



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ACONDICIONAMIENTO DE CARRETERA DE  
ACCESO PARA COLEGIO DE FORMACION  
PROFESIONAL

Autor: Lourdes Keller Rodríguez

Director: Miren Tellería Ajuriaguerra

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Acondicionamiento de carretera de acceso para colegio de formación profesional en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2019/20 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.  
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Lourdes Keller Rodríguez

Fecha: 12/ 07/ 2020

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Miren Tellería Ajuriaguerra

Fecha: 12/ 07/ 2020





**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ACONDICIONAMIENTO DE CARRETERA DE  
ACCESO PARA COLEGIO DE FORMACIÓN  
PROFESIONAL

Autor: Lourdes Keller Rodríguez

Director: Miren Tellería Ajuriaguerra

Madrid



# **ACONDICIONAMIENTO DE CARRETERA DE ACCESO PARA COLEGIO DE FORMACION PROFESIONAL**

**Autor: Keller Rodríguez, Lourdes.**

Director: Tellería Ajuriaguerra.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

El proyecto consiste en el estudio y diseño de una carretera que conecte el colegio de formación profesional con el poblado. Se trata de un proyecto de colaboración con la organización Child Future Africa y la Fundación de Ingenieros de ICAI. El objetivo del proyecto es, no solo mejorar las condiciones del poblado, si no enseñarles nuevas técnicas de construcción de carreteras, así como su mantenimiento.

**Palabras clave:** Carretera, Zimbabwe, Suelo, Arcilloso, Drenaje, Cuneta, Peraltado, Estabilización, Cal.

### **1. Introducción**

Zimbabwe es un país del Sur de África marcado por una extremada pobreza, una grave crisis sanitaria debida al VIH y la desnutrición, la ausencia de productos de primera necesidad y problemas políticos.

El objetivo de la mejora de la carretera entre el poblado y el colegio de formación profesional es mejorar las condiciones de vida en las que viven los habitantes del poblado proporcionándoles acceso a una educación de calidad y enseñándoles la técnica para construir carreteras estables. Asimismo, se desea impulsar a la comunidad al desarrollo asegurándoles un futuro mejor.

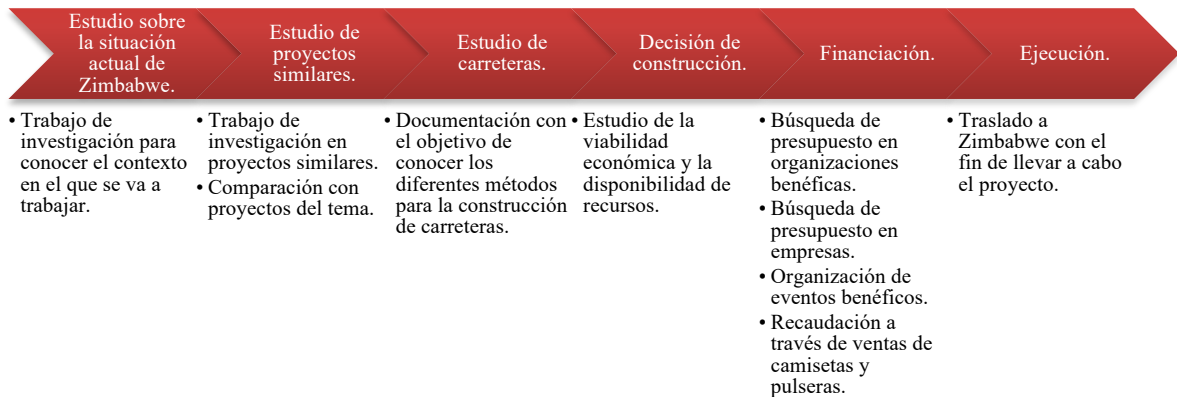
### **2. Definición del Proyecto**

El proyecto consiste en habilitar la carretera entre el colegio y el poblado para proporcionar seguridad a los habitantes. Actualmente el camino es de difícil acceso debido a la inestabilidad de los suelos. Esta inestabilidad es causada por los suelos arcillosos de la zona y las abundantes lluvias durante la temporada húmeda. Por lo tanto,

se buscará un sistema de drenaje que evacúe las aguas de la carretera y una mejora del suelo para evitar que la plasticidad de las arcillas cree grietas y huellas en el camino.

Por otra parte, será importante crear un sistema por el que los habitantes aprendan la técnica de construcción de carreteras para fomentar su desarrollo en el futuro, así como el estudio de la viabilidad económica del proyecto.

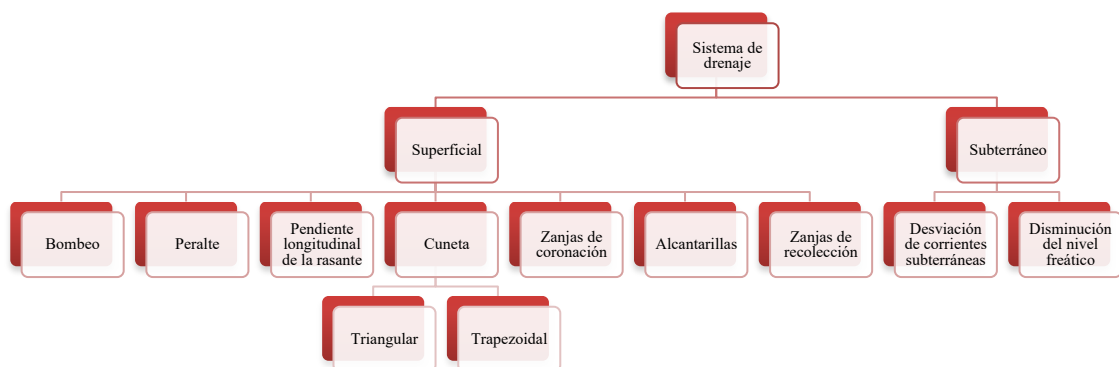
A continuación, se expone el método para la realización del proyecto.



### 3. Descripción del sistema.

Zimbabwe se caracteriza por las elevadas lluvias en la estación húmeda y un suelo muy arcilloso que crean inestabilidades en el terreno que dificultan el tránsito normal de los vehículos, e incluso de las personas. Por ello, en este documento se proponen soluciones para la mejora de los suelos.

En primer lugar, se propone un sistema de drenaje cuyo objetivo es evacuar la escorrentía superficial. En este punto se estudian los diferentes sistemas de drenaje que se exponen a continuación.





Para simplificar el diseño, sin comprometer la eficacia del sistema se decide realizar un sistema de drenaje que cuente con un peralte del 5 % en toda la carretera. Este peralte desviará las aguas fuera de la calzada con el fin de que estas lleguen a las cunetas. Una vez en las cunetas, las aguas serán dirigidas fuera de la carretera evitando así las inundaciones.

Por otra parte, con el fin de mejorar la calzada se estudian diversas técnicas para la construcción de carreteras no pavimentadas entre las que se incluyen las siguientes:

- Mejora de la capa de afirmado.
- Macadam granular.
- Estabilización granulométrica.
- Estabilización con cal.
- Estabilización con cemento.
- Imprimación reforzada bituminosa.

Debido al reducido presupuesto y la dificultad para acceder a los recursos, se propone como diseño principal la mejora de la subrasante mediante grava para así aumentar la resistencia del terreno con una posterior estabilización mediante cal de la capa de afirmado. En el caso de que hubiese problemas de presupuesto, se propone, en lugar de la estabilización con cal, una imprimación reforzada bituminosa, que proporciona estabilidad en la capa de rodadura.

#### **4. Conclusiones**

Al tratarse de un proyecto de cooperación, el presupuesto con el que se cuenta no es muy elevado y los recursos con los que se cuentan son escasos. Por esto motivo, el diseño final debe ser sencillo, empleando maquinaria simple y materiales de fácil acceso. En este contexto, y tras analizar el presupuesto que supondría cada una de las técnicas estudiadas se elige la elaboración de una carretera con un sistema de drenaje que evacúa las aguas a través del peralte hacia las cunetas. Por otra parte, en cuanto a la calzada, se mejorará mediante la adición de gravas a la subrasante y la estabilización con cal de los surcos por los que pasarán las carreteras de los vehículos.



# **ENHANCEMENT OF THE ACCESSING ROAD TO A HIGHER EDUCATION CENTRE**

**Author: Keller Rodríguez, Lourdes.**

Supervisor: Tellería Ajuriaguerra, Miren.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **ABSTRACT**

The Project consists of the study and design of a road that connect the school with the town. It is a collaborative project made with the collaboration between the organization Child Future Africa and the Fundación Ingenieros de ICAI. The objective of the project is, not only to improve the conditions of the town, but also to teach locals new road construction techniques, as well as their maintenance.

**Keywords:** Road, Zimbabwe, Soil, Clay, Drainage, Ditch, Camber, Stabilization, Cal.

### **1. Introduction.**

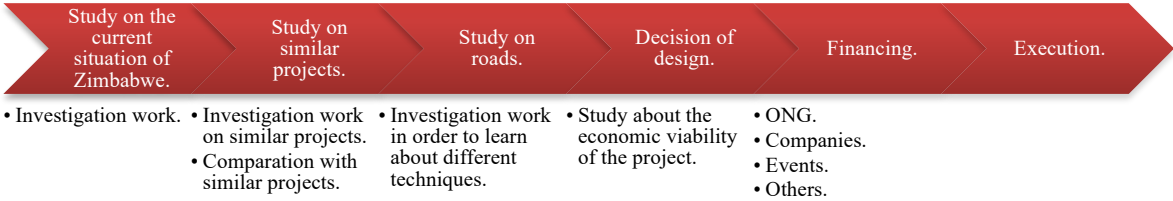
The project consists of enabling the road between the school and the town to provide security for the inhabitants. Currently the path is difficult to access due to the instability of the soils. This instability is caused by the clay soils of the area and the abundant rains during the wet season. Therefore, a drainage system will be sought that evacuates the waters of the road and an improvement of the soil to prevent the plasticity of the clays from creating cracks and tracks in the road. On the other hand, it will be important to create a system by which the inhabitants learn the road construction technique to promote their development in the future, as well as the study of the economic viability of the project. The method for carrying out the project is explained below.

### **2. Definition of the project.**

The project consists of enabling the road between the school and the town to provide security for the locals. Currently, is difficult to access to the road due to the instability of the soils. This instability is caused by the clay soils of the area and the abundant rains during the wet season. Therefore, a drainage system will be sought in order to evacuate the waters of the road and improve the characteristics of the soil to reduce the plasticity

On the other hand, it is important to create a system in which the locals learn the road construction technique to promote their development in the future. Also, it is necessary to study the economic viability of the project.

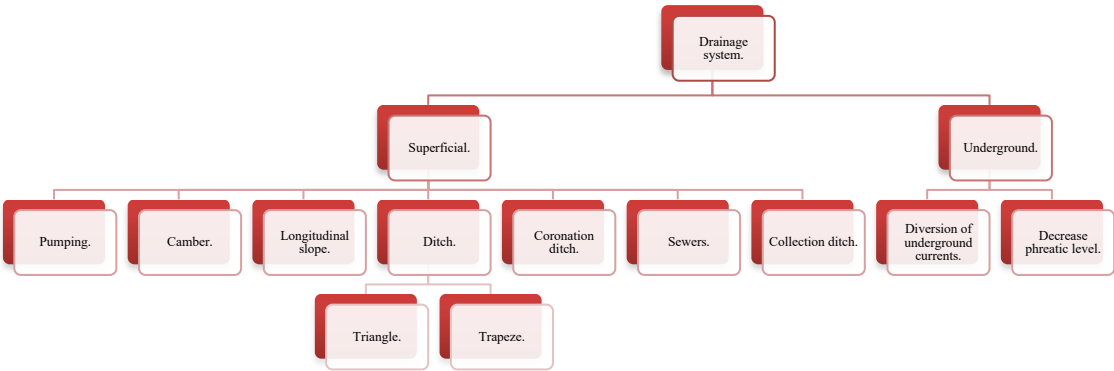
The method for carrying out the project is explained below.



**3. Description of the system.**

Zimbabwe is characterized by high rains in the wet season and very clayey soil creating instabilities in the terrain that hinder the normal transit of vehicles, and even people. Therefore, this document proposes solutions for soil improvement.

Firstly, a drainage system is proposed whose objective is to evacuate surface runoff. At this point, the different drainage systems are discussed below.



To simplify the design, without compromising the efficiency of the system, it is decided to make a drainage system that has a 5% camber on the entire road. This camber will

divert the waters out of the road in order to reach the ditch. Once in the ditch, the waters will be directed off the road.

On the other hand, in order to improve the roadway, various techniques for the construction of unpaved roads are studied, including the following:

- Affirmed layer.
- Macadam.
- Grain stabilization.
- Clay stabilization.
- Cement stabilization.
- Bituminous reinforced primer.

Due to the reduced budget and the difficult access to resources, the improvement of the subgrade by gravel is proposed as the main design in order to increase the resistance of the ground with a subsequent stabilization by lime of the bedding layer. In case of budget problems, instead of lime stabilization, a bituminous reinforced primer is proposed.

#### **4. Conclusion**

As it is a cooperation project, the budget available is not very high and the resources available are scarce. For this reason, the final design must be simple, using simple machinery and easily accessible materials. In this context, and after analyzing the budget that each of the techniques studied would entail, the creation of a road with a drainage system that evacuates the waters through the camber to the gutters is chosen. On the other hand, regarding the roadway, it will be improved by adding gravel to the subgrade and stabilizing with lime the furrows through which the roads of the vehicles will pass.



## Índice de la memoria

<b>Capítulo 1. introducción y planteamiento.</b>	<b>7</b>
1.1 Introducción.	7
1.2 Contexto de la República de Zimbabwe.	8
1.2.1 Contexto geográfico y social.	8
1.2.2 Contexto político.	9
1.2.3 Contexto económico.	10
1.3 Motivación del Proyecto.	11
1.4 Metodología.	11
<b>Capítulo 2. Diseño geométrico de la carretera.</b>	<b>14</b>
2.1 Introducción.	14
2.2 Diseño geométrico.	15
2.2.1 Distancia de visibilidad.	15
2.2.2 Alineamiento horizontal.	16
2.2.3 Alineamiento vertical.	18
2.2.4 Sección transversal.	18
2.3 Hidrología y drenaje.	20
2.3.1 El clima en Zimbabwe. Las precipitaciones.	20
2.3.2 Hidrología y cálculos hidráulicos.	21
2.3.3 Drenaje superficial.	23
2.3.4 Drenaje subterráneo.	28
2.3.5 Diseño geométrico final.	29
<b>Capítulo 3. ESTUDIO DE LOS SUELOS.</b>	<b>32</b>
3.1 Introducción.	32
3.2 Características geológicas.	32
3.3 El terreno.	33
3.4 Características para el diseño de los suelos.	33
3.4.1 Tráfico.	34
3.4.2 Subrasante.	35
3.5 Capas de la carretera.	40
3.5.1 Compactación de los suelos.	40

3.5.2 Métodos para la construcción de carreteras sin pavimentar. ....	41
3.5.3 Diseño de los suelos. ....	48
<b>Capítulo 4. Modelo a implantar y proceso. ....</b>	<b>51</b>
4.1 Decisión de implantación. ....	51
4.2 Proceso de implantación. ....	51
4.3 Mantenimiento de la carretera. ....	58
4.4 Medidas de precaución. ....	58
4.5 Mejoras de la carretera. ....	59
<b>Capítulo 5. Plan de Ejecución. ....</b>	<b>62</b>
5.1 Introducción. ....	62
5.2 Estabilización mediante cal. ....	62
5.3 Estabilización con cal en los surcos de las ruedas. ....	67
5.4 Imprimación reforzada bituminosa. ....	68
<b>Capítulo 6. Presupuesto ....</b>	<b>73</b>
6.1 Presupuesto del proyecto. ....	73
6.1.1 Construcción de la carretera mediante estabilización con cal. ....	74
6.1.2 Construcción de la carretera únicamente estabilizando los surcos por los que circularan las ruedas. ....	76
6.1.3 Imprimación reforzada bituminosa. ....	78
6.1.4 Imprimación reforzada bituminosa en los surcos de las ruedas. ....	79
6.2 Viabilidad económica. ....	80
6.3 Sostenibilidad económica. ....	81
<b>Capítulo 7. Conclusiones. ....</b>	<b>83</b>
7.1 Diseño de la carretera. ....	83
7.2 Metodología de trabajo. ....	84
7.3 Presupuesto. ....	84
<b>Capítulo 8. Bibliografía. ....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO I 90</b>	
Fin de la pobreza. ....	91
Educación de calidad. ....	91
Trabajo decente y crecimiento económico. ....	91



Industria, innovación e infraestructura.....	92
Ciudades y comunidades sostenibles.....	92

***ANEXO II 93***

***ANEXO III 95***

## *Índice de figuras*

Figura 1. Situación geográfica de Zimbabwe. Fuente: “Google Imágenes”.....	8
Figura 2. Lluvia mensual promedio durante un año en la capital de Zimbabwe. Fuente: Weather Spark. (Weather Spark, s.f.).....	21
Figura 3. Espesor de la capa de afirmado en función del número de repeticiones de EE y la calidad del terreno. ....	39
Figura 4. Densidad del terreno en función de la Humedad. ....	41
Figura 5. Capas de la carretera. ....	49
Figura 6. Capas de la carretera. ....	49
Figura 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	90

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Relación entre la velocidad directriz y el factor de fricción. ....	17
Tabla 2. Ancho de la calzada en función de IMDA y la velocidad directriz. ....	19
Tabla 3. Coeficiente de escorrentía. ....	23
Tabla 4. Dimensiones de las cunetas en función de las precipitaciones. ....	25
Tabla 5. Dimensiones de las cunetas. ....	29
Tabla 6. Ejes equivalentes en función del tipo de eje del vehículo. ....	34
Tabla 7. Granulometría. Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008) .....	36
Tabla 8. Índice de plasticidad. ....	37
Tabla 9. Equivalente de arena. ....	37
Tabla 10. Índice de grupo. ....	38
Tabla 11. Presupuesto para la construcción de la carretera mediante estabilización con cal. ....	74
Tabla 12. Presupuesto para la construcción de carreteras mediante estabilización con cal en los surcos de las ruedas. ....	76
Tabla 13. Presupuesto para la construcción de la carretera mediante imprimación reforzada bituminosa. ....	78
Tabla 14. Presupuesto para la construcción de la carretera mediante imprimación reforzada bituminosa en los surcos de los neumáticos. ....	79
Tabla 16. Clasificación de los suelos. ....	93



## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO.**

### ***1.1 INTRODUCCIÓN.***

Zimbabwe es uno de los países más pobres del sur de África. La situación actual del país se debe principalmente al estancamiento económico, el aislamiento internacional del país, la ausencia de divisas y la mala gestión política. Por otra parte, además de los problemas político-económicos, Zimbabwe sufre una crisis sanitaria causada, principalmente, por el VIH, la desnutrición infantil a causa de la falta de alimentos y otras enfermedades y epidemias como la malaria y actualmente el COVID-19, razón por la cual el país se encuentra confinado.

Con el fin de acabar con la mala situación del país surgen iniciativas como Child Future Africa, una ONG local cuyo objetivo es el desarrollo del país a través de la educación de la población. Para ello, colaboran con colegios en diferentes comunidades de Zimbabwe y cuentan con orfanatos en los que se combina ambiente familiar y actividades agrícolas con el fin de que los niños puedan cubrir sus propios costes.

Desde hace ya varios años, la Universidad Pontificia de Comillas colabora, a través de los Directores de Trabajo de Fin de Grado, con Child Future Africa. Los estudiantes de último año de carrera se desplazan a Zimbabwe con el fin de realizar sus Trabajos de Fin de Grado en proyectos de colaboración.

Este proyecto en concreto se basa en la adaptación de una carretera de acceso para el colegio de formación profesional que se realizó el año pasado. Actualmente, el acceso al colegio desde el poblado es muy difícil debido al mal estado en que se encuentra el camino y el objetivo de este proyecto es restaurar la carretera para garantizar la seguridad de los habitantes del poblado y contribuir a su desarrollo.

## 1.2 CONTEXTO DE LA REPÚBLICA DE ZIMBABWE.

### 1.2.1 CONTEXTO GEOGRÁFICO Y SOCIAL.

Zimbabwe se encuentra en el sur del continente africano, concretamente entre el río Zambeze, las cataratas Victoria y el río Limpopo y carece de costas; limita al noroeste con Zambia, al este con Mozambique, al sur con Sudáfrica y al suroeste con Botsuana.



Figura 1. Situación geográfica de Zimbabwe. Fuente: "Google Imágenes".

Zimbabwe es un país que guarda muy buenas relaciones con sus países vecinos. En cuanto a importaciones y exportaciones, el principal contribuyente es Sudáfrica, aunque en los últimos años se observa un aumento de la economía asiática en el país, en especial del mercado chino. Este último acercamiento económico se debe, en parte, al aislamiento internacional del Gobierno de Mugabe y las complicadas relaciones con Europa.

A pesar de encontrarse en una zona tropical, el clima está moderado por la altitud; los inviernos son secos y los veranos húmedos y la temperatura media anual es de 25 °C. Su situación geográfica lo convierte en un país marcado por las sequías e inundaciones.

Zimbabwe es un país que cuenta con materias primas y terrenos que explotar, pero debido a la mala gestión económica y política y los numerosos desastres naturales, la población sufre una grave crisis alimentaria por la escasez de alimentos. Según datos de UNICEF, la desnutrición crónica afecta a grandes sectores de la población. Por otra parte, más de 1.500.000 personas carecen de acceso al agua potable y a instalaciones de saneamiento ambiental, lo que provoca brotes de cólera por todo el país. Otro de los motivos de la crisis sanitaria que sufre el país y el alto porcentaje de personas que viven con VIH/SIDA (30% de la población adulta) y los miles de muertes que causa esta enfermedad.

Demográficamente, Zimbabwe tiene más de 12 millones de habitantes, compuesta por una mayoría de población negra (98,8%). La grave crisis de país ha provocado una gran emigración a otros países.

Los idiomas del país son el inglés, el shona y el ndebele, aunque existen también diferentes dialectos de tribus. Respecto a la religión, un 63% de la población cree en una mezcla entre el cristianismo y creencias indígenas, un 17% son católicos, un 11% siguen las creencias indígenas únicamente y solo un 1% de la población son musulmanes.

A pesar de todos los problemas del país y la grave crisis que sufre el mismo desde hace ya años, gracias a la gran inversión en educación, Zimbabwe es uno de los países con mayor tasa de alfabetización de adultos de África.

### **1.2.2 CONTEXTO POLÍTICO.**

Zimbabwe fue ocupado por los ingleses en 1885 cuando recibió el nombre de *Rhodesia*, quedando dividida en Rhodesia del Norte y Rhodesia del Sur. Rhodesia del norte, más desarrollada, se independizó en 1963 y pasó a ser la actual Zambia. Rhodesia del sur, al ser gobernada por mayoría blanca, no obtuvo la independencia oficialmente hasta 1980 cuando tomó el nombre de Zimbabwe.

En 1987 se establece en Zimbabwe un régimen presidencial, en el que es elegido Robert Mugabe como jefe de estado. Su gobierno se prolongó durante 37 años. En un primer momento Mugabe fue considerado el héroe de la independencia, pero fue su política marcada por fraudes electorales y una mala gestión económica la que llevó al país a la pobreza. En

este contexto Mugabe fue acusado de ser el responsable de la crisis del país y aumentó la oposición contra su Gobierno.

En 2017 la tensa situación del país llevó al ejército a alzarse. Mugabe dimitió y fue sustituido por Emmerson Mnangagwa, antiguo vicepresidente y actual presidente de La República de Zimbabwe.

### **1.2.3 CONTEXTO ECONÓMICO.**

Zimbabwe se encuentra en una fase de estancamiento económico debido, principalmente, a los siguientes problemas: la hiperinflación, la falta de divisas y la escasez de provisiones y artículos. Las decisiones políticas agravan la crisis económica y la situación de pobreza y empeoran la crisis sanitaria que sufre el país.

La crisis económica que sufre actualmente el país se remonta al Gobierno de Mugabe. En 2000 Mugabe expropió las tierras a los agricultores blancos para que fueran dirigidas por partidarios de su Gobierno que, por su falta de experiencia en el sector agrario y las sucesivas sequías, provocaron una disminución de la producción y, por consiguiente, un descenso del empleo y un aumento de los precios. Esta medida a su vez provocó un estancamiento en el sector de las manufacturas que necesita de la agricultura para obtener las materias primas. Esta nefasta situación económica se extendió hasta 2009, año en el que la economía comenzó a recuperarse gracias a un sistema de divisas múltiples. Este crecimiento económico terminó cuando en 2015 el país volvió a entrar en una época de recesión debido a la alta tasa de inflación del país. En 2018 el país alcanzó el 31% de inflación, la tasa más alta de su historia. Esta elevada inflación es la que ha provocado los estragos que hay hoy en día en el país: los ingresos de los trabajadores han disminuido considerablemente, algunos incluso sufren el robo de sus salarios, hasta el punto en que no pueden acceder a necesidades básicas. Por otra parte, la mayoría de la población no cuenta con divisas lo que imposibilita el pago de las necesidades.

Por otra parte, en 2019 el Gobierno subió el precio del combustible en un 158% y ante la grave escasez de divisas que sufre el país decidió en 2019 recuperar el dólar zimbabuense con el fin de poder cubrir el déficit público imprimiendo billetes. Este dólar es el mismo que llevo hacer años al país a la mayor tasa de inflación del mundo hace ya 10 años. Ambas



decisiones provocarán una hiperinflación, como ya se ha visto varias veces en la historia del país.

Por otra parte, el control del gobierno sobre los precios y la ausencia de sector privado en el comercio provocan que bienes necesarios no sean alcanzables por la población.

### ***1.3 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.***

El objetivo principal del proyecto es mejorar las condiciones de vida de la población de Kazai. Con la adaptación de la carretera, los estudiantes podrán acceder al colegio con una mayor facilidad y seguridad por lo que, en parte, se contribuirá a su formación como personas asegurándoles un futuro mejor.

La motivación de este proyecto nace del deseo de poner lo aprendido durante la carrera al servicio de los demás. El fin de este proyecto no es únicamente ayudar a que los alumnos puedan ir de manera segura al colegio, sino enseñar a la población a mantenerla e inspirarles por si en un futuro necesitan habilitar otro camino.

### ***1.4 METODOLOGÍA.***

El procedimiento que se seguirá para realizar el proyecto seguirá los siguientes pasos:

*I. Estudio sobre la situación actual de Zimbabwe.*

En primer lugar, se realizará un estudio sobre la situación actual del país para poder aplicar estos conocimientos al proyecto.

*II. Estudio de proyectos similares.*

Para poder realizar el proyecto, se estudiará la existencia de proyectos de adaptación de carreteras en terrenos similares que sirvan de apoyo, no solo para la redacción del

proyecto, si no para la consecución de este en el país, observando ventajas y desventajas y posibles inconvenientes que hayan podido surgir.

### *III. Estudio de carreteras.*

Para poder realizar el diseño de la carretera es necesario tener un conocimiento previo sobre las mismas, por lo que se estudiarán los el terreno, los elementos de una carretera y los métodos para su construcción.

### *IV. Decisión de construcción.*

Una vez conocidos los métodos de construcción y valoradas las circunstancias económicas y de sostenibilidad se decidirá el método final de construcción que se llevará acabo.

### *V. Financiación.*

Para poder adaptar la carretera, será necesaria una financiación que se realizará a lo largo de todo el curso con iniciativas como venta de camisetas y pulseras o fiestas de recaudación, además de la financiación por parte de las empresas.

### *VI. Ejecución.*

En un primer lugar el proyecto se iba a llevar acabo en el verano de 2020 pero debido a la crisis sanitaria se traslada al verano de 2021.



## Capítulo 2. DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA CARRETERA.

### *2.1 INTRODUCCIÓN.*

Con el fin de diseñar una carretera en las mejores condiciones posibles, es necesario evaluar algunos parámetros que servirán para determinar las características de esta. Al tratarse de una carretera de bajo volumen de tránsito situada en una zona donde los recursos son limitados, se estudiará la importancia de dichos parámetros y se decidirá si necesario tenerlos en cuenta.

Los parámetros básicos para el diseño son los siguientes:

- **Estudio de la demanda.**

Para conocer la demanda de tránsito es necesario conocer tanto el Índice Medio Diario Anual de Tránsito (IMDA) como el peso de los vehículos que van a circular por la carretera, teniendo en cuenta las variaciones horarias, diarias y estacionales de la demanda.

Al tratarse de una carretera poco transitada, el proyecto no se verá muy afectado por las variaciones de la demanda por lo que no se tendrán en cuenta a la hora de diseñar la carretera. Por otra parte, para evitar la aparición de surcos y posibles agrietamientos, se diseñará la carretera considerando la posibilidad de que vehículos de gran peso circulen por esta.

- **Velocidad de diseño.**

La carretera comunica el poblado con el colegio de formación profesional. Se trata de un camino de apenas 1 km, con dos tramos de diferente pendiente. El primer tramo es una curva a la derecha con una pendiente de aproximadamente un 20% y el segundo es una

curva a la izquierda con una pendiente del 5%. Con estas características, se determina que la velocidad máxima de la vía será 30 km/h y se tomará como velocidad de diseño.

- **Sección transversal.**

En el diseño de la carretera son muy importantes las dimensiones transversales de la misma, debiéndose tener en cuenta la velocidad de diseño, la presencia de curvas, el agua a drenar...

En el caso de este proyecto únicamente es necesario un carril, por lo que, para hacerlo más sencillo, la calzada tendrá un ancho de 5 m en todo su recorrido. Más adelante en el documento, se especificará la presencia de otros elementos en el perfil transversal como pueden ser cunetas, zanjas, badenes..., así como otras características fundamentales para el drenaje como es el peralte o bombeo.

- **Superficie de rodadura.**

Al tratarse en una carretera en un medio rural, se diseñará una carretera no pavimentada como se explicará más adelante.

Todos estos parámetros se utilizarán a lo largo del proyecto para poder determinar características de este, siempre con la intención de crear una carretera sostenible y que se adapte a la situación económica, por lo que se intentará emplear productos locales.

## **2.2 DISEÑO GEOMÉTRICO.**

### **2.2.1 DISTANCIA DE VISIBILIDAD.**

La distancia de visibilidad es la distancia mínima necesaria para que un conductor visualice un objeto que se encuentra en su trayectoria antes de alcanzarlo.

En general, a la hora de diseñar una carretera, se tienen en cuenta tres distancias de visibilidad: visibilidad de parada, visibilidad de adelantamiento y visibilidad para la entrada a otra carretera.

En este proyecto, al tratarse de una carretera en una zona rural, la distancia de visibilidad requerida para entrar a otra carretera no es necesaria; por otra parte, como es una carretera de bajo volumen de tránsito, en el que la velocidad máxima será de aproximadamente 30 km/h, las distancias de visibilidad de parada y de adelantamiento tampoco será necesario tenerlas en cuenta a la hora de diseñar la carretera.

### **2.2.2 ALINEAMIENTO HORIZONTAL.**

El alineamiento horizontal está claramente determinado por las condiciones del relieve. Es importante que el alineamiento horizontal sea tal que se pueda mantener la velocidad de diseño constante a lo largo de la carretera.

En este proyecto, el medio marca que la carretera tenga dos curvas, una a la derecha y otra a la izquierda. A la hora de diseñar, hay que tener en cuenta que estas curvas deben tener un radio mínimo. Por otra parte, la posibilidad de eliminar estas curvas haciendo una carretera completamente horizontal será rechazada por el costo que puede suponer y las alteraciones en el medio; además, las curvas contribuyen a que el conductor esté alerta. En el anexo II, el plano 1 muestra una idea aproximada de como será la carretera.

En las curvas horizontales, para contrarrestar la acción de la fuerza centrífuga, se realiza una sobreelevación de la parte exterior de la curva denominada peralte. Así, con la velocidad de diseño, el peralte máximo ( $p_{\text{máx}}$ ) y el factor máximo de fricción ( $f_{\text{máx}}$ ), se puede calcular el radio mínimo que debe tener la curva.

Debido a que es una carretera de bajo volumen de tránsito con una velocidad directriz de 30 km/h no es necesario que el peralte sea muy elevado por lo que se elegirá un peralte de 5% y el factor máximo de fricción, según la tabla, será 0,17.

Velocidad directriz (km/h)	$f_{m\acute{a}x}$
20	0,18
30	0,17
40	0,17
50	0,16
60	0,15

*Tabla 1. Relación entre la velocidad directriz y el factor de fricción.*

*Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

Asimismo, el radio mínimo que deben tener las curvas se calcula empleando la ecuación (1).

$$R_{m\acute{i}n} = \frac{V^2}{127 (0.01 * p_{m\acute{a}x} + f_{m\acute{a}x})} = \frac{(30)^2}{127 (0.01 * 5 + 0.17)} = 32,21 \text{ m}$$

Por lo tanto, a la hora de diseñar la carretera, para garantizar la seguridad vial, se comprobará que ambas curvas tengan un radio superior a 33 m. En caso de no ser así se aumentará el peralte. Este punto únicamente se podrá ver una vez se llegue al país y se puedan comprobar las características del medio.

Las curvas horizontales tienen peralte, que no solo contribuye a contrarrestar la fuerza centrífuga, sino que también tiene función de drenaje. En los tramos horizontales, la función de drenaje de las aguas superficiales se realiza mediante bombeo. El bombeo es la inclinación transversal desde el centro de la carretera hacia los bordes de esta. En general suele ser del 2 o 3%, pero en este caso, como se verá más adelante en el capítulo, se elegirá un peralte del 5%.

Para pasar de la zona con inclinación desde el centro hacia ambos lados a la zona con inclinación únicamente hacia un lado, es necesaria una curva de transición, que tendrá una longitud comprendida entre los siguientes valores:

$$L_{m\acute{i}n} = 0.0178 \frac{V^3}{R} = 0.0178 \frac{30^3}{30} = 16.02 \text{ m}$$

$$L_{m\acute{a}x} = \sqrt{24 * R} = \sqrt{24 * 30} = 26.83 \text{ m}$$

Siendo  $R$  el radio de la curva horizontal en m y  $V$  la velocidad en km/h.

Por lo tanto, antes y después de la curva horizontal habrá una curva de transición de longitud de entre 16.02 m y 26.83 m, que servirá para transformar el bombeo en peralte y viceversa. En el anexo II se adjuntan los planos de la sección transversal que representan como será el trazado en el caso de las secciones horizontales, las secciones con curvas a la derecha y las secciones con curvas a la izquierda.

### **2.2.3 ALINEAMIENTO VERTICAL.**

El alineamiento vertical trata de la rasante del perfil longitudinal. En este proyecto, el alineamiento vertical de la carretera está muy marcado por la zona en la que se encuentra. En el tramo inicial de la carretera la pendiente es aproximadamente un 20%, mientras que en el resto del camino es del 5%. Estas inclinaciones se emplearán para el drenaje de la carretera, siendo innecesaria la adición de un aumento de la pendiente.

También es importante destacar que la rasante debe encontrarse por encima del terreno para así ayudar al drenaje superficial.

A la hora de diseñar carreteras también hay es importante el diseño de las curvas verticales, ya que influyen en la visibilidad del conductor. En este caso, como se ha considerado que la distancia de visibilidad no es realmente importante, las curvas verticales tampoco lo serán.

### **2.2.4 SECCIÓN TRANSVERSAL.**

En el diseño de la sección transversal se encuentran los siguientes elementos:

- Calzada.

Al tratarse de una carretera de bajo volumen de tránsito con velocidades medias no muy elevadas (30km/h), únicamente será necesario un carril en la calzada de ancho constante a lo largo de todo el camino, sin necesidad de ensanchar en las curvas. Por ello, gracias a la tabla, y teniendo en cuenta que IMDA es 20, dejando una zona para el adelantamiento



y el cruce y suponiendo que en algún momento circularán camiones o vehículos pesados, se puede elegir el ancho de la calzada igual a 5m.

IMDA Velocidad (km/h)	< 15		16 a 50		51 a 100		101 a 200	
	*	*	*	**	*	**	*	**
25	3,50	3,50	5,00	5,50	5,50	5,50	5,50	6,00
30	3,50	4,00	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	6,00
40	3,50	5,50	5,50	5,50	6,00	6,00	6,00	6,00
50	3,50	5,50	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
60	-	5,50	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

*Tabla 2. Ancho de la calzada en función de IMDA y la velocidad directriz.*

\* Calzada de un solo carril. \*\* Carreteras con predominio de tráfico pesado.

*Adaptado en formato de "Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito". (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

Como se ha mencionado con anterioridad, la calzada cuenta con un sistema de drenaje de aguas superficiales que consiste en bombeo en los tramos rectos y peralte en los tramos con curvas. Para simplificar el diseño, y la construcción en un futuro, en lugar de combinar los dos sistemas de drenaje, se elige únicamente el peralte a lo largo de toda la carretera. De esta forma, toda el agua se conduciría a un lado del camino, lo que hará que el proyecto sea, no solo más sencillo, sino más económico, al solo necesitar elementos de drenaje en uno de los bordes de la carretera.

- Bermas.

Las bermas son espacios que se dejan a ambos lados de la carretera de un ancho mínimo de 0.5 m. En este proyecto, únicamente se colocarán en el lado inferior del peralte y tendrán la misma inclinación que este.

- Plazoletas.

Las plazoletas son ampliaciones de la calzada que se colocan en carreteras de un solo carril, pero dos sentidos de circulación para facilitar el cruce o el adelantamiento entre

dos coches. En este proyecto, al ser una carretera de poco más de un kilómetro no muy transitada, será innecesaria la construcción de plazoletas.

Por tanto, el ancho total de la sección transversal será de 5.5 metros.

### **2.3 *HIDROLOGÍA Y DRENAJE.***

Uno de los puntos más importantes a la hora de diseñar una carretera es el sistema de drenaje. La finalidad de este sistema es, básicamente, mantener la estabilidad del pavimento, así como en la capa subsuperficial.

A la hora de diseñar el sistema de drenaje, deben tenerse en cuenta los siguientes puntos:

- Preservar la vegetación existente en los taludes que pueda haber, con el fin de que esta misma disminuya el caudal que pueda caer sobre la carretera.
- No intervenir en los sistemas de drenaje naturales con los que pueda contar la carretera.
- Desviar las aguas de las precipitaciones hacia el exterior de la carretera con el fin de que no penetre en las capas inferiores de la misma.
- Asegurar que el nivel freático se encuentre muy por debajo de la carretera para que no afecte a la misma por una posible penetración en sus capas inferiores.
- Evitar que las corrientes de agua erosionen la carretera.

#### **2.3.1 EL CLIMA EN ZIMBABWE. LAS PRECIPITACIONES.**

Uno de los factores determinantes en el diseño de una carretera es el clima.

En Zimbabwe se distinguen dos temporadas; la temporada de lluvias, que es caliente y mayormente nublada y la temporada seca, en la que apenas hay precipitaciones. Las temperaturas varían desde los 8°C hasta los 28°C.

Al tratarse de un terreno arcilloso, en la época de lluvias el agua podría dañar la carretera, volviéndose a la situación actual. Para prevenir esta situación, hay que estudiar las

precipitaciones máximas que pueden darse y diseñar un sistema de drenaje que evacúe las aguas.

En la figura, obtenida de la página web Weather Spark, se muestra la lluvia mensual promedio durante todo un año en la capital de Zimbabwe, Harare.

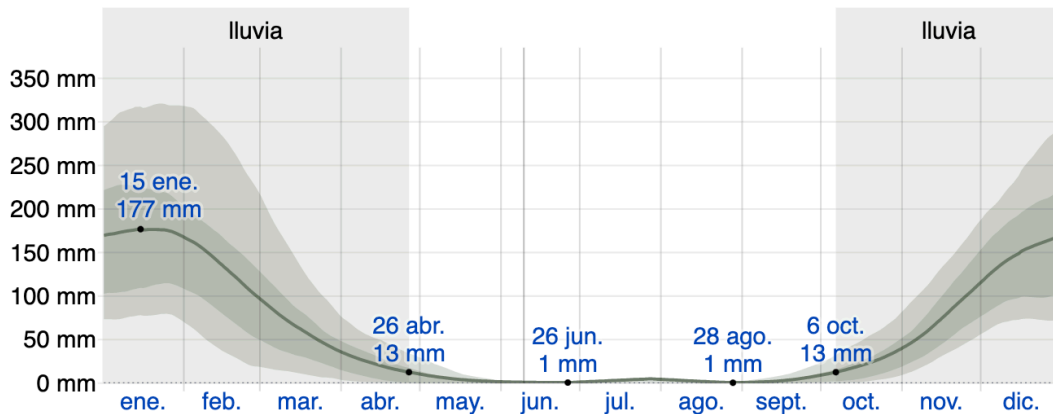


Figura 2. Lluvia mensual promedio durante un año en la capital de Zimbabwe. Fuente: Weather Spark.  
(Weather Spark, s.f.)

Según el gráfico anterior, las precipitaciones máximas son casi de 350 mm por día. Por lo tanto, a la hora de diseñar la carretera, se tomará este valor para los cálculos del caudal con el fin de drenar todas las aguas provenientes de las precipitaciones.

### 2.3.2 HIDROLOGÍA Y CÁLCULOS HIDRÁULICOS.

Para poder determinar las dimensiones de los elementos de drenaje superficial es necesario conocer las características hidrológicas de la zona (lagos, ríos, embalses...) en la que se encuentra la carretera, así como la información de las precipitaciones con la que se cuenta. La zona donde se va a construir la carretera se caracteriza por terrenos arcillosos por los que no pasa ningún río y no hay riesgo de inundación de embalses o lagos. Por lo tanto, estas características no definirán el sistema de drenaje de la carretera.

Por otra parte, Zimbabwe es un país muy caracterizado por sus abundantes precipitaciones en la época de lluvias, habiéndose registrado precipitaciones de casi 350 mm/h. Por lo tanto, la carretera debe contar con un sistema de drenaje capaz de evacuar un caudal superior al máximo registrado.

Al tratarse de una carretera de dimensiones no demasiado grandes, se considerará una cuenca pequeña por lo que el cálculo del caudal de diseño será el siguiente:

$$Q = C * I * A$$

La intensidad de precipitación pluvial máxima, previsible será de 350mm/h.

$$I = 350 \frac{mm}{h} * \frac{1 m}{1000 mm} * \frac{1 h}{3600 s} = 9,72 * 10^{-5} \frac{m}{s}$$

El área de la cuenca se calculará mediante la ecuación, teniendo en cuenta que el ancho de la carretera  $a = 5$  m y el largo que se va a tomar para estudiar cada tramo de evacuación es de 80 m.

$$A = 5 * 80 = 400 m^2$$

El coeficiente de escorrentía  $C$  depende de la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la pendiente del terreno y se puede conocer gracias a la tabla 3.

A pesar de ser un camino con tramos con diferentes pendientes, se calculará el caudal de diseño para la mayor pendiente, es decir, para una inclinación del 20%. El primer tramo tiene una inclinación del 20% sin vegetación y terreno semipermeable, por lo que el coeficiente de escorrentía es del 0,65.

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada > 50%	Alta 50 – 20 %	Media 20 – 8 %	Suave 8 – 1 %	Despreciable < 1 %
Sin vegetación	Impermeable	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
	Semipermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Permeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
Cultivos	Impermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Semipermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Permeable	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2
Pastos y vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45
	Semipermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Permeable	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15
Hierba y grama	Impermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Semipermeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
	Permeable	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
Bosques y vegetación densa	Impermeable	0,55	0,5	0,45	0,35	0,3
	Semipermeable	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25
	Permeable	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05

*Tabla 3. Coeficiente de escorrentía.*

*Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

Con todos estos datos se puede calcular el caudal de diseño:

$$Q = C * I * A = 0,65 * 9,72 * 10^{-5} * 400 = 0,0253 \frac{m^3}{s} = 25,3 \frac{L}{s}$$

### 2.3.3 DRENAJE SUPERFICIAL.

El drenaje superficial sirve para desviar las aguas de la carretera con el fin de mantener la carretera en buen estado, asegurando su durabilidad y la seguridad al circular sobre ella.

El drenaje superficial abarca el desvío de las aguas que caen sobre la superficie de la carretera, la evacuación de las aguas hacia cauces naturales y el retorno de los cauces naturales que se hayan visto afectados por la construcción de la carretera. Este último apartado no será necesario en este caso al no hacer ríos que crucen el camino.

A la hora de diseñar el sistema de drenaje de la carretera es necesario estudiar las diferentes posibilidades y comprobar si cumple los siguientes criterios:

Existencia de soluciones técnicas disponibles, así como el aprovechamiento de las soluciones naturales que ofrece el terreno.

Facilidad de obtención de los materiales para la formación de los elementos de drenaje, así como su fabricación y sostenibilidad.

### ***2.3.3.1 Elementos físicos del drenaje superficial.***

- Drenaje de la escorrentía superficial.

#### 1. Bombeo y peralte.

El bombeo es empleado en los tramos horizontales y se trata de la inclinación de la carretera desde el centro hacia ambos lados de la carretera con el fin de evacuar las aguas al exterior de la plataforma, mientras que el peralte es la inclinación de la carretera hacia un lado en los tramos con curvas para evacuar las aguas y contrarrestar la fuerza centrífuga.

En este proyecto, como ya se ha mencionado antes, se realizará un peralte del 5% a lo largo de toda la carretera con el fin ahorrar costes y realizar un proyecto más sencillo.

En el anexo II se puede observar la sección transversal en la que se indica el sentido de inclinación del peralte en función de las curvas que tenga la carretera.

#### 2. Pendiente longitudinal de la rasante.

En todas las carreteras se evitan los tramos completamente horizontales proyectando la rasante de estas zonas con una pendiente longitudinal del 0.5%.

En este proyecto, al haber pendiente longitudinal natural, no será necesario añadir una pendiente adicional.

### 3. Cunetas.

Las cunetas son elementos de drenaje que se colocan a los lados de la carretera. En este proyecto, se colocarán únicamente en el lado interior de las curvas y en el lado inferior del peralte.

Las dimensiones de la cuneta dependerán del caudal de diseño y deben ser siempre tales que la capacidad de la cuneta sea siempre mayor que el caudal de diseño. Pueden ser de sección triangular o de sección trapezoidal. A continuación, se estudian ambos casos para posteriormente elegir el más adecuado. Para ambos casos, las dimensiones de las cunetas no deben ser superiores a las que se muestran en la tabla.

Región	Profundidad (m)	Ancho (m)
Seca	0,20	0,50
Lluviosa	0,30	0,75
Muy lluviosa	0,30	1,20

*Tabla 4. Dimensiones de las cunetas en función de las precipitaciones.*

*Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

En el anexo II se adjuntan los planos correspondientes a los tipos de cunetas que se van a exponer a continuación.

#### ○ **Cuneta triangular.**

Las fórmulas que permiten calcular las dimensiones de una cuneta son las siguientes:

$$A = \frac{d * d}{2} + \frac{a * d}{2}$$
$$P = \sqrt{d^2 + d^2} + \sqrt{a^2 + d^2}$$

Al tratarse de una zona lluviosa se eligen los siguientes parámetros de diseño: profundidad de 0,4 y ancho de 0,75.

$$A = \frac{0,4 * 0,4}{2} + \frac{0,75 * 0,4}{2} = 0,23 \text{ m}^2$$

$$P = \sqrt{0,4^2 + 0,4^2} + \sqrt{0,75^2 + 0,4^2} = 1,42 \text{ m}$$

Una vez calculada el área y el perímetro de la cuneta, se puede calcular el caudal que puede circular por la cuneta transversal a través de la ecuación de Manning.

$$Q = \frac{1}{n} * A * \sqrt[3]{R^2} * \sqrt{S}$$

El radio hidráulico se calcula con el área y el perímetro de la cuneta.

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0,23}{1,42} = 0,16 \text{ m}$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, que dependerá del material de la cuneta o, en el caso de que se haya empleado algún revestimiento, del material de revestimiento.

Al tratarse de una zanja excavada en arcilla de manera irregular se elige un coeficiente de Manning, n de 0,04.

La pendiente S es la misma que la pendiente transversal de la carretera o peralte, es decir, 0,5%.

Sustituyendo en la ecuación se obtiene que el caudal de la cuneta es 26,9 L/s. Como el caudal de diseño es menor que el de la cuneta, estas dimensiones de la cuneta serían adecuadas.

○ **Cuneta trapezoidal.**

Las fórmulas que permiten calcular las dimensiones de una cuneta son las siguientes:

$$A = B * d + Z * d^2$$

$$P = B + 2 * d * \sqrt{Z^2 + 1}$$



$$T = B + 2 * d * Z$$

Considerando la zona en la que se encuentra la carretera como lluviosa, los parámetros que se elegirán será una profundidad de 0.4 m y un ancho de 0.8 m. Por otra parte, se elegirá de acuerdo con la siguiente tabla en función del material a excavar.

$$A = 0,8 * 0,4 + 1 * 0,4^2 = 0,48m^2$$

$$P = 0,8 + 2 * 0,4 * \sqrt{1^2 + 1} = 1,93 m$$

$$T = 0,8 + 2 * 0,4 * 1 = 1,6 m$$

Una vez calculada el área, el perímetro y el ancho de la cuneta, se puede calcular el caudal que puede circular por la cuneta transversal a través de la ecuación de Manning

$$Q = \frac{1}{n} * A * \sqrt[3]{R^2} * \sqrt{S}$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, que dependerá del material de la cuneta o, en el caso de que se haya empleado algún revestimiento, del material de revestimiento.

El radio hidráulico se calcula con el área y el perímetro de la cuneta.

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0,48}{1,93} = 0,25 m$$

La pendiente S es la misma que la pendiente transversal de la carretera o peralte, es decir, 0,5%.

Sustituyendo en la ecuación se obtiene que el caudal de la cuneta es 74,54 L/s. Como el caudal de diseño es menor que el de la cuneta, estas dimensiones de la cuneta serían adecuadas.

Para elegir entre la cuneta trapezoidal y la cuneta triangular se analizarán los costes y se diseñará la carretera de forma que sea lo más económica posible.

#### 4. Zanjas de coronación.

Las zanjas de coronación son elementos que se colocan en la parte superior de los taludes con el fin de disminuir la escorrentía por el mismo y, así, evitar su erosión.

Para facilitar el diseño y la construcción de la carretera, las zanjas de recolección no implicarán cálculos excesivos ni una elaboración complicada. Simplemente serán cauces cavados en la parte superior de los taludes que disminuirán la escorrentía y evitarán que las aguas lleguen a la superficie de la carretera.

#### 5. Alcantarillas.

En este caso, al tratarse de una zona sin canales de agua para el aprovechamiento de esta, no se pondrán alcantarillas.

#### 6. Zanjas de recolección.

Las zanjas de recolección son los elementos encargados de llevar las aguas desde las alcantarillas hasta los cursos naturales. Como en este caso no hay alcantarillas, las zanjas de recolección no serán necesarias.

### **2.3.4 DRENAJE SUBTERRÁNEO.**

A través del drenaje subterráneo se controla la humedad en la carretera. Las funciones principales de este tipo de drenaje son las siguientes:

- Desviar corrientes subterráneas que puedan amenazar a la estabilidad de la carretera.
- Disminuir el nivel freático.

En la zona en la que se va a construir la carretera el nivel freático se encuentra 30 metros por debajo de la superficie. Por lo tanto, no hay riesgo de inundación de la carretera por la subida del nivel freático.

Por tanto, el diseño del drenaje subterráneo no es necesario por no haber peligro de inundaciones.

### **2.3.5 DISEÑO GEOMÉTRICO FINAL.**

Tras realizar un estudio sobre la hidrología y conocer el tráfico de la carretera y las características de esta, se puede resumir el diseño geométrico en los siguientes puntos:

1. El ancho de la calzada, teniendo en cuenta un IMDA de 20 y con una velocidad directriz de 30 km/h, debe ser de 5 metros. Teniendo en cuenta las bermas la carretera tendrá un ancho de 5,5 metros.
2. Como elementos de drenaje principal se realiza un peralte a lo largo de toda la longitud de la carretera del 5%. El drenaje irá en función de las curvas del camino encontrándose la menor altura en el interior de la curva.  
Con el objetivo de cambiar la inclinación del peralte en la dirección que convenga, se realizarán curvas de transición de longitud de entre 16.02 metros y 26.83 metros
3. Se calcula que el caudal de diseño para la carretera es de 25,3 L/s. A continuación, se exponen las dimensiones de las cunetas y el caudal que las mismas evacúan.

Región	Profundidad (m)	Ancho (m)	Caudal (L/s)
Triangular	0,4	0,75	26,9
Trapezoidal	0,4	0,8	74,54

*Tabla 5. Dimensiones de las cunetas.*

Finalmente, por simplicidad, se decide realizar las cunetas triangulares, ya que evacúan por encima del caudal de diseño.

Las cunetas se situarán únicamente en el lado de la carretera hacia el que evacúe el peralte.

4. En cuanto al alineamiento horizontal, respetando la velocidad permitida de 30 km/h y con un peralte del 5% a lo largo de toda la carretera, deben evitarse las curvas con radios menores a 32,21 metros.



## **Capítulo 3. ESTUDIO DE LOS SUELOS.**

### ***3.1 INTRODUCCIÓN.***

Para poder realizar el diseño de los suelos de la carretera es necesario primero conocer el suelo existente, con el fin de no alterar mucho el terreno y aprovechar los materiales con los que ya cuenta el medio.

Por otra parte, también es necesario conocer la situación geológica de la zona.

### ***3.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.***

Para poder diseñar una carretera es necesario en primer lugar conocer las características geológicas de la zona para evitar posibles problemas. Algunas de los aspectos que podrían afectar a la estabilidad de la carretera son la presencia de fallas, la acción erosiva de los ríos, la presencia de árboles que puedan caerse y entorpecer la carretera, el desprendimiento de las rocas de los taludes, ...

El terreno en el que se va a localizar la carretera no se caracteriza por ser una zona de accidentes sísmicos por lo que, respecto a este tema, no presentará problemas. Por otra parte, como ya se ha dicho con anterioridad, no hay ningún río en los alrededores, por lo que tampoco supondrá ningún inconveniente su acción erosiva. En el caso de que hubiese algún árbol que pudiese entorpecer el camino, este se vigilará y cortará en caso de posible caída.

Por último, en torno a la carretera el terreno es arcilloso, por lo que raramente habrá desprendimiento de taludes. A pesar de esto, por seguridad y motivos de drenaje se utilizarán métodos de revegetación de los taludes con recursos naturales y autóctonos que proporcionarán estabilidad al talud y disminuirán las aguas que caen sobre la superficie de la carretera.

### ***3.3 EL TERRENO.***

El terreno de la zona en la que se va a estructurar la carretera es, como en el resto del país, arcilloso.

Los suelos arcillosos están compuestos principalmente por partículas de diámetro menor a 2  $\mu\text{m}$ . Al estar compuesto por partículas de muy pequeño tamaño, la distancia entre estas mismas también lo es; por lo que son suelos muy impermeables y con una alta capacidad para la retención del agua. No son suelos muy afectados por la erosión, pero si habrá que tenerlo en cuenta a la hora de diseñar.

Por otra parte, la arcilla es un material muy moldeable en estado húmedo y con una elevada dureza en seco. Por este motivo, la carretera necesita de un agente estabilizador que evite que la carretera pierda su estructura en las épocas de lluvias.

Al formar parte del terreno, se empleará esta arcilla para la construcción de la carretera evitando así los elevados costes de otro material.

### ***3.4 CARACTERÍSTICAS PARA EL DISEÑO DE LOS SUELOS.***

En este proyecto se realizará una carretera no pavimentada. Dentro de las posibilidades para la superficie de rodadura de una carretera de este estilo se encuentran las siguientes:

- Carreteras de tierra formadas a partir del suelo natural mejorado a través de grava.
- Carreteras de grava cuyas capas superiores están formadas por capas de revestimiento de arenas finas con piedras de tamaño inferior a 75 mm.
- Carreteras afirmadas cuya capa de revestimiento esta formada por tres tipos de materiales: piedra, arenas y arcilla.
- Carreteras con superficie de rodadura estabilizada.

Más adelante, se estudiarán los diferentes métodos y se elegirá el más adecuado.

Para poder seleccionar cuál es el mejor método de diseño primero hay que conocer unos parámetros clave.

### 3.4.1 TRÁFICO.

Para poder diseñar una carretera, es necesario conocer el tráfico que tiene esta y el efecto que puede tener el mismo sobre las distintas capas. Únicamente se tiene en cuenta los vehículos de elevado peso (peso superior a 2.5 toneladas), como son los camiones o autobuses, ya que el deterioro de la carretera causado por los automóviles o bicicletas es mínimo.

Una forma de medir el efecto que tiene el paso de vehículos pesados sobre la carretera es a través del concepto de Eje Equivalentes (EE) y representa el deterioro que provoca sobre la carretera el paso de un vehículo de eje simple sobre la carretera.

Tipo de eje	Eje equivalente EE 8.2tn
Eje de simple de rueda simples	$[P/6.6]^4$
Eje simple de rueda doble	$[P/8.16]^4$
Eje tándem de rueda doble	$[P/15.1]^4$
Eje tridem de rueda doble	$[P/22.9]^4$

*Tabla 6. Ejes equivalentes en función del tipo de eje del vehículo.*

*Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

En este proyecto se considerará el paso de vehículos pesados de ejes de rueda simple de un peso de 25 toneladas, por lo que el Eje Equivalente será:

$$EE = \left(\frac{25}{6.6}\right)^4 = 205,86$$

En el cálculo de Ejes Equivalentes se tiene en cuenta que la presión de los neumáticos es de 5.5 bar. Si la presión de los neumáticos fuese mayor, se reduciría el área de contacto entre la rueda y el suelo, aumentando la presión sobre la calzada por lo que el Eje Equivalente sería mayor.



El cálculo de Eje Equivalente no es suficiente, ya que hace referencia únicamente a un vehículo. Por lo tanto, se hará la estimación de que aproximadamente pasarán 3 vehículos pesados al día.

Por último, respecto al tráfico, es necesario también conocer el número de repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2 toneladas.

$$N_{rep\ de\ EE\ de\ 8.2t.} = \sum_0^3 \frac{EE_{día-carril} * 365 * (1 + t)^{n-1}}{t}$$

Siendo,  $EE_{día-carril}$  el eje equivalente por día para el carril de diseño. El factor direccional, al ser una carretera de dos sentidos será 0,5, mientras que el factor carril será 1 al únicamente haber un carril para cada sentido.

$$EE_{día-carril} = EE * factor_{direccional} * factor_{carril} = 205,86 * 0,5 * 1 = 102,93$$

La tasa de proyección de tráfico,  $t$ , se calculará teniendo en cuenta que la carretera se diseñará con vistas a 5 años y con una tasa anual de crecimiento socioeconómico del 2%.

$$t = t_0 * (1 + i)^{n-1} = 20 * (1 + 0,02)^{5-1} = 21,64$$

Por lo tanto, el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 toneladas será 11401. Este valor se empleará más adelante para diseñar la carretera de manera que tenga la resistencia suficiente para hacer frente al paso de los coches.

### 3.4.2 SUBRASANTE.

La Subrasante es la superficie que se encuentra justo debajo de la primera capa de la carretera, es decir, es el terreno natural sobre el que se empieza a construir la carretera.

La subrasante puede tener diferentes calidades. Estas calidades se miden en función del porcentaje CBR, que mide la resistencia al esfuerzo cortante del suelo:

- S0: Subrasante muy pobre                      CBR < 3%
- S1: Subrasante pobre                              CBR = 3% - 5%
- S2: Subrasante regular                            CBR = 6% - 10%

- S3: Subrasante buena                      CBR = 11% - 19%
- S4: Subrasante muy buena              CBR > 20%

En general, se considera que la subrasante debe ser de calidad buena o muy buena para que no haya problemas a lo largo de los años. Para poder definir la calidad de la subrasante, o de cualquier suelo, es importante conocer las siguientes propiedades:

- *Granulometría.* A través de un ensayo de granulometría se pueden definir de manera aproximada el resto de las propiedades del suelo.

El fin de este ensayo es conocer, en función del tamaño, los materiales que constituyen el suelo y en que proporción se encuentran.

Tipo de material	Tamaño de las partículas
Grava	75 mm – 2 mm
Arena gruesa	2 mm – 0,2 mm
Arena fina	0,2 mm – 0,05 mm
Limo	0,05 mm – 0,005 mm
Arcilla	Menos a 0,005 mm

*Tabla 7. Granulometría. Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

- *Plasticidad.* Es la propiedad que trata de los finos o arcillas que contiene el suelo.

El ensayo para conocer definir la plasticidad de un suelo consiste en definir los límites de Atterberg, establecidos los tres según norma:

- Límite líquido (LL).
- Límite plástico (LP).
- Límite de contracción (LC).

Una vez definidos estos límites se puede calcular el índice de plasticidad (IP), que es un indicador de la plasticidad del suelo.

$$IP = LL - LP$$

En la tabla siguiente se clasifican los terrenos en función del índice de plasticidad.

Índice de plasticidad	Característica
$IP > 20$	Suelos muy arcillosos
$20 > IP > 10$	Suelos arcillosos
$10 > IP > 4$	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	Suelos exentos de arcilla

*Tabla 8. Índice de plasticidad.*

*Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

- *Equivalente de arena (AE)*. Es un ensayo equivalente al realizado para conocer la plasticidad a través de los límites de Atterberg siendo más rápido y sencillo, pero menos exacto.

Equivalente de arena	Característica
$EA > 40$	El suelo no es plástico, es de arena
$40 > EA > 20$	El suelo es poco plástico y no heladizo
$EA < 20$	El suelo es plástico y arcilloso

*Tabla 9. Equivalente de arena.*

*Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

- *Índice de grupo (IG)*. El índice de grupo permite conocer la calidad de la subrasante. El ensayo para conocer el índice de grupo también emplea los límites de Atterberg.

Índice de grupo	Suelo de subrasante
$IG > 9$	Muy pobre
$9 > IG > 4$	Pobre
$4 > IG > 2$	Regular
$2 > IG > 1$	Bueno
$1 > IG > 0$	Muy bueno

*Tabla 10. Índice de grupo.*

*Adaptado en formato de “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”. (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)*

- *Humedad natural.* La resistencia de los suelos está directamente ligada con la humedad natural de estos, en especial en el caso de los suelos arcillosos. Como se verá más adelante, en el caso de que la humedad sea baja se añadirá agua y se compactará en suelo. Por otra parte, si la humedad es alta habrá tres soluciones:
  - Compactar el suelo.
  - Airear el suelo.
  - Sustituir el suelo.
- *CBR.* Es un ensayo complejo que consiste en conocer la capacidad de un suelo para soportar los esfuerzos cortantes.

Una vez definidas estas propiedades, se podrá clasificar el suelo a través de la tabla que se encuentra en el Anexo I.

Este sistema para clasificar las carreteras es de mucha utilidad en países desarrollados con acceso laboratorios. En el caso de este proyecto, al no haber recursos ni posibilidad de realizar los ensayos, se diseñará la carretera en función de otros parámetros como son la viabilidad del proyecto y la accesibilidad a los recursos, siempre teniendo en cuenta las propiedades que puedan ser observadas a simple vista.

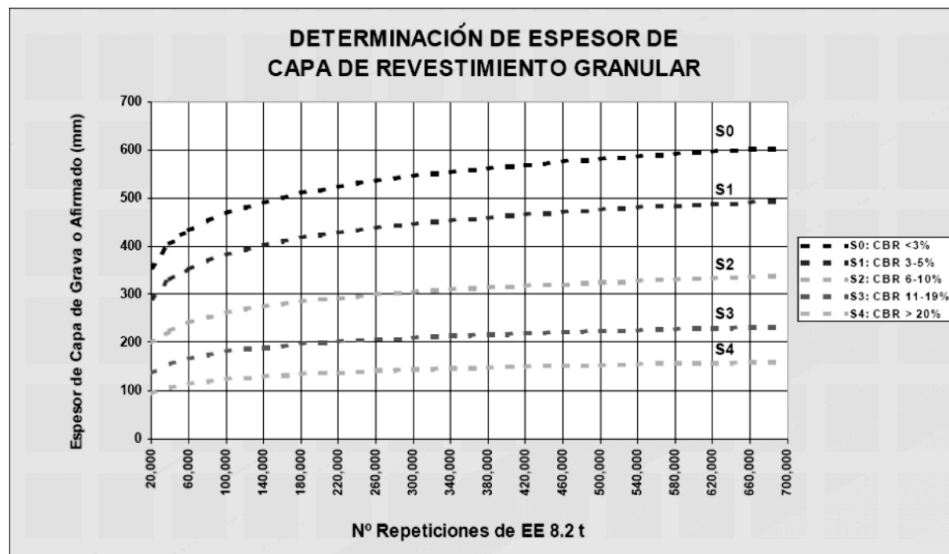


Figura 3. Espesor de la capa de afirmado en función del número de repeticiones de EE y la calidad del terreno.

Fuente: “Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”.  
(Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)

Como ya se ha mencionado antes, para realizar el ensayo CBR se necesita un laboratorio y demás recursos que no son fácilmente accesibles en Zimbabwe. Por lo tanto, una buena solución para evitar posibles problemas originados por la mala calidad de la subrasante se excavará un poco más y se colocará una capa de material de calidad S3. Un material adecuado para subrasante podría ser un suelo con una elevada cantidad de grava, finos para la cohesión y bien compactado.

Teniendo en cuenta que el número de repeticiones de EE es 11401 y que se elige un material de calidad S3, la primera capa de la carretera, que sustituye a la subrasante natural, tendrá un espesor mínimo de 150 mm. A la hora de colocar esta nueva subrasante es muy necesario incluir ya el peralte, es decir, la inclinación del 5%.

En relación con el nivel freático, la capa superior de la subrasante debe quedar por lo menos a 0.6 m de este. En este proyecto, al encontrarse el nivel freático 30 metros por debajo de la superficie, esto no supondrá un problema.

### **3.5 CAPAS DE LA CARRETERA.**

#### **3.5.1 COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS.**

Las carreteras tienen diferentes capas en función del método de construcción de carreteras que se vaya a emplear. Antes de estudiar estos es necesario saber cuál es la clave para que una carretera sea estable y tenga una alta durabilidad.

La estabilidad de una carretera se basa en un principio fundamental, la compactación. De la compactación que tenga el suelo va a depender que la carretera sea duradera y no haya problemas como agrietamientos, surcos o infiltraciones del agua en capas inferiores.

La compactación es un proceso mecánico que consiste en la eliminación del aire que pueda haber en el suelo, disminuyendo así su volumen y aumentando su resistencia al haber mayor fuerza de rozamiento entre sus partículas, así como la cohesión del suelo. Por otra parte, se disminuye la permeabilidad y la plasticidad.

Como se ha mencionado antes, la compactación disminuye el volumen y, por tanto, aumenta la densidad. La densidad esta estrechamente ligada con la humedad del suelo. En el gráfico de la figura 4, se observa que para una humedad óptima la densidad es máxima, por lo que, a la hora de compactar el terreno habrá que humedecerlo hasta el punto óptimo.

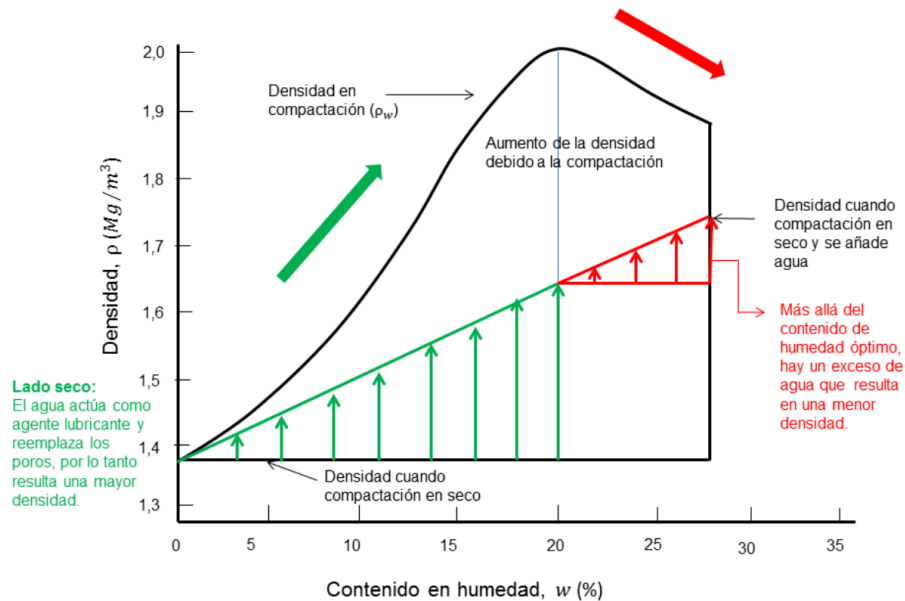


Figura 4. Densidad del terreno en función de la Humedad.

Fuente. "Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados: respuestas a cargas estáticas y dinámicas." (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)

Lo ideal sería realizar la compactación por medio de un rodillo vibratorio, pero, al realizar el proyecto en Zimbabwe, no se dispone de esta maquinaria, aunque si se dispone de un compactador manual. Este compactador manual tiene un elevado peso que, al caer desde elevada altura provoca vibraciones en el suelo que ayudan a la compactación del suelo.

### 3.5.2 MÉTODOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS SIN PAVIMENTAR.

A continuación, se presentan los diferentes métodos para la construcción de carreteras no pavimentadas.

#### 3.5.2.1 Capa de afirmado.

Es la capa de la carretera que soporta directamente las cargas y los esfuerzos del tráfico. Puede ser empleada como capa superficial o como capa inferior.

La capa de afirmado está formada por:

- Piedras. Son los materiales de mayor tamaño de la capa de afirmado y son las encargadas de aguantar los esfuerzos. Para asegurar que las piedras cumplen su función, es muy importante que estas tengan las aristas o caras fracturadas y no sean piedras lisas redondeadas.
- Arena. Son de menor tamaño que las piedras y su función es rellenar los huecos que hay entre las piedras, para así, dar estabilidad a la carretera.
- Arcilla. Proporcionan la cohesión que necesita la superficie.

La capa de afirmado debe elaborarse en función de los requerimientos que tenga la carretera. Esta elaboración es de gran importancia ya que es la que dotará al camino de las características que precisa. En este proyecto, al no poder realizar ensayos, se prescindirá de esta precisión, pero se intentará en la medida de lo posible conseguir la capa de afirmado de la mejor calidad.

Como ya se ha mencionado antes, la capa de afirmado puede ser utilizada como capa superficial para la rodadura de los vehículos o como capa inferior; en el caso de emplearse como superficie de rodadura, deberá tener una mayor cantidad de arcillas para proporcionar estabilidad. En el caso en que se emplee como capa subsuperficial, tendrá una menor cantidad de arcillas y una mayor cantidad de piedras de mayor tamaño con el fin de permitir un buen drenaje y proporcionar una elevada resistencia a la carretera.

Cabe destacar la importancia que tiene que la capa de afirmado tenga una buena proporción de piedras y finos ya que, una gran cantidad de piedras hará que el material no tenga buena consistencia y una gran cantidad de finos provocará que en épocas de lluvias aumenten los surcos.

A la hora de construir la capa de afirmado es muy importante en primer lugar retirar toda la vegetación y materia orgánica, ya que puede estropear la superficie del camino. Asimismo, la superficie en la que se va a colocar la capa de afirmado debe estar completamente limpia y lisa, sin ningún surco, pero teniendo en cuenta el peralte de la carretera, es decir, con la inclinación del 5% implementada. Para conseguir la mejor unión entre la subrasante y la capa de afirmado es recomendable labrar la superficie de la subrasante ligeramente.



Por último, es muy importante que las piedras, las arenas y los finos estén bien mezclados para darle una mayor consistencia y que sea más fácil su compactación. Para conseguir una mezcla homogénea se recomienda emplear una motoniveladora. Como los recursos son limitados, en lugar de esta máquina se mezclará manualmente intentando que la mezcla quede lo más uniforme posible.

La capa de afirmado únicamente cumplirá bien su función si se le proporciona la compactación adecuada.

### ***3.5.2.2 Macadam granular.***

El macadam granular es un compuesto formado por la unión de materiales gruesos a través de la adición de materiales más finos. Esta primera mezcla es realizada en seco. Posteriormente se añade agua para humedecer la mezcla y realizar la compactación, que elimina el aumento de la densidad y, a su vez, aumenta la resistencia.

Las capas del macadam granular son las siguientes:

- *Cama de asiento.* Es la primera capa de la carretera, se coloca encima de la subrasante y debe cumplir las siguientes características: los agregados gruesos deben ser duros, estar limpios, no deben ser partículas alargadas o laminares.

A la hora de su colocación, se debe tener especial cuidado y asegurar que la subrasante esté limpia y tenga un buen acabado superficial. Una vez colocada la cama de asiento es muy importante realizar una buena compactación.

Un espesor recomendable para esta capa es de 19 mm.

- *Capa de agregados gruesos.* Se coloca sobre la cama de asiento, y las características de sus agregados son similares a las de los agregados gruesos. No debe haber un exceso de arcillas.

A la hora de su colocación es muy importante realizarla con una motoniveladora para evitar la disgregación de los materiales. Como se ha mencionado antes, el acceso a este tipo de maquinaria es muy difícil en Zimbabwe por lo que, en su lugar, se

mezclaría manualmente. Una vez colocada esta última capa deben retirarse los agregados laminares que se observen sobre la superficie. Para la compactación lo mejor es el uso de un rodillo liso vibratorio, pero también se pueden emplear equipos manuales, como es la compactadora manual.

Para asegurar la buena resistencia de la carretera, un buen espesor para esta capa es de 100 mm. Para que la compactación sea lo más eficaz posible, la capa de agregados gruesos se realizará en dos etapas.

- *Material de relleno.* Formado por arena en estado seco. Una vez colocadas las dos primeras capas se coloca el material de relleno de manera manual.

Una vez repartidas por toda la superficie las arenas, se procederá a agregar agua para después realizar la compactación.

Para la compactación es muy importante que el material esté humedecido sin sobrepasar un límite a partir del cual la densidad disminuirá de nuevo.

- *Capa de rodadura.* Para finalizar la carretera se colocará la superficie de rodadura, que será una capa de afirmado con un espesor mínimo de 100 mm, por lo que se elegirá un espesor de 120 mm.

-

Por lo tanto, para la construcción del macadam granular habrá que cavar, contando con la subrasante, un total de 0,67 metros sobre la superficie para poder realizar el peralte del 5%.

### ***3.5.2.3 Estabilización de los terrenos.***

Como se ha explicado antes, la calidad de los suelos la define un parámetro llamado CBR. Una posibilidad para la construcción de carreteras es estabilizar estos suelos haciendo su CBR mayor y, por tanto, mejorando su calidad.

Al realizar la estabilización de un suelo se consigue mejorar las características de este como su resistencia, durabilidad, permeabilidad....

La estabilización de los suelos puede ser granulométrica, mezclando dos o más suelos para obtener unas características determinadas, o fisicoquímica, añadiendo productos como cal, cemento...

#### **3.5.2.3.1 Estabilización granulométrica.**

En la estabilización granulométrica se mezclan dos tipos diferentes de suelo. Uno de los suelos será el propio del terreno en el que se va a construir la carretera. Un buen ejemplo sería la adición de un suelo granular a un suelo arcilloso, para así aumentar la resistencia de este asegurando la cohesión y, por tanto, conseguir un suelo más estable y de mejores propiedades.

De cara al proyecto en Zimbabwe, el problema que supone este método es que se requiere de ensayos en laboratorios para comprobar las propiedades de la capa de suelo nuevo que se va a añadir.

#### **3.5.2.3.2 Estabilización con cal.**

La estabilización con cal consiste en la adición de cal y agua al suelo para aumentar la dureza de la carretera y, así, mejorar sus propiedades, aumentado su dureza y reduciendo su plasticidad.

La estabilización mediante la adición de cal es una técnica empleada desde el Imperio Romano; se ha estudiado que, en una de las vías, La Vía Apia (312 A.C), que unía varias ciudades de Roma se emplearon arenas y cal para conseguir una buena calzada. Además, algunos expertos aseguran que en la construcción de las Pirámides de Egipto también se empleó cal como agente estabilizador en el suelo. Por lo tanto, es un método que, como se puede comprobar, además de incrementar la resistencia del suelo, asegura la durabilidad de la carretera. Fue a partir del siglo pasado cuando comenzó a utilizarse la cal como estabilizador en suelos de carreteras, y es una técnica cada vez más empleada y mejorada.

Las ventajas que supone la estabilización con cal frente a otros métodos son la sostenibilidad económica y ambiental. Esto se explica de manera muy sencilla; la estabilización con cal consiste únicamente en añadir cal al suelo natural de la zona en la que se va a construir la carretera. De esta forma, se ahorra en recursos y apenas se modifica el medio.

Para la estabilización de suelos pueden emplearse diferentes tipos de cal: cal viva, lechada de cal o cal hidratada. Al tratarse de un suelo húmedo, se empleará cal viva que, al reaccionar con el agua, se convierte en cal hidratada. Para tratar los suelos se emplea cal con alto contenido en calcio. En caso de que no fuese accesible, se podrá emplear cal combinada con óxido o hidróxido de magnesio que tarda más en reaccionar que la cal pura. Es muy importante que la cal sea lo más pura posible, por lo que no debe utilizarse cal proveniente de piedra caliza pulverizada o cal de residuos del proceso de fabricación de cal.

Al añadir cal al suelo, esta reacciona con el terreno provocándose los siguientes resultados:

- Secado del suelo. La cal reacciona con el suelo eliminando la humedad. Al mezclar la arcilla con la cal esta absorbe el agua del suelo provocando una reacción exotérmica por la cual el terreno se seca y el suelo se evapora.
- Modificación del suelo. Otro de los efectos que se produce es que el suelo pierde la capacidad de retener agua, es decir, se vuelve impermeable, por el intercambio iónico entre el sodio, propio del suelo, y el calcio, de la cal.
- Estabilización del suelo. La estabilización del suelo se da a largo plazo y se produce por la formación de silicatos y aluminatos cálcicos lo que aumenta la resistencia del suelo.

Además de estos efectos principales, se reduce la plasticidad del suelo y se produce un cambio en la granulometría del suelo y un aumento de la humedad de compactación, lo que permite que los suelos muy húmedos puedan ser bien compactados.

Las etapas de la estabilización con cal son las siguientes:

- I. Labrado y pulverización inicial de la subrasante.
- II. Aplicación de la cal.
- III. Mezcla de la cal con el terreno y aplicación de agua.
- IV. Espera para la reacción de la cal con el agua.
- V. Mezcla final.
- VI. Compactación.

La cantidad recomendada para la estabilización de suelos mediante cal es de un 3% de cal en relación con el suelo con el que debe mezclarse.

### **3.5.2.3.3 Estabilización con cemento.**

La estabilización con cemento consiste en la mezcla del suelo disgregado con cemento y agua y una posterior compactación de este para elevar la resistencia del suelo. El suelo endurecido con cemento mejora con los años y aumenta su dureza con la cantidad de cemento, pero no es el mejor método para mejorar las propiedades del terreno por lo que se emplea para la estabilización de la subrasante.

Los pasos para este método son los siguientes:

- I. Escarificado del suelo y pulverización con agua.
- II. Distribución del cemento y el agua sobre el propio suelo, de forma más homogénea posible. La mezcla de cemento con agua puede realizarse con motoniveladora, pero, en este caso, se realizará manualmente o, en el caso de ser accesible, con maquinaria agrícola.
- III. Compactación del suelo.

### **3.5.2.3.4 Imprimación reforzada bituminosa.**

La imprimación reforzada bituminosa es una técnica que se emplea para la construcción de superficies de rodadura. Requiere de asfalto, pero en una proporción muy baja por lo que no se trata de carretera pavimentada.

Este método asegura una alta durabilidad a lo largo de los años, siempre y cuando la carretera cuente con un buen sistema de drenaje.

Los pasos para la imprimación reforzada son los siguientes:

- I. Escarificado y perfilado. Es necesario labrar la capa en la que se va a realizar la imprimación con la posterior pulverización de agua.
- II. Primera aplicación del asfalto líquido, intentando en la medida de lo posible que esta capa no sea superior a 1 cm.
- III. Espera de 48 horas. Para la compactación será necesario esperar un mínimo de 48 horas con el fin de que el asfalto penetre. Si es necesario, se añadirá más agua.

- IV. Compactación. Se realizará la compactación median un rodillo vibratorio, que, en este caso, será un compactador manual.
- V. En el caso en el que el asfalto con el terreno se quede pegado al rodillo, se añadirá una capa de arena.
- VI. Segunda aplicación del asfalto líquido.
- VII. Espera de 48 horas.
- VIII. Adición de arena para absorber la humedad y evitar el deslizamiento de los neumáticos.
- IX. Compactación con rodillo neumático, que en este caso será rodillo manual.

### **3.5.3 DISEÑO DE LOS SUELOS.**

Tras realizar el estudio sobre los diferentes métodos de construcción de carreteras, y teniendo en cuenta las condiciones en las que se va a trabajar, se decide realizar un proceso que incluya una mejora de la subrasante, para aporta resistencia a la carretera, y una mejora de la capa de rodadura. En este contexto se decide realizar el siguiente proceso:

- I. Mejora de la calidad de la subrasante añadiendo piedras de canto afilado con el objetivo de aumentar la resistencia de la carretera.
- II. Estabilización del suelo mediante cal con el fin de disminuir la plasticidad de las arcillas.
- III. Colocación de arenas en la capa de rodadura con el fin de proteger el terreno estabilizado con cal y aumentar la fricción entre los neumáticos y el suelo, aumentando la seguridad de la carretera.

En la figura se representan las diferentes capas de la carretera



Capa de rodadura formada por arenas

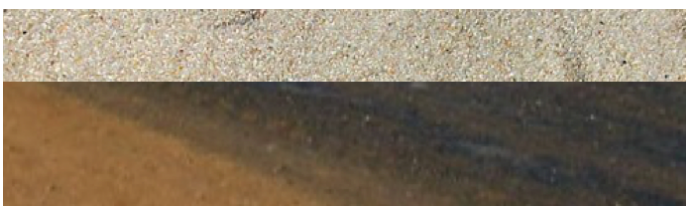
Capa de rodadura formada por arenas

Subrasante mejorada con grava.

Terreno natural

*Figura 5. Capas de la carretera.*

Por otra parte, como alternativa se propone una imprimación reforzada bituminosa, que contaría con las siguientes capas.



Capa de rodadura formada por arenas

Imprimación reforzada bituminosa

*Figura 6. Capas de la carretera.*





## **Capítulo 4. MODELO A IMPLANTAR Y PROCESO.**

### ***4.1 DECISIÓN DE IMPLANTACIÓN.***

Después de haber estudiado las diferentes alternativas de construcción de carreteras, teniendo en cuenta la durabilidad de la carretera y su buen resultado, pero, sobretodo la viabilidad en Zimbabwe, se puede decidir el modelo a implantar.

Como ya se ha mencionado antes, el acceso a recursos, la posibilidad de realizar ensayos en laboratorios y la presencia de presupuesto en Zimbabwe son muy limitadas, por lo que el proyecto también se verá limitado. Por estos motivos, se decide realizar una carretera estabilizada mediante cal, ya que es un recurso de fácil acceso y que asegura la resistencia de la carretera.

En este capítulo se expondrá el proceso de construcción completa de la carretera, teniendo en cuenta también los elementos de drenaje, y se propondrán mejoras por si en el futuro aumenta el transito de la carretera y hay posibilidades de mejorarla.

### ***4.2 PROCESO DE IMPLANTACIÓN.***

Finalmente, se propone como proyecto principal una estabilización mediante cal en toda la calzada de la carretera. A continuación, se explican los pasos a seguir.

I. Estudio del terreno.

Al llegar se realizará una inspección del terreno.

II. Limpieza de la zona.

Para poder comenzar la construcción de la carretera, en primer lugar, hay que realizar una limpieza de la zona, incluyendo la calzada y las cunetas. Se retirará la vegetación de la zona en la que se va a realizar la calzada. Además, en el caso de que haya algún árbol que pueda amenazar la carretera por su caída, se evitará su caída mediante la sujeción con cuerdas.

### III. Excavación.

El primer paso para la construcción de la calzada es excavar el terreno. Se excavará un ancho de 5 metros a lo largo de toda la longitud de la carretera. Respecto a la profundidad, se excavará un total de 0,3 metros de profundidad en el extremo inferior del peralte y 0,58 metros en el extremo superior. En esta excavación, se dejará ya marcado el peralte. El peralte variará en función de la zona de la carretera:

- En la zona con taludes, el peralte tendrá la inclinación en el mismo sentido que el talud.
- En las zonas con curvas, el peralte tendrá la inclinación hacia el interior de la curva.
- En las zonas horizontales, el peralte seguirá la misma inclinación que llevaba de antes y cambiará al encontrarse con una curva en sentido contrario.

### IV. Construcción de la calzada.

La carretera comienza a construirse desde la capa inferior por lo que en este apartado se explicará en este mismo orden.

1. Subrasante. La primera capa es la subrasante, es la capa que esta directamente en contacto con el suelo. En general, si el suelo es de buena calidad, se mantiene el suelo de la subrasante. En este caso, como no se puede calcular la calidad del terreno, se mejora. El método de mejora en este caso será la adición de piedras de pequeño tamaño. Así aumenta la resistencia de la carretera. La profundidad de esta capa será como mínimo de 150 mm, por lo que finalmente, al no tener mucho presupuesto se diseñará con esta profundidad.

2. Capa de rodadura. Esta capa será estabilizada mediante cal. Esta capa tendrá una profundidad de 150 mm. El método para la estabilización con cal es el siguiente:

- Sobre la subrasante se colocará la tierra excavada con anterioridad, sin compactar y habiendo eliminado las partículas de materia orgánica que puedan ser visibles a simple vista, como ramas, raíces, etc. Es importante que la tierra este escarificada o labrada para asegurar el contacto de la cal con las arcillas en toda la capa.
- Pulverización con agua. En el caso en el que el terreno esta excesivamente seco se debe rociar este con agua. Así se asegurará que la cal reacciona con las arcillas.

A continuación, se explicarán los cuatro siguientes pasos que se realizarán cada medio metro, para asegurar que el terreno no queda con huellas.

- Escarificación de los suelos. Para la aplicación de la cal es muy importante que el suelo se encuentre escarificado para poder realizar la mezcla del suelo con la cal.
- Aplicación de la cal. Se aplicará cal viva a lo largo de toda la carretera. Puede ser aplicada mecánicamente con camiones autodescargables, pero, al no haber recursos suficientes la forma de aplicarla es manual o, en el caso de que hubiese accesibilidad, mediante un tractor. La cal debe estar bien triturada para asegurar que entra en contacto con todo terreno y el suelo muy mojado y escarificado.

En general se añade un 3% de cal para estabilizar el terreno. En este caso, al no haber mucho presupuesto se añade solo un 2% de cal. La capa por estabilizar es de 150 mm por lo que, al tratarse de una carretera de 1 kilometro, el volumen de terreno a estabilizar será de 750 m<sup>3</sup>, por lo que habrá que añadir 7,5 m<sup>3</sup> de cal.

- Mezcla y pulverización con agua. A medida que se va aplicando la cal habrá que mezclarla con el suelo por medio de un rastillo para que llegue a la parte inferior de la capa. Una vez mezcladas las arcillas y la cal se agregará el agua.
- Periodo de espera. Es necesario dejar que la cal reaccione con la arcilla y el agua por lo que habrá que esperar entre 1 y 7 días.
- Mezcla final. Antes de la compactación es necesario una última mezcla con su posterior escarificado. Si en esta última mezcla se observan partículas blancas es necesario comprobar si es porque parte la cal no ha reaccionado con el agua y las arcillas. Para ello se coge una muestra del suelo con marcas blancas y se mezcla con agua. Si la muestra se mantiene igual, se trata de partículas inertes, que nada tienen que ver con la cal. En el caso de que reaccionen, el motivo será que la cal viva no se ha hidratado y que, por lo tanto, no ha podido reaccionar con las arcillas. Para solucionar este problema se agregará agua al terreno y se mezclará de nuevo.
- Compactación. Es el paso más importante, ya que es el que aporta densidad al suelo y, de esta manera, también resistencia. Lo perfecto sería realizar con un rodillo vibratorio, pero en este caso se realizará con un compactador manual, que asegura la compactación. Para asegurar que la carretera sea lisa, al terminar la compactación, se pasará con un rodillo liso.
- Aplicación de arenas. Para asegurar que la estabilización dure a lo largo de los años, lo ideal sería aplicar una capa superior como puede ser asfalto o una imprimación bituminosa. En este caso, al no haber un

presupuesto muy alto, se aplicarán arenas encima de la capa estabilizada con cal. Estas arenas protegerán la carretera y además aumentarán la fricción entre el vehículo y el suelo, haciendo que la carretera sea más segura.

V. Construcción de las cunetas.

El fin de las cunetas es drenar el agua que cae desde la carretera. Al haber un peralte del 5% en la carretera el agua únicamente cae hacia un lado por lo que las cunetas solo serán necesarias en un lado de la carretera. Para poder saber en que lado construir las cunetas, es necesario fijarse en el terreno y seguir las siguientes pautas:

- En el caso donde haya taludes, el peralte irá en el mismo sentido que el talud, por lo que las cunetas se construirán en el lado contrario al talud.
- En las zonas con curvas, el peralte tendrá su inclinación en dirección hacia el interior de la curva por lo que las cunetas se encontrarán en este lado.
- En las zonas horizontales, el peralte se continuará desde la última curva por lo que la cuneta seguirá el mismo camino hasta que cambie el peralte.

Una vez reconocidas las zonas en la que se van a construir las cunetas, se puede comenzar la excavación de estas. La decisión final en el diseño de las cunetas es el modelo triangular, ya que es más fácil realizarlas y mantenerlas al ser más sencilla geométricamente. Las dimensiones de las cunetas se encuentran en los planos adjuntados en el anexo II.

La estabilización con cal es el método que mejores resultados da a largo plazo. El único problema que podría presentar es que el presupuesto que se necesita es ligeramente elevado. En caso de que no haya capital suficiente para realizar esta técnica se puede optar por los siguientes proyectos:

- Estabilización con cal de la superficie por la que van a circular los vehículos.

Este método sigue la misma estructura que la estabilización de la calzada completa con la diferencia de que, en este caso, únicamente hay subrasante y capa de afirmado en los surcos por los que pasarán los neumáticos. Los surcos por los que pasarán las ruedas serán de 0,5 m cada uno.

En este caso, al ser menos estable por no haber mejorado el 100% de la calzada se podrá emplear mayor cantidad de recursos:

- La subrasante en este caso tendrá una profundidad de 200 mm, empleándose un porcentaje de gravas de 10%. Por lo tanto, en total en toda la carretera se emplearán 20 m<sup>3</sup> de gravas.
- La capa de afirmado tendrá una profundidad de 150 mm y para estabilizar se empleará un mayor porcentaje de cal, en concreto un 3 %. Por lo tanto, la cantidad de cal necesaria será de 4,5 m<sup>3</sup>.
- Las arenas se dispondrán por toda la calzada ya que ayudan a la absorción de humedad del terreno y mejoran la seguridad de la carretera al aumentar la fricción de las ruedas con la misma, haciendo la carretera más segura.
- 

➤ **Imprimación reforzada bituminosa**

Esta técnica tiene resultados peores que la estabilización con cal, pero si se realiza un buen mantenimiento puede durar años.

La técnica para la realización de la imprimación reforzada bituminosa es la siguiente:

- I. Escarificado y perfilado. En primer lugar, se labra el terreno, aproximadamente 5 cm, se rocía con agua y se le da el perfilado que se desee, en este caso, un peralte del 5%. Una vez terminado el perfilado, se realiza una pasada con un rodillo liso para homogeneizar la superficie.
- II. Primer riego. Una vez realizado el perfilado y pasado el rodillo liso se realiza la primera aplicación del líquido asfáltico. Para asegurar que el

líquido penetra en la calzada habrá que añadir entre 1,7 y 2 L/m<sup>2</sup>. Para disminuir el coste, en este caso se añade únicamente 0,8 L/m<sup>2</sup>. Con lo que, en este caso, al ser una carretera de longitud 1 km y ancho 5 m, habrá que añadir 4000 L de líquido asfáltico.

- III. Tiempo de espera. Una vez colocada la primera dosis habrá que dejar pasar 48 horas sin tránsito para asegurar que el líquido asfáltico penetre.
- IV. Compactación. Tras las 48 horas de espera, se rocía nuevamente la superficie con agua para aumentar la humedad del terreno y facilitar la compactación. La compactación se puede realizar con un rodillo vibratorio, pero en este caso se realizará con un compactador manual. Es importante que en la pasada del compactador manual la superficie de la capa de rodadura no quede adherida a este. En el caso de que esto ocurra, habrá que esperar más tiempo para asegurar que el líquido asfáltico ha penetrado.
- V. Segundo riego. Una vez terminada la compactación se realizará otra aplicación de líquido asfáltico, esta vez en una proporción de 0,5 L/m<sup>2</sup>.
- VI. Tiempo de espera. Para asegurar nuevamente que el líquido penetra se dejará curar, sin ningún tránsito, otras 48 horas.
- VII. Aplicación de arenas. Una vez pasadas 48 horas, se añadirán arenas a la superficie con el fin de que estas absorban la humedad del asfalto seco.
- VIII. Sellado final. Por último, se volverá a pasar el rodillo liso para asegurar que la superficie queda completamente firmada.

### **4.3 MANTENIMIENTO DE LA CARRETERA.**

Lo ideal a la hora de realizar una estabilización con cal sería que la temperatura fuese de 60°C a la sombra, ya que en general, la mezcla estabilizada se realiza en un laboratorio y planta a la temperatura adecuada y posteriormente se traslada a la calzada donde será compactada. Evidentemente esto no es posible por lo que, al realizarlo a una temperatura inferior, los resultados de la estabilidad no serán tan efectivos como deberían. A pesar de esto, las características del suelo se verán afectadas y tendrá una calidad mayor, aunque no excelente. Por este motivo es tan importante el mantenimiento del sistema de drenaje.

El sistema de drenaje de la carretera es muy sencillo: cuenta con un peralte que evacua el agua de la calzada de la carretera dirigiéndolo hacia las cunetas por las que el agua será conducida fuera de la carretera. Asimismo, el sistema de mantenimiento es también muy sencillo. Únicamente será necesario asegurar que las cunetas no quedan obstruidas en ningún momento y que el agua sigue el cauce de estas fuera de la carretera.

En cuanto a la calzada, para mantenerla será necesario únicamente añadir arenas como superficie de rodadura para así proteger la zona estabilizada con cal del tráfico. La lluvia no será un problema para la estabilización ya que, una vez la cal ha reaccionado con las arcillas y se ha formado la mezcla, estas no vuelven a reaccionar a pesar de la adición de agua.

En el caso de que se realizase en lugar de la estabilización con cal una imprimación reforzada bituminosa, el mantenimiento sería muy sencillo ya que únicamente habría que sellar con un rodillo liso el terreno cada 2 o 3 años. En este caso se recomienda hacerlo cada año al tratarse de un suelo muy arcilloso sin ningún tipo de estabilización.

### **4.4 MEDIDAS DE PRECAUCIÓN.**

La cal es un producto alcalino, que como se ha visto, reacciona en presencia de agua. Por lo tanto, deben tenerse algunas precauciones a la hora de trabajar con esta:

Protección ocular. Para evitar la irritación de los ojos, o incluso quemaduras en los mismos, será necesario emplear gafas protectoras.



Protección corporal. Además de afectar a los ojos, la cal puede afectar también a la piel creando quemaduras de alto grado. Por lo tanto, es importante el uso de guantes y ropa que cubra todo el cuerpo.

Protección respiratoria. La cal también es peligrosa si se inhala por lo que es obligatorio el empleo de mascarillas durante su manipulación.

En caso de que alguno de estos métodos de protección fallase es importante lavar con abundante agua en el caso de los ojos y la piel. Si hubiese quemaduras sería necesaria la asistencia médica. Por otra parte, si se inhala la cal será necesaria directamente la asistencia médica.

Estas medidas de protección son extensibles a la imprimación reforzada bituminosa, ya que el líquido asfáltico también es tóxico y puede reaccionar fácilmente.

#### **4.5 MEJORAS DE LA CARRETERA.**

Con vistas a un futuro en el que la escuela se haya desarrollado y acoja a numerosos alumnos se proponen en este apartado algunas medidas para la mejora de la carretera.

En el caso de que se realizase la estabilización con cal, el terreno estaría ya tratado por lo que una buena mejora será reforzar la capa de rodadura. Se podría pavimentar la carretera, pero supondría mucha más maquinaria y un mayor presupuesto. Por este motivo se podría optar por realizar una imprimación reforzada bituminosa sobre el terreno ya estabilizado con cal. De esta manera se mejorará la capa de rodadura y la capa inferior quedará menos expuesta, y, por tanto, mantendrá su resistencia. El método es el mismo que el ya expuesto en el apartado 2 para terrenos sin estabilizar.

Por otra parte, en un futuro también se podrán realizar mejoras sobre el sistema de drenaje. Esta mejora consistirá en el revestimiento de las cunetas. Este revestimiento puede ser de piedra en seco, de mampostería o de hormigón. Lo más sencillo será realizarlo en piedra ya que no requiere preparación previa del material. Para su construcción será necesario excavar en mayor profundidad las cavidades de las cunetas para poder colocar las piedras y rellenar

los huecos entre ellas con las arcillas del suelo. La longitud de la carretera es de 1km y el perímetro a recubrir es de 0.54 m por lo que se necesitarán 540 m<sup>2</sup> de piedra.



## **Capítulo 5. PLAN DE EJECUCIÓN.**

### **5.1 INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se expone la calendarización del plan de ejecución del proyecto de construcción de la carretera, teniendo en cuenta tanto la estructura de su calzada como el sistema de drenaje.

Como se explica en el capítulo 4, el diseño principal de la carretera es la estabilización mediante cal. Esta opción es la más adecuada debido a que es la que mejor calidad ofrece sin requerir un presupuesto muy elevado. Como segunda opción se propone la imprimación reforzada bituminosa debido a que es la más económica. A continuación, se expone el plan de ejecución de ambos proyectos.

### **5.2 ESTABILIZACIÓN MEDIANTE CAL.**

El proyecto se desarrollará entre los meses de julio y agosto, por razones de disponibilidad y por ser el proceso de construcción más efectivo durante los meses más calurosos del año, debido a las temperaturas altas que precisa la estabilización con cal.

En teoría, se estima que se tardará aproximadamente 40 días en llevar a cabo el proyecto. Esta duración es aproximada, pero, una vez en allí se intentará cumplir con el plan y los plazos establecidos.

- **Días 1 al 3. Revisión del proyecto. Exposición del proyecto.**

Como primera toma de contacto con el proyecto se reconocerá el terreno y se trazará sobre la superficie el camino que debe seguir la carretera, considerando los puntos que no se hayan tenido en cuenta en el planteamiento inicial. Asimismo, se atenderán las sugerencias de las personas locales que conocen la zona y pueden suponer mejoras en el proyecto. Por tanto, los primeros días se replanteará si el proyecto de

construcción es el más adecuado y se valorará algún posible cambio. En general, no habrá muchos cambios, pero es importante tomar unos días estudiando el terreno para asegurar que el diseño es el idóneo.

Una vez cerrado el proyecto final, se trazará sobre la superficie el perímetro de la carretera que tendrá 5,5 metros de ancho y longitudinalmente se adaptará a las características de la zona. Además, se marcará la inclinación del peralte en cada zona de la carretera y la situación de las cunetas, que se encontrarán únicamente en el lado de la calzada hacia el que se encuentre el peralte. Para conocer hacia donde es la inclinación del peralte es necesario seguir estas pautas:

- En la zona con taludes, el peralte tendrá la inclinación en el mismo sentido que el talud.
- En las zonas con curvas, el peralte tendrá la inclinación hacia el interior de la curva.
- En las zonas horizontales, el peralte seguirá la misma inclinación que llevaba de antes y cambiará al encontrarse con una curva en sentido contrario.

Durante estos días se explicará a los trabajadores tanto el diseño del proyecto como el alcance y la importancia que tiene el mismo en todos sus aspectos. No solo se dará importancia a que la carretera cumpla con el diseño geométrico, cumpliendo con las dimensiones establecidas, también se remarcará que, para que la carretera tenga una alta durabilidad, las capas de la carretera deben tener unas propiedades determinadas. Se explicará el proceso de construcción y el plan de ejecución, señalando las propiedades que aportará cada paso a la carretera.

Por último, en estos días se hablará con el jefe de obra y se le proporcionará una lista con los materiales necesarios para la construcción de la carretera. Estos materiales no serán necesarios inmediatamente, pero es importante pedirlos con tiempo para que, el día que sean necesarios estén disponibles y, de esta forma, no se retrase la obra.

La lista de materiales necesarios en este método son los siguientes:

- 330 m<sup>3</sup> de grava.
- 22 m<sup>3</sup> de cal.
- 11 m<sup>3</sup> de arenas.

Por la posibilidad de pérdidas en accidentes en el trabajo, el posible mal estado de los materiales o cualquier otro motivo que lleve a la pérdida de materiales se solicitará un aproximadamente un 5% más de lo necesario por lo que, finalmente, la lista de materiales será la siguiente:

- 350 m<sup>3</sup> de grava.
- 24 m<sup>3</sup> de cal.
- 12 m<sup>3</sup> de arenas.

Además de los materiales para la ejecución de la carretera será necesaria la siguiente maquinaria:

- Excavadora. Pueden emplearse palas, el trabajo no será tan rápido como con una excavadora, pero es un tema con el que ya se cuenta.
- Compactador manual.
- Escarificador. Si no se cuenta con uno no será necesaria su compra ya que puede emplearse un rastrillo, asegurando en su utilización que todo el terreno quede aireado.

- **Días 4 al 5. Limpieza del terreno.**

Una vez revisado el proyecto y habiendo expuesto a los trabajadores el plan de ejecución se podrá comenzar con el mismo.

Para poder comenzar con la construcción de la carretera, es importante que la zona esta limpia. Se debe eliminar toda la vegetación y materia orgánica que haya en la calzada o las cunetas, ya que esta entorpecerá la construcción de la carretera y, en un futuro, causar problemas como grietas o huellas en la misma.

En el caso de algún árbol que pueda amenazar la carretera, este no se cortará, únicamente se sujetará mediante cuerdas para evitar que caiga en el camino.

- **Días 6 al 15. Excavación del terreno.**

Con el terreno limpio, podrá comenzarse la excavación. El perímetro de la carretera estará marcado desde los primeros días, por lo que respecto a la superficie que habrá que cavar no habrá ninguna duda.

Lo más importante de este paso es que la excavación debe quedar con el peralte ya marcado. Por este motivo se debe excavar con inclinación excavando 0,68 metros de profundidad en el extremo inferior del peralte y 0,4 en el extremo superior.

- **Días 16 al 21. Construcción de la subrasante.**

La subrasante es la capa inferior de la carretera. Debe tener unas características determinadas para darle a la carretera las propiedades que necesita. Lo ideal sería poder realizar un ensayo en un laboratorio y elegir el material de la subrasante de la mayor calidad posible. Al esto no ser posible, se decide mejorar el terreno de la subrasante añadiendo a las arcillas unas piedras de pequeño tamaño o grava, que dotan a la capa inferior de una mayor resistencia. Esta capa tendrá una profundidad de 0,15 m y estará formada por el propio suelo y las arenas en proporciones del 90% y el 10% respectivamente.

El proceso de elaboración de la subrasante se realizará sobre el mismo terreno. En la cavidad de la carretera se realizará la mezcla de las arcillas con la grava, añadiendo 742,5 m<sup>3</sup> de arcilla y 82,5 m<sup>3</sup> de grava en total en toda la carretera. Una vez realizada la mezcla se procederá a compactar para poder realizar la siguiente capa de la carretera que llevará alrededor de 4 días.

En esta capa también es importante mantener el peralte o inclinación que le ha dado a la calzada en la excavación.

- **Días 22 al 35. Construcción de la capa de afirmado.**

La construcción de la capa de afirmado es el proceso más largo de todo el proyecto. Consta de varias etapas que se van a exponer a continuación con sus periodos de ejecución.

- I. Colocación de las arcillas sin compactar y rociado de agua. Este paso durará aproximadamente 1 día. Esta tierra debe estar escarificada y limpia de cualquier partícula de materia orgánica. En el caso de que la tierra este excesivamente seca se rociará con agua para asegurar la reacción de las arcillas con la cal.
- II. Escarificación de los suelos y aplicación de la cal. Este paso se realizará cada medio metro para evitar pisar el suelo y que el terreno quede con huellas antes de aplicar la cal. La cal se aplica sobre el suelo escarificado y se mezcla con esta intentando que la mezcla quede lo más homogénea posible. A partir de este paso es obligatorio el uso del material de protección, que incluye gafas y guantes de protección y mascarilla. En total en toda la carretera se emplearán 15 m<sup>3</sup> de cal. Al tratarse la carretera de medio metro en medio metro, la aplicación de cal en cada proceso será de 7,5 dm<sup>3</sup> de cal. Se calcula que, para realizar correctamente este paso, se necesitarán 4 días de trabajo
- III. Periodo de espera. Para asegurar la reacción de la cal con la arcilla hay que dejar reposar la mezcla entre 1 y 7 días. En este caso, para no alargar el proceso de construcción en un principio se dejará reposar durante 5 días, aunque una vez allí, se verá si es necesario dejarlo más. Durante estos días de espera, para evitar estar días sin trabajar en el proyecto se irá construyendo el sistema de drenaje, por tanto, se comenzará la excavación de las cunetas.
- IV. Mezcla final y compactación. Tras la espera se volverá a escarificar el terreno y se realizará otra mezcla. Este paso, como la aplicación de cal, se realizará de medio metro en medio metro. En este paso se observará si hay partículas blancas. En el caso de haberlas habrá que estudiar si son partículas inertes o si se trata de cal que no ha reaccionado. Este estudio se realizará introduciendo las partículas en agua. De tratarse de cal que no ha reaccionado se agregará agua y se mezclará de nuevo.  
Si las partículas blancas son inertes se procederá a la compactación mediante compactador manual.



Se calcula que la mezcla final y la compactación necesitará un trabajo de 4 días.

- **Día 37. Aplicación de arenas.**

Por último, una vez terminada la estabilización con cal, se aplicarán arenas para proteger la carretera. En total se aplicarán 6 m<sup>3</sup> de arenas. El objetivo de estas arenas es proteger la capa estabilizada con cal de la erosión y además, aumentar la fricción entre las ruedas de los vehículos y la calzada.

- **Días 38 al 40. Finalización de la construcción del sistema de drenaje.**

La construcción de las cunetas se comenzó durante la construcción de la calzada. Se dedicarán 4 días más para la construcción de las cunetas.

### ***5.3 ESTABILIZACIÓN CON CAL EN LOS SURCOS DE LAS RUEDAS.***

Estabilizar toda la calzada puede resultar muy caro por lo que se propone realizar la estabilización mediante cal únicamente en la zona en la que van a pasar las ruedas de los vehículos.

El plan de ejecución será el mismo que en el apartado anterior con la diferencia de que, en este caso, solo se reforzarán las zonas en las que vayan a ejercer presión los vehículos disminuyendo así los recursos necesarios.

A pesar de que únicamente se vaya a estabilizar una zona de la calzada es muy importante el perfilado de la carretera manteniendo el peralte para que así las aguas evacuen correctamente. Por eso mismo hay que seguir el plan de ejecución como si se fuese a realizar la estabilización de toda la carretera. La única diferencia será que la aplicación de los materiales se realizará en 1 metro de la carretera dividido a ambos lados del eje central de la misma. A continuación, se expone la lista de materiales necesaria en este caso:

- La subrasante en este caso tendrá una profundidad de 200 mm, empleándose un porcentaje de gravas de 10%. Por lo tanto, en total en toda la carretera se emplearán 20 m<sup>3</sup> de gravas.
- La capa de afirmado tendrá una profundidad de 150 mm y para estabilizar se empleará un mayor porcentaje de cal, en concreto un 3 %. Por lo tanto, la cantidad de cal necesaria será de 4,5 m<sup>3</sup>.
- Las arenas se dispondrán por toda la calzada ya que ayudan a la absorción de humedad del terreno y mejoran la seguridad de la carretera al aumentar la fricción de las ruedas con la misma.

#### **5.4 IMPRIMACIÓN REFORZADA BITUMINOSA.**

En este apartado se explicará el plan de ejecución de la imprimación reforzada bituminosa. Esta explicación servirá tanto en el caso de que finalmente no haya presupuesto suficiente y haya que realizar este proceso como para en un futuro mejorar la carretera.

El motivo por el que este método es más económico es, además de porque los recursos necesarios son más baratos, por la duración del proceso que, al ser menor, abarata la mano de obra.

En este caso, la duración del proceso será de 20 días aproximadamente, y se seguirá el plan de ejecución que se muestra a continuación.

- **Días 1 al 3. Revisión del proyecto. Exposición del proyecto.**

Este primer paso coincide con el expuesto para la estabilización mediante cal. Por lo que, en un primer lugar, se realizará un reconocimiento del terreno y se trazará el camino que debe seguir la carretera, añadiendo al diseño los puntos de la carretera que no se hayan tenido en cuenta. Como en el caso anterior, se atenderán las sugerencias de las personas locales para mejorar el diseño

Con el proyecto final en papel se trazará sobre el terreno el camino que debe seguir la carretera que tendrá 5,5 metros de ancho a lo largo de toda su longitud, la cual se adaptará a la zona. En este trazado también se marcará el peralte, indicando el sentido de su inclinación, y el lugar en el que se encontrarán las cunetas. Las cunetas se encontrarán únicamente en el lado de la carretera hacia el que el peralte desvíe el agua para, así, poder evacuar el agua. La inclinación del peralte seguirá las siguientes pautas:

- En la zona con taludes, el peralte tendrá la inclinación en el mismo sentido que el talud.
- En las zonas con curvas, el peralte tendrá la inclinación hacia el interior de la curva.
- En las zonas horizontales, el peralte seguirá la misma inclinación que llevaba de antes y cambiará al encontrarse con una curva en sentido contrario.

En estos días se expondrá a los trabajadores el diseño de la carretera, transmitiéndoles la importancia que tiene el mismo y explicándoles cada paso y su relevancia para que la carretera tenga la mayor durabilidad posible.

Por último, se le entregará al jefe de obra la lista de materiales necesarios para este proceso en concreto. Así, aunque la necesidad de los materiales no es inmediata se asegurará que el día que deban usarse estén disponibles. La lista de materiales es la siguiente:

- **Días 4 al 7. Labrado del terreno y perfilado. Primer riego**

Para comenzar el diseño de la carretera se labrará el terreno hasta una profundidad de 5 cm. En este diseño también es muy importante el peralte que se realizará en este paso y se mantendrá en todo el proceso de construcción de la carretera. Se rociará con agua y finalmente se pasará un rodillo liso para homogeneizar la superficie. Una vez escarificada la superficie y pasado el rodillo se realizará el primer riego. En general, cuando se realiza este método se emplea en una proporción de entre 1,7 L/m<sup>2</sup> y 2 L/m<sup>2</sup>, pero supone un coste muy elevado por lo que se aplicará el líquido asfáltico

en una proporción de 0,85 L/m<sup>2</sup>. Para evitar que el terreno tenga huellas al colocar el líquido asfáltico este paso se realizará cada medio metro, debiéndose aplicar en cada vuelta 2,5 L y, en total en toda la longitud de la carretera 5000 L de líquido asfáltico.

- **Días 7 al 9. Tiempo de espera.**

Para asegurar que el asfalto penetra en la superficie deben esperarse 48 horas para hasta el siguiente paso.

Durante este periodo comenzará a construirse las cunetas de la carretera para avanzar y evitar perder días de trabajo.

- **Días 10 al 13. Compactación.**

Una vez el líquido asfáltico ha penetrado se procederá a la compactación mediante compactador manual. En el caso de que el terreno quede adherido al compactador, se esperarán otras 48 horas para dejar que el líquido asfáltico penetre y seque.

- **Día 14. Segundo riego.**

Se añadirá una capa más de líquido asfáltico esta vez en una proporción de 0,5 L/m<sup>2</sup>, por lo tanto, a lo largo de toda la carretera en este paso se añadirán 2500 L de líquido.

- **Días 13 al 15. Tiempo de espera.**

De nuevo, para asegurar que el líquido penetra en el terreno habrá que esperar 48 horas.

Como se hizo en el otro periodo de espera, se irá realizando la construcción de las cunetas.

- **Días 16. Aplicación de las arenas.**

Tras las 48 horas de espera se añadirán las arenas. Aproximadamente se necesitarán 11 m<sup>3</sup> de arenas. El fin de esta aplicación es que las arenas absorban la humedad del

asfalto y aumenten la fricción de los neumáticos con el suelo para así hacer el camino más seguro.

- **Día 17. Sellado final.**

El proceso de construcción de la calzada ya ha finalizado. Para asegurar que esta queda bien firmada se pasará de nuevo el rodillo liso por toda la superficie.

- **Días 18 al 20. Finalización de la construcción de sistema de drenaje.**

A lo largo de la imprimación reforzada bituminosa se comenzó la construcción de las cunetas, por lo que a estas se le ha dedicado alrededor de 4 días. Por este motivo, se estima que en tres días más de trabajo el sistema de drenaje estará construido.



## Capítulo 6. PRESUPUESTO

### 6.1 *PRESUPUESTO DEL PROYECTO*

En este capítulo se expone el presupuesto que se necesita en el proyecto. En primer lugar, se presenta el presupuesto de el diseño principal y más adelante se realizan cambios sobre este para realizar un plan más económico.

Para realizar correctamente el presupuesto, como habrá pérdidas de material por accidente o fallo, se aumentará la cantidad de materiales necesarios un 5%.

Por otra parte, al tratarse de un proyecto de cooperación las personas locales que colaboren no cobrarán un salario si no que lo trabajaran de manera gratuita. El jefe de obra, al estar más formado cobrará un salario de aproximadamente 750 € al mes.

Respecto a la maquinaria, no se necesitará comprar nada nuevo ya que solo se emplearán palas para excavar, compactadores manuales, rodillos lisos y rastrillos para escarificar el terreno. Por lo tanto, esto no supondrá un coste adicional.

A continuación, se presentan los diferentes presupuestos.

### 6.1.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CARRETERA MEDIANTE ESTABILIZACIÓN CON CAL.

<b>Mano de obra</b>	
<b>Jefe de obra</b>	
Salario (€/semana)	188,00
Semanas de trabajo	6
Personas	1
<b>Sueldo (€)</b>	<b>1128</b>
<b>Trabajadores</b>	
Salario (€/semana)	0
Semanas de trabajo	6
Personas	6
<b>Sueldo (€)</b>	<b>0</b>
<b>Materiales</b>	
<b>Grava</b>	
Cantidad (m3)	82,5
Coste (€/m3)	146
<b>Coste total (€)</b>	<b>12045</b>
<b>Cal</b>	
Cantidad (m3)	15,75
Coste (€/m3)	740,4
<b>Coste total (€)</b>	<b>11661,3</b>
<b>Arena</b>	
Cantidad (m3)	6
Coste (€/m3)	1050
<b>Coste total (€)</b>	<b>6300</b>
<b>Total (€)</b>	<b>31134,3</b>

Tabla 11. Presupuesto para la construcción de la carretera mediante estabilización con cal.



Respecto al presupuesto con el que se cuenta 30.451 € es un número excesivo por lo que a continuación se proponen cambios en el diseño que, aunque harán que las características de la carretera no sean tan buenas, será un número más accesible.

### 6.1.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CARRETERA ÚNICAMENTE ESTABILIZANDO LOS SURCOS POR LOS QUE CIRCULARAN LAS RUEDAS.

<b>Mano de obra</b>	
<b>Jefe de obra</b>	
Salario (€/semana)	188,00
Semanas de trabajo	6
Personas	1
<b>Sueldo (€)</b>	<b>1128</b>
<b>Trabajadores</b>	
Salario (€/semana)	0
Semanas de trabajo	6
Personas	6
<b>Sueldo (€)</b>	<b>0</b>
<b>Materiales</b>	
<b>Grava</b>	
Cantidad (m3)	21
Coste (€/m3)	146
<b>Coste total (€)</b>	<b>3066</b>
<b>Cal</b>	
Cantidad (m3)	4,725
Coste (€/m3)	740,4
<b>Coste total (€)</b>	<b>3498,39</b>
<b>Arena</b>	
Cantidad (m3)	6
Coste (€/m3)	1050
<b>Coste total (€)</b>	<b>6300</b>
<b>Total (€)</b>	<b>13992,39</b>

Tabla 12. Presupuesto para la construcción de carreteras mediante estabilización con cal en los surcos de las ruedas.

Esta cantidad se adecua más al presupuesto con el que se cuenta, aunque si fuese necesario podría reducirse más, disminuyendo la profundidad de la capa de afirmado o el porcentaje en cal que se añade. También podría emplearse menor cantidad de arena que reduciría significativamente el presupuesto.

### 6.1.3 IMPRIMACIÓN REFORZADA BITUMINOSA.

Este método supone un cambio radical en el diseño ya que no se emplea cal. En su lugar se utiliza líquido asfáltico.

Requiere menos tiempo por lo que el salario del jefe de obra se verá reducido al trabajar únicamente un mes en lugar de un mes y medio.

<b>Mano de obra</b>	
<b>Jefe de obra</b>	
Salario (€/semana)	188,00
Semanas de trabajo	3
Personas	1
<b>Sueldo (€)</b>	<b>564</b>
<b>Trabajadores</b>	
Salario (€/semana)	0
Semanas de trabajo	3
Personas	3
<b>Sueldo (€)</b>	<b>0</b>
<b>Materiales</b>	
<b>Líquido asfáltico</b>	
Cantidad (m3)	5
Coste (€/m3)	2856
<b>Coste total (€)</b>	<b>14280</b>
<b>Arena</b>	
Cantidad (m3)	6
Coste (€/m3)	1050
<b>Coste total (€)</b>	<b>6300</b>
<b>Total (€)</b>	<b>21144</b>

Tabla 13. Presupuesto para la construcción de la carretera mediante imprimación reforzada bituminosa.

Este presupuesto es más adecuado que el primero, pero sigue estando por encima de la estabilización únicamente de los surcos de las ruedas.

#### 6.1.4 IMPRIMACIÓN REFORZADA BITUMINOSA EN LOS SURCOS DE LAS RUEDAS.

Se propone como última opción la imprimación reforzada bituminosa únicamente en los surcos de los neumáticos. El presupuesto es el siguiente.

<b>Mano de obra</b>	
<b>Jefe de obra</b>	
Salario (€/semana)	188,00
Semanas de trabajo	3
Personas	1
<b>Sueldo (€)</b>	<b>564</b>
<b>Trabajadores</b>	
Salario (€/semana)	0
Semanas de trabajo	3
Personas	3
<b>Sueldo (€)</b>	<b>0</b>
<b>Materiales</b>	
<b>Líquido asfáltico</b>	
Cantidad (m3)	1
Coste (€/m3)	2856
<b>Coste total (€)</b>	<b>2856</b>
<b>Arena</b>	
Cantidad (m3)	6
Coste (€/m3)	1050
<b>Coste total (€)</b>	<b>6300</b>
<b>Total (€)</b>	<b>9720</b>

Tabla 14. Presupuesto para la construcción de la carretera mediante imprimación reforzada bituminosa en los surcos de los neumáticos.

A pesar de ser la opción más económica, no es la más recomendable debido a que sus propiedades no son las mejores.

## **6.2 VIABILIDAD ECONÓMICA.**

La viabilidad económica en este proyecto es clave. Se buscará en todo momento ajustar el presupuesto al máximo buscando los recursos más baratos para no elevar excesivamente el coste de construcción, pero siempre buscando la durabilidad de la carretera. En este contexto, se elige la opción de la estabilización con cal de los surcos por los que pasarán los neumáticos al ser la opción que asegura la mejora de las propiedades del suelo sin elevar excesivamente el coste.

Por otra parte, habrá que buscar recursos para conseguir este capital. Durante el curso 2019-2020 se realizaron proyectos como fiestas y torneos deportivos benéficos, así como ventas de camisetas y pulseras. Además, se buscó capital a través de empresas y organizaciones benéficas. El objetivo era conseguir alrededor de 50.000 €. Estos proyectos ayudaron a reunir una pequeña cantidad de dinero que se mantendrá de cara al futuro para realizar los proyectos, pero la realidad es que, debido al COVID-19 la recaudación se vio interrumpida y no se llegó al objetivo buscado. De cara al año que viene y con la esperanza de poder realizar el proyecto en los meses de julio y agosto de 2021, se retomará la recaudación lo antes posible con el objetivo de llegar al presupuesto necesario para todos los proyectos que se desea realizar. A pesar de la mala suerte de este año y de no poder ir a realizar el proyecto cuando se deseaba, se puede aprender de la experiencia y comenzar la recaudación mucho antes y desde otro punto de vista que implique mayor cantidad de dinero, como son las contribuciones de organizaciones benéficas y empresas.

Si se logra el presupuesto requerido el proyecto será perfectamente viable económicamente por lo que se trabajará mucho este aspecto a lo largo del año.

En caso de no conseguirse el capital necesario, se elegirá la opción mas barata o se reducirá la cantidad de materiales de cara a abaratar el coste del proyecto.

### **6.3 SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA.**

De cara al futuro de la comunidad es necesario estudiar si la carretera es sostenible económicamente. El mantenimiento de la carretera consiste en evitar que las cunetas se atasquen por la presencia de objetos y, una vez al año, reponer las arenas de la superficie si fuese necesario. De los costes que esto suponga se encargará la comunidad por lo que el proyecto es sostenible a largo plazo.

En el caso de que se decidiese mejorar la carretera, los costes que esto suponga también serán responsabilidad de la comunidad.





## Capítulo 7. CONCLUSIONES.

### 7.1 DISEÑO DE LA CARRETERA.

La zona donde se planea realizar el proyecto se caracteriza por abundantes precipitaciones durante los meses de lluvias, además de por una escasa vegetación y suelo muy arcilloso. Por este motivo, se decide realizar una carretera en la que tenga especial importancia el sistema de drenaje. Partiendo de este punto, la carretera tendrá un peralte del 5% a lo largo de toda su longitud para evacuar las aguas que caigan sobre ella dirigiéndolas hacia las cunetas. De esta forma, se asegura que la carretera no se inunda evitando además que se creen surcos y huellas sobre la carretera.

Por otra parte, la estabilidad de la carretera es fundamental. Esta se consigue a través de las diferentes capas del camino. Para evitar grietas y huellas causadas por vehículos de elevado volumen es muy importante una buena elección de la subrasante que dotará a la carretera de una elevada resistencia. Por ello, la calidad de la subrasante se mejora añadiendo grava. La siguiente capa que se encuentra en la carretera es la capa de afirmado. Esta capa se estabiliza con el objetivo de disminuir la plasticidad añadiendo cal, para que en las épocas de lluvias la carretera no se estropee. Por último, para proteger la estabilización se coloca una fina capa de arenas que deberá reponerse cada año.

Este método de estabilización de carreteras tiene unos buenos resultados, pero tiene un coste muy elevado por lo que, para abaratar costes, en lugar mejorar la subrasante y estabilizar toda la carretera únicamente se realizará el proyecto por los surcos por los que pasarán los coches, es decir, en dos surcos de 0,5 metros cada uno a ambos lados del eje central de la carretera.

Como recurso adicional se propone también la imprimación reforzada bituminosa que resulta más barata, pero con resultados inferiores.

## **7.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO.**

A la hora de realizar el proyecto, el aspecto más importante es transmitir a la comunidad la importancia de la carretera en todos sus aspectos. Debe ser una carretera duradera que puedan emplear en su día a día, pero también debe servirles como método de aprendizaje por si en un futuro desean habilitar cualquier otro camino. Por lo tanto, a la hora de construir la carretera, se hará participe a la comunidad enseñándoles la técnica de construcción y su mantenimiento.

Deberá seguirse el plan de ejecución evitando pausas en el trabajo que retrasen la fecha de finalización del proyecto. Además, en este diseño es muy importante el empleo de medidas de seguridad para evitar los posibles problemas físicos que puede causar la cal.

## **7.3 PRESUPUESTO.**

De cara al proyecto que, en teoría y si no hay ningún impedimento, se realizará en el verano de 2021, será necesario recaudar el dinero para llevar a cabo, no solo la carretera, si no todos los trabajos de otros compañeros. Por ello, se requiere un compromiso firme con la recaudación que estará orientada a las donaciones de grandes empresas y organizaciones benéficas.



## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Association, N. L. (2004). *Manual de Estabilización de Suelo Tratado con Cal. Estabilización y Modificación con Cal.*
2. *Calcinor.* (s.f.). Obtenido de *Calcinor*:  
<https://www.calcinor.com/es/actualidad/2018-01-23/cal-estabilizacion-de-suelos/#:~:text=Son%20tres%20los%20efectos%20que,de%20cualquier%20suelo%20con%20humedad.>
3. Castelló, J. D. (2003). *Mezcla de Cemento en las Infraestructuras de Transporte. Estabilización de Suelos con Cal.* Madrid. Obtenido de *Mezcla de Cemento en las Infraestructuras de Transporte. Estabilización de Suelos con Cal.*
4. *Child Future Africa.* (s.f.). Obtenido de *Child Future Africa*:  
<http://childfutureafrica.org/>
5. *Construreyes Ingeniería.* (s.f.). Obtenido de *Construreyes Ingeniería*:  
<https://www.construreyesingenieria.com/2017/07/disenio-hidraulico-de-cunetas.html>
6. *EcuRed.* (4 de marzo de 2011). Obtenido de *EcuRed*:  
<https://www.ecured.cu/Zimbabue>
7. *Geotécnia Facil.* (s.f.). Obtenido de *Geotécnia Facil*:  
<http://geotecniafacil.com/ensayo-cbr-laboratorio/>
8. Gomez, M. G. (2018). *Estabilización de un Suelo con Cal y Ceniza Volante.* Bogotá.
9. Lombardi, V. Z. (2008). *Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito.* Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Lima. Obtenido de *Manual de Diseño d*

10. Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito:  
<http://www.sutran.gob.pe/wp-content/uploads/2015/08/manualdedisenodecarreterasnopavimentadasdebajovolumendetransito.pdf>
11. Lombardi, V. Z. (2008). *Manual para el Diseño de Carretera Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito*. Obtenido de Manual para el Diseño de Carretera Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito.:  
<http://www.trianglegironi.cat/images/imatges%20i%20documents/cerdanya/urus/disseny%20carreteres.pdf>
12. Moyo, J. (18 de febrero de 2019). *Equal Times*. Obtenido de Equal Times:  
[https://www.equaltimes.org/zimbabue-en-2019-la-situacion?lang=es#.Xwc4\\_ZMzbfZ](https://www.equaltimes.org/zimbabue-en-2019-la-situacion?lang=es#.Xwc4_ZMzbfZ)
13. *Naciones Unidas*. (s.f.). Obtenido de Objetivos Desarrollo Sostenible:  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
14. Santos, C. G. (2019). *Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados, respuestas a cargas estáticas y dinámicas*. Madrid.
15. *Soil Mechanics*. (s.f.). Obtenido de  
<https://sites.google.com/site/soilmechanicsiiunam/mejoramiento-de-suelos>
16. UNICEF. (s.f.). *UNICEF*. Obtenido de UNICEF:  
[https://www.unicef.org/spanish/emergencies/southernafrica/index\\_zimbabwe.html](https://www.unicef.org/spanish/emergencies/southernafrica/index_zimbabwe.html)
17. Ventura, V. (4 de julio de 2019). *El Economista*. Obtenido de El Economista:  
<https://www.eleconomista.es/internacional/noticias/9977300/07/19/Zimbabue-recupera-su-moneda-local-diez-anos-despues-de-retirarla-por-una-hiperinflacion-historica.html>

18. *Weather Spark*. (s.f.). Obtenido de El clima Promedio en Harare:  
<https://es.weatherspark.com/y/96831/Clima-promedio-en-Harare-Zimbabue-durante-todo-el-a%C3%B1o>
19. *Wikipedia*. (s.f.). Obtenido de Rugosidad (hidráulica):  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Rugosidad\\_\(hidr%C3%A1ulica\)#Coeficiente\\_n\\_para\\_la\\_f%C3%B3rmula\\_de\\_Manning](https://es.wikipedia.org/wiki/Rugosidad_(hidr%C3%A1ulica)#Coeficiente_n_para_la_f%C3%B3rmula_de_Manning)
20. *Wikipedia*. (s.f.). Obtenido de Geografía de Zimbabwe:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa\\_de\\_Zimbabue](https://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_de_Zimbabue)
21. *Wikipedia*. (4 de julio de 2020). *Zimbabwe*. Obtenido de  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Zimbabue#Geograf%C3%ADa>



## ANEXO I

Los objetivos de desarrollo sostenible tienen como objetivo erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. Estos tres objetivos principales se amplían en 17 objetivos que buscan un desarrollo sostenible.



*Figura 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible.*

Al tratarse de un proyecto de colaboración, se quieren cumplir numerosos objetivos entre los que se encuentran:

- Fin de la pobreza.
- Educación de calidad.
- Trabajo decente y crecimiento económico.
- Industria, innovación e infraestructura.
- Ciudades y comunidades sostenibles.



### ***FIN DE LA POBREZA.***

El proyecto trata de la adaptación de la carretera que conecta el poblado con el colegio de formación profesional. De esta forma, se potencia la educación de los habitantes de la comunidad lo que llevará a una mejor formación y una mayor facilidad para desarrollarse en el mundo. Este desarrollo no será únicamente en el ámbito de la educación ya que conllevará un desarrollo económico que ayudará a erradicar la pobreza.

### ***EDUCACIÓN DE CALIDAD.***

La posibilidad de acudir al colegio de formación profesional por una carretera restaurada que disminuye el riesgo de accidente contribuye a que la calidad de la educación mejore. Asimismo, la posibilidad de que camiones con materiales escolares u otros servicios puedan acceder al colegio por una carretera fácilmente transitable también aumenta la calidad de la educación.

### ***TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO.***

Los alumnos no son los únicos que acudirán al colegio de formación profesional, los profesores también merecen unas condiciones laborales dignas como es poder acudir al trabajo en bajo unas condiciones de seguridad mínimas. La adaptación de la carretera contribuirá a que los trabajadores tengan un empleo decente.

Asimismo, al ser la carretera que lleva a un colegio de formación profesional, la educación mejorará y la población experimentará un crecimiento económico.

---

### ***INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA.***

Con la construcción de la carretera se mejorará la situación actual del camino, mejorando la infraestructura. Además, este proyecto supone una innovación en la zona que acercará a la población al método de construcción de carreteras, pudiendo emplear este mismo método en un futuro si desean adaptar otro camino.

### ***CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES.***

El proyecto se ha elaborado con el fin de que la carretera tenga la mayor durabilidad posible. Por esta razón, se les explica a los habitantes del poblado la importancia de mantener la carretera dándoles indicaciones de como hacerlo para asegurar la sostenibilidad del proyecto. La mejor manera de crear comunidades sostenibles es a través de la educación, transmitiendo la capacidad que tienen ellos mismos para mejorar y mantener su propia comunidad. Por este motivo, en este proyecto tiene especial importancia la implicación de los ciudadanos y su aprendizaje.

## ANEXO II

Clasificación de los suelos según el método AASHTO.

Clasificación general	Suelos granulosos 35% máximo que pasa por tamiz de 0,08 mm							Suelos finos más de 35% pasa por el tamiz de 0,08 mm				
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6
Análisis granulométrico												
% que pasa por el tamiz de: 2 mm 0,5 mm 0,08 mm	máx. 50 máx. 30 máx. 15	máx. 50 máx. 25	mín. 50 máx. 10	máx. 35	Máx.35	máx. 35	máx. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35
Límites Atterberg												
Límite de liquidez Índice de plasticidad	máx. 6	máx. 6		máx. 40 máx. 10	mín. 40 máx. 10	máx. 40 mín. 10	mín. 40 mín. 10	máx. 40 máx. 10	máx. 40 máx. 10	máx. 40 mín. 10	mín. 40 IP<LL-30	mín. 40 IP<LL-30
Índice de grupo	0	0	0	0	0	máx. 4	máx. 4	máx. 8	máx. 12	máx. 16	máx. 20	máx. 20
Tipo de material	Piedras, gravas y arena		Arena Fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Estimación general del suelo como subrasante	De excedente a bueno						De pasable a malo					

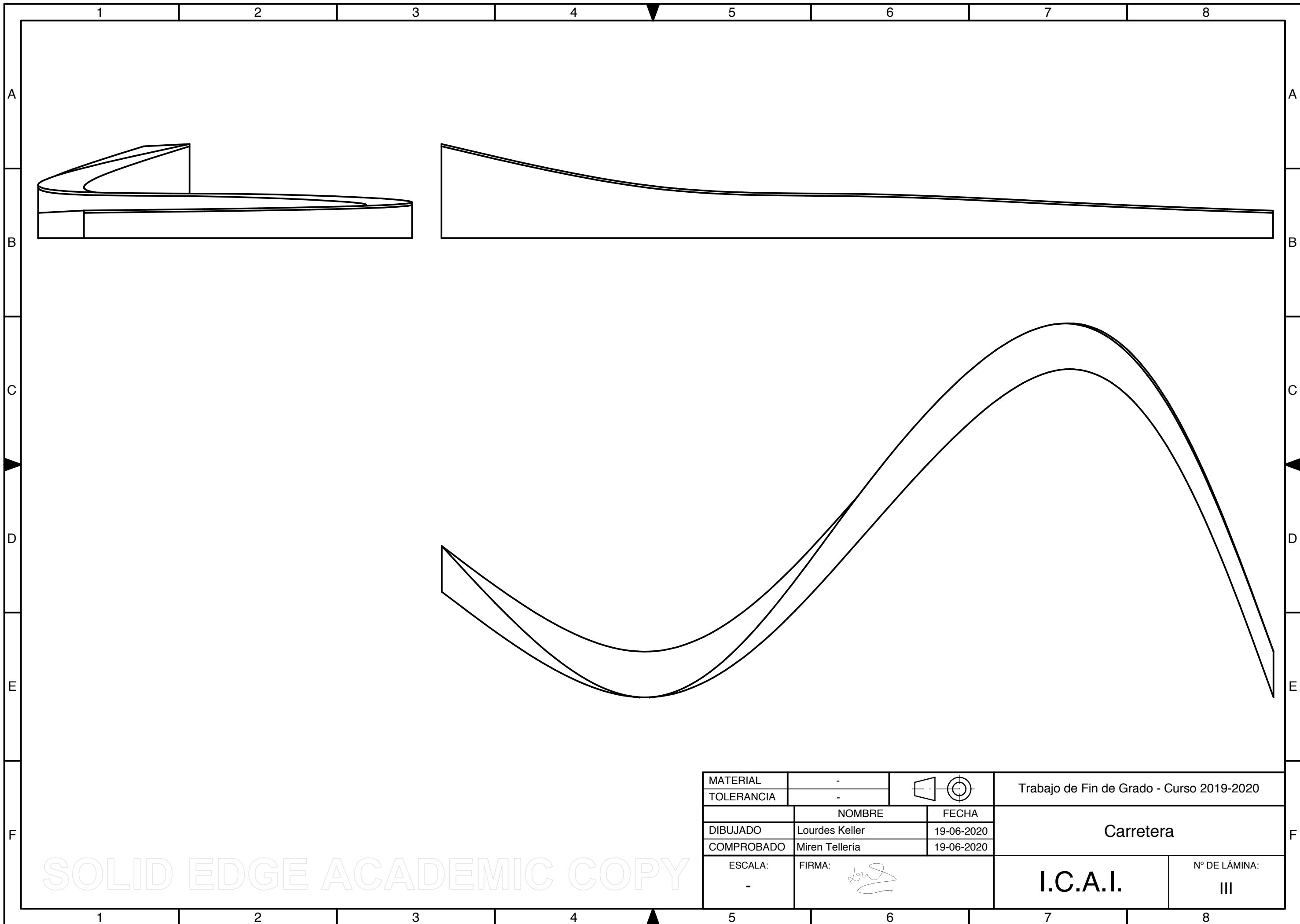
Tabla 15. Clasificación de los suelos.

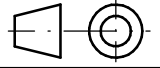

Fuente: "Manual para el Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito." (Lombardi, Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, 2008)



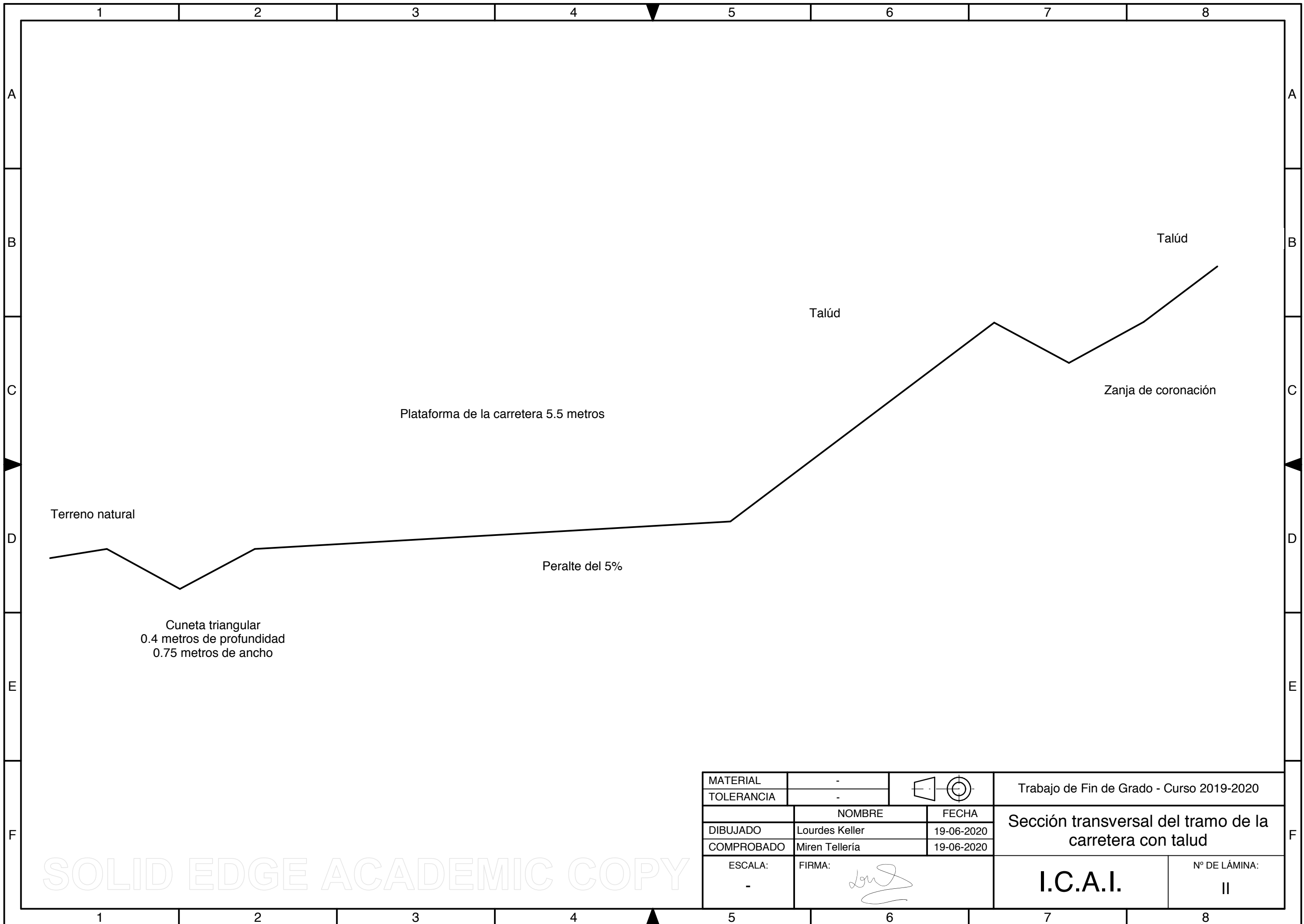
## **ANEXO III**

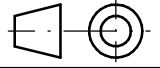

En el Anexo II se adjuntan los planos relativos a la ejecución de la carretera.



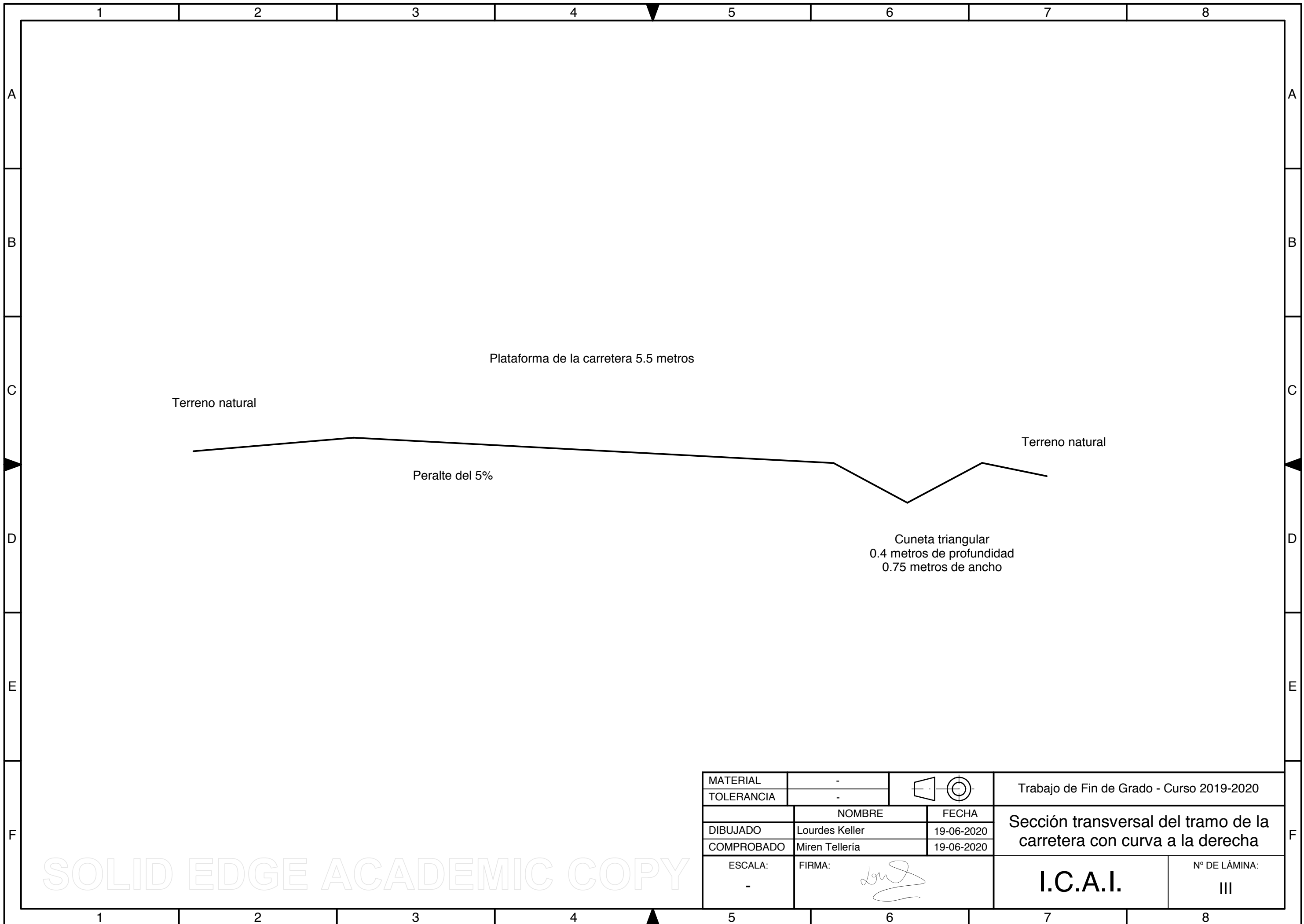
MATERIAL	-		Trabajo de Fin de Grado - Curso 2019-2020	
TOLERANCIA	-		Carretera	
	NOMBRE	FECHA		
DIBUJADO	Lourdes Keller	19-06-2020		
COMPROBADO	Miren Telleria	19-06-2020		
ESCALA:	FIRMA:			Nº DE LÁMINA: III
-				

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



MATERIAL	-		Trabajo de Fin de Grado - Curso 2019-2020	
TOLERANCIA	-		Sección transversal del tramo de la carretera con talud	
	NOMBRE	FECHA		
DIBUJADO	Lourdes Keller	19-06-2020		
COMPROBADO	Miren Tellería	19-06-2020		
ESCALA:	FIRMA:		I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA: II
-				

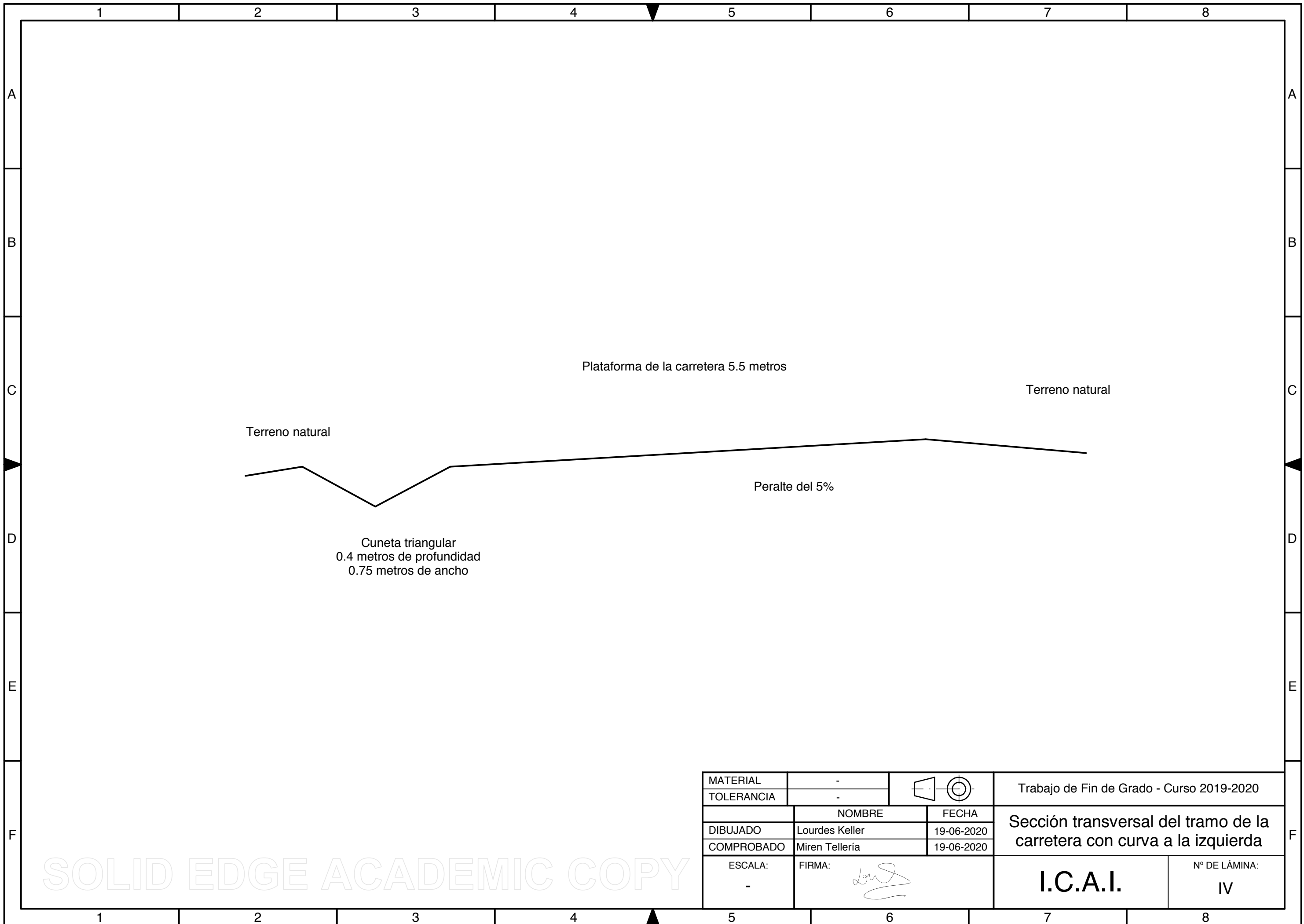
SOLID EDGE ACADEMIC COPY



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

I.C.A.I.





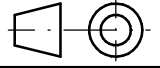

Plataforma de la carretera 5.5 metros

Terreno natural

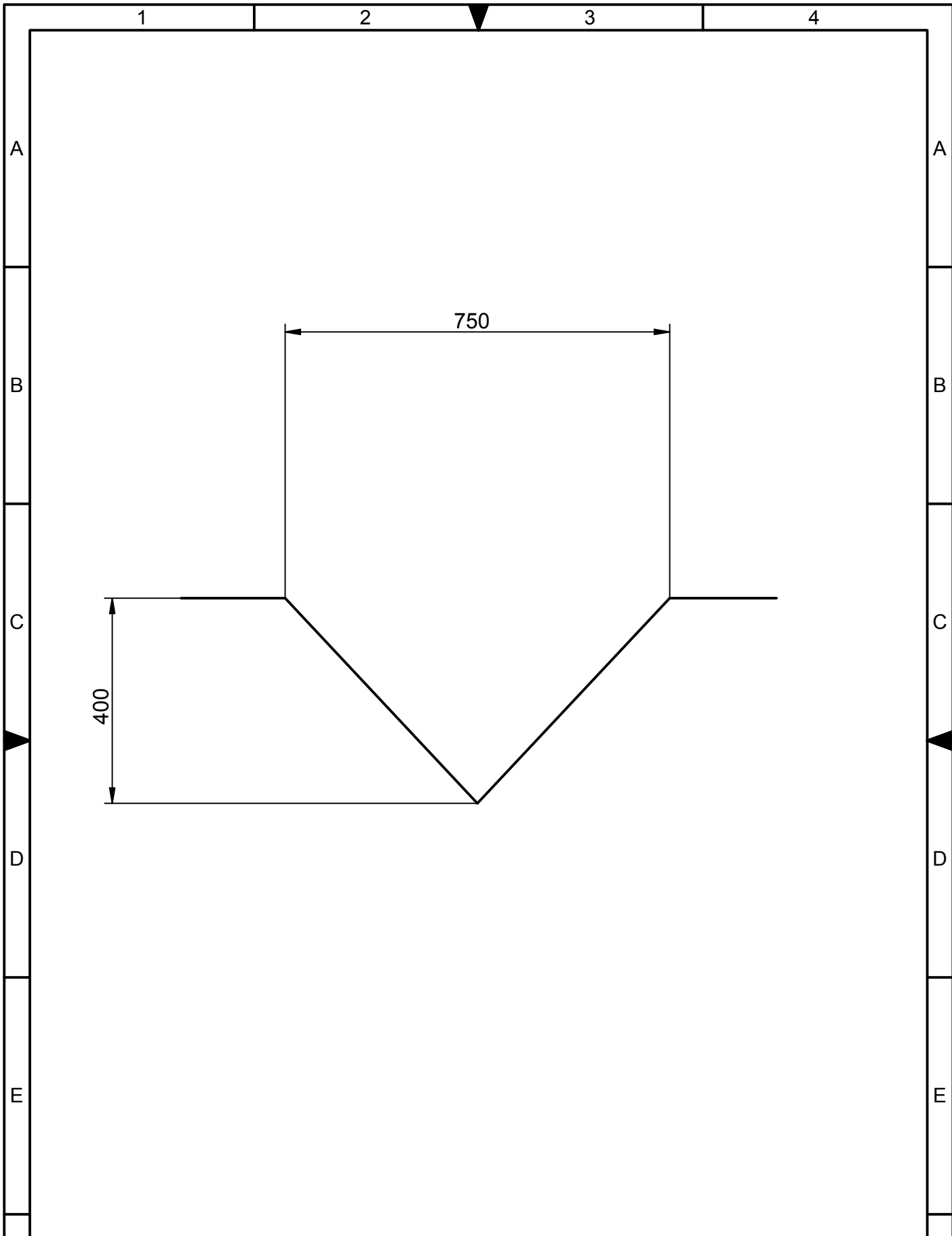
Terreno natural

Peralte del 5%

Cuneta triangular  
0.4 metros de profundidad  
0.75 metros de ancho

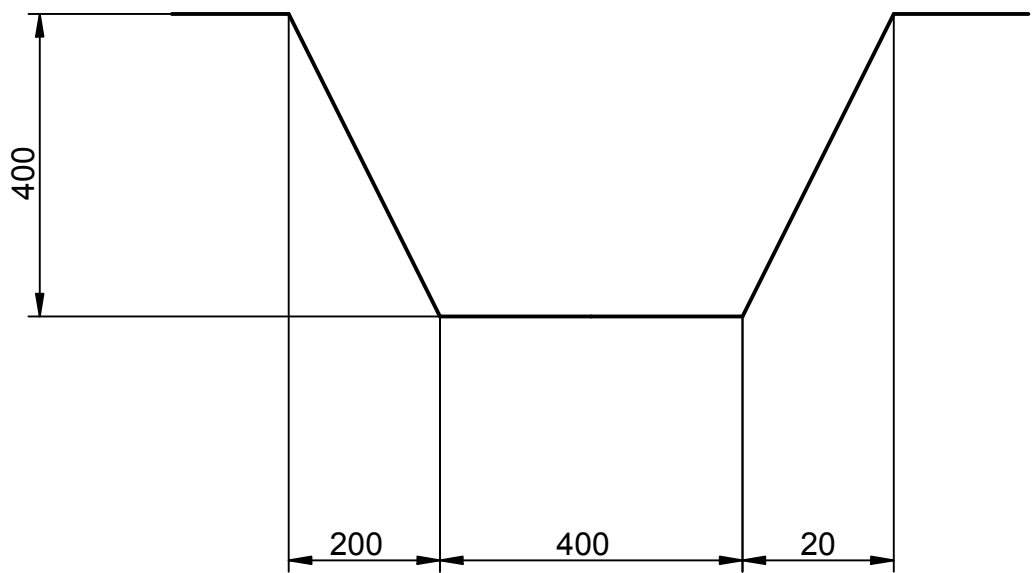
MATERIAL	-		Trabajo de Fin de Grado - Curso 2019-2020	
TOLERANCIA	-		Sección transversal del tramo de la carretera con curva a la izquierda	
	NOMBRE	FECHA		
DIBUJADO	Lourdes Keller	19-06-2020		
COMPROBADO	Miren Tellería	19-06-2020		
ESCALA:	FIRMA:		I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA: IV
-				

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



MATERIAL	-		Trabajo de Fin de Grado - Curso 2019-2020		
TOLERANCIA	-		<p style="text-align: center;"><b>Cuneta triangular</b></p>		
	NOMBRE	FECHA			<p style="text-align: center;"><b>I.C.A.I.</b></p>
DIBUJADO	Lourdes Keller	20/06/20			
COMPROBADO	Miren Tellería	20/06/20			
ESCALA:	FIRMA:				

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



MATERIAL	-		Trabajo de Fin de Grado - Curso 2019-2020	
TOLERANCIA	-		<p style="text-align: center;"><b>Cuneta trapezoidal</b></p>	
	NOMBRE	FECHA		
DIBUJADO	Lourdes Keller	20/06/20		
COMPROBADO	Miren Tellería	20/06/20		
ESCALA:	FIRMA:		<p style="text-align: center;"><b>I.C.A.I.</b></p>	Nº DE LÁMINA:
-				VI

SOLID EDGE ACADEMIC COPY