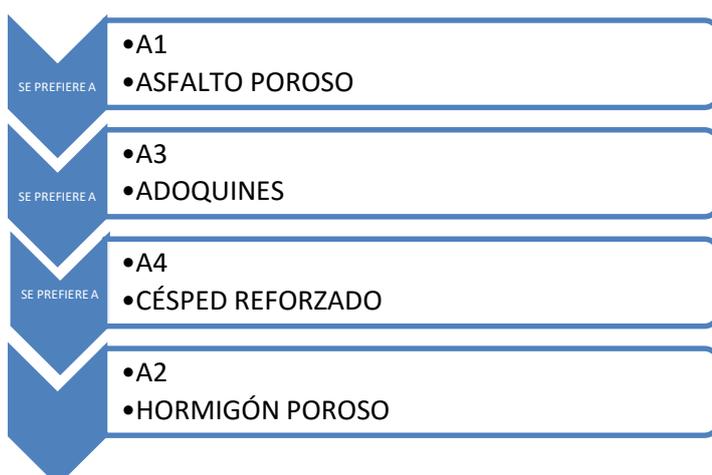
1. Definición de los criterios: son los criterios utilizados para discernir entre varias alternativas.
2. Asignación de pesos a cada criterio.
3. Valoración de cada alternativa, A_i , de acuerdo a cada criterio.
4. Cálculo:
 - Matriz de concordancia entre A_i
 - Matriz de discordancia entre A_i

El objetivo es encontrar la alternativa más adecuada en cada zona.

Se obtiene para cada zona la correspondiente matriz de pesos y calificaciones que recoge los pesos de cada criterio y las calificaciones de cada alternativa para cada criterio. En base a ellas se calculan las matrices de concordancia y de discordancia para cada zona siguiendo unas directrices algebraicas. También se calculan los parámetros p y q que servirán a la postre para realizar los análisis de dominancia probable y dominancia real que determinan la preponderancia de unas alternativas sobre otras.

RESULTADOS

En las 3 zonas se obtiene el mismo resultado que es que la alternativa 1 (asfalto poroso) se prefiere a la alternativa 3 (adoquines), y a su vez ésta se prefiere a la alternativa 4 (césped reforzado) y ésta se prefiere a la alternativa 2 (hormigón poroso).



RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Aunque está reflejado en todos los TFGs de cursos anteriores, se extraen de (Zorrilla Martínez, 2015), y se amplian con nuevos aportes originales, los criterios generales a tener en cuenta en el diseño de un firme permeable y que son los criterios hidrológicos e hidráulicos y los criterios estructurales.

Se detallan posibles secciones de firme permeable y se desglosan las distintas unidades de obra estructuradas en definición, materiales, ejecución de las obras y medición y abono. Estas prescripciones han sido tomadas de un proyecto constructivo de aparcamientos de firmes permeables en Asturias, habiendo sido eliminadas las correspondientes a plazas de aparcamiento para autobús y quedando las siguientes: m³ de relleno de regulación de la explanada, m² de geotextil separador entre celda drenante y explanada, m² de celda drenante, m² de geotextil separador entre celda drenante y subbase, m³ de zahorra drenante, m² de geotextil separador entre subbase y base, m de encintado de separación entre viales y aparcamientos, m de bordillo de separación entre aparcamientos y acera, m de bordillo de separación entre aceras y jardines, m³ de tierra vegetal abierta para aparcamiento de ligeros, m³ de arena gruesa, m² de celda de plástico de refuerzo para aparcamientos de vehículos ligeros, m² de adoquines permeables y m² de baldosa porosa.

CONCLUSIONES

No se ha obtenido ningún empate en ninguna de las 3 zonas. Tanto si el peso mayor se le asigna a la seguridad como a la estética, como a los costes resulta elegida la alternativa 1 (asfalto poroso). Se puede concluir que el asfalto poroso es la alternativa adecuada para los 14 aparcamientos considerados, y en consecuencia se procurará su instalación. Por lo tanto, podrían ejecutarse obras de sustitución del firme por uno de otro tipo en los aparcamientos del campus de Las Llamas, tal que coincida el tipo de pavimento con el resultante del proceso de selección multicriterio. Se observa que la variación de los pesos llevada a cabo en este TFG no altera el resultado final.

REFERENCIAS FUNDAMENTALES

Agüero Lanza, J. (06 de 2015). Estudio de alternativas para la construcción de aparcamientos de firmes permeables en la UC. *TFG en Ingeniería Civil*. Santander: UCrea.

Rodríguez Hernández, J. (2008). ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SECCIONES PERMEABLES DE FIRMES PARA VÍAS URBANAS CON UN COMPORTAMIENTO ADECUADO FRENTE A LA COLMATACIÓN Y CON LA CAPACIDAD PORTANTE NECESARIA PARA SOPORTAR TRÁFICOS LIGEROS. Santander.

Zorrilla Martínez, G. (2015). *ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE*. UCrea.

Study of Alternatives for the Construction of Permeable Pavements

End of Degree in Civil Engineering, majoring in Civil Construction, September 2016

Author: Javier González Fernández

Director: Jorge Rodríguez Hernández

Center: ETSICCP Santander (University of Cantabria)

Keywords: sustainability, permeable pavements, multicriteria, ELECTRE

INTRODUCTION

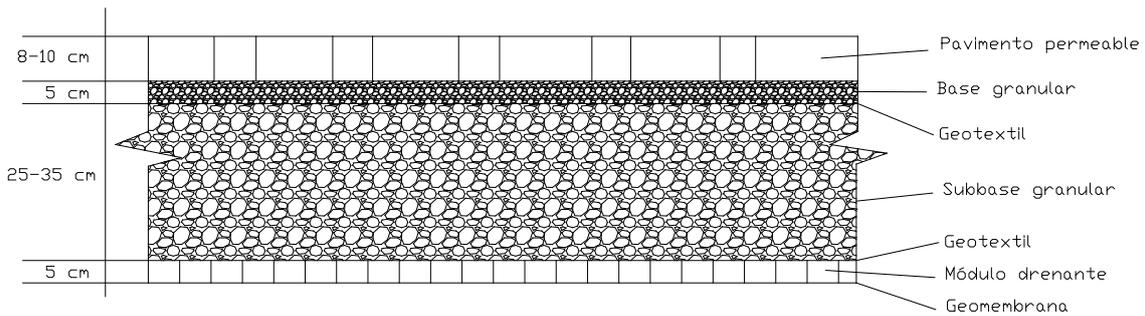
This work end of degree (TFG) has been drawn up by the knowledge gained in their own subjects completed degree. This TFG complies with school regarding TFG, and is framed in the typology of basic project (informative study). Thus it is not structured as a construction project (memory, plans, PPTP and budget).

Periods of rain create problems such as floods. This is due to overextending surface waterproof exists in urban areas, which prevent water from seeping into natural terrain or at least reaches the sub-base for temporary storage and subsequent use or for connection to a system drainage, which for certain high intensities of rain runoff cause a collapse such that conventional drainage systems is reached. In the particular case of a horizontal parking (also in horizontal pavements) may be generated as known puddles, causing difficulty in pedestrian traffic by it, with the risk of subsequent dipping and cold. Permeable firm avoid these problems because water penetrates therethrough and in some cases also allow a new use of water collected.

This TFG begins with the definition of permeable based firm established by (Rodríguez Hernández, 2008), then water management is explained and a figure that clarifies the definition of firm in general is included. There is also talk of some disadvantages of permeable firm and measures taken to mitigate (use of geotextiles as filter).

They are cited and the main materials used in the construction of permeable firm, which are porous concrete (hydraulic and asphalt) and aggregates are characterized. Furthermore, prefabricated elements include plastic, it has generated a product catalog of Atlantis and Hidrostant brands that are applicable both surface layers and layers of sub-base.

To close this first part of the work has been established classification by artificial surfaces slope and according to their permeability. Pratt classifications C, S and P Wilson Cooper (2002) are collected; Ferguson (2005); McCormack (2006); Caltrans (2007) and Rodriguez Hernandez (2008).



Prior to the multi-step selection proposal 4 alternatives that will be evaluated and are reinforced lawn, porous asphalt, porous concrete and cobblestones with grooves made. This proposal is justified on the basis that are the most used, are suitable for traffic and parking, on-site installation is simple and the Electre method presents a good practice limited to 4 alternatives evaluated manually.

METHODOLOGY

Multicriteria methods are defined in a paragraph and then the main multicriteria methods used in the construction are listed. The procedure is to quote the acronym of the method, explain its meaning and mention their main applications. Then proceed to the election of a multi-criteria method in which the selection of alternatives is based and which happens to be the Electre method, that choice is reasoned and a brief history of Electre method is done. This method requires criteria that lead to the qualifications of the alternatives and shown in the corresponding weights and grades matrices. These matrices addition to the aforementioned ratings also reflected the weights of each criterion according to importance or preference.

Subsequently the criteria for decision making are defined. This section seeks to identify the main variables to consider for decision making in the most sustainable way possible, for which are taken as reference the three pillars of sustainable drainage: economy, environment and society.



There are 14 parking lots where construction of permeable firm projected, and whose project is about finding the best alternative for execution, 13 of them belonging to the campus of Las Llamas, plus one more belonging to Las Llamas park. Based on the information gathered in (Agüero Lanza, 2015) and making original contributions a list of all configured by a photograph that accompanies a table in which the values of the area shown, the slope, the number is made online parking spaces and the number of

parking spaces on drums. These data allow zoning depending on the variables for decision making in 3 areas. Zone 1 or general area that includes all car parks and in which the criterion with the highest weight is safety. Zone 2 or zone of high visibility where the criterion with the highest weight is the aesthetic and zone 3 or zone slope $\neq 0$ in which the criterion with the highest weight is cost.

For each zone the Electre method is developed with the following modus operandi:

1. Definition of criteria: the criteria used to distinguish between several alternatives.
2. Assigning weights to each criterion.
3. Assessment of each alternative, A_i , according to each criterion.
4. Calculation:

-Matriz Match between A_i

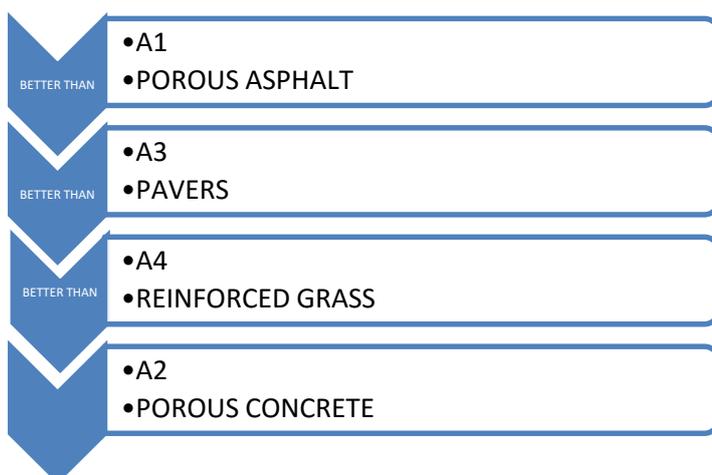
-Matriz Discordance between A_i

The goal is to find the most appropriate alternative in each area.

It is obtained for each zone corresponding weight matrix and qualifications that collects the weights of each criterion and qualifications of each alternative for each criterion. Based on these matrices concordance and discordance for each zone they are calculated following some algebraic guidelines. the parameters p and q are also calculated to serve the dessert for the analysis of real and likely dominance that determine the prevalence of some alternatives on others.

RESULTS

In the 3 zones the same result is that alternative 1 (porous asphalt) is preferred to Alternative 3 (cobblestones), and in turn it is preferred to Alternative 4 (reinforced turf) and this is preferred to the alternative is obtained 2 (porous concrete).



CONSTRUCTIVE RECOMMENDATIONS

Although it is reflected in all GFRs of previous courses, they are extracted from Zorrilla Martínez (2015), and expanded with new original contributions, the general criteria to be taken into account in the design of a permeable firm and are hydrological criteria and hydraulic and structural criteria.

Possible firm permeable sections are detailed and different work units structured definition, materials, execution of works and measurement and payment breakdown. These requirements have been taken from a construction project of parking firm permeable in Asturias, having been eliminated corresponding to parking spaces for bus and leaving the following: m3 of fill regulating the esplanade, m2 separator geotextile between Draining cell and esplanade m2 of drainage cell, m2 separator geotextile between draining cell and subbase, m3 of drainage gravel, m2 separator geotextile between subbase and base, m tapping of separation between roads and parking, m curb separation between parking lots and sidewalk , m curb separating sidewalks and gardens, open for parking m3 light soil, coarse sand m3, m2 plastic cell booster for parking light vehicles, m2 m2 permeable pavers and porous tile.

CONCLUSIONS

It has not obtained any tie in any of the 3 zones. Whether the greater weight is given to safety and aesthetics, as to costs is chosen alternative 1 (porous asphalt). It can be concluded that porous asphalt is the appropriate alternative for the 14 parking spaces considered, and therefore its installation will be sought. Therefore, replacing the firm works by one other in the campus parking Flames could be implemented such that matches the type of pavement with the resulting multi-criteria selection process. It is noted that the variation of the weights carried out in this GFR does not alter the final result.

MAIN REFERENCES

Agüero Lanza, J. (06 de 2015). Estudio de alternativas para la construcción de aparcamientos de firmes permeables en la UC. *TFG en Ingeniería Civil*. Santander: UCrea.

Rodríguez Hernández, J. (2008). ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SECCIONES PERMEABLES DE FIRMES PARA VÍAS URBANAS CON UN COMPORTAMIENTO ADECUADO FRENTE A LA COLMATACIÓN Y CON LA CAPACIDAD PORTANTE NECESARIA PARA SOPORTAR TRÁFICOS LIGEROS. Santander.

Zorrilla Martínez, G. (2015). *ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE*. UCrea.

Tabla de contenido

Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
Antecedentes	7
Objetivos	8
Catálogo de firmes permeables	9
Definición de firme permeable	9
Materiales de construcción para firmes permeables	11
Clasificación de firmes permeables.....	17
Firmes permeables según el tipo de superficie permeable	17
Según el uso del agua infiltrada	19
Propuesta de alternativas	20
Selección Multicriterio	23
Principales métodos multicriterio y aplicaciones en construcción.....	23
Elección del método multicriterio.....	24
Definición de criterios para la toma de decisión.....	25
Descripción del caso práctico.....	28
Nº 1: Aparcamiento de profesores de la ETSICCP.....	30
Nº 2: Aparcamiento de alumnos de la ETSICCP	31
Nº 3: Aparc. situado entre ETSICCP y la ETS de Industriales.....	31
Nº 4: Aparc. de profesores de la ETS de Industriales.....	32
Nº 5: Aparc. de profesores de la Facultad de Ciencias	36
Nº 6: Aparc. al sur de la Facultad de Ciencias y del pabellón polideportivo.....	36
Nº 7: Aparc. situado entre la Facultad de Ciencias y el IFCA	39
Nº 8: Aparc. al norte del pabellón polideportivo y del IFCA.	39
Nº 9: Aparc. del Edificio Interfacultativo.....	42
Nº 10: Aparc. de profesores del Edificio Interfacultativo	43
Nº 11: Aparc. situado entre el Edificio Interfacultativo y el Pabellón de Gobierno.....	43
Nº 13: Aparc. entre edificio anexo al Interfacultativo y la Facultad de Derecho y Ciencias económicas y Empresariales	47
Nº 14: Aparc. del Parque de Las Llamas situado detrás de la Escuela TS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación	49

Aplicación al caso práctico de la selección multicriterio.....	52
Zonificación	52
Asignación de pesos a los criterios en función de la zona	53
Zona 1.....	53
Zona 2.....	54
Zona 3.....	55
Valoración de alternativas	56
Zona 1.....	56
Zona 2.....	57
Zona 3.....	58
Cálculo de matrices de concordancia y discordancia.....	59
Zona 1.....	59
Zona 2.....	61
Zona 3.....	62
Análisis de dominancias y toma de decisiones	63
Zona 1.....	63
Zona 2.....	65
Zona 3.....	67
Recomendaciones constructivas.....	¡Error! Marcador no definido.
Prescripciones técnicas	70
1. M ³ de relleno de regulación de la explanada.....	70
2. M ² de geotextil separador entre explanada y celda drenante	72
3. M ² de celda drenante.....	73
4. M ² de geotextil separador entre celda drenante y subbase.....	74
5. M ³ de zahorra drenante como subbase.....	75
6. M ² de geotextil separador entre subbase y base.....	77
7. M de encintado de separación entre viales y aparcamientos	78
8. M de bordillo de separación entre aparcamientos y acera	79
9. M de bordillo de separación entre aceras y jardines.....	80
10. M ³ de tierra vegetal abierta para aparcamiento de ligeros.....	81
11. M ³ de arena gruesa como base.....	82
12. M ² de celda de plástico para césped reforzado	83
13. M ² de adoquines permeables	84

14. M ² de baldosa porosa.....	85
Estimación económica	86
Cuadro de precios Nº 1	87
Mediciones	88
Presupuesto	90
Resumen del Presupuesto.....	91
Conclusiones	92
Referencias.....	93

Índice de Figuras

Ilustración 1. Sección de firme permeable según Rodríguez Hernández (2008)	9
Ilustración 1. Sección de firme permeable según Perales García (2014).....	10
Ilustración 2Producto Atlantis Turf Cell con césped. Panorámica	13
Ilustración 3Producto Atlantis Turf Cell sin césped. Panorámica	13
Ilustración 4Producto Atlantis Turf Cell. Detalle.....	13
Ilustración 5Producto Atlantis Gravel Cell	13
Ilustración 6Producto Atlantis Road Cell. Celdas de plástico.....	14
Ilustración 7Producto Atlantis Road Cell. Estructura de Firme.....	14
Ilustración 8Producto Atlantis Road Cell. Aplicación Práctica	14
Ilustración 9Producto Atlantis Flo-Tank.....	15
Ilustración 10Producto Atlantis Flo-Tank.....	15
Ilustración 11Producto Atlantis Flo-Channel	15
Ilustración 12Producto Hidro tank Hidrobox. Caja de plástico	16
Ilustración 13Situación aparcamientos del 1 al 4	28
Ilustración 14Situación aparcamientos del 6 al 8	29
Ilustración 15Distribución aparcamientos del 9 al 13.....	29
Ilustración 16Aparcamiento 1. Entrada	30
Ilustración 17Aparcamiento 1. Zona principal	30
Ilustración 18Aparcamiento 2. Vista desde Oeste	31
Ilustración 19Aparcamiento 2. Vista desde Este.....	31
Ilustración 20Aparcamiento 3. Zona entrada	32
Ilustración 21Aparcamiento 3. Zona principal	32
Ilustración 22Aparcamiento 3. Zona salida	33
Ilustración 23Aparcamiento 4. Zona entrada desde Campus	33
Ilustración 24Aparcamiento 4. Zona entre ETSI y CDTU	34
Ilustración 25Aparcamiento 4. Zona sur ETSI	34
Ilustración 26Zona entrada parque Las Llamas.....	35
Ilustración 27Aparcamiento 5. Vista general	36
Ilustración 28Aparcamiento 4. Vista pavimento.....	36
Ilustración 29Zona sur Ciencias con aparcamientos en línea	37
Ilustración 30Aparcamiento 6. Zona sur Ciencias con aparcamientos en batería.....	37
Ilustración 31Aparcamiento 6. Zona al sur del pabellón polideportivo.....	38
Ilustración 32Aparcamiento 7. Vista general	39
Ilustración 33Sensores de presencia de coche aparcado	39
Ilustración 34Aparcamiento 8. Vista general desde zona este	40
Ilustración 35Aparcamiento 8. Zona oeste, al norte del pabellón polideportivo	40
Ilustración 36Aparcamiento 8. Zona oeste anexa al Edificio Interfacultativo	41
Ilustración 37Aparcamiento 9.....	42
Ilustración 38Aparcamiento 10. Vista zona principal.....	43
Ilustración 39Aparcamiento 10. Vista de la entrada a la zona principal.....	43
Ilustración 40Aparcamiento 11. Zona superior.....	44
Ilustración 41Aparcamiento 11.Zona intermedia	44
Ilustración 42Aparcamiento 11.Zona inferior	45

Ilustración 43Aparcamiento 12	46
Ilustración 44Aparcamiento 13. Vista desde zona superior	47
Ilustración 45Aparcamiento 13. Vista desde zona superior	47
Ilustración 46Aparcamiento 13. Vista desde zona inferior	48
Ilustración 47. Vista superior del aparcamiento del Parque de Las Llamas situado detrás de Industriales (http://www.giteco.unican.es/SUDSlab/investigacion.shtml).....	49
Ilustración 48Operario coloca celdas de plástico en plaza de aparcamiento	50
Ilustración 49Maquinaria utilizada: apisonadora y rotaflex	51
Ilustración 50Pareja de operarios corta celdas de plástico	51

Índice de Tablas

Tabla 1Clasificación de SA	17
Tabla 2Requerimientos, criterios e indicadores	27
Tabla 3Pesos Zona1.....	53
Tabla 4Pesos Zona 2.....	54
Tabla 5Pesos Zona 3.....	55
Tabla 6 Pesos y Calificaciones Zona 1.....	56
Tabla 7Pesos y Calificaciones Zona 2	57
Tabla 8Pesos y Calificaciones Zona 3	58
Tabla 9Matriz de concordancia Zona 1	59
Tabla 10Matriz de discordancia Zona 1	60
Tabla 11Matriz de concordancia Zona 2	61
Tabla 12Matriz de discordancia Zona 2	61
Tabla 13Matriz de concordancia Zona 3	62
Tabla 14Matriz de discordancia Zona 3	62
Tabla 15Tabla de dominancia hacia (domina a) Zona 1.....	63
Tabla 16Tabla de dominancia desde (dominada por) Zona 1.....	64
Tabla 17Tabla de dominancia hacia (domina a) Zona 2.....	65
Tabla 18Tabla de dominancia desde (dominada por) Zona 2.....	66
Tabla 19Tabla de dominancia hacia (domina a) Zona 3.....	67
Tabla 20. Tabla de dominancia desde (dominada por) Zona 3	68
Tabla 21Uso granulométrico de la zorra drenante marcado por los límites inferiores de la ZD1("Ingeniería de Carreteras, Volumen II", C. Kraemer et al., 2004) y la ZAD20 (artículo 510 del PG-3 vigente).....	75

Antecedentes

El presente trabajo fin de grado corresponde al grado en Ingeniería Civil, Mención de Construcciones Civiles. La definición del TFG que se recoge en la normativa es la siguiente:

"El TFG consistirá en la realización por parte del estudiante de un trabajo original, autónomo y personal, bajo la dirección de un profesor, en el que se apliquen y desarrollen los conocimientos, capacidades y competencias adquiridas a lo largo de la titulación."

Así mismo en la normativa se recoge las distintas tipologías de TFG:

"El TFG atenderá a una de las siguientes tipologías: proyecto constructivo clásico, proyecto básico y estudio o trabajo sobre cualquier aspecto de la ingeniería civil."

Este TFG se titula "Estudio de Alternativas para la Construcción de Firmes Permeables". Por lo tanto, como su propio nombre indica el presente TFG se enmarca dentro del grupo de proyectos básicos, a los que la normativa se refiere del siguiente modo:

"Se considerarán proyectos básicos, por ejemplo, los estudios de alternativas de trazado, estudios de viabilidad económica de obras, estudios informativos, etc... Su carácter de básico hace innecesario profundizar como en un proyecto constructivo clásico, pero exigen un esfuerzo mayor en los aspectos específicos de dicho proyecto básico, como estudios de alternativas o estudios económicos."

Dentro de la sub-clasificación que se da a los proyectos básicos, éste en concreto se trataría de un estudio informativo.

Debido al carácter del TFG, para su desarrollo han sido necesarios los conocimientos propios del grado en Ingeniería Civil adquiridos en diversas asignaturas que son: cálculo; mecánica; dibujo técnico I; materiales de construcción; álgebra y geometría; estadística y métodos numéricos; termodinámica y campos; dibujo técnico II; topografía y geodesia; informática y programación; empresa; geología aplicada; resistencia de materiales; ampliación de matemáticas; habilidades, valores y competencias transversales; comportamiento mecánico de materiales; geotecnia; hidráulica e hidrología; construcción de obras públicas; inglés técnico; cálculo de estructuras; sistemas energéticos; impacto ambiental; edificación; maquinaria, equipos y plantas; tecnología de estructuras; obras hidráulicas; proyectos; caminos; organización y control de obras; instrumentos de gestión empresarial; ampliación de geotecnia; geotechnical works; ferrocarriles e infraestructuras viarias; gestión ambiental; tecnología energética y eléctrica; obras marítimas y sistemas de abastecimiento y saneamiento.

Objetivos

Partiendo de la definición de firmes permeables, el objetivo fundamental de este TFG es generar un catálogo de alternativas y una metodología de selección multicriterio. Se analizarán los distintos materiales de construcción empleados en las capas permeables y se finalizará con un caso práctico de aplicación real en el Campus de las Llamas de la Universidad de Cantabria.

Para alcanzar este objetivo general, será necesario lograr los siguientes objetivos parciales:

- Proponer un catálogo de firmes permeables tras analizar el estado actual de desarrollo de los distintos materiales de construcción aplicables.
- Proponer un método de selección multicriterio tras analizar los principales métodos aplicados en el ámbito de la construcción.
- Descripción y diagnóstico de los aparcamientos en superficie del campus de las Llamas de la Universidad de Cantabria.
- Propuesta de alternativas y selección de la óptima tras su valoración según método multicriterio propuesto.
- Inclusión de un microproyecto constructivo donde se esbozan memoria, planos, PPTP y presupuesto de la actuación propuesta para el Campus de la Llamas de la Universidad de Cantabria.

Catálogo de firmes permeables

Definición de firme permeable

Es una estructura multicapa que permite el paso del agua procedente de la escorrentía superficial a su través para su almacenamiento temporal y posterior infiltración en el terreno natural o hacia los laterales mediante un sistema de drenes (Rodríguez Hernández, 2008).

Las distintas maneras de gestión del agua son drenaje subsuperficial o diferido, almacenamiento en sub-base e infiltración.

Para conseguir el almacenamiento en la sub-base el agua penetra la capa de rodadura, la intermedia y la base. La estructura de un firme permeable puede observarse en detalle en la Ilustración 1 y en la Ilustración 2.

La infiltración consiste en la penetración de todas las capas del firme hasta llegar a la explanada y seguir su curso hasta una posible recarga de acuíferos o su dispersión en el terreno natural.

Para que un firme sea considerado permeable, han de serlo todas las capas que lo forman, y además deben presentar una permeabilidad creciente con la profundidad para evitar el riesgo de colapso funcional.

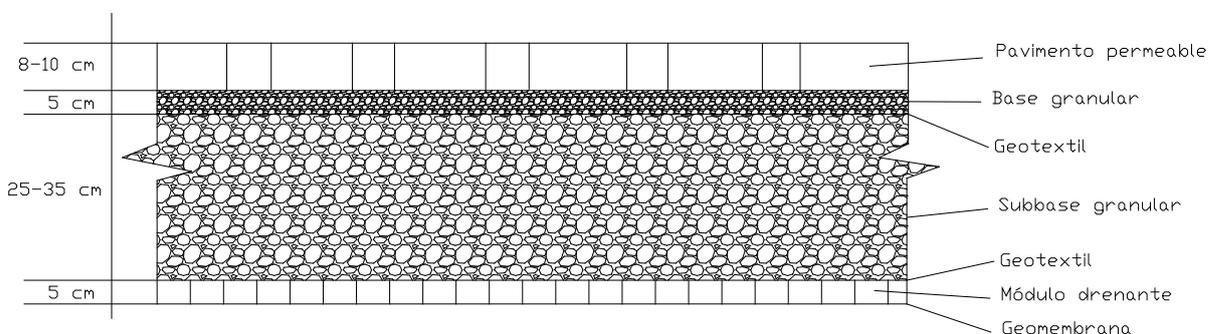


Ilustración 1. Sección de firme permeable según Rodríguez Hernández (2008)

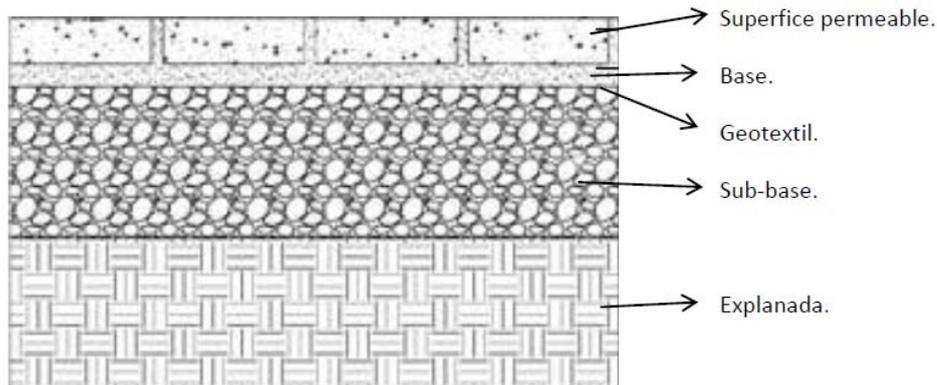


Ilustración 2. Sección de firme permeable según Perales García (2014)

La escorrentía superficial puede ser causada por el agua de lluvia o por vertidos puntuales. He aquí un inconveniente de los firmes permeables y es que no hacen distinción alguna entre el agua y otros tipos de líquido en la captación, por lo que no se garantiza calidad del agua almacenada. De esta manera quedan restringidos usos del agua como el consumo humano o el regadío. Podemos decir que los firmes permeables pueden proporcionar un agua de mayor calidad que la escorrentía superficial pero aún contaminada. Para reducir los niveles de contaminación al máximo se introduce el uso de los geotextiles, con el fin de retener partículas y sólidos en suspensión, con sus contaminantes asociados, y servir de base a la biopelícula de microorganismos biodegradantes de las sustancias contaminantes como materia orgánica e hidrocarburos.

Materiales de construcción para firmes permeables

En este apartado se van a citar y explicar los distintos tipos de materiales de construcción de aplicación en la formación de firmes permeables. Inicialmente en una primera aproximación se han dividido en 3 categorías para posteriormente reducirlas a 2 al considerar el asfalto poroso un hormigón.

A continuación, se presenta la clasificación inicial. El hormigón poroso es el primero de los materiales.

El hormigón poroso puede ser de tres tipos:

- Hidráulico: fabricado con cemento hidráulico como conglomerante de los áridos. El hormigón poroso hidráulico ofrece resistencias medias a compresión entre 15 y 20 MPa y permeabilidades entre 0,5 y 5 cm/s
- Asfáltico: fabricado con ligante bituminoso como conglomerante de los áridos. También conocido como mezcla bituminosa o asfalto.
- Sintético: fabricado con ligante sintético a base de resinas encargado de ligar el esqueleto mineral adecuadamente.

El porcentaje de huecos mínimo para que un hormigón sea poroso es el 15% y existe una cota superior del 25% para evitar problemas de estabilidad. Aunque ambos tienen un peso específico entre 1700 y 2000 kg/m³, el hormigón poroso, a diferencia del hormigón ligero con arcilla expandida, es el único con huecos accesibles interconectados que permiten el paso del agua.

El segundo material es el asfalto poroso.

Asfalto poroso: un porcentaje de huecos muy alto resta cohesión a la mezcla y la hace más susceptible al envejecimiento, este límite superior puede llegar en algunos casos hasta valores del orden del 25% o incluso algo superiores. Las mezclas porosas presentan más de un 20% de huecos en mezcla, funcionan por rozamiento interno, pero también es muy importante la cohesión proporcionada por el mástic. Debido a su porosidad permiten evacuar el agua a través de la propia mezcla. Se fabrican en caliente y se emplean como capa de rodadura de firmes de calidad sobre todo en zonas lluviosas, con espesores comprendidos entre los 4 y los 6 cm. Para conseguir altas porosidades manteniendo una buena cohesión suele ser conveniente el empleo de ligantes modificados. Las mezclas porosas (PA, Porous Asphalt) tienen una vida media de 10 años.

El tercer material son los áridos.

Rellenos y zavorras drenantes: se define como zavorra el material granular, de granulometría continua, utilizado como capa de firme. Se denomina zavorra artificial al constituido por partículas total o parcialmente trituradas, en la proporción mínima que se especifique en cada caso. Por el contrario, zavorra natural es el material formado básicamente por partículas no

trituras. La zorra artificial drenante (ZAD 20) tiene un tamaño máximo de árido de 20mm. La reducción de árido fino eleva la permeabilidad de la capa hasta coeficientes superiores a 10-3 cm/s, sin riesgo de merma de la capacidad soporte, razón por la cual menos del 10% de árido es de tamaño inferior a 1mm. (Miguel Ángel Calzada Pérez, 2013)

En resumen, podríamos reducir los materiales de construcción permeables a dos categorías básicas que son áridos y hormigón.

Áridos: a su vez se dividen en vegetados(césped) y no vegetados (gravas, áridos rodados o decorativos).

Hormigón: puede ser hidráulico, asfáltico o sintético. El hormigón puede ser permeable de por sí(hormigón poroso) pero aunque sea un hormigón impermeable también admite una disposición permeable(ranuras, agujeros) con lo que en ambos casos se consigue una superficie permeable.

En los últimos años han aparecido también numerosos elementos prefabricados de plástico.

A continuación se muestran los principales productos extraídos de los catálogos virtuales de las marcas Atlantis e Hidrostant.

Atlantis Turf Cell



Ilustración 5 Producto Atlantis Turf Cell. *Detalle*



Ilustración 4 Producto Atlantis Turf Cell sin césped. *Panorámica*



Ilustración 3 Producto Atlantis Turf Cell con césped. *Panorámica*

Atlantis Gravel Cell



Ilustración 6 Producto Atlantis Gravel Cell

Atlantis Road Cell



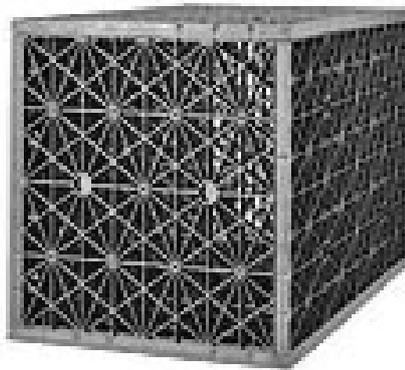
Ilustración 7 Producto Atlantis Road Cell. Celdas de plástico



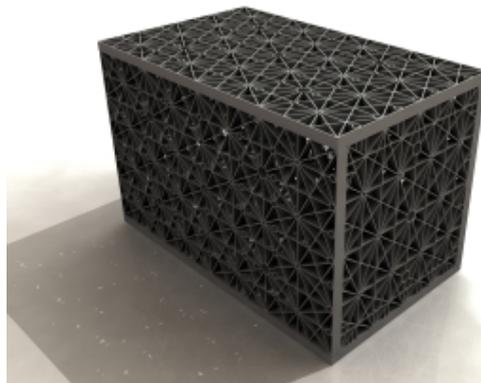
Ilustración 8 Producto Atlantis Road Cell. Estructura de Firme



Ilustración 9 Producto Atlantis Road Cell. Aplicación Práctica



*Ilustración 10*Producto Atlantis Flo-Tank



*Ilustración 11*Producto Atlantis Flo-Tank



*Ilustración 12*Producto Atlantis Flo-Channel

Hidrotank Hidrobox



Ilustración 13 Producto Hidrotank Hidrobox. Caja de plástico

Clasificación de firmes permeables

Cualquier superficie que nos encontremos en el mundo real es básicamente natural o artificial. Centrándonos en las artificiales, éstas pueden clasificarse según su pendiente en horizontales (y ligeramente inclinadas) o verticales (incluyendo las superficies fuertemente inclinadas). Así mismo según su permeabilidad son impermeables o permeables, dando lugar a los 6 grupos que refleja la siguiente tabla.

Dentro del grupo de superficies artificiales se encuentran los pavimentos, cubiertas y zonas verdes. Este tipo de superficies pueden ser permeables, siendo los firmes permeables un tipo específico de pavimentos permeables que permiten el paso de un determinado tráfico.

SUPERFICIES ARTIFICIALES	IMPERMEABLES	PERMEABLES
HORIZONTALES	ACERAS, PAVIMENTOS Y CUBIERTAS CONVENCIONALES	ZONAS VERDES, PAVIMENTOS PERMEABLES Y CUBIERTAS VERDES
VERTICALES	MUROS Y FACHADAS CONVENCIONALES	MUROS VEGETADOS Y FACHADAS VERDES

Tabla 1 Clasificación de SA

Firmes permeables según el tipo de superficie permeable

Las variantes más utilizadas de superficies permeables son césped reforzado, adoquines con ranuras, hormigón poroso, mezcla bituminosa porosa y adoquines porosos.

En la clasificación principal hecha por C Pratt, S Wilson y P Cooper (2002) se distinguen dos grandes grupos:

- Superficie porosa: aquella en la que la infiltración se produce a través de poros repartidos por toda la superficie. Los tipos son:
 - Suelos abiertos o materiales granulares.
 - Grava o césped protegidos con geosintéticos.
 - Adoquines y baldosas porosas.
 - Aglomerados porosos: asfalto poroso y hormigón poroso.
- Superficie permeable: aquella que se construye con un material impermeable pero se coloca de forma que existan ranuras o huecos, convirtiendo la superficie en permeable. Los tipos son:
 - Elementos prefabricados de hormigón o plástico que permiten obtener césped

o grava reforzados.

- o Adoquines y baldosas con ranuras.
- o Materiales de puesta en obra continua: sistemas de hormigón fabricado in situ con separadores o encofrados que aseguran las ranuras.

Otras clasificaciones de firmes permeables según su superficie son las siguientes:

Ferguson (2005):

1. Áridos porosos
2. Césped poroso
3. Celdas de plástico
4. Adoquines con juntas abiertas
5. Entramados prefabricados de hormigón
6. Hormigón poroso
7. Asfalto poroso
8. Superficies permeables ligeras
9. Caminos de madera

McCormarck (2006):

- Pavimentos construidos con materiales impermeables convencionales con huecos o ranuras que permiten la infiltración del agua a través de la superficie.
- Pavimentos construidos con elementos o materiales porosos.

Caltrans (2007):

1. Asfalto poroso
2. Hormigón poroso
3. Adoquines permeables
4. Estructuras de drenaje subterráneo

Como síntesis, podemos asegurar que existen dos tipos fundamentales que llamaremos superficies permeables continuas y discontinuas. Las primeras son aquellas construidas con materiales permeables como el hormigón poroso. Un ejemplo son las losas continuas de hormigón poroso o asfalto poroso. Por otro lado, las discontinuas son aquellas formadas por módulos prefabricados permeables o impermeables en disposición permeable, como por ejemplo los áridos con refuerzos prefabricados de hormigón o de plástico (grava reforzada), o los adoquines de hormigón, ya sea poroso o impermeable con ranuras. Si las tierras, tanto vegetadas (césped) como no vegetadas (gravas, cantos rodados o decorativos), son sin finos estaríamos ante una superficie permeable (porosa). En el caso de que se trate de zahorras continuas compactada, nos encontraríamos ante una superficie impermeable.

Podemos afirmar que “todo pavimento poroso es permeable pero no todo pavimento permeable es poroso”.

Según el uso del agua infiltrada

Una vez fijado el tipo de superficie permeable, lo más importante es decidir el destino del agua de lluvia que se va a infiltrar.

A lo largo de los años se han distinguido dos usos fundamentales (Pratt, Wilson y Cooper, 2002):

- Infiltración del agua al terreno para la recarga de acuíferos naturales, siempre que sea posible.
- Almacenamiento del agua en la capa subbase del firme.

Posteriormente, McCormack (2006) añadió un uso más:

- Infiltración directa al terreno sin ningún otro tipo de sistema de drenaje.
- Sistema de drenaje subterráneo adicional.
- Sistema de drenaje superficial adicional.

Esta clasificación fue adaptada por Rodríguez Hernández (2008):

- Firmes permeables con infiltración.
- Firmes permeables con almacenamiento.
- Firmes permeables con drenaje diferido.

Por tanto, podemos tener firmes permeables que favorezcan la recarga de los acuíferos subterráneos (almacenamiento natural del agua de lluvia), que faciliten el almacenamiento artificial en la subbase (generando acuíferos artificiales) o simplemente incrementen el tiempo de concentración (laminación de avenidas).

Propuesta de alternativas

Para su aplicación en el caso de estudio de este trabajo, en el Campus de la Llamas de la Universidad de Cantabria en Santander, se seleccionan las 4 alternativas siguientes de pavimentos permeables:

- Césped reforzado.
- Asfalto poroso.
- Hormigón poroso.
- Adoquines con ranuras.

Los motivos por los que se han seleccionado las 4 alternativas anteriores son que son las más usadas, son aptas para tráfico rodado y aparcamientos y su puesta en obra es sencilla. Además, se recomienda que se desarrolle el método Electre manualmente hasta un máximo de 4 alternativas.

Respecto al uso del agua infiltrada, se analiza el informe geotécnico “Condiciones geotécnicas existentes en la ejecución del “Parque Atlántico” en la Vaguada de “Las Llamas” en Santander (Cantabria)” (TRIAX, 2006), destacando la siguiente información.

Hacia el Sureste, en el área más próxima a la Escuela de Telecomunicaciones, se localizan rellenos antrópicos.

Sustrato rocoso. Calizas y margas de la formación Sardinero. Los afloramientos más importantes de esta formación se encuentran en los taludes de la autovía S-20 y en la zona Sur, constituyendo los laterales de la vaguada. Son materiales fracturados y ligeramente carstificados con una estratificación y pizarrosidad muy marcada (especialmente en los tramos margosos).

El espesor de la parte más superficial de los depósitos fluvio-costeros en el lado norte es de unos 4m, mientras que en el Sur, aumenta hasta unos 7m. Por debajo, su espesor es mayor del lado norte (8-9 m), que del lado sur (unos 6 m).

Se considera imprescindible la protección del colector existente. Por otro lado, las características de asiento diferido que presentan los materiales implicados (fangos y turbas), y la presencia de elementos rígidos sobre los rellenos (muros de hormigón o enlosados y pavimentaciones), obligan a acelerar dichos movimientos mediante la interposición de elementos de drenaje (columna de grava, arena o zanjas drenantes). En este caso, se dan las circunstancias de que, por una parte, la proximidad de la ladera del lado Universidad, condiciona perfiles de suelo acuñados hacia la misma y, por otra, el que en el tramo entre el colector y la citada ladera, los materiales más deformables a largo plazo (fangos y turbas), se sitúan a una profundidad alcanzable por medios mecánicos (inferior, en general, a los 5 m). Resultando de una mayor efectividad, debido a su mayor índice de ocupación, en esta zona se aconseja la utilización de zanjas drenantes. Se trataría de zanjas transversales a la ladera y al

propio colector, con profundidad máxima en ese punto, acuñándose hasta desaparecer cuando ya no existan suelos marismales blandos, hacia ladera. Las zanjas serán de la anchura del cazo de la excavadora utilizado (en torno a 90 cm), y se situarán a una distancia entre ellas, función del tiempo de consolidación previsto.

Con todo, se opta por evitar la infiltración al terreno, proponiendo un uso combinado de almacenamiento y drenaje diferido.

Según explica (Rodríguez Hernández, 2008):

- Firmes permeables con almacenamiento: son aquellos que están diseñados y construidos para permitir el almacenamiento de un determinado volumen de agua en la capa subbase, con el objetivo de su posterior valorización mediante su reutilización en usos no potables.
- Firmes permeables con drenaje diferido: son aquellos que cuentan con un sistema de drenaje subterráneo compuesto por tuberías permeables, con el objetivo de retardar el flujo de aguas pluviales, laminando las puntas de caudal en los sistemas de saneamiento a los que están conectados.

El drenaje diferido se diferencia de la infiltración directa en que en el primero el destino del agua es un sistema de saneamiento mientras que en el segundo su destino es un acuífero en caso de que lo haya o el terreno en general en caso contrario.

Selección Multicriterio

Principales métodos multicriterio y aplicaciones en construcción

Los métodos multicriterio son instrumentos de valoración de alternativas y por consiguiente esenciales en los procesos de selección y toma de decisión. Estos métodos, por tanto, permiten resolver problemas de selección y búsqueda de la alternativa más adecuada. Su característica fundamental es la consideración de más de un criterio.

Los principales métodos multicriterio empleados en la construcción son los siguientes (Jato-Espino, Castillo-López, Rodríguez-Hernández, & Canteras-Jordana, 2014):

- AHP: siglas en inglés de Analytic Hierarchy Process (en español Proceso Analítico Jerárquico). Su principal aplicación es el proceso de selección de una grúa torre.
- DEA: siglas en inglés de Data Envelopment Analysis (en español Análisis Envolvente de Datos). Entre sus aplicaciones destacan la mejora de las voladuras en roca en Noruega (Odeck), la eficiencia de los camiones durante la construcción de la carretera y las etapas de mantenimiento (Hjalmarsson and Odeck), la eficiencia de 45 contratistas de la construcción en términos de seguridad (El-Mashaleh), la eficiencia de siete diferentes condados de Virginia durante la etapa de mantenimiento de un puente (Ozbek), la eco-eficiencia de acabados de muros exteriores (Tatari y Kucukvar) y la comparación de la realización de 3 mezclas bituminosas en caliente y una mezcla bituminosa convencional mezclada en caliente (Li).
- ELECTRE: siglas de Elimination et Choix Traduisant la Réalité. Sus principales aplicaciones son la valoración de varios sistemas de toma de decisiones en Finlandia (Hokkanen y Salminen), la bondad de la implementación de diferentes tipos de buenas prácticas ambientales para la gestión de la escorrentía (BMPs) (Martin), el problema de selección del contratista (Marzouk) y la localización óptima de una instalación de residuos de construcción y demolición (RCDs) (Banias).
- TOPSIS: siglas en inglés de Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (en español Técnica para Orden de Preferencia por Semejanza a Solución Ideal). Sus principales aplicaciones son el procedimiento de selección de materiales para tejados (Rahman) y la optimización de la dosificación de la mezcla de un hormigón de alta resistencia auto-compactante (Simsek).
- ANP: siglas en inglés de Analytic Network Process (en español Proceso de Red Analítico). Sus aplicaciones más destacadas son el impacto de los factores de riesgo en la construcción en proyectos de puentes urbanos (Lu) y la comparación de varias tecnologías de construcción subterránea apropiadas para sustituir un viejo conducto de alcantarilla (Bobylev).

Elección del método multicriterio

Del amplio espectro de métodos multicriterio elegimos, principalmente por ser el más utilizado, el método Electre. También se ha sumado a este hecho la familiarización del autor de este TFG con el método Electre en la ordenación de alternativas en estudios de impacto ambiental. Por supuesto el método escogido posee la ventaja de todo método de selección multicriterio como es la consideración de más de un criterio en la toma de decisión. Otra razón que se ha considerado y que se suma a las anteriores es que el método Electre es uno de los métodos de selección multicriterio más conocido. El método Electre fue propuesto originalmente por Bernard Roy y sus compañeros en la compañía de asesoría SEMA, en Europa a mediados de los sesenta.

El modus operandi es el siguiente:

1. Definición de los criterios: son los criterios utilizados para discernir entre varias alternativas. A partir de los 3 pilares fundamentales de la sostenibilidad (economía, medio ambiente y sociedad) se establecen estos criterios valorados a través de los correspondientes indicadores. Para encontrar estos criterios hay que preguntarse cuáles son los condicionantes desde los 3 puntos de vista citados anteriormente que intervienen en la elección de un firme permeable.
2. Asignación de pesos a cada criterio: se trata de priorizar (ordenar) los criterios, dando el valor más alto al más importante. Estos pesos deben ser valores enteros entre 1 y 5 o entre 1 y 10. Puede comprobarse esta asignación en el apartado “asignación de pesos a los criterios en función de la zona”.
3. Valoración de cada alternativa, A_i , de acuerdo a cada criterio: en este tercer paso se trata de calificar cada alternativa según cada criterio. Dichas calificaciones se incluyen junto a los pesos en la matriz de pesos y calificaciones. Las calificaciones deben ser valores enteros entre 1 y 5 o entre 1 y 10. Para encontrar estas calificaciones hay que comparar las alternativas y otorgar las más alta a la más ventajosa. Pueden observarse la matriz de pesos y calificaciones en el apartado “valoración de alternativas”.
4. Cálculo:
 - Matriz de concordancia entre A_i : ver epígrafe “cálculo de matrices de concordancia y discordancia” en zona 1.
 - Matriz de discordancia entre A_i : ver epígrafe “cálculo de matrices de concordancia y discordancia” en zona 1.

Definición de criterios para la toma de decisión

En este apartado se trata de identificar las principales variables a tener en cuenta para la toma de decisión, de la forma más sostenible posible, para la cual se toman como referencia los tres pilares fundamentales del drenaje sostenible: economía, medio ambiente y sociedad.

Economía:

- Costes: estimación del presupuesto disponible y los costes asociados a la construcción de un firme permeable, teniendo en cuenta la extensión de la superficie a ocupar y su pendiente, como principales indicadores básicos en el análisis previo de la viabilidad.
- Flexibilidad: análisis de la rigidez de los requisitos de calidad y funcionalidad a cumplir en función del uso del terreno en la zona de implantación, requisitos fundamentalmente estructurales (durabilidad exigida).
- Tiempo: previsión del mantenimiento necesario para asegurar la funcionalidad del pavimento permeable a lo largo del tiempo. Dentro de este epígrafe, se ha estimado oportuno detallar el riesgo de colmatación dada su gran importancia en el caso de los firmes permeables. Riesgo de colmatación:
 - Viento (dirección predominante): factor influyente en el riesgo de colmatación. Su dirección predominante acota el abanico de posibilidades de emplazamiento. El conjunto de alternativas se reduce. Proximidad de partículas capaces de colmatar el firme.
 - Escorrentía (cuencas hidrológicas): es otro de los factores determinantes del riesgo de colmatación. La ubicación pésima de un aparcamiento con firme permeable es el desagüe de una cuenca hidrológica, aunque bien es cierto que es altamente improbable que el lugar deseado por el promotor coincida con uno de estos puntos. Aproxima partículas capaces de colmatar el firme.
 - Tráfico: considerando que los accesos a las plazas de aparcamiento que presenten densidad e intensidad altas presentarán un riesgo de colmatación menor.

Medio Ambiente:

- Consumos: dependiendo del tipo de materiales de construcción empleados y la compensación asociada a su uso con fines de depuración in situ y ahorro energético para el sistema de tratamiento de aguas residuales. Primarán aquellos materiales de construcción con mejor certificado ambiental, es decir, con menores consumos de energía y emisiones asociadas.
- Emisiones: durante la construcción y el mantenimiento, analizando también aquellas

emisiones relacionadas con la generación de residuos, la cual se tratará de minimizar. Podrán también compensarse en parte con la aplicación de productos fotocatalíticos a los aparcamientos de firmes permeables que permitiría la descontaminación del aire. Aunque parezca una utopía, hay casos en los que se ha alcanzado el éxito. Para muestra un botón: aceras que absorben CO₂.

- Reciclabilidad: valoración del posterior uso de los materiales empleados en la construcción de los firmes permeables, bien en aplicaciones similares o como materia prima para la producción de áridos reciclados.

Sociedad:

- Estética: el encaje en el diseño urbano es un tema subjetivo que depende de los gustos y preferencias de cada ciudadano. Con todo, siempre existe un espacio común donde llegar a acuerdos en visibilidad: aumento o disminución del área de las cuencas visuales, alteración de forma y excentricidad de las cuencas visuales, modificación de compacidad y creación de nuevos focos de observadores; calidad del paisaje: incompatibilidad con el carácter global, perturbación de usos específicos dedicados al disfrute del paisaje, alteración de lugares singulares culturalmente significados y pérdida de paisajes de gran calidad; componentes del paisaje: eliminación de componentes de gran valor intrínseco (vegetación, agua, suelo, etc.), inclusión de componentes de paisaje de escaso valor (escombros, etc.), alteración del entorno y condiciones de observación de componentes singulares e intrusión en zonas ajenas a la instalación (accesos, corredores, etc.) y elementos visuales: contraste de color, forma, línea y textura, dominancia visual por escala e intrusión por posición. En resumen se refiere a formas, colores y texturas.
- Comodidad: en este apartado se agrupan distintas características como el comportamiento acústico, teniendo en cuenta que ha de garantizarse la preservación de un entorno aislado de ruidos molestos, o el efecto isla de calor, que es un problema que surge en las grandes ciudades donde la gran concentración de superficies artificiales (fachadas, pavimentos, tejados, etc.) provoca un calentamiento, un incremento excesivo de la temperatura, debido a la reflexión de los rayos solares al incidir en dichas superficies. Adicionalmente el acabado superficial y la macrotextura determina la comodidad de los peatones.
- Seguridad: el nivel de adherencia neumático-pavimento influye significativamente en el nivel de control o dominio que el conductor tiene de su vehículo, factor determinante del riesgo de accidente por colisión. En el caso de que un firme permeable se implante en un aparcamiento se debe garantizar una maniobrabilidad fluida. Además, debe evitarse emplear elementos sueltos susceptibles de ser robados o utilizados como objetos arrojados.

En la siguiente tabla se resumen los requerimientos, criterios e indicadores a tener en cuenta en la selección de firmes permeables. En síntesis, se han considerado 9 criterios para valorar las 4 alternativas seleccionadas en el apartado anterior.

REQUERIMIENTO	CRITERIO	INDICADOR
ECONÓMICO	Costes	Presupuesto disponible
		Coste de construcción
		Área y pendiente
	Flexibilidad	Calidad y funcionalidad
		Resistencia exigida
	Tiempo	Mantenimiento necesario
		Aporte de sedimentos por viento
		Afección debida a la escorrentía
		Desgaste debido al tráfico
	AMBIENTAL	Consumos
Emisiones		Carbón embebido en residuos
Reciclabilidad		Materia prima requerida
		Admisión de materiales reciclados
SOCIEDAD	Estética	Apariencia
		Grado de integración urbana
	Comodidad	Generación de ruido
		Efecto isla de calor y transitabilidad
	Seguridad	Riesgo para vial para los usuarios
		Susceptibilidad al vandalismo

Tabla 2 Requerimientos, criterios e indicadores

Descripción del caso práctico

La siguiente información ha sido tomada del TFG realizado por Juan Agüero Lanza en 2015 (Agüero Lanza, 2015), seleccionado únicamente los aparcamientos del Campus de las Llamas y actualizando las fotografías para reflejar el estado actual de conservación de los aparcamientos en 2016.

En las siguientes tablas y figuras se refleja el orden de inventario propuesto para los aparcamientos del Campus de Las Llamas, que son sobre los que se realizará un estudio para la colocación de firmes permeables

Nº	Nombre-Situación
1	Aparc. de profesores de la ETSICCP
2	Aparc. de alumnos de la ETSICCP
3	Aparc. situado entre ETSICCP y la ETS de Industriales
4	Aparc. de profesores de la ETS de Industriales
5	Aparc. de profesores de la Facultad de Ciencias
6	Aparc. al sur de la Facultad de Ciencias
7	Aparc. situado entre la Facultad de Ciencias y el IFCA
8	Aparc. al norte del pabellón polideportivo y del IFCA.
9	Aparc. del Edificio Interfacultativo
10	Aparc. de profesores del Edificio Interfacultativo
11	Aparc. situado entre el Edificio Interfacultativo y el Pabellón de Gobierno
12	Aparc. del pabellón de Gobierno
13	Aparc. entre edificio anexo al Interfacultativo y la Facultad de Derecho y Ciencias económicas y Empresariales

Tabla 2: Distribución aparcamientos campus de Las Llamas



Ilustración 14 Situación aparcamientos del 1 al 4

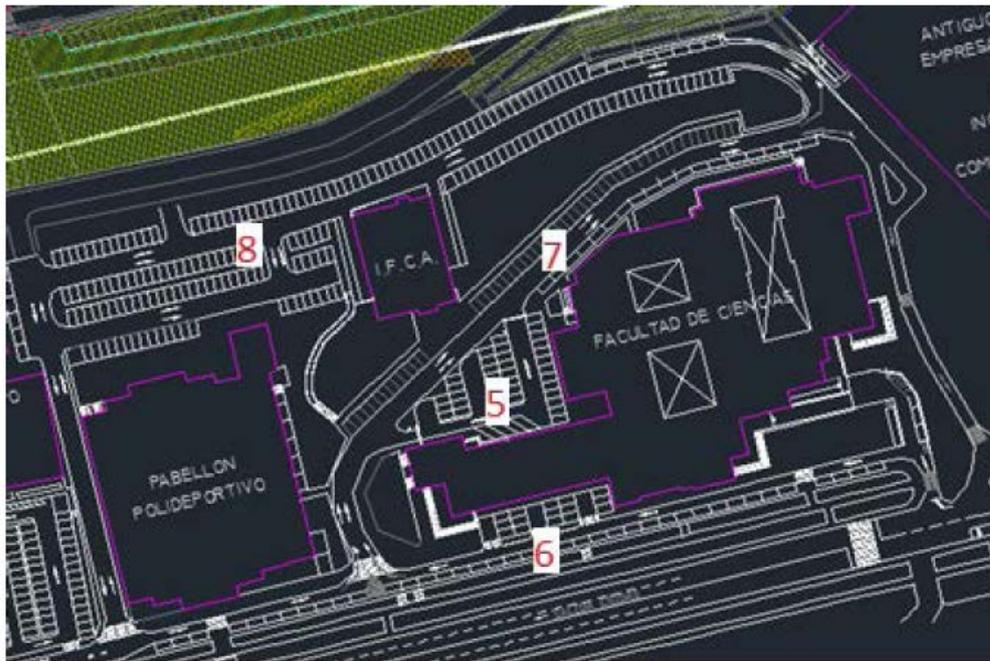


Ilustración 15 Situación aparcamientos del 6 al 8



Ilustración 16 Distribución aparcamientos del 9 al 13

A estos 13 aparcamientos añadiríamos uno más situado en el Parque de Las Llamas, justo detrás de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Este aparcamiento, a pesar de no pertenecer al Campus, es usado mayoritariamente por estudiantes y profesores a lo largo del curso escolar.

Nº 1: Aparcamiento de profesores de la ETSICCP

A-Zona entrada	
Nº aparcamientos línea	9
Nº aparcamientos batería	0
Pendiente	7,63 %
Área	280 m ²



Ilustración 17Aparcamiento 1. Entrada

B-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	37
Pendiente	0,42 %
Área	707 m ²



Ilustración 18Aparcamiento 1. Zona principal

Nº 2: Aparcamiento de alumnos de la ETSICCP

A-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	41
Pendiente	0,82 %
Área	830 m ²



Ilustración 19 Aparcamiento 2. Vista desde Oeste



Ilustración 20 Aparcamiento 2. Vista desde Este

Nº 3: Aparc. situado entre ETSICCP y la ETS de Industriales

A-Zona entrada	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	10
Pendiente	2,23 %
Área	438 m ²



Ilustración 21Aparcamiento 3. Zona entrada

B-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	39
Pendiente	0,09 %
Área	1348 m ²



Ilustración 22Aparcamiento 3. Zona principal

Nº 4: Aparc. de profesores de la ETS de Industriales

C-Zona salida	
Nº aparcamientos línea	9
Nº aparcamientos batería	0
Pendiente	9,31 %
Área	309 m ²



Ilustración 23Aparcamiento 3. Zona salida

A-Zona entrada desde Campus	
Nº aparcamientos línea	17
Nº aparcamientos batería	0
Pendiente	13,92 %
Área	808 m ²



Ilustración 24Aparcamiento 4. Zona entrada desde Campus

B-Zona entre ETSI y CTDU	
Nº aparcamientos línea	14
Nº aparcamientos batería	0
Pendiente	0,78 %
Área	684 m ²



Ilustración 25Aparcamiento 4. Zona entre ETSI y CTDU

C-Zona sur ETSI	
Nº aparcamientos línea	22
Nº aparcamientos batería	27
Pendiente	5,76 %
Área	1276 m ²



Ilustración 26Aparcamiento 4. Zona sur ETSI

D-Zona entrada parque Las Llamas	
Nº aparcamientos línea	11
Nº aparcamientos batería	14
Pendiente	0,24 %
Área	830 m ²



Ilustración 27 Zona entrada parque Las Llamas

Nº 5: Aparc. de profesores de la Facultad de Ciencias

A-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	40
Pendiente	0,2 %
Área	878 m ²



Ilustración 28Aparcamiento 5. Vista general



Ilustración 29Aparcamiento 4. Vista pavimento

Nº 6: Aparc. al sur de la Facultad de Ciencias y del pabellón polideportivo

A-Zona sur Ciencias	
Nº aparcamientos línea	27
Nº aparcamientos batería	15
Pendiente	0,42 %
Área	1070 m ²



Ilustración 30 Zona sur Ciencias con aparcamientos en línea

B-Zona sur pabellón polideportivo	
Nº aparcamientos línea	11
Nº aparcamientos batería	0
Pendiente	3,98 %
Área	305 m ²



Ilustración 31 Aparcamiento 6. Zona sur Ciencias con aparcamientos en batería



Ilustración 32 Aparcamiento 6. Zona al sur del pabellón polideportivo

Nº 7: Aparc. situado entre la Facultad de Ciencias y el IFCA

A-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	18
Nº aparcamientos batería	51
Pendiente	2,32 %
Área	1577 m ²
Observaciones	Las plazas situadas antes del IFCA llevan pendiente contraria al resto



Ilustración 33 Aparcamiento 7. Vista general



Ilustración 34 Sensores de presencia de coche aparcado

Nº 8: Aparc. al norte del pabellón polideportivo y del IFCA.

A-Zona este	
Nº aparcamientos línea	17
Nº aparcamientos batería	38
Pendiente	6,94 %
Área	1259 m ²



Ilustración 35 Aparcamiento 8. Vista general desde zona este

B-Zona oeste	
Nº aparcamientos línea	11
Nº aparcamientos batería	113
Pendiente	9,15 %
Área	3024 m ²



Ilustración 36 Aparcamiento 8. Zona oeste, al norte del pabellón polideportivo



Ilustración 37 Aparcamiento 8. Zona oeste anexa al Edificio Interfacultativo

Nº 9: Aparc. del Edificio Interfacultativo

A-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	90
Pendiente	6,52 % (más desfavorable)
Área	2167 m ²
Observaciones	Pendiente en sentido Este- Oeste y sentido Sur- Norte, se tiene en cuenta ambos efectos.



Ilustración 38Aparcamiento 9

Nº 10: Aparc. de profesores del Edificio Interfacultativo

A-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	5
Nº aparcamientos batería	22
Pendiente	3,44 %
Área	459 m ²



Ilustración 39 Aparcamiento 10. Vista zona principal



Ilustración 40 Aparcamiento 10. Vista de la entrada a la zona principal

Nº 11: Aparc. situado entre el Edificio Interfacultativo y el Pabellón de Gobierno

A-Zona superior	
Nº aparcamientos línea	7(10)
Nº aparcamientos batería	27
Pendiente	9 %
Área	694 m ²
Observaciones	Pendiente máxima en la última parte



Ilustración 41Aparcamiento 11. Zona superior

B-Zona inferior	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	19
Pendiente	6,06 %
Área	341 m ²
Observaciones:	Superficie algo convexa



Ilustración 42Aparcamiento 11.Zona intermedia



Ilustración 43Aparcamiento 11.Zona inferior

Nº 12: Aparc. del pabellón de Gobierno

A-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	65
Pendiente	0,15 %
Área	1645 m ²



Ilustración 44Aparcamiento 12

Nº 13: Aparc. entre edificio anexo al Interfacultativo y la Facultad de Derecho y Ciencias económicas y Empresariales

A-Zona principal	
Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	97
Pendiente	15,11%
Área	2175 m ²



Ilustración 45 Aparcamiento 13. Vista desde zona superior



Ilustración 46 Aparcamiento 13. Vista desde zona superior



Ilustración 47Aparcamiento 13. Vista desde zona inferior

Nº 14: Aparc. del Parque de Las Llamas situado detrás de la Escuela TS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación

Nº aparcamientos línea	0
Nº aparcamientos batería	45
Pendiente	0%
Área	473,76 m ²

A la lista anterior se añade el aparcamiento experimental del Parque de Las Llamas situado entre el propio parque y la ETSI Industriales y de Telecomunicación.



Ilustración 48. Vista superior del aparcamiento del Parque de Las Llamas situado detrás de Industriales (<http://www.qiteco.unican.es/SUDSlab/investigacion.shtml>).



Ilustración 49 Operario coloca celdas de plástico en plaza de aparcamiento



Ilustración 50 Maquinaria utilizada: apisonadora y rotaflex



Ilustración 51 Pareja de operarios corta celdas de plástico

Aplicación al caso práctico de la selección multicriterio

Zonificación

En función de las variables para la toma de decisión se agrupan los aparcamientos en 3 zonas de actuación.

Zona 1: general. En esta zona primará la seguridad. Incluye todos los aparcamientos. Es de personas cabales exigir que el riesgo para mano de obra y usuarios sea ínfimo, por lo tanto este criterio se sitúa por encima de los demás en importancia en todos los aparcamientos de la lista.

Zona 2: alta visibilidad. En esta zona primará la estética. Se encuadran en este grupo los aparcamientos nº 1, 2, 6, 9, 12 y 14. El criterio “estética” se valora por los indicadores “apariencia” y “grado de integración urbana”. La apariencia y el grado de integración urbana son indicadores que existen en la medida en la que existen observadores, por lo tanto en zonas de concentración de éstos, es mayor la importancia de la estética.

Zona 3: pendiente $\neq 0$. En esta zona primarán los costes. Agrupa los aparcamientos nº 1 (zona entrada), nº 3 (zona entrada), nº 4 (zona salida, zona entrada desde campus y zona sur ETSI), nº 6 (zona sur pabellón polideportivo), nº 7 (zona principal), nº 8 (zona este y zona oeste), nº 9 (zona principal), nº 10 (zona principal), nº 11 (zona superior y zona inferior) y nº 13 (zona principal). Se excluyen de esta zona por tener pendiente nula los aparcamientos nº 1 (zona principal), nº 2 (zona principal), nº 3 (zona principal), nº 4 (zona entre ETSI y CTDU y zona entrada parque Las Llamas), nº 5 (zona principal), nº 6 (zona sur Ciencias) y nº 12 (zona principal). Los costes de construcción y los costes de mantenimiento son mayores en esta zona de manera que se muestra una especial consideración hacia su cuantía.

Asignación de pesos a los criterios en función de la zona

Zona 1

El peso mayor (9) se le asigna a la seguridad dado que es el principal criterio por norma general. El siguiente peso (8) corresponde a los costes, el peso 7 a la flexibilidad, el peso 6 a la reciclabilidad, el peso 5 al tiempo, el peso 4 a las emisiones, el peso 3 a la comodidad, el peso 2 a los consumos y el menor peso (1) a la estética dado que en esta zona es el peso menos trascendente de los 9. Está claro que lo más importante es la integridad física de las personas. El cuidado del medio ambiente y la preocupación por la limitación de recursos naturales (reciclabilidad y emisiones) son aspectos bastante importantes que se llevan los pesos 6 y 4 respectivamente. Al consumo se le ha otorgado el peso 2 por estar vinculado con la reciclabilidad, ya que si la reciclabilidad es alta el consumo pasa a tener menos importancia. La comodidad se lleva el peso 3 que está más cerca del mínimo que del máximo puesto que el tiempo que los usuarios (bien sea como conductores o como peatones) pasan en el aparcamiento es reducido, únicamente el necesario para estacionar el vehículo y acceder a él. La flexibilidad y el tiempo se llevan pesos medio-altos (7 y 5 respectivamente) dado que ambos hacen referencia a la pérdida de funcionalidad del pavimento y por lo tanto alcanzar altas calificaciones en los criterios más importantes sin hacerlo en este perdería sentido, ya que no se cumpliría el objetivo para el que se construyó el firme permeable.

CRITERIOS	PESOS
COSTES	8
FLEXIBILIDAD	7
TIEMPO	5
CONSUMOS	2
EMISIONES	4
RECICLABILIDAD	6
ESTÉTICA	1
COMODIDAD	3
SEGURIDAD	9
<i>TOTAL</i>	<i>45</i>

Tabla 3Pesos Zona1

Zona 2

El peso mayor (9) se le asigna a la estética dado se busca aquella solución más satisfactoria desde este punto de vista. Algo que habrá que conjugar con la solución obtenida en la zona 1 dada la pertenencia simultánea de los aparcamientos nº 1, 2, 6, 9, 12 y 14 a la zona 1 y a la zona 2. La alternativa seleccionada para la zona 2 será bonita y segura.

CRITERIOS	PESOS
COSTES	7
FLEXIBILIDAD	6
TIEMPO	4
CONSUMOS	1
EMISIONES	3
RECICLABILIDAD	5
ESTÉTICA	9
COMODIDAD	2
SEGURIDAD	8
<i>TOTAL</i>	<i>45</i>

Tabla 4Pesos Zona 2

Zona 3

El peso mayor (9) se le asigna a los costes aunque al igual que en la zona 2 debe tenerse en cuenta la pertenencia simultánea de los aparcamientos de la zona 3 a ésta y a la zona 1, lo que implica la adopción de una solución que satisfaga tanto los costes como la seguridad. La alternativa seleccionada para la zona 3 será barata y segura.

CRITERIOS	PESOS
COSTES	9
FLEXIBILIDAD	7
TIEMPO	5
CONSUMOS	2
EMISIONES	4
RECICLABILIDAD	6
ESTÉTICA	1
COMODIDAD	3
SEGURIDAD	8
<i>TOTAL</i>	<i>45</i>

Tabla 5Pesos Zona 3

Valoración de alternativas

Zona 1

CRITERIOS	PESOS	ALTERNATIVAS A EVALUAR			
		A1. ASFALTO POROSO	A2. HORMIGÓN POROSO	A3. ADOQUINES	A4. CÉSPED REFORZADO
COSTES	8	6	2	6	2
FLEXIBILIDAD	7	6	7	8	2
TIEMPO	5	6	2	2	6
CONSUMOS	2	5	5	5	5
EMISIONES	4	5	5	5	5
RECICLABILIDAD	6	6	4	4	3
ESTÉTICA	1	8	6	5	7
COMODIDAD	3	7	4	2	3
SEGURIDAD	9	5	3	3	3
TOTAL	45	48	31	32	34

Tabla 6 Pesos y Calificaciones Zona 1

Zona 2

CRITERIOS	PESOS	ALTERNATIVAS A EVALUAR			
		A1. ASFALTO POROSO	A2. HORMIGÓN POROSO	A3. ADOQUINES	A4. CÉSPED REFORZADO
COSTES	7	6	2	6	2
FLEXIBILIDAD	6	6	7	8	2
TIEMPO	4	6	2	2	6
CONSUMOS	1	5	5	5	5
EMISIONES	3	5	5	5	5
RECICLABILIDAD	5	6	4	4	3
ESTÉTICA	9	8	6	5	7
COMODIDAD	2	7	4	2	3
SEGURIDAD	8	5	3	3	3
TOTAL	45	48	31	32	34

Tabla 7Pesos y Calificaciones Zona 2

Zona 3

CRITERIOS	PESOS	ALTERNATIVAS A EVALUAR			
		A1. ASFALTO POROSO	A2. HORMIGÓN POROSO	A3. ADOQUINES	A4. CÉSPED REFORZADO
COSTES	9	6	2	6	2
FLEXIBILIDAD	7	6	7	8	2
TIEMPO	5	6	2	2	6
CONSUMOS	2	5	5	5	5
EMISIONES	4	5	5	5	5
RECICLABILIDAD	6	6	4	4	3
ESTÉTICA	1	8	6	5	7
COMODIDAD	3	7	4	2	3
SEGURIDAD	8	5	3	3	3
TOTAL	45	48	31	32	34

Tabla 8 Pesos y Calificaciones Zona 3

Cálculo de matrices de concordancia y discordancia

Zona 1

Matriz de concordancia

De la interpretación de la siguiente fórmula matemática se obtiene que para confeccionar la matriz de concordancia se comparan las calificaciones entre pares de alternativas. Si la calificación de una alternativa es mayor o igual que la de la alternativa con la que se compara, el peso del criterio correspondiente se multiplica por 1; si es menor se multiplica por 0. Así sucesivamente con cada criterio y después se suman todos los valores para obtener un elemento de la matriz.

$$C_{A_i/A_j} = \sum_{j=1}^{n_C} W_j g(A_i, A_j)$$

$$g(A_i, A_j) = 1 \text{ si } C_{A_{ik}} \geq C_{A_{jk}} \\ = 0 \text{ si } C_{A_{ik}} < C_{A_{jk}}$$

	A1	A2	A3	A4
A1	--	38	38	45
A2	13	--	30	39
A3	21	41	--	36
A4	11	29	24	--

Tabla 9 Matriz de concordancia Zona 1

$$P = 365/12 = 30,42$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} C_{A_i/A_j}}{n_A^2 - n_A}$$

Matriz de discordancia

De forma análoga a la matriz anterior, de la interpretación de la siguiente fórmula matemática se obtiene que para formar la matriz de discordancia se debe restar a la calificación de una

alternativa la calificación de la alternativa con la que se compara. Se hace esto para cada criterio y se selecciona el máximo. Este máximo ha de ser positivo; en caso de que sea negativo se tomará el valor cero.

$$D_{Ai/Aj} = \max(C_{Aik} - C_{Ajk}) \forall k = 1 \dots n_C$$

	A1	A2	A3	A4
A1	--	4	5	4
A2	1	--	2	5
A3	2	1	--	6
A4	0	4	4	--

Tabla 10 Matriz de discordancia Zona 1

$$Q = 38/12 = 3,17$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} D_{Ai/Aj}}{n_A^2 - n_A}$$

Ambas matrices son cuadradas y los elementos de su diagonal tienen el valor cero.

Zona 2

Matriz de concordancia

	A1	A2	A3	A4
A1	--	39	39	45
A2	10	--	32	32
A3	17	34	--	30
A4	8	32	27	--

Tabla 11 Matriz de concordancia Zona 2

$$P=345/12=28,75$$

Matriz de discordancia

	A1	A2	A3	A4
A1	--	4	5	4
A2	1	--	2	5
A3	2	1	--	6
A4	0	4	4	--

Tabla 12 Matriz de discordancia Zona 2

$$Q=38/12=3,17$$

La matriz de discordancia y por lo tanto el parámetro Q, es la misma para las tres zonas dado que no varían las calificaciones de cada alternativa para los distintos criterios.

Zona 3

Matriz de concordancia

	A1	A2	A3	A4
A1	--	30	30	37
A2	13	--	21	31
A3	22	33	--	28
A4	11	21	15	--

Tabla 13 Matriz de concordancia Zona 3

$$P=292/12=24,33$$

Matriz de discordancia

	A1	A2	A3	A4
A1	--	4	5	4
A2	1	--	2	5
A3	2	1	--	6
A4	0	4	4	--

Tabla 14 Matriz de discordancia Zona 3

$$Q=38/12=3,17$$

La matriz de discordancia y por lo tanto el parámetro Q, es la misma para las tres zonas dado que no varían las calificaciones de cada alternativa para los distintos criterios.

Análisis de dominancias y toma de decisiones

Zona 1

Dominancia probable hacia

Si $C_{Ai/Aj} \geq p$ entonces Ai posiblemente domina a Aj

38>30,42 => A1 posiblemente domina a A2

38>30,42=> A1 posiblemente domina a A3

45>30,42=> A1 posiblemente domina a A4

39>30,42=> A2 posiblemente domina a A4

41>30,42=> A3 posiblemente domina a A2

36>30,42=> A3 posiblemente domina a A4

Solamente si existe dominancia probable se comprueba la dominancia real que certifica el dominio o superioridad de una alternativa sobre otra.

Dominancia real hacia

Si $D_{Ai/Aj} \leq q$ Entonces Ai realmente domina a Aj

1<3,17=> A3 realmente domina a A2

	Domina a
A1	A2 A3 A4
A2	A4
A3	A2 A4
A4	-

Tabla 15 Tabla de dominancia hacia (domina a) Zona 1

Dominancia probable desde

Si $C_{Ai/Aj} < p$ entonces Aj posiblemente es dominada por Ai

13<30,42=> A1 posiblemente es dominada por A2

30<30,42=> A3 posiblemente es dominada por A2

21<30,42=> A1 posiblemente es dominada por A3

11<30,42=> A1 posiblemente es dominada por A4

29<30,42=> A2 posiblemente es dominada por A4

24<30,42=> A3 posiblemente es dominada por A4

Dominancia real desde

Si $D_{Ai/Aj} > q$ entonces A_j realmente es dominada por A_i

4>3,17=> A2 realmente es dominada por A4

4>3,17=> A3 realmente es dominada por A4

	Es dominada por
A1	-
A2	A1 A3
A3	A1 A2
A4	A1

Tabla 16 Tabla de dominancia desde (dominada por) Zona 1

Zona 2

Dominancia probable hacia

Si $C_{A_i/A_j} \geq p$ entonces A_i posiblemente domina a A_j

39 > 28,75 => A_1 posiblemente domina a A_2

39 > 28,75 => A_1 posiblemente domina a A_3

45 > 28,75 => A_1 posiblemente domina a A_4

32 > 28,75 => A_2 posiblemente domina a A_3

32 > 28,75 => A_2 posiblemente domina a A_4

34 > 28,75 => A_3 posiblemente domina a A_2

30 > 28,75 => A_3 posiblemente domina a A_4

32 > 28,75 => A_4 posiblemente domina a A_2

Dominancia real hacia

Si $D_{A_i/A_j} \leq q$ entonces A_i realmente domina a A_j

2 < 3,17 => A_2 realmente domina a A_3

1 < 3,17 => A_3 realmente domina a A_2

	Domina a
A1	A2 A3 A4
A2	A3 A4
A3	A2 A4
A4	A2

Tabla 17 Tabla de dominancia hacia (domina a) Zona 2

Dominancia probable desde

Si $C_{A_i/A_j} < p$ entonces A_j posiblemente es dominada por A_i

10 < 28,75 => A1 posiblemente es dominada por A2

17 < 28,75 => A1 posiblemente es dominada por A3

8 < 28,75 => A1 posiblemente es dominada por A4

27 < 28,75 => A3 posiblemente es dominada por A4

Dominancia real desde

Si $D_{A_i/A_j} > q$ entonces A_j realmente es dominada por A_i

4 > 3,17 => A3 realmente es dominada por A4

	Es dominada por
A1	-
A2	A1 A3
A3	A1 A2
A4	A1

Tabla 18 Tabla de dominancia desde (dominada por) Zona 2

Zona 3

Dominancia probable hacia

Si $C_{Ai/Aj} \geq p$ entonces Ai posiblemente domina a Aj

30>24,33 => A1 posiblemente domina a A2

30>24,33=> A1 posiblemente domina a A3

37>24,33=> A1 posiblemente domina a A4

31>24,33=> A2 posiblemente domina a A4

33>24,33=> A3 posiblemente domina a A2

28>24,33=> A3 posiblemente domina a A4

Solamente si existe dominancia probable se comprueba la dominancia real que certifica el dominio o superioridad de una alternativa sobre otra.

Dominancia real hacia

Si $D_{Ai/Aj} \leq q$ Entonces Ai realmente domina a Aj

1<3,17=> A3 realmente domina a A2

	Domina a
A1	A2 A3 A4
A2	A4
A3	A2 A4
A4	-

Tabla 19 Tabla de dominancia hacia (domina a) Zona 3

Dominancia probable desde

Si $C_{Ai/Aj} < p$ entonces Aj posiblemente es dominada por Ai

13<24,33=> A1 posiblemente es dominada por A2

21<24,33=> A3 posiblemente es dominada por A2

22<24,33=> A1 posiblemente es dominada por A3

11<24,33=> A1 posiblemente es dominada por A4

21<24,33=> A2 posiblemente es dominada por A4

15<24,33=> A3 posiblemente es dominada por A4

Dominancia real desde

Si $D_{A_i/A_j} > q$ entonces A_j realmente es dominada por A_i

4>3,17=> A2 realmente es dominada por A4

4>3,17=> A3 realmente es dominada por A4

	Es dominada por
A1	-
A2	A1 A3
A3	A1 A2
A4	A1

Tabla 20. Tabla de dominancia desde (dominada por) Zona 3

Discusión y toma de decisión

No se ha obtenido ningún empate en ninguna de las 3 zonas. De cualquier manera, convendría recordar que de haberse dado, un empate podría resolverse decrementando el valor de p o incrementando el valor de q .

En la primera de las zonas, la general, el orden de preferencia de mayor a menor es el que sigue: asfalto poroso, adoquines, césped reforzado y hormigón poroso.

A la luz de los resultados analíticos, el asfalto poroso constituye también la mejor opción en aquellos aparcamientos ubicados en las zonas de mayor visibilidad o zona 2.

En la tercera zona (zona de pendiente $\neq 0$) se prefiere la alternativa 1 a la alternativa 3 y a su vez, la alternativa 3 se prefiere a la alternativa 4, y la 4 se prefiere a la alternativa 2, idéntico resultado al de las anteriores zonas.

Además, el asfalto poroso es la opción más barata, siendo la más cara es el hormigón poroso.

Tanto si el peso mayor se le asigna a la seguridad como a la estética, como a los costes resulta elegida la alternativa 1 (asfalto poroso).

Por tanto, e puede concluir que el asfalto poroso es la alternativa adecuada para los 14 aparcamientos considerados.

Sin embargo, la preponderancia de una única solución sobre el resto puede resultar contraproducente a la hora de la toma de decisión.

Así, existen criterios adicionales que deben tenerse en cuenta al evaluar el conjunto de los 14 aparcamientos, como la posible monotonía de acabado que puede llegar a generarse, o la excesiva apuesta que puede suponer elegir una única superficie, con todos sus inconvenientes, en lugar de diversificar la apuesta y el riesgo entre varias superficies.

Por tanto, si bien se recomienda el uso de asfalto poroso en caso de tener que sustituir los pavimentos existentes y fundamentalmente también para la ejecución de los viales de acceso, si tuviésemos que ejecutar de nuevo los aparcamientos, la mejor opción, sin irnos necesariamente a la más cara de hormigón poroso, sería la combinación de superficies permeables menos conocidas: césped reforzado y adoquines. Así, se decide plantear la construcción de dos secciones distintas, con pavimentos de césped reforzado y adoquines, cuyos beneficios combinados pueden superar los beneficios asociados al asfalto poroso o al hormigón poroso, dando respuesta a los condicionantes de conjunto.

Por último, mencionar que la complicación constructiva asociada a la ejecución de firmes de césped reforzado y adoquines en disposición permeable, es mucho mayor que en el caso de mezcla bituminosa porosa, siendo este un material de construcción más empleado. Así, tiene más interés detallar las prescripciones técnicas del césped reforzado y los adoquines, que del asfalto poroso.

Descripción de la alternativa seleccionada

Prescripciones técnicas

En este apartado se detallan las prescripciones técnicas asociadas a la ejecución de estos dos pavimentos. La siguiente información proviene fundamentalmente de Zorrilla Martínez (2015) y de informes de asesorías técnicas para la construcción de firmes permeables, llevadas a cabo por el Grupo GITECO, siendo ampliada y adaptada con algunos comentarios originales para este trabajo.

1. M³ de relleno de regulación de la explanada

Definición

Esta unidad comprende la extensión y compactación del relleno sobre el terreno constituyendo la explanada con las pendientes indicadas en los planos del proyecto.

En cualquier caso, se estará a lo dispuesto en el Capítulo III Rellenos de la Parte 3ª Explanaciones, del PG vigente y a los criterios de la Dirección de Obra.

Materiales

Se trata de un relleno de grava menuda (30-50 mm) u otro material granular seleccionado sin finos plásticos. Dicho relleno tendrá un espesor mínimo de 10 cm una vez compactado sobre el terreno natural de manera que la explanada resultante tenga un CBR mayor de 3 y una permeabilidad del orden de 1 cm/s.

Ejecución de las obras

El relleno se extenderá sobre el terreno natural y se compactará dando las pendientes indicadas en los planos para la explanada.

Se debe comprobar la permeabilidad y la capacidad portante una vez finalizada la ejecución del relleno.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros cúbicos (m³) realmente ejecutados, conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo

indicado en los correspondientes planos.

2. M² de geotextil separador entre explanada y celda drenante

Definición

Esta unidad comprende la colocación de la lámina de geotextil que separa la explanada de la celda drenante de plástico con los solapes necesarios.

En cualquier caso, se estará a lo dispuesto en el artículo 390 del PG vigente.

Materiales

El geotextil indicado para esta ubicación es el Danofelt PP 215 o uno similar con una resistencia al punzonamiento estático entre 2,75 y 0,41 KN, una permeabilidad entre 6,5 y 0,5 cm/s y un media de abertura de $110 \pm 38,5 O_{90} \mu\text{m}$.

Ejecución de las obras

El geotextil se extenderá directamente sobre la explanada con los solapes necesarios para cubrir la totalidad de la superficie ocupada por aparcamientos, viales y aceras. Los solapes serán de 1 m o la longitud indicada por el fabricante y aprobada por la Dirección de Obra.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros cuadrados (m²) realmente cubiertos con geotextil sin contar los solapes, conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

3. M² de celda drenante

Definición

Esta unidad comprende la colocación de la celda drenante sobre el geotextil situado sobre la explanada.

Materiales

Se colocará celda de drenaje de 52 mm de espesor tipo Atlantis o similar con una retención 52 l/m² y una resistencia a compresión en vacío de 150 toneladas/m².

Ejecución de las obras

La celda de drenaje se extenderá directamente sobre el geotextil cubriendo la totalidad de la superficie ocupada por aparcamientos, viales y aceras con la misma inclinación que la explanada.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros cuadrados (m²) de celda drenante realmente colocados conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

4. M² de geotextil separador entre celda drenante y subbase

Definición

Esta unidad comprende la colocación de la lámina de geotextil que separa la celda drenante de plástico de la subbase del firme con los solapes necesarios.

En cualquier caso, se estará a lo dispuesto en el artículo 390 del PG vigente y a las indicaciones de la Dirección de Obra.

Materiales

El geotextil indicado para esta ubicación es el Fibertex F-2B o uno similar con una resistencia al punzonamiento estático del orden de 1,5 kN, una permeabilidad de 10 cm/s y un media de abertura de 110 O₉₀ μm.

Ejecución de las obras

El geotextil se extenderá directamente sobre la explanada con los solapes necesarios para cubrir la totalidad de la superficie ocupada por aparcamientos, viales y aceras. Los solapes serán de 1 m o la longitud indicada por el fabricante y aprobada por la Dirección de Obra.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros cuadrados (m²) realmente cubiertos con geotextil sin contar los solapes, conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

5. M³ de zahorra drenante como subbase

Definición

Se define como tal a la capa de material granular sin finos que sirve de subbase a los firmes de los aparcamientos, viales y aceras entre el geotextil sobre la celda drenante y el geotextil de separación respecto a la base.

Se cumplirá todo lo descrito en el artículo 510 del PG-3 vigente y las indicaciones de la Dirección de Obra.

Materiales

Los materiales granulares que componen esta unidad procederán del machaqueo y trituración de piedra caliza de cantera. El coeficiente de desgaste, medido por el ensayo de Los Angeles, será inferior a 30, presentando un equivalente de arena superior a 40. La granulometría deberá estar entre los límites marcados por la antigua zahorra drenante ZD1 y la nueva zahorra artificial drenante ZAD20 indicados en la siguiente tabla. La permeabilidad del material debe ser del orden de 10⁻² cm/s.

POSIBLES GRANULOMETRÍAS	ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)								
	40	25	20	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZD1	100	70	50	30	10	0	0	0	0
ZAD20	100	100	65	40	14	0	0	0	0
Zahorra drenante	100	100-70	65-50	40-30	14-10	0	0	0	0

Tabla 21 Uso granulométrico de la zahorra drenante marcado por los límites inferiores de la ZD1 ("Ingeniería de Carreteras, Volumen II", C. Kraemer et al., 2004) y la ZAD20 (artículo 510 del PG-3 vigente)

Ejecución de las obras

Previo al inicio de la ejecución de la unidad, el contratista deberá formar un acopio del volumen que indique el Director de Obra, el cual deberá ser ensayado y merecerá la aprobación del Director de Obra.

Una vez colocado el geotextil sobre la celda de drenaje se procederá al extendido de la subbase en dos tongadas con los espesores necesarios de cara a conseguir el espesor final indicado en los planos con un mínimo de 30 cm una vez compactadas.

En la zona de tránsito de autobuses se dispondrán las dos tongadas situándose entre ambas la lámina de geotextil de filtro y separación de la manera indicada en el correspondiente

apartado de este pliego.

Medición y abono

La subbase se medirá y abonará, al correspondiente precio del cuadro de precios nº 1, por los metros cúbicos (m³) realmente ejecutados en obra, deducidos de las secciones tipo, comprendiendo dicho precio todas las operaciones y materiales necesarios para la terminación de la unidad tal y como se describe en el presente Pliego.

No serán de abono los derrames laterales, ni la compensación de la merma de espesores de capas subyacentes.

6. M² de geotextil separador entre subbase y base

Definición

Esta unidad comprende la colocación de la lámina de geotextil de filtro y separación entre la subbase y la base de los diferentes firmes con los solapes necesarios.

En cualquier caso, se estará a lo dispuesto en el artículo 390 del PG vigente y a las indicaciones de la Dirección de Obra.

Materiales

El geotextil indicado para esta ubicación es el Polifelt TS 30 o uno similar no tejido de polipropileno con una resistencia al punzonamiento estático del orden de 1,75 kN, una permeabilidad de 10,5 cm/s y un media de abertura de 110 O₉₀ μm.

Ejecución de las obras

El geotextil se extenderá directamente sobre la zahorra drenante con los solapes necesarios para cubrir la totalidad de la superficie ocupada por aparcamientos, viales y aceras. Los solapes serán de 1 m o la longitud indicada por el fabricante y aprobada por la Dirección de Obra.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros cuadrados (m²) realmente cubiertos con geotextil sin contar los solapes, conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

7. M de encintado de separación entre viales y aparcamientos

Definición

Esta unidad comprende la colocación de un encintado tipo Bloques Montserrat o similar sobre cama de hormigón de manera que su cota superior coincida con la cota de la superficie final sirviendo de separación y confinamiento de espacios de aparcamiento y viales. El mismo bordillo se colocará de separación entre aceras y zonas verdes con misión de confinar el espacio de la acera.

Materiales

Se utilizará un encintado de hormigón prefabricado que se ajuste a las dimensiones previstas en los planos colocado sobre una cama de hormigón.

Ejecución de las obras

Una vez realizado el replanteo de la línea y altura del encintado se dispondrá la correspondiente cama de hormigón para recibirlo. Una vez colocado el encintado se comprobará la cota y nivelación del mismo.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros lineales (m) de encintado colocado incluyendo cama de hormigón conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

8. M de bordillo de separación entre aparcamientos y acera

Definición

Esta unidad comprende la colocación de un bordillo de acera tipo Bloques Montserrat o similar sobre cama de hormigón de manera que su cota superior coincida con la cota de la acera quedando la superficie del aparcamiento por debajo, sirviendo de separación y confinamiento de espacios de acera y aparcamientos.

Materiales

Se utilizará un bordillo de hormigón prefabricado que se ajuste a las dimensiones previstas en los planos colocado sobre una cama de hormigón.

Ejecución de las obras

Una vez realizado el replanteo de la línea y altura del bordillo se dispondrá la correspondiente cama de hormigón para recibirlo. Una vez colocado el bordillo se comprobará la cota y nivelación del mismo.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros lineales (m) de bordillo colocado incluyendo cama de hormigón conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

9. M de bordillo de separación entre aceras y jardines

Definición

Esta unidad comprende la colocación de un bordillo de jardín sobre cama de hormigón de manera que sirva para confinar el espacio de la acera.

Materiales

Se utilizará un bordillo de hormigón prefabricado de jardín tipo Bloques Montserrat o similar que se ajuste a las dimensiones previstas en los planos colocado sobre una cama de hormigón.

Ejecución de las obras

Una vez realizado el replanteo de la línea y altura del bordillo se dispondrá la correspondiente cama de hormigón para recibirlo. Una vez colocado el bordillo se comprobará la cota y nivelación del mismo.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros lineales (m) de bordillo colocado incluyendo cama de hormigón conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

10. M³ de tierra vegetal abierta para aparcamiento de ligeros

Definición

Se define como tal a la mezcla de 30 % de turba o tierra vegetal con 70 % de arena gruesa que sirve de base y relleno en los firmes de los aparcamientos de césped reforzado en la zona de aparcamiento de los vehículos ligeros ofreciendo una permeabilidad inicial de $3 \cdot 10^{-2}$ cm/s.

Materiales

Se emplearán dos materiales mezclados: turba o tierra vegetal con semillas (30 %) y arena gruesa 2-5 mm (70 %). La arena gruesa procederá de cantera y no tendrá finos de carácter plástico. La mezcla debe ser homogénea.

Ejecución de las obras

Una vez colocado el geotextil sobre la subbase y confinados los espacios de aparcamiento con los bordillos se procederá a extender una primera tongada de tierra vegetal abierta compactándola hasta obtener una superficie estable de 10 cm de espesor. Sobre dicha superficie se colocará la celda de plástico de refuerzo de resistencia 150 t/m². Una vez colocada la celda se rellenará con 5 cm de tierra vegetal abierta sin compactar dejando una holgura respecto a la cota final de la superficie que permita el crecimiento del césped. Finalmente se comprobará la permeabilidad final de la superficie que debe ser del orden de $3 \cdot 10^{-2}$ cm/s.

Medición y abono

La tierra vegetal abierta se medirá y abonará, al correspondiente precio del cuadro de precios nº 1, por los metros cúbicos (m³) realmente ejecutados en obra, deducidos de las secciones tipo, comprendiendo dicho precio todas las operaciones y materiales necesarios para la terminación de la unidad tal y como se describe en el presente Pliego.

11. M³ de arena gruesa como base

Definición

Esta unidad comprende la extensión de la base de arena gruesa de permeabilidad igual o mayor de 0,1 cm/s como base. Se tendrá en cuenta lo especificado en el artículo 510 del PG-3 vigente así como las indicaciones de la dirección de obra.

Materiales

Como base se utiliza una arena gruesa de tamaño 2-5 mm procedente de cantera o en su defecto una arena caliza 0-6 cortada por el tamiz 4mm ambas posibilidades sin finos plásticos

Ejecución de las obras

Previo al inicio de la ejecución de la unidad, el contratista deberá formar un acopio del volumen que indique el Director de Obra, el cual deberá ser ensayado y merecerá la aprobación del Director de Obra. Una vez colocado el geotextil sobre la subbase se procederá al extendido de la base en una única tongada. Se comprobará que la permeabilidad sea del orden de 0,1 cm/s. El espesor de la tongada será 5 cm en el caso de superficie de adoquines y unos 10 cm en el caso de las aceras.

El extendido y nivelación de la capa de arena tiene como objetivo conseguir una capa uniforme en cuanto a comportamiento y en consecuencia, en cuanto a espesor, ya que no se compacta hasta que los adoquines han sido colocados. Para realizar dicha nivelación puede utilizarse un listón de nivelación con guías longitudinales. Idealmente, para finalizar la compactación, la arena debe tener un contenido de humedad entre un 6% y un 8%, es decir, la arena no estará seca ni saturada.

La extensión de la capa de arena debe hacerse de modo que, la cantidad de arena colocada diariamente permita precisamente que los adoquines colocados cada día sean completados. Una vez que la arena ha sido nivelada, no debe pisarse, por lo que la colocación de los adoquines se realiza desde el pavimento terminado. No es recomendable echar la arena en tramos muy grandes a la vez, ya que se desperdicia material, y el trabajo se organiza mejor en tramos de 3 ó 4 metros.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros cúbicos (m³) realmente extendidos conforme a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

12. M² de celda de plástico para césped reforzado

Definición

Esta unidad comprende la colocación de la celda de plástico de resistencia 150 t/m² sobre la subbase para su posterior relleno con tierra vegetal abierta constituyendo la superficie de césped reforzado correspondiente a los aparcamientos de vehículos ligeros.

Materiales

Se colocará como refuerzo la celda de drenaje de 52 mm de espesor tipo Atlantis o similar con una retención 52 l/m² y una resistencia a compresión en vacío de 150 toneladas/m² en los aparcamientos destinados a vehículos ligeros.

Ejecución de las obras

La celda de refuerzo se colocará en superficie sobre 10 cm de tierra abierta, rellenándose posteriormente con 5 cm más de tierra abierta. La celda se adaptará a los contornos marcados por el encintado de separación de viales y aparcamientos.

Medición y abono

Se medirán y abonarán, al correspondiente precio del Cuadro de Precios nº 1, los metros cuadrados (m²) de celda de plástico de refuerzo realmente utilizados incluyendo recortes necesarios para ajustarse a las especificaciones de este Pliego y a lo indicado en los correspondientes planos.

13. M² de adoquines permeables

Definición

La superficie de adoquines permeables estará formada por bloques prefabricados de hormigón que una vez colocados permitan el paso del agua a las capas inferiores de pavimento.

Los adoquines se colocarán a tope, sin recebo alguno y según la distribución en planta que marque la Dirección de Obra.

Materiales

Los adoquines serán tipo permeable de Bloques Montserrat, Formpave o similar con un ancho de 10 cm, un largo de 20 cm y un espesor de 10 cm y un diseño tal que, colocados a tope, permitan el paso del agua a su través sin necesidad de relleno.

Ejecución de las obras

Los adoquines se dispondrán sobre la base de arena gruesa, confinados entre los bordillos laterales de los viales. La compactación de la arena gruesa se realizará una vez colocados los adoquines. De este modo se evitan los desplazamientos de las piezas, aperturas de las juntas y pérdidas de trabazón entre los adoquines. Tanto durante la ejecución como una vez finalizada la puesta en obra se realizará un estricto control de calidad de los materiales utilizados, los acopios y los acabados obtenidos. Además se comprobará la permeabilidad resultante de la superficie sea superior a $25 \cdot 10^{-2}$ cm/s.

Medición y abono

La superficie de adoquines se medirá y abonará, al correspondiente precio del cuadro de precios nº 1, por los metros cuadrados realmente colocados en obra, deducidos de las plantas correspondientes como se describe en el presente Pliego.

14. M² de baldosa porosa

Definición

La superficie de acera estará formada por baldosa porosa de un espesor del orden de 5 cm sobre cama de arena gruesa según la disposición especificada por la Dirección de Obra.

Materiales

Las baldosas porosas serán del tipo Bloques Montserrat o similar con una permeabilidad aproximada de $40 \cdot 10^{-2}$ cm/m.

Ejecución de las obras

Las baldosas porosas se dispondrán sobre la base de arena gruesa, confinadas entre los bordillos laterales de las aceras realizando la correspondiente compactación. De este modo se evitan los desplazamientos de las piezas, aperturas de las juntas y pérdidas de trabazón entre las baldosas. Tanto durante la ejecución como una vez finalizada la puesta en obra se realizará un estricto control de calidad de los materiales utilizados, los acopios y los acabados obtenidos. Además se comprobará la permeabilidad resultante de la superficie sea superior a $40 \cdot 10^{-2}$ cm/s.

Medición y abono

La superficie de baldosas porosas se medirá y abonará, al correspondiente precio del cuadro de precios nº 1, por los metros cuadrados realmente colocados en obra, deducidos de las plantas correspondientes como se describe en el presente Pliego.

Estimación económica

A continuación, se presentan los precios estimados de las unidades de obra descritas acompañados de una medición aproximada.

Los precios son estimados indicados en el cuadro de precios Nº 1 se han tomado de la base de precios PREOC 2005, pudiendo variar según la disponibilidad y distancia de transporte. En el caso de los adoquines y las baldosas los precios señalados se refieren al material en fábrica, sin transporte ni colocación, para lo cual sería necesario consultar a los suministradores más cercanos al Campus de Santander.

Este apartado se ha realizado con la versión de estudiante del programa MENFIS 8, generando la salida en base a los cuatro apartados siguientes:

- Cuadro de Precios Nº 1.
- Mediciones.
- Presupuesto.
- Resumen del Presupuesto.

El presupuesto total de la obra con IVA incluido es de 1.375.880,16 €

Cuadro de precios Nº 1

		Pág.: 1
CUADRO DE PRECIOS Nº 1		Ref.: procdp1a
		Fec.:
Código	Descripción de las unidades de obra	Precio
01	m3 de relleno de regulación de la explanada CUATRO EUROS CON TREINTA Y SIETE CÉNTIMOS	4,37
02	m2 de geotextil separador entre celda drenante y explanada UN EURO CON TREINTA Y DOS CÉNTIMOS	1,32
03	m2 de celda drenante DIECISEIS EUROS CON SEIS CÉNTIMOS	16,06
04	m2 de geotextil separador entre celda drenante y subbase UN EURO CON QUINCE CÉNTIMOS	1,15
05	m3 de zahorra drenante DIECINUEVE EUROS CON DIECISIETE CÉNTIMOS	19,17
06	m2 de geotextil separador entre subbase y base NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS	0,98
07	m de encintado de separación entre viales y aparcamientos DIECISEIS EUROS CON CUARENTA Y DOS CÉNTIMOS	16,42
08	m de bordillo de separación entre aparcamientos y acera DIECISEIS EUROS CON CUARENTA Y DOS CÉNTIMOS	16,42
09	m de bordillo de separación entre aceras y jardines CATORCE EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS	14,50
010	m3 de tierra vegetal abierta para aparcamiento de vehículos ligeros DIECISIETE EUROS CON CUARENTA Y SIETE CÉNTIMOS	17,47
011	m3 de arena gruesa TRECE EUROS CON CINCUENTA Y UN CÉNTIMOS	13,51
012	m2 de celda de plástico de refuerzo para aparcamiento de vehículos ligeros DIECISEIS EUROS CON SEIS CÉNTIMOS	16,06
013	m2 de adoquines permeables DIECISEIS EUROS	16,00
014	m2 de baldosa porosa TREINTA Y SIETE EUROS CON TREINTA Y SEIS CÉNTIMOS	37,36

Mediciones

		Pág.: 1
	MEDICIONES	Ref.: promed1
		Fec.:

N.º Orden	DESIGNACIÓN DE LA CLASE DE OBRA Y DE LAS PARTES EN QUE DEBE EJECUTARSE	N.º de partes iguales	UNIDADES				
			DIMENSIONES			Subtotales	TOTALES
			Longitud	Latitud	Altura		
01 01	m3 de relleno de regulación de la explanada						
							Total partida: 014.551,00
02 02	m2 de geotextil separador entre celda drenante y explanada						
							Total partida: 0222.754,80
03 03	m2 de celda drenante						
							Total partida: 0322.754,80
04 04	m2 de geotextil separador entre celda drenante y subbase						
							Total partida: 0422.754,80
05 05	m3 de zahorra drenante						
							Total partida: 054.551,00
06 06	m2 de geotextil separador entre subbase y base						
							Total partida: 0622.754,80
07 07	m de encintado de separación entre viales y aparcamientos						
							Total partida: 071.566,30
08 08	m de bordillo de separación entre aparcamientos y acera						
							Total partida: 082.280,00
09 09	m de bordillo de separación entre aceras y jardines						
							Total partida: 092.280,00
10 010	m3 de tierra vegetal abierta para aparcamiento de vehículos ligeros						
							Total partida: 10982,20

		Pág.: 1
	MEDICIONES	Ref.: promed1
		Fec.:

N.º Orden	DESIGNACIÓN DE LA CLASE DE OBRA Y DE LAS PARTES EN QUE DEBE EJECUTARSE	N.º de partes iguales	UNIDADES					
			DIMENSIONES			Subtotales	TOTALES	
			Longitud	Latitud	Altura			
11 011	m3 de arena gruesa							
								Total partida: 11920,13
12 012	m2 de celda de plástico de refuerzo para aparcamiento de vehículos ligeros							
								Total partida: 126.548,03
13 013	m2 de adoquines permeables							
								Total partida: 133.604,90
14 014	m2 de baldosa porosa							
								Total partida: 143.100,00

Presupuesto

		Pág.: 1
	PRESUPUESTO	Ref.: propret
		Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio	Importe
01 01	m3 de relleno de regulación de la explanada	4.551,00	4,37 €	19.887,87 €
02 02	m2 de geotextil separador entre celda drenante y explanada	22.754,80	1,32 €	30.036,34 €
03 03	m2 de celda drenante	22.754,80	16,06 €	365.442,09 €
04 04	m2 de geotextil separador entre celda drenante y subbase	22.754,80	1,15 €	26.168,02 €
05 05	m3 de zahorra drenante	4.551,00	19,17 €	87.242,67 €
06 06	m2 de geotextil separador entre subbase y base	22.754,80	0,98 €	22.299,70 €
07 07	m de encintado de separación entre viales y aparcamientos	1.566,30	16,42 €	25.718,65 €
08 08	m de bordillo de separación entre aparcamientos y acera	2.280,00	16,42 €	37.437,60 €
09 09	m de bordillo de separación entre aceras y jardines	2.280,00	14,50 €	33.060,00 €
10 010	m3 de tierra vegetal abierta para aparcamiento de vehículos ligeros	982,20	17,47 €	17.159,03 €
11 011	m3 de arena gruesa	920,13	13,51 €	12.430,96 €
12 012	m2 de celda de plástico de refuerzo para aparcamiento de vehículos ligeros	6.548,03	16,06 €	105.161,36 €
13 013	m2 de adoquines permeables	3.604,90	16,00 €	57.678,40 €
14 014	m2 de baldosa porosa	3.100,00	37,36 €	115.816,00 €
Total Presupuesto				955.538,69 €

Resumen del Presupuesto

		Pág.: 1
	RESUMEN DE CAPÍTULO	Ref.: prores1
		Fec.:

Nº Orden	Descripción de los capítulos	Importe	%
----------	------------------------------	---------	---

TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	955.538,69 €
13 % Gastos Generales.....	124.220,03 €
6 % Beneficio Industrial.....	57.332,32 €
TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	1.137.091,04 €
21 % I.V.A.....	238.789,12 €
TOTAL PRESUPUESTO C/IVA.....	1.375.880,16 €

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:
UN MILLON TRESCIENTOS SETENTA Y CINCO MIL OCHOCIENTOS OCHENTA EUROS CON DIECISEIS CÉNTIMOS

17 de Septiembre de 2016

LA PROPIEDAD

LA DIRECCIÓN TÉCNICA

LA CONSTRUCTORA

Fdo:

Fdo:

Fdo:

Conclusiones

No se ha obtenido ningún empate en ninguna de las 3 zonas. Tanto si el peso mayor se le asigna a la seguridad como a la estética, como a los costes resulta elegida la alternativa 1 (asfalto poroso). Se puede concluir que el asfalto poroso es la alternativa adecuada para los 14 aparcamientos considerados, y en consecuencia se procurará su instalación. Por lo tanto, podrían ejecutarse obras de sustitución del firme por uno de otro tipo en los aparcamientos del campus de Las Llamas, tal que coincida el tipo de pavimento con el resultante del proceso de selección multicriterio. Se observa que la variación de los pesos llevada a cabo en este TFG no altera el resultado final.

Sin embargo, la preponderancia de una única solución sobre el resto puede resultar contraproducente a la hora de la toma de decisión.

Así, existen criterios adicionales que deben tenerse en cuenta al evaluar el conjunto de los 14 aparcamientos, como la posible monotonía de acabado que puede llegar a generarse, o la excesiva apuesta que puede suponer elegir una única superficie, con todos sus inconvenientes, en lugar de diversificar la apuesta y el riesgo entre varias superficies.

Por tanto, si bien se recomienda el uso de asfalto poroso en caso de tener que sustituir los pavimentos existentes y fundamentalmente también para la ejecución de los viales de acceso, si tuviésemos que ejecutar de nuevo los aparcamientos, la mejor opción, sin irnos necesariamente a la más cara de hormigón poroso, sería la combinación de superficies permeables menos conocidas: césped reforzado y adoquines. Así, se decide plantear la construcción de dos secciones distintas, con pavimentos de césped reforzado y adoquines, cuyos beneficios combinados pueden superar los beneficios asociados al asfalto poroso o al hormigón poroso, dando respuesta a los condicionantes de conjunto.

Por último, mencionar que la complicación constructiva asociada a la ejecución de firmes de césped reforzado y adoquines en disposición permeable, es mucho mayor que en el caso de mezcla bituminosa porosa, siendo este un material de construcción más empleado. Así, tiene más interés detallar las prescripciones técnicas del césped reforzado y los adoquines, que del asfalto poroso.

Una futura línea de trabajo puede ser la evaluación de las alternativas para la construcción de firmes permeables mediante otros métodos multicriterio distintos al propuesto aquí (AHP, DEA, TOPSIS, etc.), que permitan incluir criterios de conjunto que faciliten la toma de decisión.

Referencias

- Agüero Lanza, J. (06 de 2015). Estudio de alternativas para la construcción de aparcamientos de firmes permeables en la UC. *TFG en Ingeniería Civil*. Santander: UCrea.
- B.K., F. (2005). *Porous pavements*. Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis. *Integrative Studies in Water Management and Land Development*;6. Series Editor Robert L. France.
- Caltrans. (2007). *Treatment BMP Technology Report*. California Department of Transportation (Caltrans) Division of Environmental Analysis. Final Report. CTSW-RT-070167.02.02 April.
- CIRIA. (2001). *Sustainable urban drainage systems, best practice manual for England, Scotland, Wales and Northern Ireland*; Edición de Noviembre 2001. London.
- GITECO UC. (s.f.). *ASISTENCIA TÉCNICA. DISEÑO DE PAVIMENTOS PERMEABLES EN LOS APARCAMIENTOS DE MUÑIGOS Y DE REPELAO, ASTURIAS*.
- J., D. S. (2002). "Pavimentos porosos de hormigón: una opción para mitigar los efectos de las aguas lluvias". *Revista BIT*, Junio.
- Jato-Espino, D., Castillo-López, E., Rodríguez-Hernández, J., & Canteras-Jordana, J. C. (2014). *A review of application of multi-criteria decision making methods*.
- Miguel Ángel Calzada Pérez, Á. V. (2013). *ANOTACIONES BÁSICAS DE CAMINOS:FIRMES DE CARRETERAS*.
- P.G., H. (1991). "Permeable Pavements". Report SR 264. Hydraulic Research Ltd. Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Perales García, M. (2014). *Construcción del aparcamiento de firmes permeables del Parque de Las Llamas, Santander*. Santander.
- Pratt C.J., W. S. (2002). *Source control using constructed pervious surfaces. Hydraulic, structural and water quality performance issues*. London.
- Rodríguez Hernández, J. (2008). ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SECCIONES PERMEABLES DE FIRMES PARA VÍAS URBANAS CON UN COMPORTAMIENTO ADECUADO FRENTE A LA COLMATACIÓN Y CON LA CAPACIDAD PORTANTE NECESARIA PARA SOPORTAR TRÁFICOS LIGEROS. Santander.
- T., M. (2006). *Pavingexpert CD-rom*. <http://www.pavingexpert.com/pavindex.htm> [última fecha de consulta 24/06/2006].
- TRIAX. (2006). *Informe geotécnico. Condiciones geotécnicas existentes en la ejecución del "Parque Atlántico" en la vaguada de "Las Llamas" en Santander (Cantabria)*. Maliaño (Cantabria).

Zorrilla Martínez, G. (2015). *ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE*. UCrea.