



universidad
de león



Página 1 de 87

Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Fin de Grado

ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE
SABERO (LEÓN)

IMPROVEMENT STUDY OF SABERO'S WHITEWATER
COURSE (LEÓN)

Autor: Darío Cuesta Álvaro
Tutor: Marta Menéndez

(Julio, 2022)

Darío Cuesta Álvaro

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
Trabajo de Fin de Grado

ALUMNO: Darío Cuesta Álvaro

TUTOR: Marta Menéndez Fernández

TÍTULO: Estudio de mejora del canal de aguas bravas de Sabero

TITLE: Improvement study of Sabero's white water course

CONVOCATORIA: Junio 2022

RESUMEN:

Las ayudas europeas para la reactivación económica de las zonas mineras han abierto numerosas posibilidades a los desolados pueblos de la montaña leonesa. Se expone un estudio de rehabilitación y mejora del canal de aguas bravas de Sabero (León), instalación de uso turístico y de ocio deportivo, que supone uno de los más importantes dinamizadores sociales y económicos de la zona.

Se plantean mejoras en la sostenibilidad y utilidad de la infraestructura tras el mejor aprovechamiento del caudal, las cotas y sus desniveles, así como el diseño de elementos de nueva implantación.

Así mismo, se propone una obra de adaptación asequible que aportará ciertos cambios imprescindibles para lograr la consideración de dicho canal como un referente a nivel internacional, consiguiendo culminar el plan de reactivación económica, turística y social establecido en la comarca.

ABSTRACT:

European aids for the economic reactivation of the mining areas have opened numerous possibilities to the desolated Leonese mountain towns. This document studies different possibilities for the rehabilitation and improvement of Sabero's whitewater channel (León), which currently is one of the most important social and economic resources of the zone.

Improvements in the sustainability and usefulness of the infrastructure are proposed to improve the use of the flow, the heights and their unevenness, as well as the design of new elements.

Likewise, an adaptation work is proposed so that will provide certain essential changes to improve the channel features so that it could be considered as an international benchmark, managing to complete the economic, tourist and social reactivation plan established in the region.

Palabras clave: Aguas bravas, slalom, compuerta, rótula, velocímetro, caudal, hidrológico, escollera, espigón, contracorriente, ola, compresión, tracción, flexión, eje, torsión.

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Introducción y antecedentes.....	10
2.	Contextualización.	12
2.1.	Objeto del estudio.	12
2.2.	Emplazamiento, características y descripción del recorrido.....	13
2.3.	Estudio hidrológico I.	14
3.	Análisis del caudal.	19
3.1.	Teoría del cálculo.....	20
3.1.1.	Estudio del terreno.....	21
3.1.2.	Estudio del fluido.....	23
3.1.2.1.	Velocímetro.....	24
3.1.2.2.	Análisis del movimiento.....	26
3.2.	Medición de campo.	28
3.2.1.	Procedimiento.	28
3.2.2.	Resultados.	30
3.2.3.	Interpretación de los resultados.	33
3.3.	Conclusiones y propuestas de mejora.....	33
3.3.1.	Estudio hidrológico II.	34
4.	Compuerta hidráulica.....	37
4.1.	Funcionamiento teórico y diseño.	38
4.2.	Dimensionamiento del perfil.	39
4.3.	Dimensionamiento del eje.....	46
4.3.1.	Planteamiento y estudio de las tensiones más desfavorables.....	46
4.3.1.1.	Estudio a flexión.....	48
4.3.1.2.	Estudio a torsión.	52

4.3.1.3.	Conclusiones.	56
4.3.2.	Dimensionamiento del eje a flexión.....	56
4.3.2.1.	Eje biapoyado con un tramo.....	57
4.3.2.2.	Eje con tres apoyos y dos tramos.	57
4.3.2.3.	Eje con cuatro apoyos y tres tramos.	61
4.4.	Dimensionamiento de la trampilla de caudal ecológico.	66
5.	Distribución de la pendiente.	68
5.1.	Criterio de selección de datos.	68
5.1.1.	Planteamiento y mediciones.	68
5.1.2.	Análisis matemático.	70
5.2.	Interpretación de resultados.	76
5.3.	Propuesta de mejora.	78
5.3.1.	Análisis de situación.	78
5.3.2.	Redistribución.....	80
5.3.2.1.	Redistribución tramo 1.	80
5.3.2.2.	Redistribución tramo 2.	84
6.	Conclusiones.....	85
7.	Agradecimientos.....	86
8.	Bibliografía.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2-1. Vista aérea (Río Esla a su paso por Alejico)	13
Figura 2.2-2. Perfil de elevación del canal	14
Figura 2.3-1. Viabilidad del canal tras la obra de 2015.	16
Figura 2.3-2. Viabilidad del canal tras la obra de 2020.	17
Figura 3.1-1. Planteamiento estudio del terreno.	22
Figura 3.1-2. Mean-Section Method.	23
Figura 3.1-3. Problemas del cálculo de la velocidad del fluido en sistemas con Trayectoria libre.....	23
Figura 3.1-4. Velocímetro.	24
Figura 3.1-5. Elementos del Velocímetro.	25
Figura 3.1-6. Análisis del movimiento.	27
Figura 3.2-1. Caudales SAIH durante la medición.	28
Figura 3.2-2. Zonas de medición.	28
Figura 3.2-3. Boceto de situación.	29
Figura 3.2-4. Proceso de medición.	30
Figura 3.2-5. Perfil zona 1.....	30
Figura 3.2-6. Caudales zona 1. Valores en cm^3/s y línea de aproximación polinómica de grado 6.....	31
Figura 3.2-7. Perfil zona 2.....	31
Figura 3.2-8. Caudales zona 2. Valores en cm^3/s y línea de aproximación polinómica de grado 6.....	31
Figura 3.2-9. Resultados obtenidos.	33
Figura 3.3-1. Utilidad del canal con compuerta.	36
Figura 3.3-1. Distribución del caudal por el tramo de Slalom con la compuerta.	38
Figura 4.1-1. Esquema inicial del funcionamiento de la compuerta.	39
Figura 4.2-1. Presión hidrostática.....	39
Figura 4.2-2. Dimensiones del perfil.....	40
Figura 4.2-3. Distribución de cargas sobre el perfil.....	40
Figura 4.2-4. Momentos generados por cada fuerza sobre la rótula.....	41
Figura 4.2-5. Variabilidad de los momentos respecto a la compuerta.....	42
Figura 4.2-6. Dimensionamiento del perfil.....	44
Figura 4.2-7. Variación de los momentos dependiendo del nivel de altura del caudal.	45
Figura 4.3-1. Direcciones de los ejes.	46
Figura 4.3-2. Puntos más desfavorables de estudio.....	47
Figura 4.3-3. Fuerzas transmitidas al eje.....	47
Figura 4.3-4. Tensiones generadas por las cargas distribuidas en el eje z.	48
Figura 4.3-5. Tensiones generadas por las cargas distribuidas en el eje y.	49
Figura 4.3-6. Distribución de tensiones en la sección.	49

Figura 4.3-7. Cálculos limitantes para viga biapoyada sometida a cargas distribuidas.....	52
Figura 4.3-8. Fuerzas causantes del momento máximo ($h=0.3236$).....	53
Figura 4.3-9. Distribución de las tensiones tangenciales.....	54
Figura 4.3-10. Cálculos a torsión con longitud máxima de flexión.	56
Figura 4.3-11. Resolución de la estructura hiperestática de tres apoyos y dos tramos.....	57
Figura 4.3-12. Resolución del Dimensionamiento 2.....	60
Figura 4.3-13. Planteamiento y resolución del Dimensionamiento 3.	61
Figura 4.3-14. Descomposición en estructuras isostáticas.....	62
Figura 4.3-15. Diagrama de momentos de la estructura.....	63
Figura 4.3-16.Resolución del dimensionamiento 3.	65
Figura 4.3-17. Eje con cuatro apoyos y tres tramos.	66
Figura 4.4-1. Trampilla para el caudal ecológico.	67
Figura 5.1-1. Localización de las rutas creadas para el estudio de los sectores.....	69
Figura 5.1-2. Histograma de las altitudes recopiladas en la balsa inicial.	70
Figura 5.1-3. Representación de puntos y planteamiento inicial.....	71
Figura 5.1-4. Imparcialidad del criterio establecido.	72
Figura 5.1-5. Histograma. Evolución de la media en cada iteración.	73
Figura 5.1-6. Diagrama de puntos. Evolución de la media en cada iteración.....	73
Figura 5.1-7. Programación del algoritmo.....	74
Figura 5.1-8. Características obtenidas de cada tramo.	75
Figura 5.1-9. Perfil del canal.	75
Figura 5.2-1. Tramo inicial del circuito.	76
Figura 5.2-2. Tramo medio del circuito.	77
Figura 5.2-3. Tramo final del circuito.....	77
Figura 5.3-1. Reglamento ICF 8.2. Competition course.....	78
Figura 5.3-2. Reglamento ICF 9.4. Course Design Requirements.....	78
Figura 5.3-3. Limitaciones del artículo 9.4.5 de la normativa ICF.....	79
Figura 5.3-4. Comparativa perfil actual y perfil modificado.	80
Figura 5.3-5. Localización del tramo (1).	81
Figura 5.3-6. Localización de la modificación del tramo (1).	81
Figura 5.3-7. Colocación de los espigones para la generación de un rulo.....	82
Figura 5.3-8. Representación 3D de los diques de nueva implantación.....	82
Figura 5.3-9. Vista frontal de los diques de nueva implantación.	83
Figura 5.3-10. Vista superior de los diques de nueva implantación.....	83
Figura 5.3-11. Simulación de las pendientes de agua generadas por el nuevo perfil.	84

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 3.1-1. Caudal	21
Fórmula 3.1-2. Mean-Section Method	23
Fórmula 3.1-3. Segunda Ley de Newton.	26
Fórmula 3.1-4. Movimiento Rectilíneo Uniforme.	27
Fórmula 3.1-5. Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado.....	27
Fórmula 4.2-1. Ecuaciones de las fuerzas sobre el perfil.....	41
Fórmula 4.2-2. Equilibrio de momentos en la rótula.	42
Fórmula 4.2-3. Dimensionamiento del perfil en función del espesor.	43
Fórmula 4.3-1. Tensiones bajo flexión.	49
Fórmula 4.3-2. Desarrollo matemático del punto más desfavorable.....	50
Fórmula 4.3-3. Radio mínimo de agotamiento de la sección.	51
Fórmula 4.3-4. Momento máximo.	53
Fórmula 4.3-5. Tensión tangencial debido al torsor a lo largo del eje.	54
Fórmula 4.3-6. Variación del cortante a lo largo del eje.	54
Fórmula 4.3-7. Tensión tangencial debida al cortante a lo largo del eje.	54
Fórmula 4.3-8. Variación del momento con dos apoyos.....	55
Fórmula 4.3-9. Tensión normal debido a las cargas distribuidas a lo largo del eje.....	55
Fórmula 4.3-10. Ecuación de Von Mises.	55
Fórmula 4.3-11. Principio de los Trabajos Virtuales.....	57
Fórmula 4.3-12. Principio de los Trabajos Virtuales aplicado en la resolución de la viga hiperestática.	58
Fórmula 4.3-13. Cálculo del momento máximo.	58
Fórmula 4.3-14. Radio mínimo de agotamiento de la sección.	59
Fórmula 4.3-15. Ecuaciones del giro en C.	62
Fórmula 4.3-16. Ecuaciones del giro en D.	62
Fórmula 4.3-17. Ecuaciones de los momentos tramos 1 y 3.....	63
Fórmula 4.3-18. Análisis del momento máximo en los tramos 1 y 3.	63
Fórmula 4.3-19. Ecuaciones del momento en el Tramo 2.....	63
Fórmula 4.3-20. Resolución tensional del dimensionamiento 3.	64
Fórmula 4.4-1. Predimensionamiento de las trampillas.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.3-1. Cálculo del caudal en la zona 1.....	32
Tabla 3.3-2. Caudales de cada ramal.....	33
Tabla 4-1. Distribución del caudal con la compuerta.....	37

1. Introducción y antecedentes.

Hay que remontarse a 1789 cuando con la revolución francesa comenzó a nivel europeo un proceso de éxodo rural pronunciado en el que millones de habitantes residentes en el campo emigraban a las grandes ciudades en búsqueda de nuevas y mejores oportunidades de vida y trabajo. Es entonces, cuando se establecieron los primeros esbozos de la despoblación rural actual causada debida a un crecimiento urbano desorbitado e inevitable.

Desde entonces, este hecho poco a poco se ha ido consolidando en mayor o menor medida hasta que a mediados del siglo XX la realidad ya era arrolladora. Las ciudades empezaban a monopolizar toda gran oportunidad de desarrollo industrial con la consecuente creación de empleo. Además, en la vida rural el desarrollo industrial jugaba una baza de doble filo pues se conseguían mecanizar procesos que hasta la fecha eran manufacturados lo cual suponía incrementar y mejorar la capacidad de producción en menor tiempo, pero que a su vez se llevaba por delante miles y miles de empleados que dejaban de ser necesarios al no poder competir ante la nueva maquinaria. A nivel nacional este desmesurado movimiento de población no se producía de forma ecuánime en toda la geografía española, si no que se veía magnificado en las ciudades industriales punteras que a su vez eran las grandes capitales con sistemas de comunicación cómodos e innovadores frente a los cuales las zonas rurales quedaban devastadas.

En definitiva, lo expuesto anteriormente, sumado a la comodidad, el desarrollo y las oportunidades de las ciudades se ha convertido en la puntilla de muchas zonas rurales envejecidas y prácticamente despobladas a día de hoy. Castilla y León, pero más en particular la montaña leonesa es una de las comarcas más afectadas por este hecho atroz, ya que hay que sumar a todo lo anterior las medidas drásticas de las nuevas políticas energéticas contra las fuentes de energía no renovables, siendo la minería del carbón el principal motor económico de la zona. Es por ello, por lo que todos estos factores han encaminado la zona a la despoblación y el abandono progresivo hasta lo que terminará siendo su inevitable muerte, si no se remediara con urgencia.

Más en particular, el municipio de Sabero de la provincia de León ha sido una de las víctimas principales ya que desde 1960 ha visto disminuida y envejecida su población a pasos agigantados debido a las causas ya mencionadas. No obstante, ha sido en los últimos años, tras la apremiante revelación de las evidencias de estas duras conclusiones, cuando parece vislumbrarse un atisbo de esperanza, ya que desde Europa se han aprobado planes y ayudas de desarrollo y recuperación con los que se trata de reactivar la zona económica y demográficamente.

Uno de estos planes, consiste en la creación de zonas atractivas de ocio que consigan polarizar un flujo turístico significativo con el consecuente beneficio que ello conlleva. Una de las inversiones que está llevando a cabo el ayuntamiento de la localidad es el desarrollo y constante mejora del canal de aguas bravas de Alejico, barrio del municipio, en donde numerosos deportistas de alto nivel, empresas de ocio y tiempo libre, turistas y los propios habitantes del pueblo encuentran una zona deportiva y recreativa a la que acudir disfrutando de unas condiciones medioambientales y paisajísticas prácticamente únicas en la región. Con el presente documento, se presenta un proyecto asequible gracias a ayudas europeas con el que se persigue la realización de una tercera obra de mejora sobre el canal de aguas bravas de Alejico (Sabero). La obra aportará ciertos cambios imprescindibles con la idea final de afianzar dicho canal como un referente deportivo a nivel internacional, incluso llegando a convertirlo en una de las sedes recurrentes de la ICF (International Canoe Federation). Por otra parte, de esta manera se conseguiría culminar el plan de reactivación de la zona a nivel económico, deportivo y turístico con todos los beneficios que ello conlleva.

2. Contextualización.

2.1. OBJETO DEL ESTUDIO.

El presente documento se redacta con el objeto de estudiar y elaborar diferentes propuestas de mejora que permitan detallar las obras concernientes a la mejora del canal de aguas bravas de Alejico-Sabero (León) en el río Esla para un uso tanto deportivo como recreativo que ayude a la recuperación económica y social de esta zona deprimida.

Las propuestas se centran principalmente en el estudio y modificación del caudal y de la geometría del canal actual con el objeto de mejorar la viabilidad de la zona y la calidad del recorrido. Dichas propuestas, se postulan en cuanto a las temáticas siguientes, que serán desarrolladas posteriormente:

- Elementos de nueva implantación:
 - Se diseña una compuerta reguladora del caudal que permita mejorar notoriamente la viabilidad y uso de la instalación. Para ello, se realiza un detallado estudio hidrológico con el que establecer el caudal más apropiado del canal para posteriormente diseñar la compuerta.

- Mejoras de distribución:
 - Establecimiento de un nivel de cotas de agua adecuado para aumentar el número de días útiles del canal, consiguiendo que los usuarios puedan utilizarlo con un caudal menor.
 - Mejora en la distribución de la pendiente final de la infraestructura.
 - Estudio de los movimientos de agua para su conformación ideal.

El presente documento precisa los detalles del diseño, materiales necesarios y aprovisionamiento, las opciones constructivas, las normas y reglas de cálculo a seleccionar, así como los criterios establecidos para el estudio e implementación de las diversas soluciones. A su vez, también se adjuntan todos los planos necesarios para su implantación.

2.2. EMPLAZAMIENTO, CARACTERÍSTICAS Y DESCRIPCIÓN DEL RECORRIDO.

Alejico es una localidad del municipio de Sabero, próxima a la despoblación con tan solo 10 habitantes (INE 2017), comunicada por una carretera local en el margen derecho del río con comienzo en la carretera CL-626 junto al puente sobre el río Esla y fin en el propio pueblo tras dos kilómetros de recorrido. Dicha carretera garantiza la accesibilidad de la infraestructura que se detalla a continuación. [1]



Figura 2.2-1. Vista aérea (Río Esla a su paso por Alejico).

El río Esla a su paso por la localidad de Alejico se caracteriza por una dinámica de aguas apropiada para un uso recreativo y deportivo. Se caracteriza por un tren de olas de aproximadamente 90 metros de longitud, seguido por una balsa inicial de transición de agua parada con una superficie de unos 4430 m² de la que emanan dos ramales separados por una isla alargada de 7603 m². Actualmente y dadas sus características óptimas, el cauce de la derecha (siempre en sentido descendente) viene siendo utilizado para el uso deportivo habiéndose establecido un paseo de Tramex a lo largo del mismo y con un puente que comunica la orilla derecha con la isla central. Por la otra parte, el cauce izquierdo no se ha modificado nunca y cuenta a su vez, con un pequeño desvío de agua a un molino colindante.

El recorrido adecuado para la práctica deportiva surge de una primera obra inicial en 2015 en la que se adaptó el curso del río con el recrecimiento de espigones, entendiéndose por estos la escollera que permite estrechar el flujo del río y generar olas y contracorrientes, y un sistema de cableado a lo largo de las orillas y transversalmente a ellas que permite sujetar y mover las puertas necesarias para la práctica del slalom. Posteriormente, en 2021 se somete el canal a otra reforma con objeto de mejorar la instalación para albergar el Campeonato de Europa de descenso en aguas bravas, el cual tuvo una amplia repercusión mediática en los medios de información locales y nacionales.

Se establece un recorrido con una longitud total 322,40m, una anchura variable de en torno a los 14m, un desnivel absoluto de 2,77m y con una pendiente media de 1,17% distribuida tal y como se muestra en la “Figura 2.2-2” obtenida tras los muestreos y criterios matemáticos que se explicarán posteriormente. La solera del canal es roca madre de naturaleza caliza mientras que las riberas del río están hechas de escolleras de piedra colocadas artificialmente de las que salen perpendicularmente diversos espigones añadidos también de escollera.

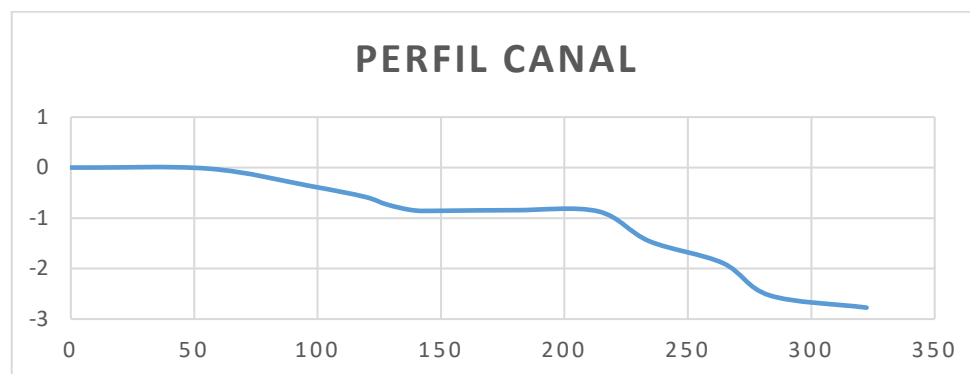


Figura 2.2-2. Perfil de elevación del canal.

2.3. ESTUDIO HIDROLÓGICO I.

El Esla es el principal afluente del Duero y uno de los ríos más importantes del noroeste de la península. Nace en el valle de Valdosín (León), en la cordillera Cantábrica, de donde recibe numerosos afluentes hasta ser remansado en el embalse de Riaño, bien conocido por su polémica construcción. Resulta fundamental destacar la relevancia de este embalse, utilizado desde 1988 para garantizar el regadío durante los meses de cultivo en el páramo castellano de Tierra de Campos.[2]

El canal de aguas bravas de Sabero se encuentra situado 18 kilómetros por debajo de la salida del embalse, antes del desvío posterior por el canal de riego artificial de Payuelos de manera que prácticamente la totalidad del caudal depende de la apertura de las compuertas de la presa y no de los afluentes del valle, los cuales presentan una cuenca insuficiente para garantizar el caudal adecuado.

Es por ello, por lo que se presentan unas condiciones hidrológicas prácticamente únicas en España. Así, el mayor caudal se obtiene en los meses

veraniegos, en los que la demanda de regadío es muy alta, al tiempo que el volumen de agua almacenado del embalse se ve notoriamente reducido, produciéndose el llenado del aforo durante las lluvias y deshielos otoñales e invernales.

Uno de los objetivos del presente proyecto reside en el establecimiento del nivel de cotas de agua preciso a la entrada del canal para conseguir aumentar el número de días útiles del mismo, consiguiendo que los usuarios puedan utilizarlo con un caudal inferior. Para este estudio, se han recopilado, filtrado y estudiado los datos del Sistema Automático de Información Hidrológica[3] durante los últimos siete años, permitiendo ver la utilidad actual del canal. Cabe destacar que tal recopilación se obtiene a partir de los caudales y niveles de agua horarios, los cuales se han promediado para su posterior estudio de manera diaria. También destacar la falta de datos en los meses de octubre y noviembre de 2021 debido a que la recopilación se realiza en base a años hidrológicos los cuales abarcan desde octubre a septiembre y tales datos no se han podido recopilar al corresponder con el periodo actual. No obstante, los de diciembre sí han sido tomados diariamente.

Es entonces, cuando resulta curioso remontarse a la historia del canal. En el año 2015 tras la primera obra del canal, otra de las mejoras conseguidas fue la derivación de un mayor caudal al ramal derecho del río ya que se aumentó la sección de entrada al mismo, estableciéndose entonces un caudal mínimo para la práctica deportiva de 22 m³/s. En aquel estudio, también se establecía un caudal de 85 m³/s como caudal máximo que inhabilitaba la instalación para su uso deportivo.

De esta forma, estudiando los datos hidrológicos de los pasados 7 años y estableciendo los filtros inferior y superior de 22 m³/s y 85 m³/s respectivamente, se obtenía una media de uso de 155 días al año (43,42%). Se descartaban una media de 198 días al año por escasez de agua mientras que tan solo no era útil anualmente una media de 4 días por exceso de agua tal y como se muestra en la “Figura 2.3-1”.

CAUDAL DE ESTUDIO: 22

CAUDAL NO ADMITIDO: 85

DÍAS ÚTILES														DÍAS NO ÚTILES				
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL	ESCASEZ	EXCESO			
2015	2	19	31	30	31	30	31	31	14	3	0	0	222	60.82%	143	39.18%	0	0.00%
2016	6	1	4	19	27	22	31	31	30	3	0	0	174	47.54%	177	48.36%	15	4.10%
2017	0	4	0	17	8	26	31	31	1	0	0	1	119	32.60%	246	67.40%	0	0.00%
2018	0	0	5	16	4	17	31	31	26	0	2	0	132	36.16%	233	63.84%	0	0.00%
2019	2	0	16	5	17	30	31	31	15	0	8	2	157	43.01%	193	52.88%	15	4.11%
2020	10	15	16	12	2	15	31	26	10	1	0	1	139	37.98%	227	62.02%	0	0.00%
2021	12	27	10	0	0	15	31	31	12	0	0	1	139	45.13%	168	54.55%	1	0.32%
MEDIA	5	9	12	14	13	22	31	30	15	1	1	1	155	43.42%	198	55.46%	4	1.12%

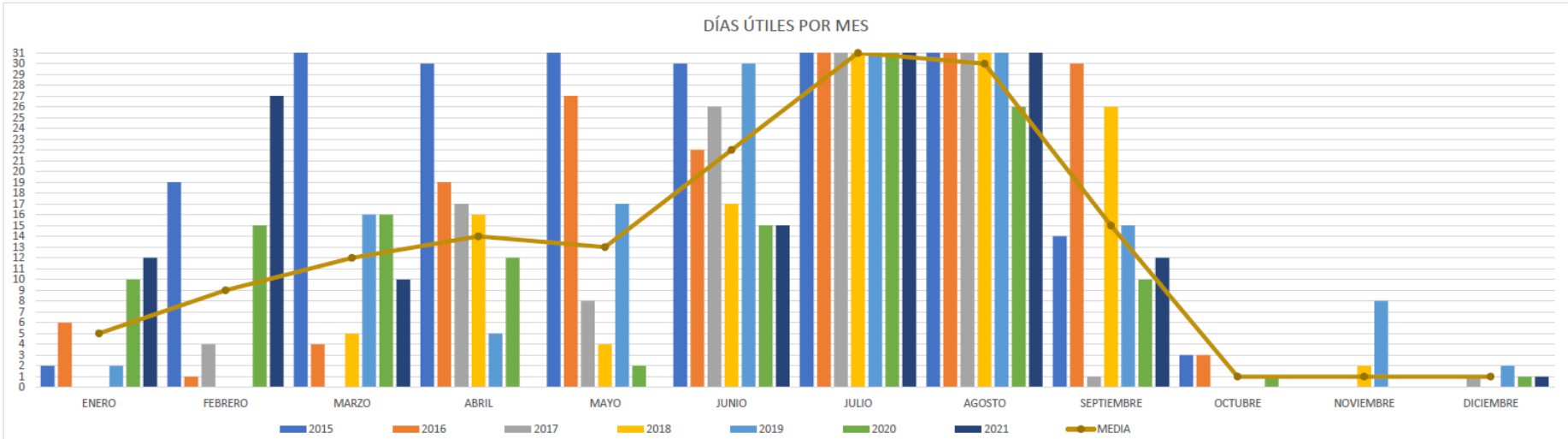


Figura 2.3-1. Viabilidad del canal tras la obra de 2015.

A finales del año 2020 se realiza una segunda obra en las que se colocan rocas en las orillas para formar una escollera vertical con la que se estrecha notoriamente la anchura del canal, acelerando la velocidad de la corriente y reduciendo los requisitos mínimos de caudal que garantizan la navegabilidad. Mediante esta obra, se consigue redefinir el intervalo de caudales aceptable entre 12 m³/s y 80 m³/s.

Los resultados de esta modificación fueron notoriamente positivos, ya que se conseguía habilitar la instalación una media de 224 días al año (62,75%) mientras que se descartaban 128 días por escasez de agua y 5 por exceso, tal y como se muestra en la “Figura 2.3-2”.

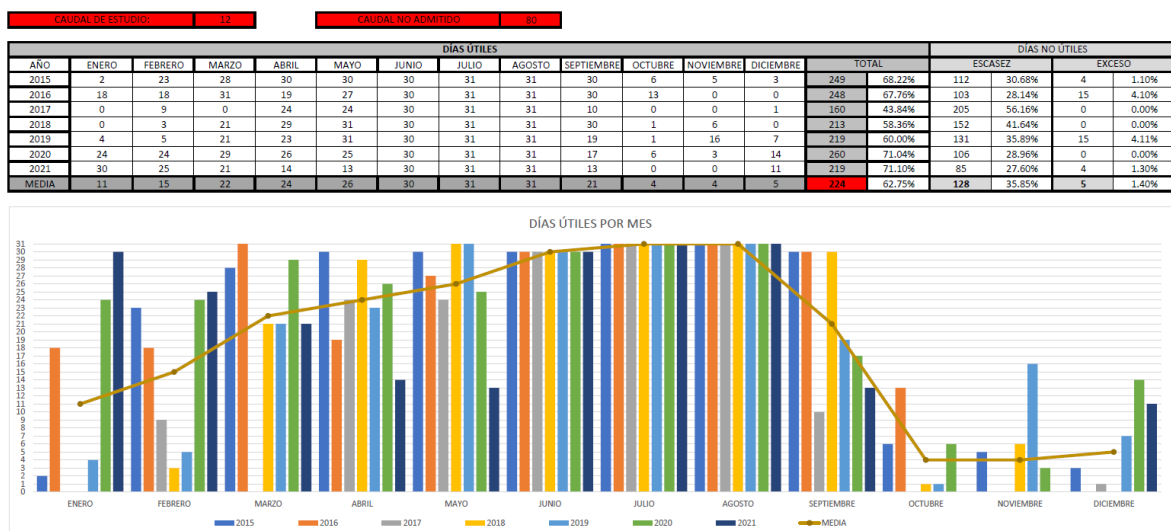


Figura 2.3-2. Viabilidad del canal tras la obra de 2020.

Comparando los datos obtenidos bajo el intervalo útil del año 2015 (22,85 m³/s), frente al intervalo del año 2020 (12,80 m³/s) se concluye una ganancia del 19,33% de días aprovechables al año, consiguiendo reducir desde 198 a 128 los días no practicables por escasez perdiendo tan solo un día a mayores por exceso de agua. En definitiva, se consigue aumentar el intervalo útil consiguiendo que el límite inferior se adapte más al caudal usual mientras que la reducción numérica del límite superior no resulta significativa.

Por otro lado, en cuanto al análisis mensual, se consigue obtener un uso mucho más promediado del canal desde febrero hasta septiembre, aunque no se logra obtener el caudal adecuado durante los meses invernales.

Como conclusión, se ha estudiado la utilidad del canal bajo márgenes de estudio técnicos comparando la evolución entre obras. No obstante, el presente documento pretende estudiar y plantear mejoras en el uso del caudal de manera que se pueda rentabilizar aún más la instalación y siempre teniendo en cuenta la realización de modificaciones con un impacto ecológico nulo o despreciable de acuerdo a la normativa vigente.

3. Análisis del caudal.

El canal de aguas bravas de Sabero ha experimentado una notoria evolución durante los últimos 15 años, pasando de ser un canal impracticable hasta convertirse en uno de los referentes nacionales en el deporte del slalom. Aunque año a año se han ido introduciendo pequeñas mejoras en la instalación, sobre todo, como se ha analizado anteriormente, cabe destacar las dos obras realizadas en los años 2015 y 2020 en las que se mejoró notoriamente la instalación modificando tanto el cauce del río como los accesos y alrededores.

En este estudio, se ha estudiado con detenimiento la historia y evolución del canal con el objetivo de conocer a la perfección las mejoras realizadas y los motivos que llevaron a hacerlas. No obstante, resulta impensable entender cómo se han realizado tales acciones sin haber siquiera planteado la posibilidad de calcular el caudal circulante por cada uno de los dos ramales en que se divide el río. De esta forma, se hubiesen podido establecer los niveles relativos de agua circulante por cada uno de ellos.

Hasta la fecha únicamente se han considerado las mediciones del caudal absoluto del Esla realizadas en una estación de aforo del Sistema Automático de Información Hidrológica situada varios kilómetros por debajo del canal (mediciones reflejadas en el análisis del *Apartado 2.3. Estudio Hidrológico I*). Esta medición es notoriamente fiable pues entre el lugar a considerar y dicha estación de aforo, no existen derivaciones de caudal ni aportes significativos de otros arroyos por lo que el caudal total del río se puede considerar constante. De esta manera se consigue conocer la información del río de forma precisa, en tiempo real, de forma automática y, sabiendo el límite mínimo y máximo de caudal con el que la instalación es practicable, se puede determinar su utilización sin tener que recurrir a otras referencias sobre el terreno.

Uno de los objetivos prioritarios del presente proyecto es que el canal sea útil más días al año y para ello se plantean dos soluciones. O bien se estrecha aún más el canal, proceso no viable pues ya se optó por ello en la obra del 2020, o bien, se modifica la entrada de agua para que, aunque el caudal global del río sea reducido, se pueda derivar un mayor volumen al cauce deportivo.

Únicamente resulta factible esta segunda opción por la cual se considera fundamental estudiar la división de caudales en ambos ramales de manera que se conozca la proporción de agua circulante por cada curso para posteriormente, poder modificar el lecho de los ramales de acuerdo a la cantidad de agua que interese derivar al canal de slalom.

A continuación, se plantea la resolución teórica al problema de medición, así como los problemas e ideas que han ido surgiendo y los motivos de admisión y descarte. Finalmente, se redacta el proceso de medición en campo.

3.1. TEORÍA DEL CÁLCULO.

El término caudal hace referencia a la cantidad de fluido que circula a través de una superficie por unidad de tiempo. Este término se puede calcular a partir de varios procedimientos, pero muchos han resultado directamente descartados por su complejidad y elevado coste instrumental.

El método elegido para el cálculo del caudal del río ha sido el de la sección media "Mean-Section Method"[4] regulado mediante normativa ISO 748, 2001. Los datos obtenidos a través de SAIH Duero facilitan el caudal total del río Esla a su paso por la estación de aforo situada dos kilómetros aguas abajo, de manera que, si se consigue calcular el caudal de uno de los dos tramos, bien sea el de la derecha o el de la izquierda de la isla, se puede calcular el otro restando el obtenido del caudal total. Debido a las características topográficas de la zona, el cauce más sencillo de estudio es el adecuado para la práctica deportiva, es decir el ramal derecho. A su vez, este ramal se encuentra dividido en dos por otra isla de reducidas dimensiones en la zona de medición, lo cual resulta ventajoso en el proceso de medición ya que reducen la anchura de los cauces resultantes siendo menor la distancia del sondeo.

En cuanto al procedimiento elegido para el cálculo del caudal, éste se divide en dos partes que se detallan a continuación.

En primer lugar, se realiza lo que se denomina como estudio del terreno en el que se establece una sección en la que se analiza la profundidad del río (mediante un sondeo) para posteriormente poder establecer la relación con la superficie de paso del fluido.

En segundo lugar, se realiza el estudio del fluido con la finalidad de establecer la velocidad del líquido a su paso por la sección detallada anteriormente. Una vez se obtengan ambas mediciones, bastará multiplicar la superficie por la velocidad y se hallará el caudal, véase “Fórmula 3.1-1”.

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = S[m^2] \times v \left[\frac{m}{s} \right]$$

Fórmula 3.1-1.Caudal.

3.1.1. ESTUDIO DEL TERRENO.

A diferencia con un canal de riego artificial, el río presenta un lecho irregular lo que complica notoriamente las mediciones. El procedimiento de campo que se plantea consiste en realizar diversos sondeos con una varilla reglada, con los que se obtienen numerosas mediciones de la profundidad del río cada cierto intervalo constante de distancia.

Para ello, se clava una guía de acero corrugado en cada orilla del cauce y se tiran dos cuerdas separadas verticalmente medio metro de manera que todo el sistema quede totalmente perpendicular a la dirección de la corriente. La finalidad de tirar dos cuerdas es, por un lado, guiar el sondeo en una misma sección del río y, por otro lado, garantizar la perpendicularidad del sondeo, ya que, al igual que se realiza en la construcción de un muro, si la guía toca ambas cuerdas a la vez, se asegura la perpendicularidad en la inclinación de la varilla de sondeo sobre el lecho del río. Se irá realizando el sondeo transversalmente al río y se anotarán todas las mediciones.

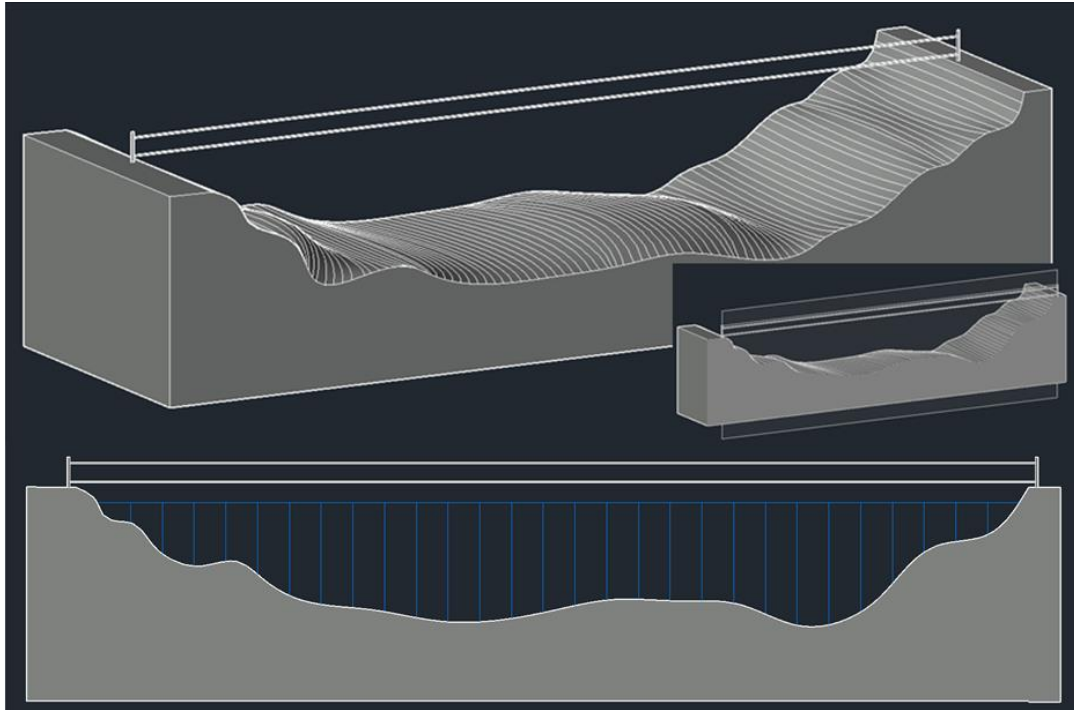


Figura 3.1-1. Planteamiento estudio del terreno.

La integración es uno de los conceptos fundamentales en el cálculo y en el análisis matemático. Consiste en la generación de una suma cuyos sumandos son infinitesimalmente pequeños obteniéndose el área de la superficie cubierta por el agua, que en definitiva es lo que requiere el problema en cuestión. No obstante, en este caso no se ha procedido con la integración pero sí que se plantea un método basado en este principio.

Una vez obtenidas todas las alturas, se numeran tal y como se muestra a continuación, haciendo corresponder a cada punto (colocado a una distancia constante del anterior) la altura obtenida en la medición. Posteriormente, se coge cada área comprendida entre P_i (con su correspondiente h_i) y P_{i+1} (con su correspondiente h_{i+1}) y se calcula la altura media de esa área. A continuación, se calcula el área final del rectángulo de base $P_{i+1} - P_i$ (valor constante del intervalo entre puntos) y altura $(h_{i+1} - h_i)/2$ mediante la multiplicación de ambos valores, determinando la superficie total de la sección, como la suma de todos los rectángulos.

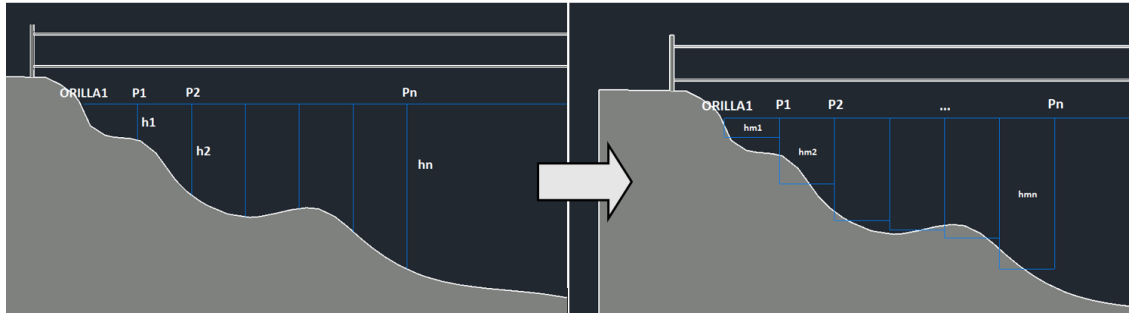


Figura 3.1-2. Mean-Section Method.

$$S = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{i-1}) \times \frac{(h_i - h_{i-1})}{2}$$

Fórmula 3.1-2. Mean-Section Method.

3.1.2. ESTUDIO DEL FLUIDO.

Una vez se ha procedido con el análisis del terreno, se necesita encontrar la velocidad con la que fluye el fluido para posteriormente multiplicar ambos valores obteniéndose el caudal del ramal.

Para el estudio de la velocidad del fluido, inicialmente se planteó colocar dos cuerdas transversales y paralelas a la superficie del río y separadas en la dirección de la corriente una distancia conocida, de manera que soltando un objeto flotante, y midiendo el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia se pudiera determinar la velocidad de la corriente. Este planteamiento, suele ser empleado en la medición del caudal en canales de riego en los que el flujo es laminar pero en este caso al encontrar un flujo turbulento de aguas bravas, resultaba ser poco válido pues el objeto flotante podría recorrer varias trayectorias o incluso quedarse retenido y las mediciones tendrían una variabilidad muy alta (véase “Figura 3.1-3”).

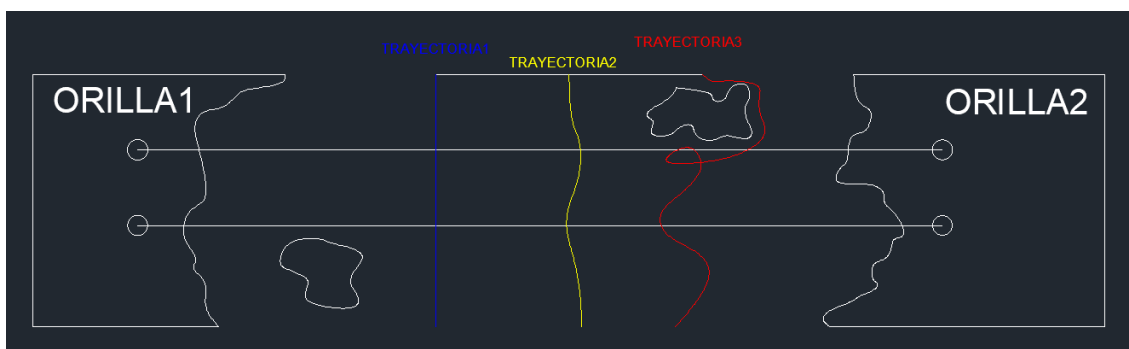


Figura 3.1-3. Problemas del cálculo de la velocidad del fluido en sistemas con Trayectoria libre.

Como se puede ver, hay mediciones que se van a ver afectadas por la geometría del curso del río pese a no encontrarse el objeto perturbador entre las dos cuerdas de medición y además, resulta imposible determinar la distancia exacta del desplazamiento pues hay casos en los que la medición resulta muy acertada pero hay otros en los que se recorre mucha más distancia de la que se considera entre las dos cuerdas (trayectoria3).

Para solventar este problema se diseña y construye un sistema de medición, que de ahora en adelante llamaremos velocímetro, que permite guiar la plataforma flotante entre ciertos márgenes de movimiento (muy pequeños) de manera que se fuerza a describir una trayectoria casi recta o al menos poco perturbada (trayectoria1 y trayectoria2).

3.1.2.1. VELOCÍMETRO.

El velocímetro es el aparato de medida diseñado y construido que surge como solución del problema planteado anteriormente.

El objetivo de este elemento es conseguir transmitir un movimiento difícil de prever y caótico (el generado naturalmente por el río sobre cualquier objeto flotante) a un medio en el que se pueda determinar a la perfección el espacio recorrido y su duración.

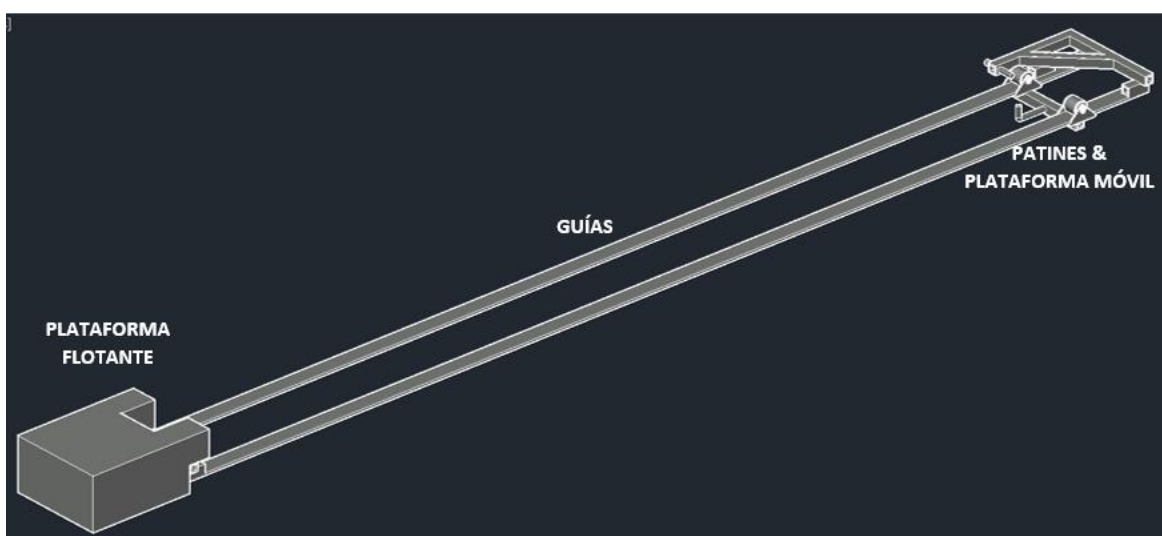


Figura 3.1-4. Velocímetro.

El diseño planteado consta de una plataforma móvil y flotante que se suelta en el río y mediante una cuerda, cuyo movimiento queda restringido por una arandela, transmite la fuerza de la corriente y su movimiento a unos patines que se mueven por dos guías de acero de 100x1,5 cm separadas 5 cm entre sí y unidas mediante tubos estructurales de perfil cuadrado. Además, uno de los vértices de las guías, cuenta con un perfil esquinado en donde un pasante permite activar el movimiento de la plataforma en el momento preciso que interese.

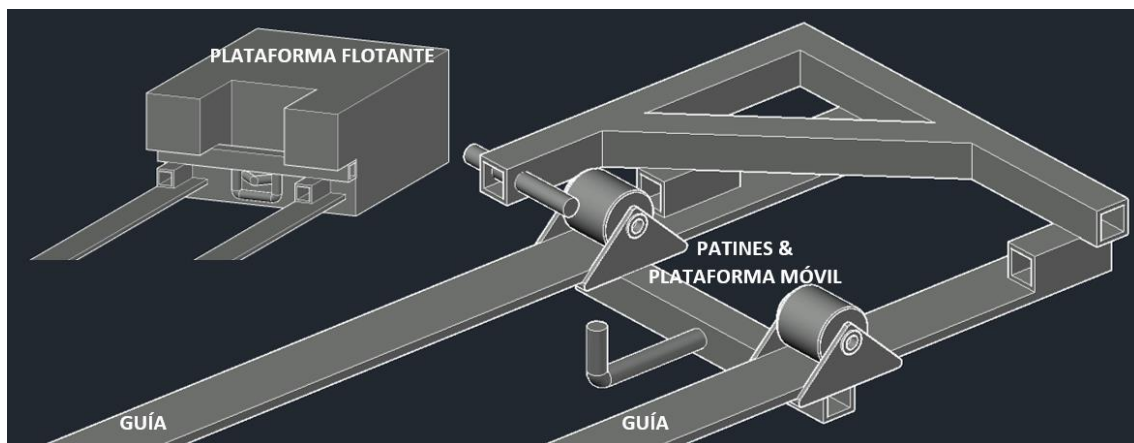


Figura 3.1-5. Elementos del Velocímetro.

De esta manera, se consigue transmitir el movimiento caótico de la plataforma flotante (que presenta composición de componentes circulares y lineales) al movimiento lineal y perfectamente definido de los patines sobre la guía. Finalmente, tras definir la distancia de estudio, se debe tomar el tiempo que tardan los patines en desplazarse desde el principio al final para, posteriormente calcular la velocidad dividiendo la distancia planificada de antemano entre la duración del desplazamiento.

Durante el diseño, la construcción y la prueba del velocímetro, se han planteado varios problemas que han llevado a cambiar estructuralmente el diseño inicial de la plataforma en contacto con el agua, hasta finalmente obtener este sistema que finalmente ha sido tomado como válido.

3.1.2.2. ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO.

Hasta aquí la explicación del velocímetro y los motivos que han llevado a su construcción, pero, como todo mecanismo, se requiere de un análisis dinámico del mismo.

Se obtiene un sistema inercial en el que la plataforma flotante adopta la velocidad superficial del agua, originando una fuerza sobre la cuerda que se traslada hasta los patines provocando su movimiento.

Una vez el mecanismo está en funcionamiento se deben considerar las fuerzas de rozamiento que se oponen al movimiento y que por tanto variarán la aceleración y velocidad final del sistema. No obstante, se concluye que las únicas fuerzas de rozamiento capaces de distorsionar el sistema son, en primer lugar, las existentes entre la cuerda y la arandela que, bien por la insignificante masa de la cuerda o por la superficie curva de la arandela, se consideran nulas. En segundo lugar, respecto a los patines sobre las guías, el peso (aun siendo mínimo) no es tan despreciable, pero debido al propio diseño de los patines, no se puede concluir ninguna pérdida en el movimiento p al menos sobre las variables en las que se va a realizar el cálculo.

Otro aspecto considerado es que los patines parten del reposo hasta adquirir la velocidad final del agua, es decir, los patines inicialmente describen un Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado, MRUA hasta que obtienen la velocidad final del agua y se desplazan siguiendo un Movimiento Rectilíneo Uniforme. Este hecho no se considera despreciable y se ha procedido con el siguiente planteamiento.

Al tratarse de un sistema de referencia inercial, se verifica la segunda Ley de Newton que establece que la fuerza es igual a la masa del objeto en movimiento por su aceleración. En este sistema la fuerza será muy grande pues proviene del agua y sin embargo, la masa es mínima (17g) por lo que se deduce que la aceleración será muy alta.

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \begin{array}{c} \uparrow \vec{F} \\ \downarrow m \\ \uparrow \vec{a} \end{array} = \vec{a}$$

Fórmula 3.1-3. Segunda Ley de Newton.

Si el sistema tiene una aceleración elevada, el tiempo y el espacio que tarda y necesita para obtener la velocidad constante del río es muy reducido. No obstante, ese pequeño margen de espacio y tiempo no debe ser considerado ya que solo interesa el tramo que describe un MRU.

Para detectar esta circunstancia se considera que los patines obtendrán la velocidad final (V_f) en un espacio muy reducido debido a la alta aceleración. Por ello, se supone que analizando únicamente los últimos 50 cm de la trayectoria sobre las guías, se describe ya un Movimiento Rectilíneo Uniforme y en el que se puede evaluar el tiempo que tardan los patines en recorrer dicha distancia y por tanto, obtener el dato de V_f . Posteriormente, basta con sustituir las ecuaciones del MRUA para obtener la longitud de guía que se debe desechar tras estar sometida a dicho movimiento y poder establecer la longitud final de cálculo.

$$V_f = \frac{50mm}{t}$$

Fórmula 3.1-4. Movimiento Rectilíneo Uniforme.

$$V_f = V_0^0 + a \times t$$

$$X_f = X_0^0 + V_0^0 \times t + \frac{1}{2} \times a \times t^2$$

Fórmula 3.1-5. Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado.

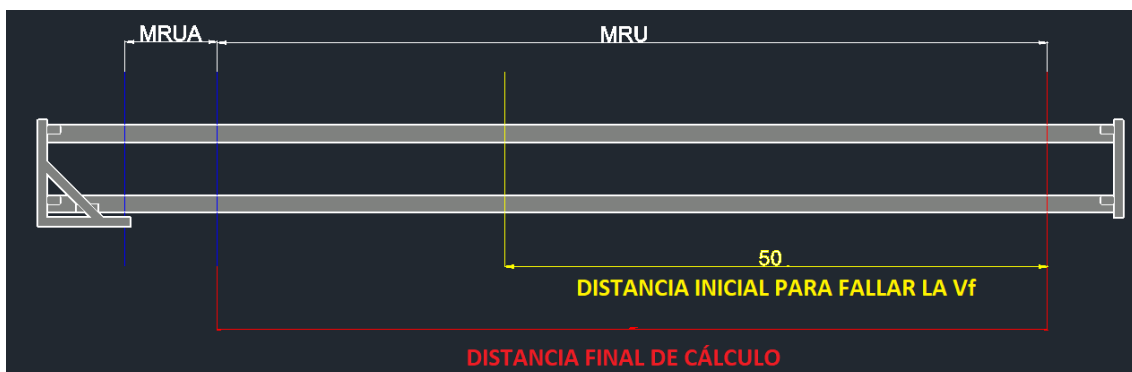


Figura 3.1-6. Análisis del movimiento.

3.2. MEDICIÓN DE CAMPO.

3.2.1. PROCEDIMIENTO.

Se acude a realizar las mediciones al Canal de Sabero entre las 10:00 y las 12:00 del día 2 de abril de 2022 con un caudal de aforo medio durante ese periodo para todo el río según la estación del SAIH de $5.34 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual resulta ideal para poder realizar las mediciones adecuadas. Se requiere del velocímetro, un metro, un nivel, dos varillas, cuerda y cronómetro.

02/04/2022 09:00	5.33
02/04/2022 10:00	5.33
02/04/2022 11:00	5.33
02/04/2022 12:00	5.36
02/04/2022 13:00	5.23

Figura 3.2-1. Caudales SAIH durante la medición.

Inicialmente, se estudia el río y se establecen las dos zonas de estudio, por su facilidad y comodidad de acceso. Ambas zonas se sitúan en el cauce derecho del río, la primera abarca únicamente el ramal derecho de la isla pequeña mientras que la segunda abarca el caudal total del tramo de slalom (Figura12). Por tanto, la diferencia entre ambas supondrá el caudal del ramal izquierdo de la isla pequeña y la diferencia entre el caudal recopilado por el SAIH y el caudal del tramo de slalom, será el circulante por la izquierda de la isla principal.



Figura 3.2-2. Zonas de medición.

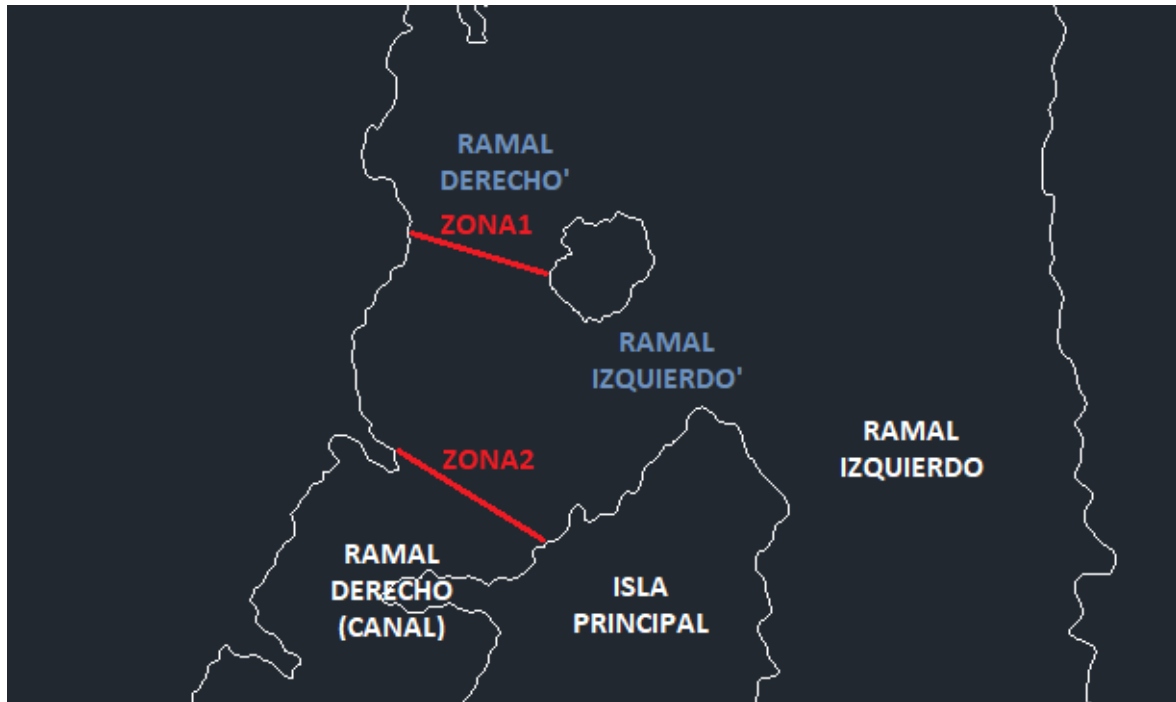


Figura 3.2-3. Boceto de situación.

Sobre el terreno, se decide tirar una única cuerda ya que la altura de las varillas de sondeo es de 1 m y al ser la profundidad máxima de unos 60 cm, no queda suficiente longitud sobre la superficie del agua para colocar las dos cuerdas inicialmente planteadas. Como procedimiento sustitutorio se emplea un nivel que garantiza la perpendicularidad de las varillas. La fijación de la cuerda se realiza sobre los postes existentes actualmente para sujetar el sistema de salidas de las competiciones.

Inicialmente, se realiza el sondeo de la profundidad de las zonas cada 75 cm (que se van marcando sobre la cuerda) y se van anotando todas las alturas obtenidas sobre un archivo Excel, creado con anterioridad y programado de manera que en caso de detectar algún punto disonante salte un mensaje de fallo que obligue a repetir la medición.

Posteriormente, se mide el tiempo que tarda la plataforma en desplazarse en cada uno de los puntos de referencia en los que se ha tomado la profundidad. Primeramente, se nivela el velocímetro con el nivel y se coloca de manera que el punto inicial del movimiento quede debajo de la marca realizada en la cuerda. Posteriormente, se habilita el movimiento activando el cronómetro y pausándolo al llegar al tope final y se anota tal tiempo. Al igual que en las mediciones de altura,

se ha preestablecido el archivo Excel de manera que, si la diferencia entre tomas es mayor al error absoluto preestablecido, se muestre un mensaje de error que fuerce a repetir la medición.



Figura 3.2-4. Proceso de medición.

3.2.2. RESULTADOS.

Una vez realizadas las mediciones indicadas anteriormente en las zonas de estudio 1 y 2, se obtienen los siguientes resultados.



Figura 3.2-5. Perfil zona 1.

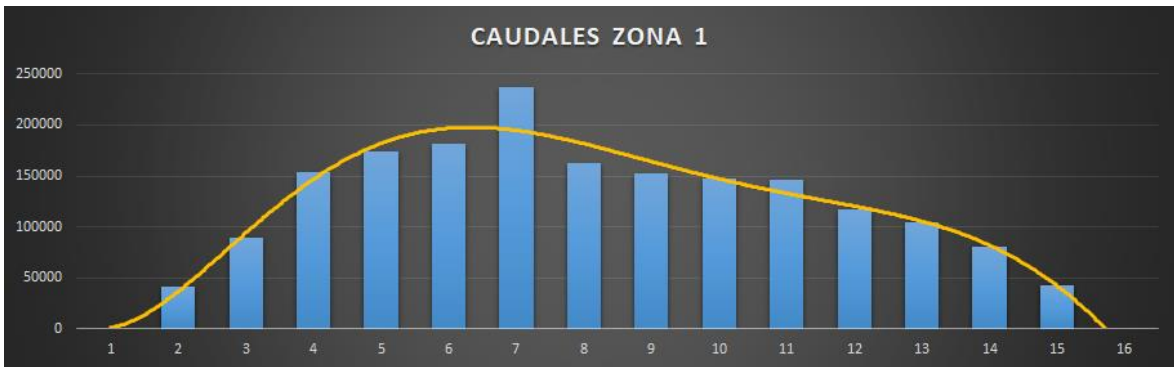


Figura 3.2-6. Caudales zona 1. Valores en cm^3/s y línea de aproximación polinómica de grado 6.

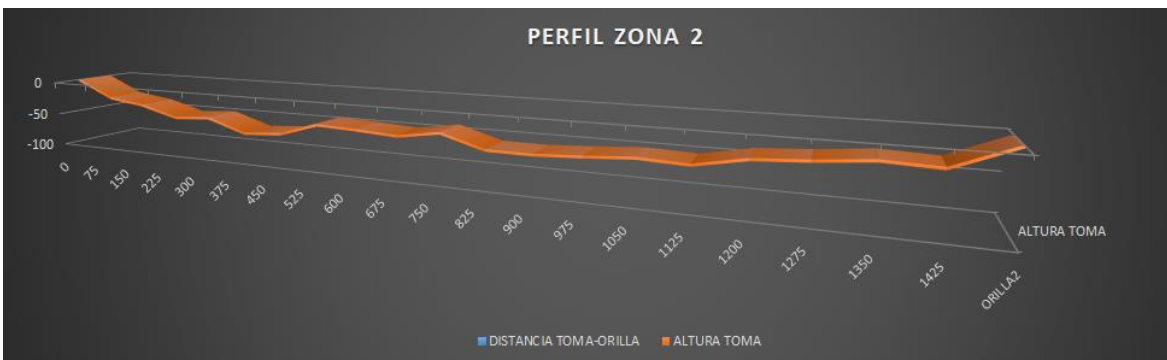


Figura 3.2-7. Perfil zona 2.

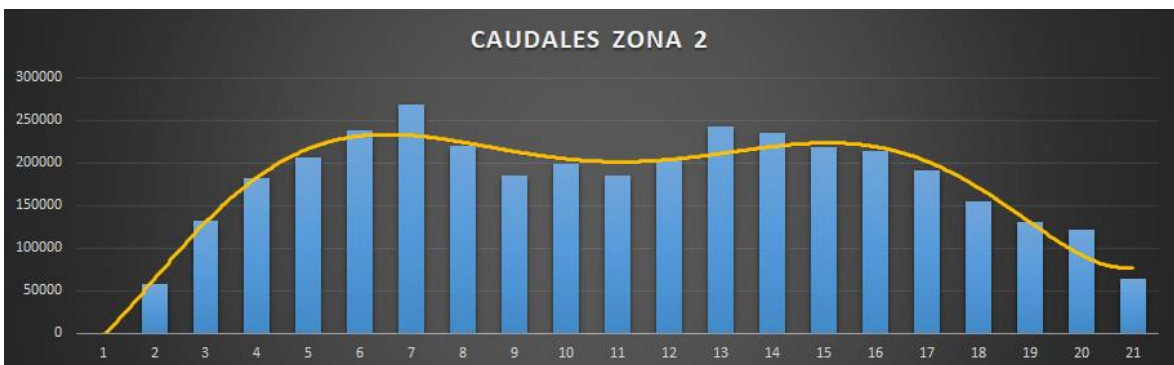


Figura 3.2-8. Caudales zona 2. Valores en cm^3/s y línea de aproximación polinómica de grado 6.

Merece destacar el mínimo relativo de la curva en el punto 11, plenamente justificado al coincidir justo con la zona situada por debajo de la pequeña isla del medio de ambos cauces causando de un descenso del caudal en dicha zona ya que lógicamente, el caudal se ve afectado por la geometría predecesora.

Tabla 3.2-1. Cálculo del caudal en la zona 1.

ZONA1														
FECHA		02/04/2022												
CAUDALES SAIH														
Q ₁	10	5.33												
Q ₂	11	5.33												
Q ₃	12	5.36												
Q _{MEDIO}	CAUDAL MEDIO	5.34												
Todas las distancias serán expresadas en cm.														
SOLO MODIFICAR CELDAS COLOREADAS														
ARRASTRAR CELDAS COLOREADAS														
Distancia entre orillas		1125												
Distancia entre tomas		75												
Distancia Velocímetro		90												
Nº DE MUESTRAS		15												
MARGEN DE TIEMPOS		0.2												
TOMA	DISTANCIA TOMA-ORILLA	ALTURA TOMA		ZONA			SUPERFICIE	TOMA	T ₁	T ₂	T _r	V _r	CAUDAL (cm ³ /s)	
0	0	0	0	DESDE	HASTA			0	0	0	0	0	0	
1	75	17.7	-17.7	0	1	663.75		1	1.36	1.49	1.425	63.1578947	41921.05263	
2	150	25.5	-25.5	1	2	1620		2	1.7	1.56	1.63	55.2147239	89447.85276	
3	225	27.9	-27.9	2	3	2002.5		3	1.13	1.22	1.175	76.5957447	153382.9787	
4	300	33.2	-33.2	3	4	2291.25		4	1.09	1.28	1.185	75.9493671	174018.9873	
5	375	41	-41	4	5	2782.5		5	1.32	1.43	1.375	65.4545455	182127.2727	
6	450	41	-41	5	6	3075		6	1.12	1.22	1.17	76.9230769	236538.4615	
7	525	35.5	-35.5	6	7	2868.75		7	1.68	1.5	1.59	56.6037736	162382.0755	
8	600	40	-40	7	8	2831.25		8	1.61	1.73	1.67	53.8922156	152582.3353	
9	675	40.7	-40.7	8	9	3026.25		9	1.8	1.9	1.85	48.6486486	147222.973	
10	750	37.7	-37.7	9	10	2940		10	1.81	1.81	1.81	49.7237569	146187.8453	
11	825	37.6	-37.6	10	11	2823.75		11	2.16	2.19	2.175	41.3793103	116844.8276	
12	900	37.4	-37.4	11	12	2812.5		12	2.51	2.32	2.415	37.2670807	104813.6646	
13	975	34.8	-34.8	12	13	2707.5		13	3.09	2.92	3.005	29.9500832	81089.85025	
14	1050	16	-16	13	14	1905		14	3.92	4.03	3.975	22.6415094	43132.07547	
ORILLA2	ORILLA2	0	0	14	ORILLA2	600		ORILLA2	-	-	-	-		
ORILLA2	ORILLA2	0	0	ORILLA2	ORILLA2	ORILLA2								
				TOTAL			34950	TIEMPO MEDIO		1.88928571	53.8144094	TOTAL		1831692.25
												1.83		

Únicamente se representa la “Tabla 3.3-2” del cálculo del caudal en la zona 1 ya que en la zona 2 se realiza el mismo planteamiento y las mismas mediciones obteniéndose los resultados mostrados en la “Tabla 3.3-3”..

Tabla 3.2-2. Caudales de cada ramal.

FECHA		02/04/2022			
CAUDALES SAIH					
Q _{MEDIO}	CAUDAL MEDIO	5.34			
	ZONA1	1.83			
	ZONA2	2.77			
			% PARCIAL	% TOTAL	
RAMAL	DERECHO	DERECHO	1.83	66.06	51.87
		IZQUIERDO	0.94	33.94	
	IZQUIERDO		2.57		48.13

3.2.3. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

El caudal circulante el día de las mediciones por el canal de slalom es de 2,77 m³/s mientras que por el ramal izquierdo circulan 2.57 m³/s lo que supone el 51,87% frente al 48,13% del caudal total respectivamente. Además, por el afluente derecho del tramo de slalom circula el 66,06 % del caudal del mismo mientras que por el izquierdo discurre el 33,94%.

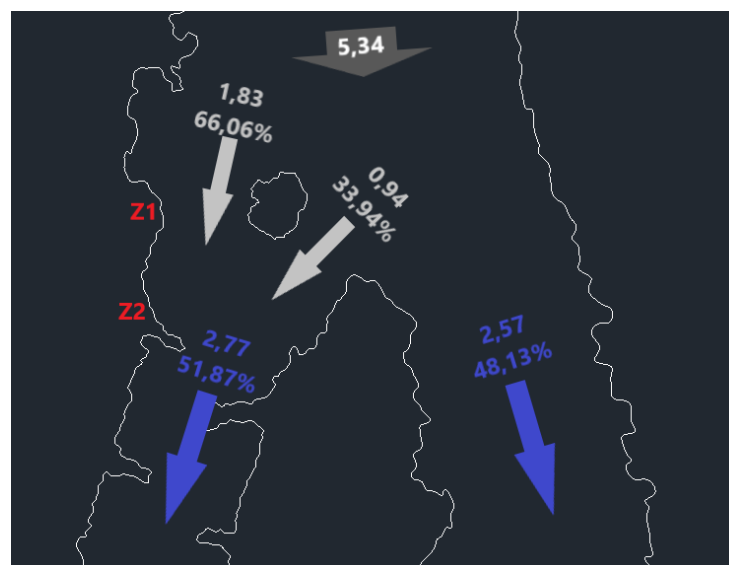


Figura 3.2-9. Resultados obtenidos.

3.3. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA.

Una vez se ha comprobado las reparticiones de los caudales en ambos ramales, se plantea una redistribución de los mismos para mejorar la cantidad de días útiles del canal.

Para ello, se propone una compuerta que permita regular el caudal mínimo del río derivando mayor parte de agua al canal deportivo cuando haya regímenes de caudal pequeños mientras que con caudales altos, se mantenga la misma distribución que en la actualidad.

3.3.1. ESTUDIO HIDROLÓGICO II.

En la actualidad, se ha establecido un caudal mínimo para uso deportivo de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación de aforo de SAIH. Según los estudios realizados, este caudal se distribuye en dos ramales de manera que por el de slalom circula el 51,87% del total, lo cual equivale a un caudal mínimo para la práctica deportiva de $6,22 \text{ m}^3/\text{s}$.

La opción más sencilla, sería regular la entrada al canal derivando toda el agua por el ramal derecho, no obstante, se debe preservar el caudal ecológico, entendiéndose como tal el flujo mínimo de agua necesario para mantener y preservar los valores ambientales del cauce como la flora y la fauna, el paisaje o la dilución de contaminantes entre otros.

El caudal ecológico lo regula la CHD (Confederación Hidrográfica del Duero) mediante métodos matemáticos complejos que tienen en cuenta distribuciones de sequía consecutivas durante 21 o 25 días[5]–[7]. Además, la normativa ha ido evolucionando de año en año por lo que resulta confuso y difícil concretar estos valores.

Por ello en este proyecto, se ha optado por estudiar los valores mínimos de caudal durante los seis últimos años en la estación de aforo de Sabero obteniéndose un valor mínimo de $2.53 \text{ m}^3/\text{s}$ el 5 de octubre de 2017. Este caudal se podría tomar como ecológico ya que como poco, es el mínimo permitido, pero para asegurar unos mínimos superiores y no mantener el cauce al límite de su capacidad, se toma $3.37 \text{ m}^3/\text{s}$ como caudal ecológico siendo este valor el obtenido del promedio de los caudales mínimos de todos los años recopilados.

Al igual que se hizo anteriormente, por el ramal izquierdo se sabe que circula el 48,13% del caudal global por lo que, si $3,37 \text{ m}^3/\text{s}$ es el caudal mínimo total, por el ramal izquierdo deben circular como mínimo $1,62 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por tanto, si se pretende conseguir el equivalente al caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ con el que se garantiza el uso de la instalación, es un equivalente a desviar $6,22 \text{ m}^3/\text{s}$ (el 51,87%) por el ramal derecho. Por otra parte, si se asegura un caudal ecológico de

1,62 m³/s por el ramal izquierdo, se consigue cambiar de 12 m³/s a 7,84 m³/s el caudal total mínimo para la práctica deportiva, consiguiendo de esta manera un incremento de 36 días útiles desde 224 hasta 260.

Finalmente se programa la recopilación de datos realizada y explicada anteriormente en el documento del estudio hidrológico I, obteniéndose el caudal equivalente y necesario de cada tramo respetando el ecológico demandado tal y como ocurrirá con el establecimiento de la compuerta y la nueva viabilidad de la instalación, véase “Figura 3.3-1”.

CAUDAL ORIGINAL			CAUDAL MODIFICADO	
RAMAL	DERECHO	51.87%	CAUDAL HISTÓRICO MÍNIMO	3.37
	IZQUIERDO	48.13%	CAUDAL MÍNIMO RAMAL IZQUIERDO	1.62
			CAUDAL MÍNIMO RAMAL DERECHO	1.75

$$\frac{Q_{derecho}}{\%derecho} = Q_{TOTAL}$$

CAUDAL COMPUERTA CERRADA	MIN	MÁX
	7.84	23.13

CAUDAL MÍNIMO ÚTIL	12	CAUDAL NO ADMITIDO	80
--------------------	----	--------------------	----

NIVEL DE AGUA MÍNIMO	COMPUERTA CERRADA
----------------------	-------------------

CAUDAL EQUIVALENTE SAIH	7.84	CAUDAL REAL NO ADMITIDO DEL CANAL	80
-------------------------	------	-----------------------------------	----

AÑO	DÍAS ÚTILES												DÍAS NO ÚTILES					
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL	ESCASEZ	EXCESO			
2015	7	28	28	30	30	30	31	31	30	15	16	12	288	78.90%	73	20.00%	4	1.10%
2016	31	23	31	19	27	30	31	31	30	24	0	0	277	75.68%	74	20.22%	15	4.10%
2017	0	15	0	27	29	30	31	31	21	0	0	2	186	50.96%	179	49.04%	0	0.00%
2018	0	7	31	30	31	30	31	31	30	11	14	3	249	68.22%	116	31.78%	0	0.00%
2019	9	28	31	30	31	30	31	31	30	1	23	9	284	77.81%	66	18.08%	15	4.11%
2020	26	25	31	30	26	30	31	31	18	12	6	19	285	77.87%	81	22.13%	0	0.00%
2021	30	25	24	22	22	30	31	31	14	0	0	20	249	80.84%	55	17.86%	4	1.30%
MEDIA	15	22	25	27	28	30	31	31	25	9	8	9	260	72.83%	92	25.77%	5	1.40%

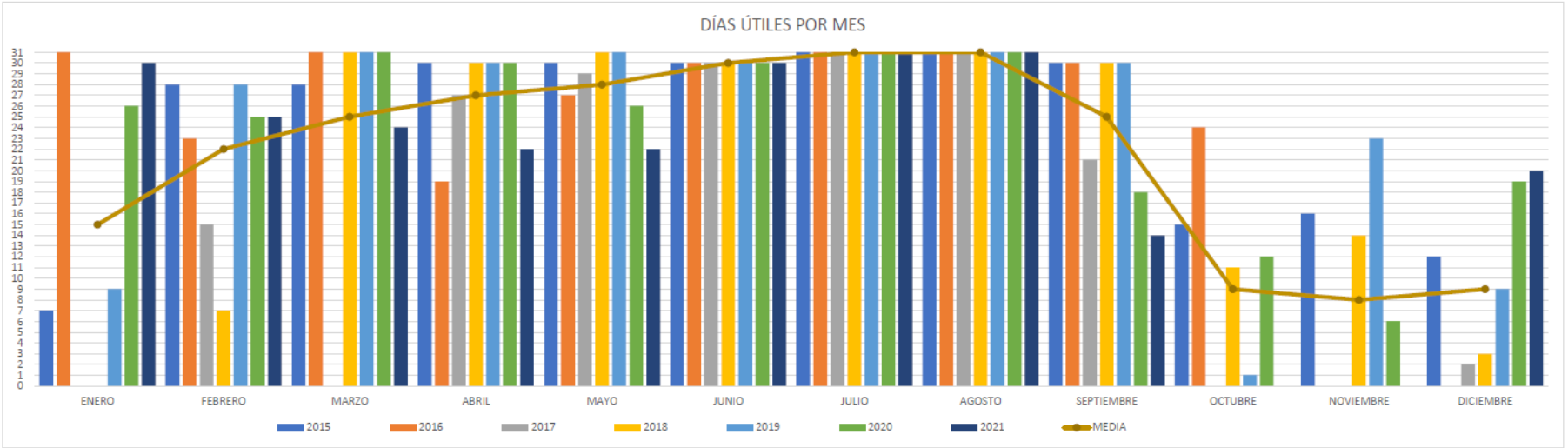


Figura 3.3-1. Utilidad del canal con compuerta.

4. Compuerta hidráulica.

Se plantea una compuerta hidráulica para conseguir el desvío de mayor caudal al ramal derecho. Para su diseño, se han considerado fundamentales tres características:

En primer lugar, reducir el impacto ambiental al máximo con un diseño innovador y ecológico que no necesite de accionamientos motores y que se regule por sí mismo de forma automática dependiendo de las características del río.

En segundo lugar, se pretende un diseño que apenas necesite mantenimiento y cuyos costes sean mínimos a largo plazo, lo cual encaja con el planteamiento del punto anterior de no necesitar accionamientos motores.

En tercer lugar, el funcionamiento de esta compuerta debe asegurar la derivación de caudal cuando el caudal total del río es reducido mientras que cuando el caudal total es adecuado no se desvía agua al tramo de slalom. Es decir, funciona de manera que cuando el caudal total del río es menor a 12 m³/s, la compuerta permanece cerrada. Una vez obtenidos los 7,84 m³/s se derivan 6,22m³/s (lo mínimo para la práctica deportiva) al ramal de slalom. Por otra parte, una vez se alcancen el caudal total de 12 m³/s la compuerta se abrirá manteniendo la distribución de los caudales naturales del río (51,87% y 48,13%).

Tabla 3-1. Distribución del caudal con la compuerta.

		Q _{TOTAL}	Q _{RAMAL DCHO}
CAUDAL MÍNIMO SAIH		12	6.2244
CAUDAL ACEPTADO		20	10.374

Q _{TOTAL}	CAUDAL NATURAL		CAUDAL COMPUERTA		Q _{RAMAL DCHO}	
	Q _{RAMAL DCHO}	Q _{RAMAL IZDO}	Q _{RAMAL DCHO}	Q _{RAMAL IZDO}		
5			3.38		3.38	COMPUERTA CERRADA
5.2			3.58		3.58	COMPUERTA CERRADA
...			COMPUERTA CERRADA
7.6			5.98		5.98	COMPUERTA CERRADA
7.8			6.18		6.18	COMPUERTA CERRADA
8			6.38		6.38	COMPUERTA CERRADA
8.2			6.58		6.58	COMPUERTA CERRADA
...			COMPUERTA CERRADA
11.6			9.98		9.98	COMPUERTA CERRADA
11.8			10.18	1.62	10.18	COMPUERTA CERRADA
12	6.2244	6.2244			6.2244	COMPUERTA ABIERTA
12.2	6.32814	6.32814			6.32814	COMPUERTA ABIERTA
12.4	6.43188	6.43188			6.43188	COMPUERTA ABIERTA
...	COMPUERTA ABIERTA
19.6	10.16652	10.16652			10.16652	COMPUERTA ABIERTA
19.8	10.27026	10.27026			10.27026	COMPUERTA ABIERTA
20	10.374	10.374			10.374	COMPUERTA ABIERTA
20.2	10.47774	10.47774			10.47774	COMPUERTA ABIERTA
20.4	10.58148	10.58148			10.58148	COMPUERTA ABIERTA

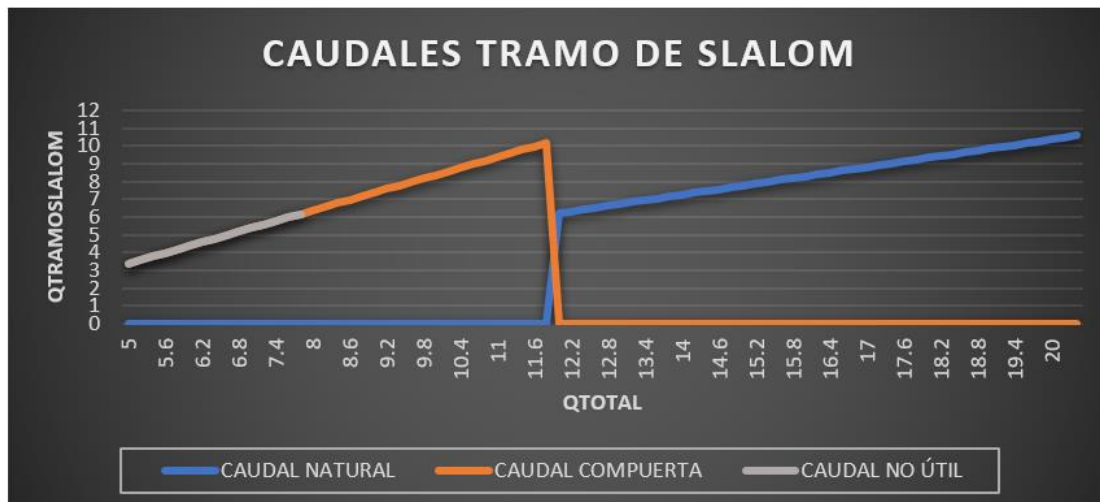


Figura 3.3-1. Distribución del caudal por el tramo de Slalom con la compuerta.

4.1. FUNCIONAMIENTO TEÓRICO Y DISEÑO.

La compuerta hidráulica se diseña con un perfil en “L” cuyo eje de movimiento está situado en el punto de unión de las láminas que la conforman permitiendo dos posiciones de equilibrio. Por un lado, la compuerta permanece cerrada en posición vertical impidiendo el paso del agua y por otro lado cuando el caudal llega a ser el deseado, la compuerta se tumba permitiendo el flujo natural del caudal.

Por otra parte, y como se ha señalado anteriormente, se diseña de manera que se dimensiona un orificio para el paso del caudal ecológico situado en la base hormigonada de la compuerta.

Finalmente, destacar que la compuerta está calculada para que sea el propio caudal del río el que provoque su apertura o su represamiento evitando así actuadores mecánicos o motores.

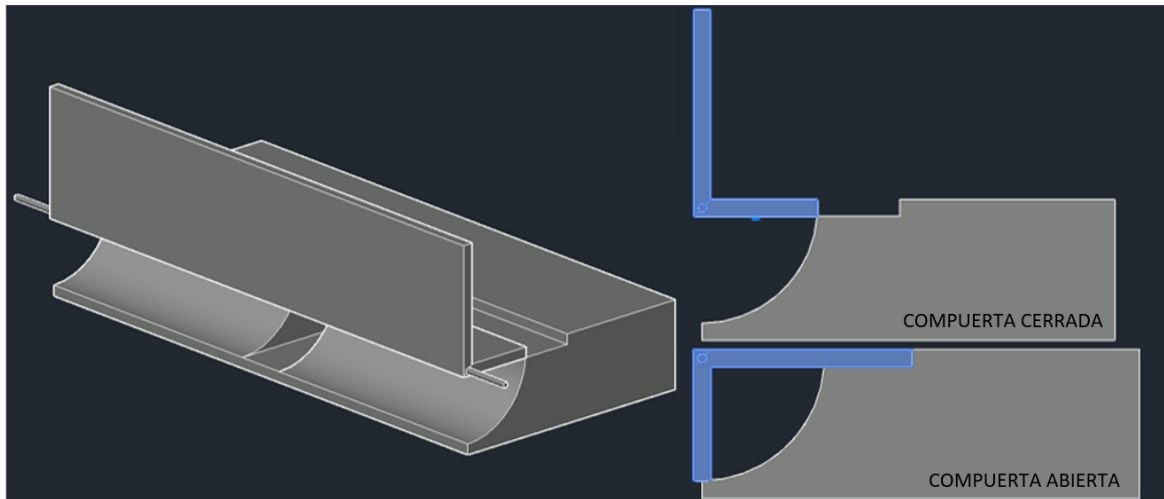


Figura 4.1-1. Esquema inicial del funcionamiento de la compuerta.

4.2. DIMENSIONAMIENTO DEL PERFIL.

La compuerta se diseña basándose en la presión hidrostática generada debido a la existencia de una columna de agua situada por encima del cuerpo sumergido creando una presión “P” proporcional a la altura del fluido (h). Más en particular, se sitúa una rótula en el vértice de la “L” y se limita el giro a un máximo de 90° de manera que cuando la presión hidrostática del agua ejerce suficiente presión sobre la paleta corta de la compuerta, esta se mantiene vertical mientras que cuando la presión que ejerce el agua represada es mayor que la presión hidrostática, la compuerta se cierra permitiendo el paso del caudal como se calculará posteriormente.

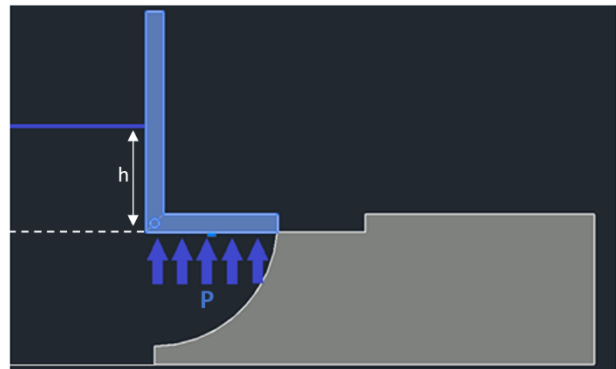


Figura 4.2-1. Presión hidrostática.

Tal y como se muestra en la Figura 24, se establecen las dimensiones de profundidad “b”, altura “h”, anchura “a” y espesor “e” del perfil, para poder estudiar a continuación, las fuerzas aplicadas proporcionales a estas dimensiones.

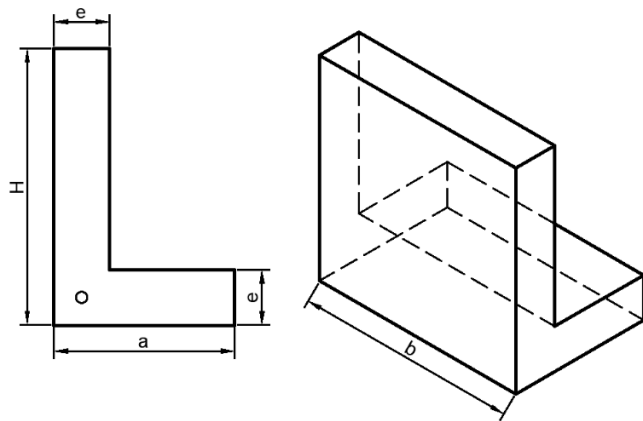


Figura 4.2-2. Dimensiones del perfil.

Estudiando el equilibrio y las fuerzas aplicadas sobre la estructura se concluyen tres esfuerzos. En primer lugar, se tiene en cuenta la fuerza ejercida sobre la estructura por el agua represada que lógicamente, irá aumentando con la altura del caudal (F_1). En segundo lugar, la fuerza debida a la presión hidráulica (F_2) explicada anteriormente que es ejercida como una carga distribuida sobre la pestaña inferior y más corta “a” y debido a la altura de fluido “h” desde el nivel del agua hasta la fibra inferior del perfil. Finalmente, aparece también otra carga distribuida debida al peso propio del material elegido (F_{PP}).

Todas las fuerzas planteadas son cargas distribuidas y por lo tanto se pueden simplificar como una única fuerza ejercida sobre la mitad de la superficie o en caso de la F_1 , como una fuerza aplicada a un tercio de la altura.

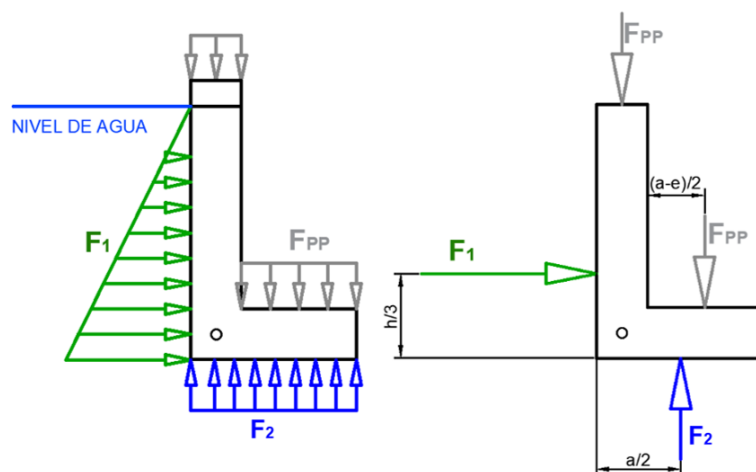


Figura 4.2-3. Distribución de cargas sobre el perfil.

Una vez planteados los esfuerzos que se ejercen sobre la estructura, se procede a estudiar la dinámica y los movimientos que se generan para poder encontrar a través de ellos las dimensiones apropiadas del perfil y los puntos de equilibrio correspondientes a la apertura y cierre de la compuerta. Tras desarrollar las fuerzas, se obtienen las siguientes igualdades:

$$F_1 = \gamma_{H2O} \times g \times b \times h \times \frac{h}{2}$$

$$F_2 = \gamma_{H2O} \times g \times h \times b \times a$$

$$F_{PP} = \gamma_m \times g \times b \times e \times (a - e)$$

Fórmula 4.2-1. Ecuaciones de las fuerzas sobre el perfil.

Cada fuerza generará un momento igual al valor de la propia fuerza multiplicada por la distancia desde la rótula al punto de aplicación. Destacar que la fuerza del peso propio situada en la perpendicular del ala vertical se encuentra alineada con la rótula por lo que no genera ningún giro y por tanto ningún momento, lo cual es fácil de ver a través del diagrama de cargas distribuidas ya que por simetría las cargas situadas a la derecha de la rótula anulan las contrarias. Por otra parte, los momentos generados en sentido horario se consideran con signo negativo mientras que los momentos antihorarios positivos.

$$M_i = F_i \times d_i$$

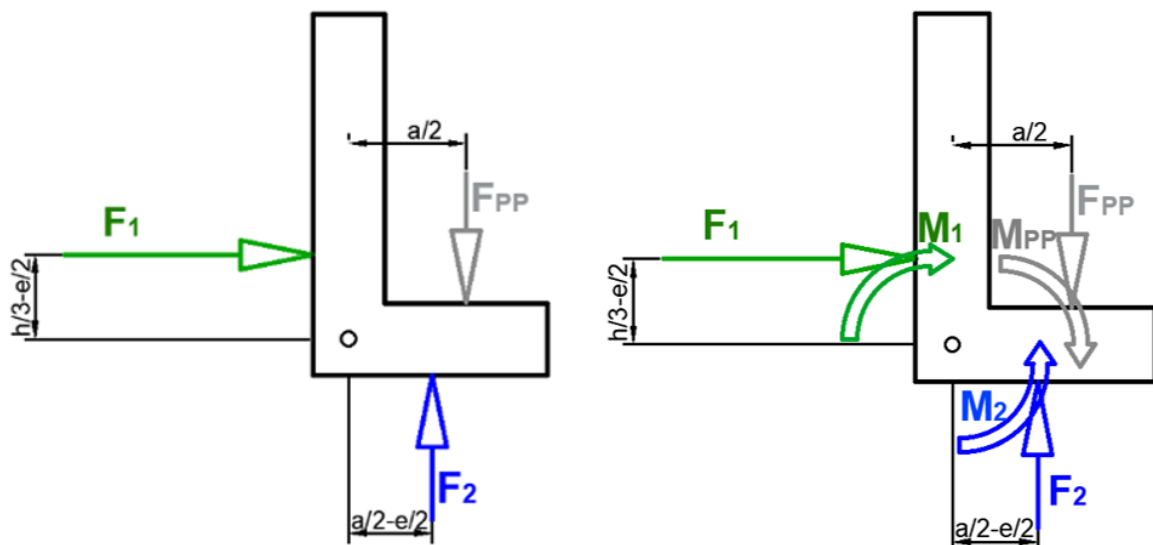


Figura 4.2-4. Momentos generados por cada fuerza sobre la rótula.

Una vez encontrados los momentos ejercidos por cada fuerza, se hace el sumatorio y se iguala a cero de manera que las soluciones de la ecuación resultante representan los instantes en los que el sistema está en equilibrio, es decir, cuando la compuerta se abre o se cierra.

$$M_1 = -\gamma_{H_2O} \times g \times b \times \frac{h^2}{2} \times \left(\frac{h}{3} - \frac{e}{2}\right)$$

$$M_2 = \gamma_{H_2O} \times g \times b \times h \times a \times \frac{a-e}{2}$$

$$M_{PP} = -\gamma_m \times g \times b \times e \times (a-e) \times \frac{a}{2}$$

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0$$

$$-\gamma_{H_2O} \times g \times b \times \frac{h^2}{2} \times \left(\frac{h}{3} - \frac{e}{2}\right) + \gamma_{H_2O} \times g \times b \times h \times a \times \frac{a-e}{2} - \gamma_m \times g \times b \times e \times (a-e) \times \frac{a}{2} = 0$$

$$-\gamma_{H_2O} \times g \times b \times \frac{h^2}{2} \times \left(\frac{h}{3} - \frac{e}{2}\right) + \gamma_{H_2O} \times g \times b \times h \times a \times \frac{a-e}{2} - \gamma_m \times g \times b \times e \times (a-e) \times \frac{a}{2} = 0$$

$$-\gamma_{H_2O} \times \frac{h^2}{2} \times \left(\frac{h}{3} - \frac{e}{2}\right) + \gamma_{H_2O} \times h \times a \times \frac{a-e}{2} - \gamma_m \times e \times (a-e) \times \frac{a}{2} = 0$$

Fórmula 4.2-2. Equilibrio de momentos en la rótula.

Interpretando la ecuación final se obtiene la dirección del giro de la compuerta de manera que, si el momento generado por el agua retenido más el momento resultante del peso propio de la estructura son mayores que el momento de la presión hidrostática, la compuerta vence y se abre. Si, por el contrario, el momento generado por la presión hidrostática es mayor que el generado por la suma del peso propio de la estructura más el debido al del agua retenido, la compuerta permanece cerrada y se represa agua, desviándose por consiguiente hacia el ramal deportivo.

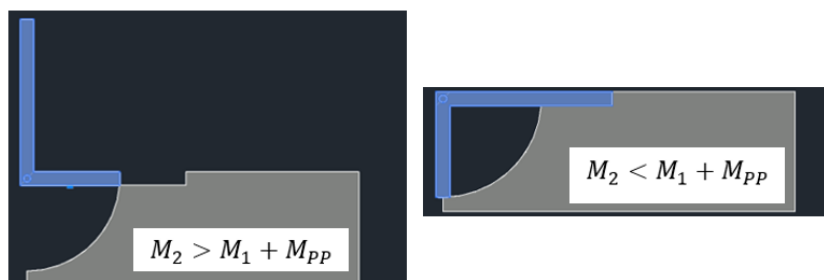


Figura 4.2-5. Variabilidad de los momentos respecto a la compuerta.

La ecuación obtenida, aparece expresada en función de las dimensiones del perfil pues, cada una de éstas condiciona la superficie de aplicación de la fuerza y las distancias del momento. Para resolver este problema, se acude al canal para calcular la altura “h” ideal del caudal con la que interesa que la compuerta quede en equilibrio y que a partir de entonces venza, es decir, se fija el valor de “h” de manera que la ecuación ya solo depende de dos parámetros, el espesor “e” y la anchura “a”.

El siguiente paso que se toma es resolver la ecuación en función de ambos parámetros de manera que se obtiene una ecuación de segundo grado de “a” en función de “e” que se resuelve mediante un algoritmo programado para la obtención del valor de “a_i” para cada valor de “e_i”. Además, se programa el algoritmo para que de manera automática y al meter las características del material, se obtengan todos los perfiles válidos para la compuerta con unas restricciones de diseño prefijadas.

$$a^2 \times [\gamma_{H2O} \times h - \gamma_m \times e] + a \times [\gamma_m \times e^2 - \gamma_{H2O} \times h \times e] + \gamma_m \times h^2 \times \frac{e}{2} - \gamma_{H2O} \times \frac{h^3}{2} = 0$$

Fórmula 4.2-3. Dimensionamiento del perfil en función del espesor.

Una vez definidas las características del perfil, el archivo Excel generado las incluye en la ecuación del equilibrio calculando las fuerzas y momentos de acuerdo a las dimensiones halladas “a” y “e”.

Para entender mejor el procedimiento empleado, se plantea el siguiente ejemplo (no válido pues no se ha medido en campo aún la altura así como que no se ha decidido el material de la compuerta) en el que se ha cogido como material el aluminio y una altura del nivel de caudal deseado de 50 cm para explicar el funcionamiento del archivo.

En primer lugar, tal y como se muestra en la Figura 28 se establecen los datos de referencia constantes en todo el proceso como la densidad del agua, el peso propio del material o el valor de la gravedad. A continuación, se establece la altura “h” obtenida mediante medición del caudal que se considera adecuado para represar (en este ejemplo se toman 0,5 m) y automáticamente se establecen los criterios de perfil con el espesor y la anchura máxima y mínima aceptable.

Posteriormente, se dan valores al espesor (e_i) desde el mínimo hasta el máximo y se programa de manera que se resuelva la ecuación mostrada en la fórmula 8 permitiendo obtener los valores de la anchura (a_i) solución.

Como conclusión, se obtienen dos columnas en las que aparecen los valores preestablecidos del perfil válidos en cuanto al espesor y a la anchura que cumplen el equilibrio, así como los criterios de perfil.

Finalmente, en cuanto al dimensionamiento, la última columna se utiliza para ir estudiando y eliminando los valores obtenidos más desfavorables.

ESTUDIO DEL EQUILIBRIO

$$\frac{\gamma_{H2O} \times h \times a \times (a - e)}{2} - \frac{\gamma_{H2O} \times h^2}{2} \times \left(\frac{h}{3} + \frac{e}{2}\right) - \frac{\gamma_m \times e \times a}{2} \times (a - e) \cong 0$$

$$\gamma_{H2O} \times h \times a \times (a - e) - \gamma_{H2O} \times h^2 \times \left(\frac{h}{3} + \frac{e}{2}\right) - \gamma_m \times e \times a \times (a - e) \cong 0$$

DATOS REFERENCIA		
ELEMENTO	VALOR	UNIDADES
PESO PROPIO AGUA	1000	Kg/m ³
PESO PROPIO MATERIAL	2700	Kg/m ³
GRAVEDAD	9.8	m/s ²

CRITERIOS DEL PERFIL				
DIMENSION		MIN	MÁX	UNIDADES
ALTURA SEGÚN CAUDAL	h	0.5		m
ANCHO	a	0.06	0.5	
PROFUNDO	b	-		
ESPESOR	e	0.03	0.33333333	

TABLA DE DIMENSIONES											
PERFIL				RESOLUCIÓN			COMPROBACIÓN CRITERIOS DE PERFIL				¿OK?
h	e	a1	a2	a	b	c	e1	a1	e2	a2	
0.5	0.03	0.31619468	-0.2861947	419	-12.57	-37.916667	0.03	0.31619468			SI
	0.04	0.32649211	-0.2864921	392	-15.68	-36.666667	0.04	0.32649211			SI
	0.05	0.33750114	-0.2875011	365	-18.25	-35.416667	0.05	0.33750114			NO
	0.06	0.34935061	-0.2893506	338	-20.28	-34.166667	0.06	0.34935061			NO
	0.07	0.36220998	-0.29221	311	-21.77	-32.916667	0.07	0.36220998			NO
	0.08	0.37630692	-0.2963069	284	-22.72	-31.666667	0.08	0.37630692			NO
	0.09	0.39195502	-0.301955	257	-23.13	-30.416667	0.09	0.39195502			NO
	0.1	0.40959921	-0.3095992	230	-23	-29.166667	0.1	0.40959921			NO
	0.11	0.42989402	-0.319894	203	-22.33	-27.916667	0.11	0.42989402			NO
	0.12	0.45384661	-0.3338466	176	-21.12	-26.666667	0.12	0.45384661			NO
	0.13	0.48309886	-0.3530989	149	-19.37	-25.416667	0.13	0.48309886			NO
	0.14	0.52054127	-0.3805413	122	-17.08	-24.166667					
	0.15	0.5718431	-0.4218431	95	-14.25	-22.916667					
	0.16	0.65011179	-0.4901118	68	-10.88	-21.666667					
	0.17	0.79576894	-0.6257689	41	-6.97	-20.416667					
	0.18	1.26351933	-1.0835193	14	-2.52	-19.166667					
	0.19	#¡NUM!	#¡NUM!	-13	2.47	-17.916667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.2	#¡NUM!	#¡NUM!	-40	8	-16.666667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.21	#¡NUM!	#¡NUM!	-67	14.07	-15.416667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.22	#¡NUM!	#¡NUM!	-94	20.68	-14.166667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.23	#¡NUM!	#¡NUM!	-121	27.83	-12.916667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.24	#¡NUM!	#¡NUM!	-148	35.52	-11.666667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.25	#¡NUM!	#¡NUM!	-175	43.75	-10.416667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.26	#¡NUM!	#¡NUM!	-202	52.52	-9.166667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.27	#¡NUM!	#¡NUM!	-229	61.83	-7.916667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.28	#¡NUM!	#¡NUM!	-256	71.68	-6.666667	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	
	0.29	0.10158531	0.18841469	-283	82.07	-5.416667	0.29	0.10158531	0.29	0.18841469	SI
	0.3	0.05482049	0.24517951	-310	93	-4.166667			0.3	0.24517951	SI
	0.31	0.03102338	0.27897662	-337	104.47	-2.916667			0.31	0.27897662	SI
	0.32	0.01501295	0.30498705	-364	116.48	-1.666667			0.32	0.30498705	SI
	0.33	0.00326146	0.32673854	-391	129.03	-0.416667			0.33	0.32673854	SI

Figura 4.2-6. Dimensionamiento del perfil.

Por otra parte, se estudia la dinámica de las fuerzas respecto a los valores válidos del perfil de manera que se toma un valor de a_i y e_i (0,3161 y 0,03) y se estudia la dinámica de fuerzas y momentos de la estructura a medida que cambian los valores de la altura del caudal hasta llegar a la “h” establecida en la que se cumple el equilibrio y por tanto, si sigue aumentando el caudal y la “h”, la compuerta vence y se abre.

En el ejemplo tomado, se aprecia cómo varían los momentos uno y dos, representados mediante columnas azules y naranjas, a medida que aumenta la altura, mientras que el momento debido al peso propio permanece constante en todo momento.

En línea amarilla se representa el sumatorio de los tres momentos y para verificar las dimensiones y la efectividad de la compuerta debe garantizar un momento total positivo hasta la altura preestablecida de 0,5 m y negativa a partir de entonces. En caso de cumplirse tales criterios, se establece una columna que indica la posición de la compuerta. Además, se consigue que con regímenes de agua mínimos, que tengan una altura de 0,05 m la compuerta esté abierta lo cual no es real pues con el caudal ecológico ya se consigue una altura superior a ese mínimo.

PERFIL	Valor	Unidds
Profundo -b-	-	
Ala horizontal -a-	0.31619468	m
Espesor -e-	0.03	

ALTURAS SEGÚN CAUDAL		DINÁMICA DE LA COMPUERTA							
		FUERZAS			MOMENTOS				
		F ₁	F ₂	F _{pp}	M ₁	M ₂	M _{pp}	M _i	
h ₁	0.05	1.25	7.90486711	12.8058847	-0.0020833	2.26233095	-3.6649761	-1.4047285	COMPUERTA ABIERTA
h ₂	0.1	5	15.8097342	12.8058847	-0.0916667	4.52466189	-3.6649761	0.76801909	COMPUERTA CERRADA
h ₃	0.15	11.25	23.7146013	12.8058847	-0.39375	6.78699284	-3.6649761	2.72826671	COMPUERTA CERRADA
h ₄	0.2	20	31.6194684	12.8058847	-1.0333333	9.04932379	-3.6649761	4.35101432	COMPUERTA CERRADA
h ₅	0.25	31.25	39.5243355	12.8058847	-2.1354167	11.3116547	-3.6649761	5.51126193	COMPUERTA CERRADA
h ₆	0.3	45	47.4292026	12.8058847	-3.825	13.5739857	-3.6649761	6.08400955	COMPUERTA CERRADA
h ₇	0.35	61.25	55.3340698	12.8058847	-6.2270833	15.8363166	-3.6649761	5.94425716	COMPUERTA CERRADA
h ₈	0.4	80	63.2389369	12.8058847	-9.4666667	18.0986476	-3.6649761	4.96700477	COMPUERTA CERRADA
h ₉	0.45	101.25	71.143804	12.8058847	-13.66875	20.3609785	-3.6649761	3.02725239	COMPUERTA CERRADA
Ala vertical -h-	0.5	125	79.0486711	12.8058847	-18.958333	22.6233095	-3.6649761	0	COMPUERTA ABIERTA
h ₁₀	0.55	151.25	86.9535382	12.8058847	-25.460417	24.8856404	-3.6649761	-4.2397524	COMPUERTA ABIERTA
h ₁₁	0.6	180	94.8584053	12.8058847	-33.3	27.1479714	-3.6649761	-9.8170048	COMPUERTA ABIERTA
h ₁₂	0.65	211.25	102.763272	12.8058847	-42.602083	29.4103023	-3.6649761	-16.856757	COMPUERTA ABIERTA
h ₁₃	0.7	245	110.66814	12.8058847	-53.491667	31.6726333	-3.6649761	-25.48401	COMPUERTA ABIERTA

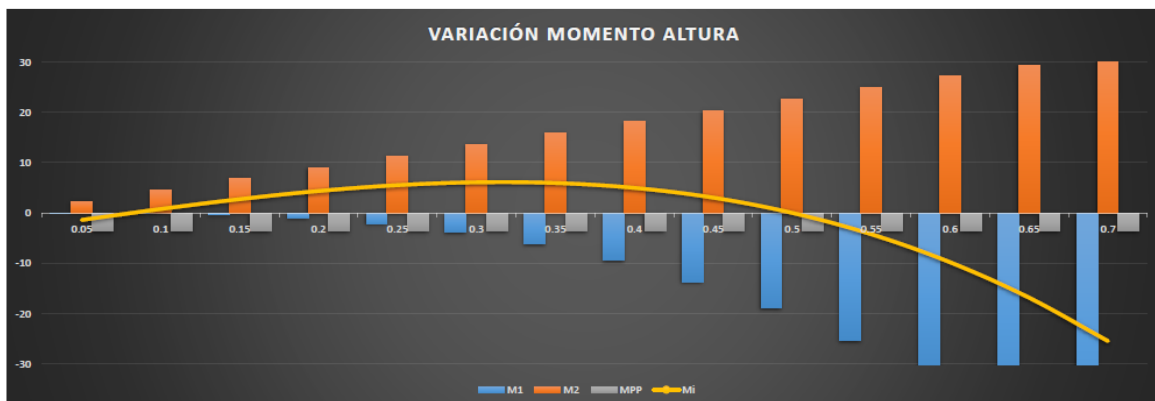


Figura 4.2-7. Variación de los momentos dependiendo del nivel de altura del caudal.

4.3. DIMENSIONAMIENTO DEL EJE.

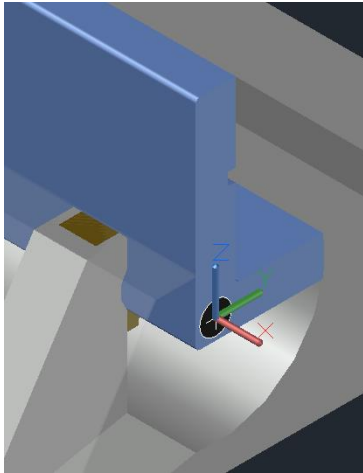


Figura 4.3-1. Direcciones de los ejes.

Una vez conocidas las dimensiones del perfil para el funcionamiento óptimo y deseado de la compuerta en el plano “y-z”, se procede a dimensionar el eje circular de movimiento de manera que resista todas las cargas transversales de la sección a lo largo del eje “x”. Para este apartado se siguen los apuntes de Resistencia de Materiales de la Universidad de Valladolid [8].

En primer lugar, hay que tener en cuenta las dimensiones del perfil ya que el diámetro del eje no puede ser mayor que el espesor de las alas y, de hecho, para asegurar la correcta unión entre ambos se establece la relación de que el diámetro máximo admisible debe de ser el 80% del valor del espesor, lo cual equivale a un diámetro máximo de 8 cm.

4.3.1. PLANTEAMIENTO Y ESTUDIO DE LAS TENSIONES MÁS DESFAVORABLES.

El problema de este apartado reside en el dimensionamiento del número de apoyos intermedios necesarios para que los vanos del eje sean tales que resistan las tensiones aplicadas. Es decir, se van a estudiar las tensiones normales y tangenciales que surgen con el funcionamiento de la estructura para todas las alturas del caudal permitiendo establecer las longitudes máximas de cada tramo de la compuerta y el número de apoyos necesarios para abarcar todo el ramal.

El planteamiento seguido consiste en encontrar la altura de agua que genera más tensiones sobre la estructura y establecer ese valor con sus consiguientes tensiones como el punto más desfavorable y limitante del eje para su posterior dimensionamiento.

Existen dos alturas dignas de estudio, en primer lugar, se debe estudiar el punto en el que el momento generado en la sección estudiada anteriormente (Figura 31. $h \approx 0.3m$) es máximo ya que genera un momento torsor distribuido a lo largo del eje causante de tensiones tangenciales que, sumadas a las tensiones normales procedentes de las cargas distribuidas para esa altura, serán uno de los

puntos más desfavorables del eje. Por otra parte, se debe realizar el estudio a flexión debido a las cargas distribuidas a lo largo del eje cuando la compuerta está a punto de vencer (Figura 31. $h=0.5m$) ya que las tensiones normales generadas serán máximas pues, lógicamente, las tangenciales serán nulas por no haber ningún momento aplicado en la sección (hecho causante del vencimiento de la compuerta).

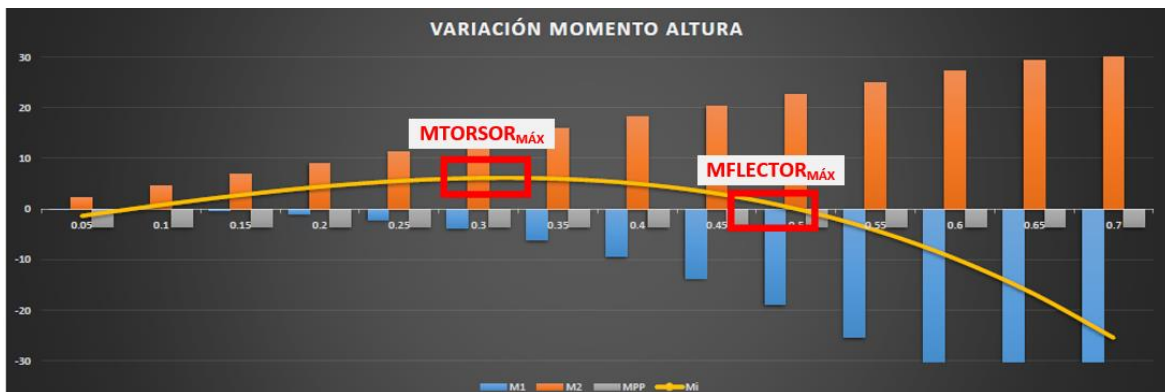


Figura 4.3-2. Puntos más desfavorables de estudio.

Las cargas generadas en el funcionamiento de la compuerta son transmitidas al eje circular por el principio de acción reacción de Newton. Por un lado, en la dirección del eje “z” sentido negativo se encuentran las debidas al peso propio de los materiales de la sección en (F_{PPM} Fuerza del peso propio del material (polietileno de alta densidad) y F_{PPA} Fuerza del peso propio del acero del eje circular) y la debida al empuje del agua, F_2 en sentido “z” positivo. Por otra parte, en la dirección de “y” aparece la fuerza debida al agua retenida por la compuerta F_1 .

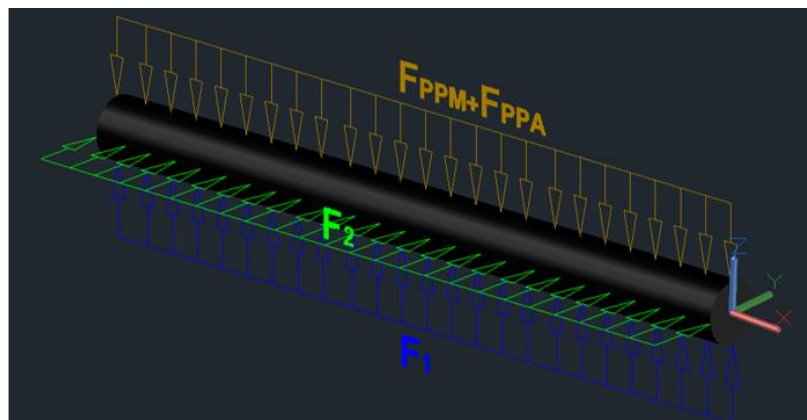


Figura 4.3-3. Fuerzas transmitidas al eje.

Como se ha señalado anteriormente, el dimensionamiento se realiza a través de las secciones más desfavorables por lo que se supone el máximo radio admisible y resistente del eje de 0,04m para obtener el valor de las fuerzas.

4.3.1.1. ESTUDIO A FLEXIÓN.

El estudio a flexión se realiza cuando la altura del nivel del agua es de medio metro ya que es el momento de vencimiento de la compuerta en el que el momento es nulo y las cargas distribuidas son máximas.

La complejidad de este estudio reside en que las cargas distribuidas se ejercen sobre la dirección “y” y la dirección “z” por lo que la flexión del eje se ve notoriamente complicada.

El eje se encuentra biapoyado ya que se permite el movimiento en el eje.

Las cargas distribuidas sobre el eje generan en la sección unas tensiones de compresión y tracción tales como se muestran en la “Figura 4.3-4” y “Figura 4.3-5” en diferentes márgenes del eje.

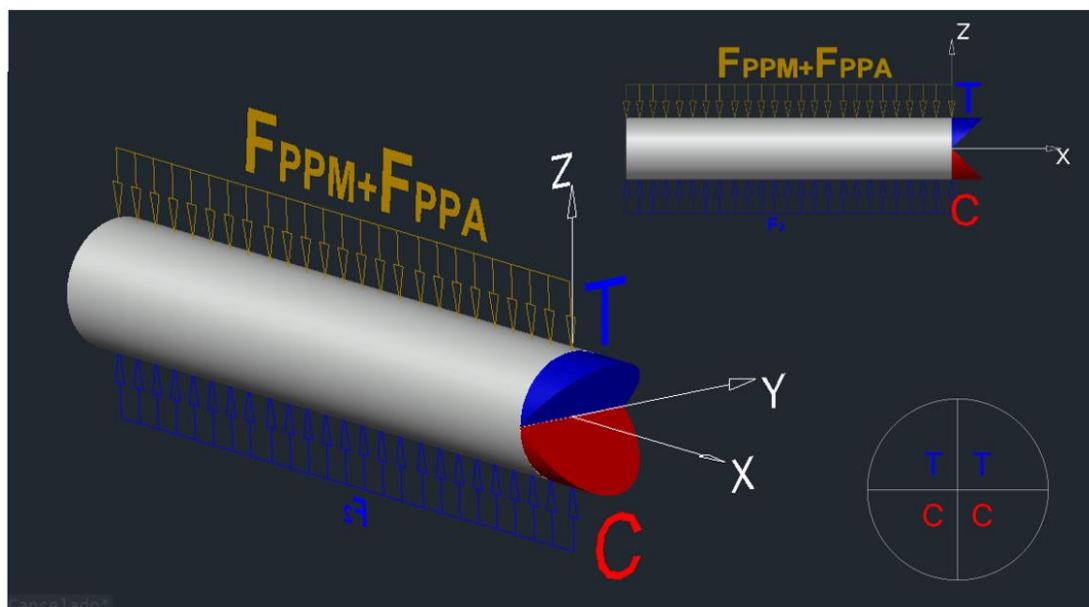


Figura 4.3-4. Tensiones generadas por las cargas distribuidas en el eje z.

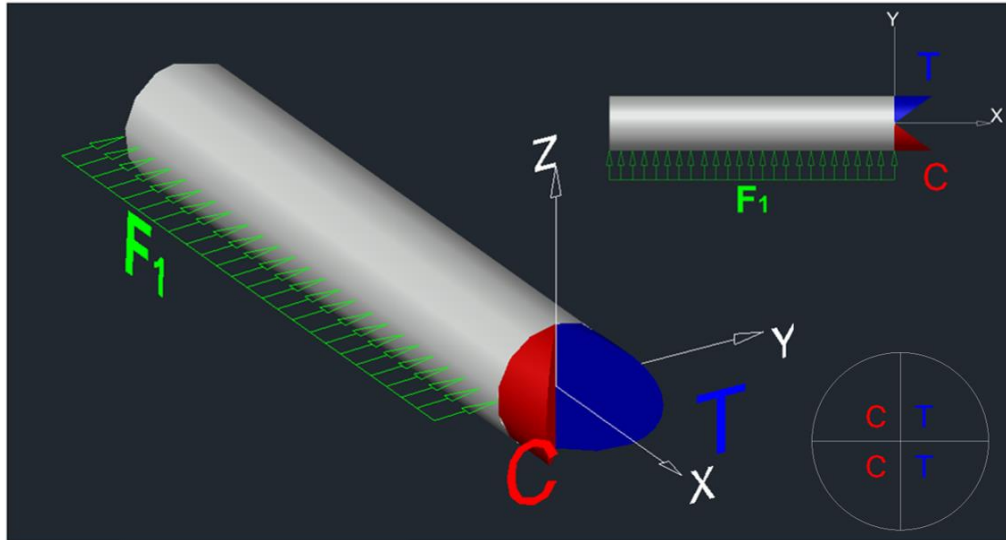


Figura 4.3-5. Tensiones generadas por las cargas distribuidas en el eje y.

Por lo tanto, las tensiones reales aplicadas sobre el eje son la suma de ambas siendo tal que en los cuadrantes donde se encuentran compresiones y tracciones, la suma total será reducida o incluso nula mientras que en aquellos donde coincide tracción o compresión de ambos, la suma será máxima obteniéndose ahí el valor crítico y los puntos más desfavorables. En definitiva, el estudio tensional a flexión se reduce a estudiar el efecto de las cargas distribuidas a lo largo del eje en función de la altura de la sección "h" (que no la altura de la compuerta). Por otra parte, al estudiar una viga biapoyada isostática se sabe que el momento máximo se encuentra a la mitad de la longitud de la misma y, por tanto, dividiendo ese valor entre el momento de inercia de la sección y multiplicado por la altura "h" se obtiene la tensión máxima.

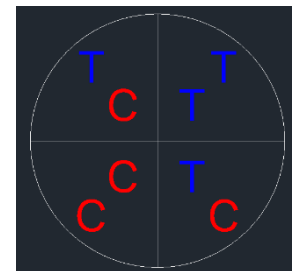
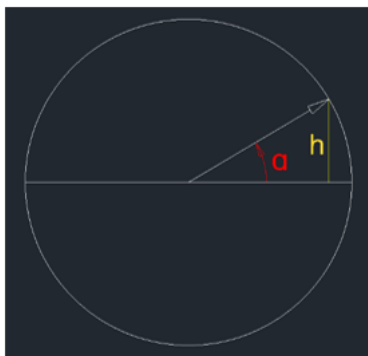


Figura 4.3-6. Distribución de tensiones en la sección.



$$\Gamma = \frac{M}{I} \times h$$

$$\Gamma_{1Z} = \frac{M_{MÁX1}}{\pi \times r^4 / 4} \times \sin(\alpha) \times r = \frac{4 \times M_{MÁX1}}{\pi \times r^3} \times \sin(\alpha)$$

$$\Gamma_{2Y} = \frac{M_{MÁX2}}{\pi \times r^4 / 4} \times \cos(\alpha) \times r = \frac{4 \times M_{MÁX2}}{\pi \times r^3} \times \cos(\alpha)$$

$$\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 = \frac{4}{\pi \times r^3} [M_{MÁX1} \times \sin(\alpha) + M_{MÁX2} \times \cos(\alpha)]$$

Fórmula 4.3-1. Tensiones bajo flexión.

Para conocer el punto en el que las tensiones son máximas se recurre a las derivadas de la Fórmula 9. en función del ángulo α .

$$\Gamma(\alpha) = \frac{4}{\pi \times r^3} [M_{MÁX1} \times \sin(\alpha) + M_{MÁX2} \times \cos(\alpha)]$$

$$\Gamma'(\alpha) = \frac{4}{\pi \times r^3} [M_{MÁX1} \times \cos(\alpha) - M_{MÁX2} \times \sin(\alpha)] = 0$$

$$[M_{MÁX1} \times \cos(\alpha) - M_{MÁX2} \times \sin(\alpha)] = 0 ; M_{MÁX1} \times \cos(\alpha) = M_{MÁX2} \times \sin(\alpha)$$

$$\frac{M_{MÁX1}}{M_{MÁX2}} = \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \tan(\alpha)$$

$$M_{MÁX1} = q_Z \times l^2 / 8 ; M_{MÁX2} = q_Y \times l^2 / 8$$

$$\frac{q_Z \times l^2 / 8}{q_Y \times l^2 / 8} = \tan(\alpha) ; \frac{q_Z}{q_Y} = \tan(\alpha) ; \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{q_Z}{q_Y} \right)$$

Fórmula 4.3-2. Desarrollo matemático del punto más desfavorable.

A continuación, se calcula el radio necesario en la sección del eje para abarcar toda la longitud deseada llegando al límite elástico del material (acero inoxidable 304), de manera que para los diferentes valores de α se obtiene un radio que agota la sección siendo el mayor de todos ellos el necesario.

Se deciden estudiar únicamente los ángulos en los que la “h” es máxima, es decir, en los ángulos en los que únicamente se crea flexión por una dirección de las cargas puntuales ya que al ser perpendiculares, la línea neutra de las tensiones generadas por una coincide con los valores máximos de la otra ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$) y los ángulos encontrados a través de la Fórmula 10. ya que serán los valores máximos y mínimos de tensión en el eje.

Lógicamente los valores máximos se encuentran en los cuadrantes donde las tensiones de tracción y compresión de ambas cargas son iguales, es decir en el primer y tercer cuadrante mientras que en el segundo y cuarto cuadrante las tensiones se llegan a anular tras restarse los esfuerzos de tracción y compresión (“Figura 4.3-4” y “Figura 4.3-5”

$$\Gamma f = \frac{4}{\pi \times r^3} [M_{MÁX1} \times \sin(\alpha) + M_{MÁX2} \times \cos(\alpha)]$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{4 \times l^2}{8 \times \pi \times \Gamma f} \times [M_{MÁX1} \times \sin(\alpha) + M_{MÁX2} \times \cos(\alpha)]}$$

Fórmula 4.3-3. Radio mínimo de agotamiento de la sección.

Una vez encontrado el radio mínimo que agota la sección, se debe verificar que cumpla con los requisitos del perfil preestablecidos de un valor máximo de 4cm y en caso de no cumplirlo, se debe rediseñar el eje como se hace posteriormente.

Finalmente, para concluir si es más desfavorable el estudio a flexión o a torsión se halla la longitud máxima admisible con el radio de 4cm. para posteriormente comparar dicha longitud con la máxima admisible a torsión con el mismo radio para poder ver cuál de los dos estados tensionales es más limitante.

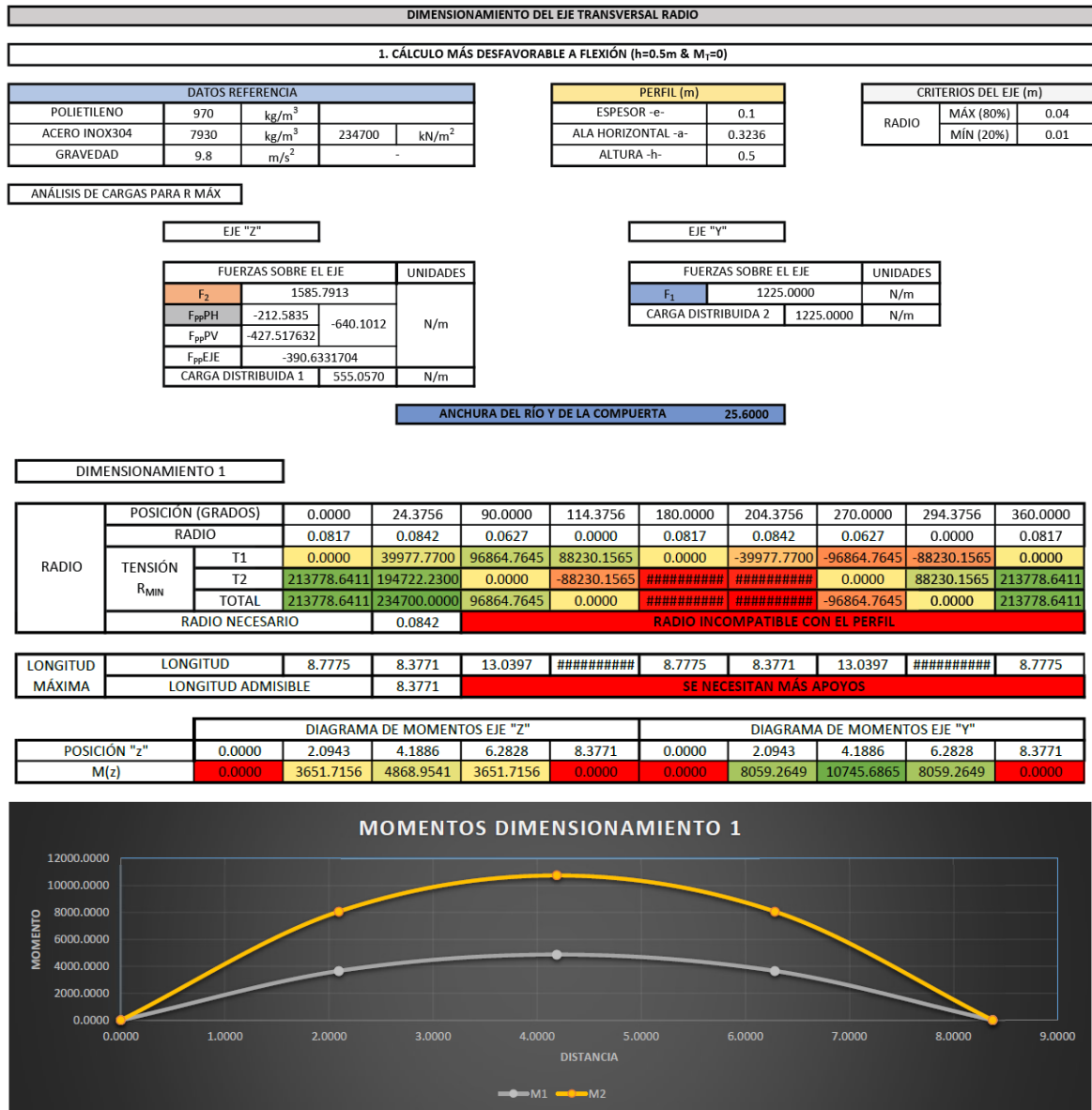


Figura 4.3-7. Cálculos limitantes para viga biapoyada sometida a cargas distribuidas.

4.3.1.2. ESTUDIO A TORSIÓN.

El estudio a torsión [9] se realiza sobre el momento generado en la altura de agua más desfavorable. Para ello, se deriva y se iguala a cero la ecuación cinemática de la compuerta, representante del momento causante del giro de la misma, para encontrar el máximo valor comprendido entre las alturas de uso.

$$f(h) = \gamma_{H2O} \times h \times a \times \frac{(a - e)}{2} - \gamma_{H2O} \times \frac{h^2}{2} \times \left(\frac{h}{3} - \frac{e}{2}\right) - \gamma_m \times a \times e \times \frac{(a - e)}{2}$$

$$f'(h) = \gamma_{H2O} \times a \times \frac{(a - e)}{2} - \gamma_{H2O} \times h \times \left(\frac{h}{3} - \frac{e}{2}\right) + \gamma_{H2O} \times \frac{(h \times e)}{2} = 0$$

$$h = \frac{-e/2 \pm \sqrt{e^2/4 + (a \times e) \times a}}{-1} = 0.32363 \text{ m}$$

Fórmula 4.3-4. Momento máximo.

Tal y como se mostraba en la “Figura 4.3-7”. se obtiene el valor del momento máximo a la altura de 0.32363m por lo que se recalcula el valor de las fuerzas sobre el eje para esa altura.

DIMENSIONAMIENTO DEL EJE TRANSVERSAL				
1. CÁLCULO MÁS DESFAVORABLE A TORSIÓN (h=0.3236m)				
DATOS REFERENCIA				
POLIETILENO	970	kg/m ³		
ACERO INOX304	7930	kg/m ³	234700	kN/m ²
GRAVEDAD	9.8	m/s ²		
PERFIL (m)				
ESPESOR -e-			0.1	
ALA HORIZONTAL -a-			0.3236	
ALTURA -h-			0.3236	
CRITERIOS DEL EJE (m)				
RADIO	MÁX (80%)			0.04
	MÍN (20%)			0.01
ANÁLISIS DE CARGAS PARA R MÁX				
EJE "Z"				
FUERZAS SOBRE EL EJE		UNIDADES		
F ₂	1585.7913			
F _{ppPH}	-212.5835	-472.4447		N/m
F _{ppPV}	-259.861154			
F _{ppEJE}	-390.6331704			
CARGA DISTRIBUIDA 1	722.7135			N/m
EJE "Y"				
FUERZAS SOBRE EL EJE		UNIDADES		
F ₁	513.2111			N/m
CARGA DISTRIBUIDA 2	513.2111			N/m
M _T	50.6675			

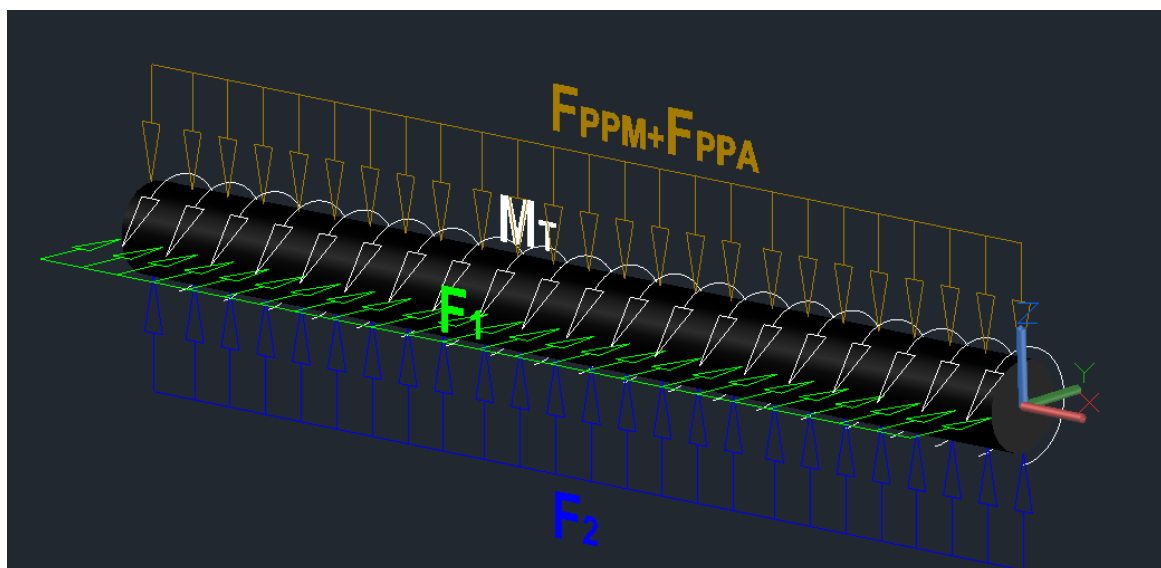


Figura 4.3-8. Fuerzas causantes del momento máximo (h=0.3236).

En el estado tensional de estudio hay por un lado tensiones normales debidas a la flexión provocada por las cargas distribuidas y por otro lado tensiones tangenciales debidas al cortante y al momento distribuido a lo largo del eje.

Para las fuerzas tangenciales, se plantean las ecuaciones a medida que se avanza en la dirección "x" del eje y teniendo en cuenta el signo de las mismas de manera que los puntos más desfavorables van a ser aquellos en los que las tangenciales debidas al torsor (mostradas en marrón) vayan en el mismo sentido que las tangenciales debidas al cortante en "z" o en "y" (mostradas en amarillo y rojo respectivamente). Se han marcado tales puntos como A y B.

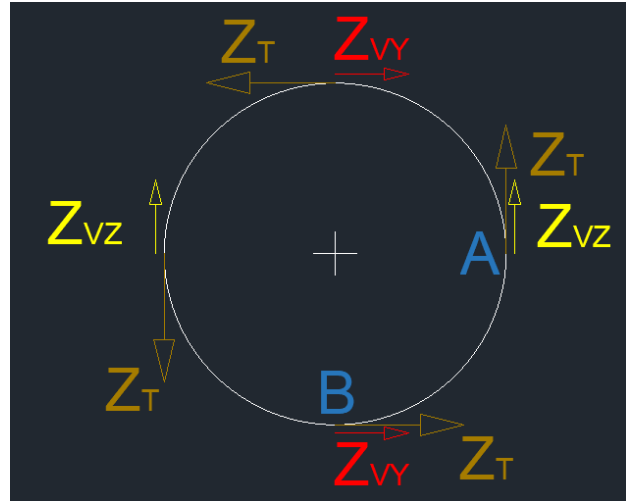
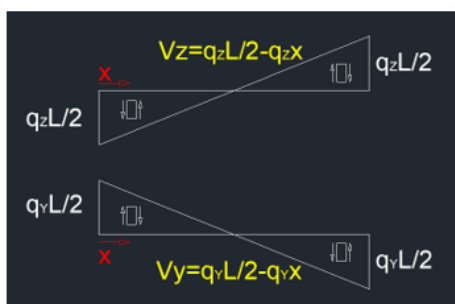


Figura 4.3-9. Distribución de las tensiones tangenciales.

$$Z_{TORSOR}(x) = \int \frac{T}{\pi \times r^3/2} \times dx = \frac{16 \times T}{\pi \times d^3} \times x$$

Fórmula 4.3-5. Tensión tangencial debido al torsor a lo largo del eje.

Los esfuerzos cortantes a lo largo de la sección no son constantes por lo que se encuentra su ecuación y se valoran en función de ello.



$$Z_{Vz}(x) = q_z \times L/2 - q_z \times x$$

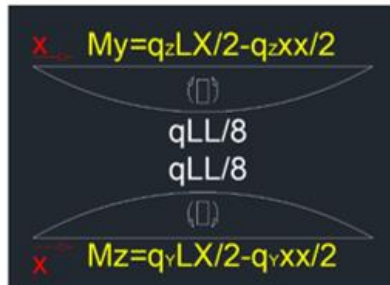
$$Z_{Vy}(x) = q_y \times L/2 - q_y \times x$$

Fórmula 4.3-6. Variación del cortante a lo largo del eje.

$$Z_{CORTANTEz}(x) = \frac{4 \times (q_z \times L/2 - q_z \times x)}{3 \times \pi \times d^2/4} \quad Z_{CORTANTEy}(x) = \frac{4 \times (q_y \times L/2 - q_y \times x)}{3 \times \pi \times d^2/4}$$

Fórmula 4.3-7. Tensión tangencial debida al cortante a lo largo del eje.

Una vez obtenidas las tensiones tangenciales se deben obtener las tensiones normales debidas a las cargas distribuidas.



$$M_z(x) = \left(q_y \times L \times x/2 - q_y \times x^2/2 \right)$$

$$M_y(x) = \left(q_z \times L \times x/2 - q_z \times x^2/2 \right)$$

Fórmula 4.3-8. Variación del momento con dos apoyos.

$$\Gamma_z(x) = \frac{4 \times \left(q_y \times L \times x/2 - q_y \times x^2/2 \right)}{\pi \times r^3} \quad \Gamma_y(x) = \frac{4 \times \left(q_z \times L \times x/2 - q_z \times x^2/2 \right)}{\pi \times r^3}$$

Fórmula 4.3-9. Tensión normal debido a las cargas distribuidas a lo largo del eje.

Una vez obtenidas todas las tensiones a lo largo del eje, se aplica el criterio de Von Mises para encontrar la tensión equivalente en el eje. Cabe destacar, que los puntos estudiados son A y B de la “Figura 4.3-9”. por ser los más desfavorables bajo tensiones tangenciales y que en A el momento debido a la carga qz es nulo así como el momento debido a la carga qy en B.

$$\Gamma' = \sqrt{(\Gamma_x^2 - \Gamma_x \times \Gamma_y + \Gamma_y^2 + 3 \times Z_{xy}^2)}$$

Fórmula 4.3-10. Ecuación de Von Mises.

Se elabora una hoja de cálculo en la que, tras introducir la longitud del eje a lo largo del río, se obtienen las tensiones equivalentes (“Figura 4.3-10”).

ANCHURA DEL RÍO Y DE LA COMPUERTA											
											8.3771
A											
"x"	0.0000	0.8377	1.6754	2.5131	3.3508	4.1886	5.0263	5.8640	6.7017	7.5394	8.3771
TORSOR	2111.0248	1688.8198	1266.6149	844.4099	422.2050	0.0000	-422.2050	-844.4099	-1266.6149	-1688.8198	-2111.0248
VZ	802.9690	642.3752	481.7814	321.1876	160.5938	0.0000	-160.5938	-321.1876	-481.7814	-642.3752	-802.9690
ZTOT	2913.9937	2331.1950	1748.3962	1165.5975	582.7987	0.0000	-582.7987	-1165.5975	-1748.3962	-2331.1950	-2913.9937
γy	0.0000	32242.3039	57319.6514	75232.0424	85979.4770	89561.9552	85979.4770	75232.0424	57319.6514	32242.3039	0.0000
TTOT	5047.1852	32494.1467	57399.5915	75259.1261	85985.4024	89561.9552	85985.4024	75259.1261	57399.5915	32494.1467	5047.1852
LONGITUD MÁXIMA ADMISIBLE											13.5609
ANCHURA DEL RÍO Y DE LA COMPUERTA											
											8.3771
B											
"x"	0.0000	0.8377	1.6754	2.5131	3.3508	4.1886	5.0263	5.8640	6.7017	7.5394	8.3771
TORSOR	2111.0248	1688.8198	1266.6149	844.4099	422.2050	0.0000	-422.2050	-844.4099	-1266.6149	-1688.8198	-2111.0248
VZ	570.2018	456.1615	342.1211	228.0807	114.0404	0.0000	-114.0404	-228.0807	-342.1211	-456.1615	-570.2018
ZTOT	2681.2266	2144.9813	1608.7360	1072.4906	536.2453	0.0000	-536.2453	-1072.4906	-1608.7360	-2144.9813	-2681.2266
γy	0.0000	45404.2208	80718.6148	105943.1819	121077.9222	126122.8356	121077.9222	105943.1819	80718.6148	45404.2208	0.0000
TTOT	4644.0207	45555.9667	80766.6941	105959.4663	121081.4846	126122.8356	121081.4846	105959.4663	80766.6941	45555.9667	4644.0207
LONGITUD MÁXIMA ADMISIBLE											11.4275
NOHAYLIMITANTE											

Figura 4.3-10. Cálculos a torsión con longitud máxima de flexión.

En el apartado anterior, se calculaba la longitud máxima a flexión cuando la altura del nivel del agua era de medio metro obteniéndose una distancia máxima de 8,3771 m, por lo que se introduce esa misma longitud y se concluye que la sección a la altura de 0.3236 m no se llega a estar sometida a tensiones próximas al límite de fatiga del material (234700 Kn/m²) por lo que el cálculo a torsión del eje no es el factor limitante del dimensionamiento si no que es el cálculo a flexión.

Además, se establecen las longitudes máximas que soporta el eje con esas cargas siendo estas lógicamente mayores que las de flexión, así como que el punto B es más limitante y desfavorable que el A.

4.3.1.3. CONCLUSIONES.

Por tanto, se concluye que la longitud máxima con la que se agota el eje a flexión es más pequeña que a torsión y por tanto el dimensionamiento se debe realizar a flexión.

4.3.2. DIMENSIONAMIENTO DEL EJE A FLEXIÓN.

Tras el estudio realizado anteriormente, el limitante es el esfuerzo a flexión cuando la altura del nivel del agua llega a medio metro de manera que se va a dimensionar siguiendo el planteamiento del apartado 4.3.1.1. *Estudio a flexión*. No obstante, se ha visto como con las fuerzas que se ejercen en la estructura y los

factores de diseño limitantes, el eje no conseguía abarcar la distancia suficiente como para cubrir la distancia entre ambas orillas y es por ello por lo que el dimensionamiento se plantea estableciendo n tramos con n+1 apoyos hasta conseguir que la distancia que resista el eje bajo esas fuerzas sea mayor que la distancia entre las orillas.

4.3.2.1. EJE BIAPOYADO CON UN TRAMO.

Los cálculos y razonamiento planteados en este apartado son los mismos que en el apartado 4.3.1.1 *Estudio a flexión* obteniéndose los resultados de la Figura36. con una longitud máxima admisible de 8,3771 metros y un radio de 8,42 cm, lo cual no es suficiente para cubrir los 25,6 metros que separan las orillas y los criterios de perfil por lo que se requiere de otro dimensionamiento.

4.3.2.2. EJE CON TRES APOYOS Y DOS TRAMOS.

Este planteamiento resulta ser una estructura hiperestática que se decide resolver por el Principio de los Trabajos Virtuales descomponiendo la estructura en dos isostáticas. A continuación, se resuelve el equilibrio de fuerzas y momentos de cada una de ellas y se obtiene el diagrama de momentos de ambas para posteriormente aplicar el Principio de los Trabajos Virtuales [10], encontrando el valor de V_c (Fórmula 18)

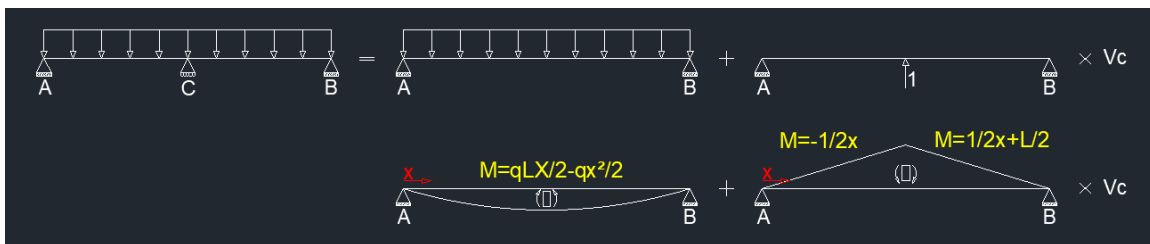


Figura 4.3-11. Resolución de la estructura hiperestática de tres apoyos y dos tramos.

$$1 \times \delta_c = \frac{1}{E \times I} \times \int_0^L M^I(x) \times [M^0(x) + V_c \times M^I(x)] dx$$

$$1 \times 0 = \frac{1}{E \times I} \times \left[\int_0^L M^I(x) \times M^0(x) dx + \int_0^L M^I(x) \times V_c \times M^I(x) dx \right]$$

Fórmula 4.3-11. Principio de los Trabajos Virtuales.

$$\begin{aligned}
 \int_0^L M^I(x) \times M^0(x) dx &= 2 \times \int_0^{L/2} \left(\frac{q \times L \times x}{2} - \frac{q \times x^2}{2} \right) \times \frac{-x}{2} dx = \\
 &= 2 \times \int_0^{L/2} \left(-\frac{q \times L \times x^2}{4} + \frac{q \times x^3}{4} \right) dx = \frac{1}{2} \times \left[-\frac{q \times L \times x^3}{3} + \frac{q \times x^4}{4} \right]_0^{L/2} = \\
 &= \underline{\underline{-\frac{5}{384} \times q \times L^4}} \\
 \int_0^L M^I(x) \times M^I(x) dx &= 2 \times \int_0^{L/2} \frac{-x}{2} \times \frac{-x}{2} dx = \\
 &= 2 \times \int_0^{L/2} \frac{x^2}{4} dx = \frac{1}{2} \times \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{L/2} = \underline{\underline{\frac{L^3}{48}}} \\
 1 \times 0 &= \frac{1}{E \times I} \times \left(-\frac{5}{384} \times q \times L^4 + \frac{L^3}{48} \times V_C \right); 0 = -\frac{5}{384} \times q \times L^4 + \frac{L^3}{48} \times V_C \\
 \frac{5}{384} \times q \times L^4 &= \frac{L^3}{48} \times V_C; \underline{\underline{V_C = \frac{5}{8} \times q \times L}}
 \end{aligned}$$

Fórmula 4.3-12. Principio de los Trabajos Virtuales aplicado en la resolución de la viga hiperestática.

Una vez obtenido el valor de V_C se calculan los momentos reales multiplicando V_C por las ecuaciones mostradas en la Figura 40. De esta forma, se obtiene el valor del momento máximo en la mitad del vano ($L/2$).

$$\begin{aligned}
 M_{MÁX}(L/2) &= M_1(x) + M_2(x) \times V_C = \frac{q \times L}{2} \times x - \frac{q \times x^2}{2} - \frac{x}{2} \times V_C \\
 M_{MÁX}(L/2) &= \frac{q \times L^2}{4} - \frac{q \times L^2}{8} - \frac{L}{4} \times \frac{5}{8} \times q \times L = \underline{\underline{-\frac{1}{32} \times q \times L^2}}
 \end{aligned}$$

Fórmula 4.3-13. Cálculo del momento máximo.

Una vez obtenido el valor del momento máximo causante de la mayor tensión de la estructura a flexión, se calculan las tensiones siguiendo el mismo planteamiento que en el Apartado 4.3.1.1. *Estudio a flexión* (Figura 33, 34 y 35). No obstante, dado que lo buscado es el radio necesario en el eje para soportar dichas tensiones, basta con despejar el valor del mismo sobre la ecuación para posteriormente calcularlo y comprobar si es inferior al valor del radio máximo que

se puede establecer en la estructura. En caso de serlo, se validaría el dimensionamiento de la misma.

Por otra parte se calcula la longitud máxima admisible con el radio máximo para volver a verificar lo explicado en el párrafo anterior pero con la longitud.

$$\Gamma f = \frac{4}{\pi \times r^3} [M_{MÁX1} \times \sin(\alpha) + M_{MÁX2} \times \cos(\alpha)]$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi \times \Gamma f} \times \left[\frac{1}{32} \times q_1 \times L^2 \times \sin(\alpha) + \frac{1}{32} \times q_2 \times L^2 \times \cos(\alpha) \right]}$$

Fórmula 4.3-14. Radio mínimo de agotamiento de la sección.

Los resultados obtenidos son los mostrados en la “Figura 4.3-12”. Se obtiene que el radio necesario para soportar las cargas totales de la longitud de 25,6 m debería de ser de 5,31 cm, lo cual es incompatible con los criterios de perfil planteados. Por otra parte, la longitud máxima admisible utilizando el radio máximo de 4 cm es de 16,7542 m por lo que se concluye que se necesita dimensionar la estructura con más apoyos.

A su vez, también se grafican los momentos generados a lo largo del eje “x” según las fuerzas ejercidas sobre los ejes “y-z”. Obteniéndose el M2 (amarillo) debido a la carga en el eje “y” como más desfavorable.

En definitiva, se concluye que el dimensionamiento 2 no consigue suplir las necesidades de la estructura por lo que no es válido y se requiere un nuevo planteamiento.

DIMENSIONAMIENTO DEL EJE TRANSVERSAL RADIO									
1. CÁLCULO MÁS DESFAVORABLE A FLECCIÓN (h=0.5m & M _y =0)									
DATOS REFERENCIA					PERFIL (m)			CRITERIOS DEL EJE (m)	
POLIETILENO	970	kg/m ³			ESPESOR -e-	0.1	RADIO	MÁX (80%)	0.04
ACERO INOX304	7930	kg/m ³	234700	kN/m ²	ALA HORIZONTAL -a-	0.3236		MÍN (20%)	0.01
GRAVEDAD	9.8	m/s ²		-	ALTURA -h-	0.5			
ANÁLISIS DE CARGAS PARA R MÁX									
EJE "Z"					EJE "Y"				
FUERZAS SOBRE EL EJE					FUERZAS SOBRE EL EJE				
F ₂	1585.7913				F ₁	1225.0000			
F _{ppPH}	-212.5835		-640.1012						
F _{ppPV}	-427.517632				CARGA DISTRIBUIDA 2	1225.0000			
F _{ppEJE}	-390.6331704								
CARGA DISTRIBUIDA 1	555.0570								
					ANCHURA DEL RÍO Y DE LA COMPUERTA 25.6000				

DIMENSIONAMIENTO 2											
RADIO	POSICIÓN (GRADOS)	0.0000	24.3756	90.0000	114.3756	180.0000	204.3756	270.0000	294.3756	360.0000	
	RADIO	0.0514	0.0531	0.0395	0.0000	-0.0514	-0.0531	-0.0395	0.0000	0.0514	
	TENSIÓN R _{MIN}	T1	0.0000	39977.7700	96864.7645	88230.1565	0.0000	-39977.7700	-96864.7645	-88230.1565	0.0000
		T2	213778.6411	194722.2300	0.0000	-88230.1565	#####	#####	0.0000	88230.1565	213778.6411
	TOTAL	213778.6411	234700.0000	96864.7645	0.0000	#####	#####	-96864.7645	0.0000	213778.6411	
	RADIO NECESARIO	0.0531		RADIO INCOMPATIBLE CON EL PERFIL							
LONGITUD MÁXIMA	LONGITUD	17.5549023	16.7542129	26.0794039	2577070896	17.5549023	16.7542129	26.0794039	1822264306	17.5549023	
	LONGITUD ADMISIBLE	16.7542		SE NECESITAN MÁS APOYOS							

DIAGRAMA DE MOMENTOS EJE "Z"										
POSICIÓN "z"	0	2.09427661	4.18855321	6.28282982	8.3771	8.3771	10.471383	12.5656596	14.6599362	16.7542
M(z)	0.0000	2434.4771	2434.4771	0.0000	-4868.9541	-4868.9541	0.0000	2434.4771	2434.4771	0.0000
DIAGRAMA DE MOMENTOS EJE "Y"										
POSICIÓN "z"	0	2.09427661	4.18855321	6.28282982	8.3771	8.3771	10.471383	12.5656596	14.6599362	16.7542
M(z)	0.0000	5372.8433	5372.8433	0.0000	-10745.6865	-10745.6865	0.0000	5372.8433	5372.8433	0.0000

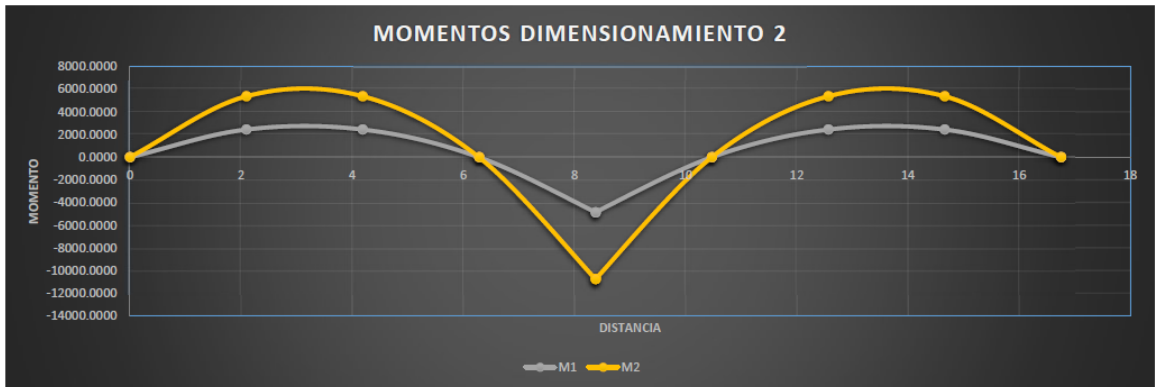


Figura 4.3-12. Resolución del Dimensionamiento 2.

4.3.2.3. EJE CON CUATRO APOYOS Y TRES TRAMOS.

La nueva estructura consta de cuatro apoyos y tres tramos siendo una viga hiperestática. Para su resolución se divide en tres tramos isostáticos a los que se le suma el momento generado en la unión tal y como se descompone en la Figura 42. A continuación se calculan los esfuerzos cortantes (en verde) y los diagramas de momentos (en azul) de cada una de los tramos isostáticos y sus cargas.

Posteriormente, se plantean los giros generados por cada una de las cargas (en amarillo) y se establecen las condiciones de contorno de que tal giro debe de ser nulo en los puntos "C-D" ya que la estructura se comporta como un empotramiento en esas zonas.

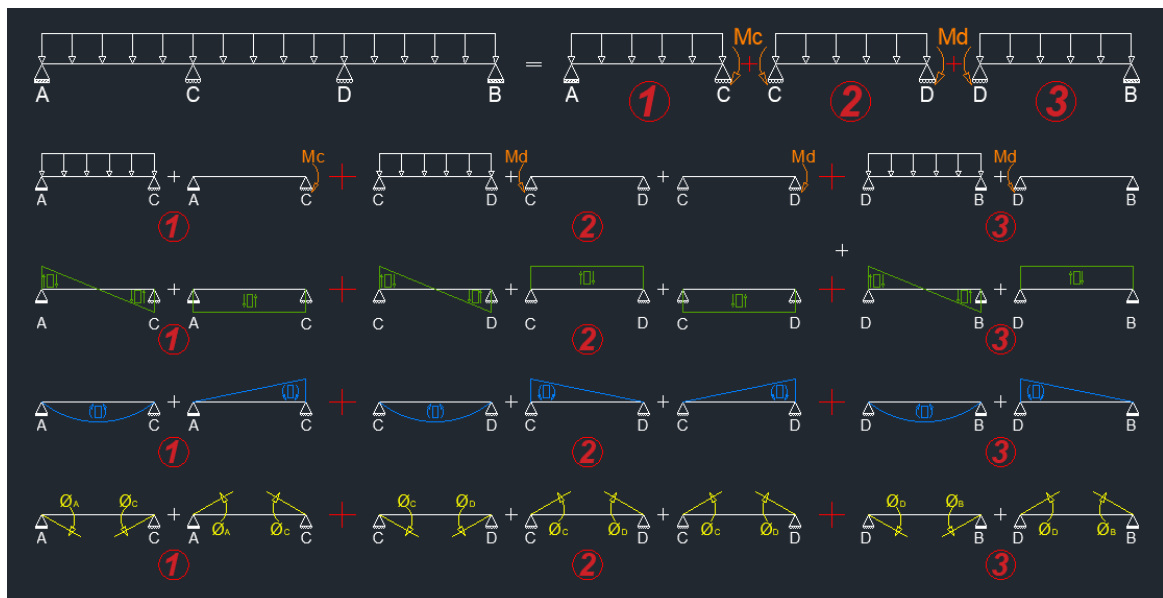


Figura 4.3-13. Planteamiento y resolución del Dimensionamiento 3.

Las ecuaciones de la resolución se plantean de manera que dependiendo del sentido de giro que genere cada carga se sumen o se resten además de que el giro generado en el punto por la derecha debe ser igual al generado por la izquierda debido a la continuidad del eje.

$$\begin{aligned} \frac{q \times L^3}{24 \times E \times I} - \frac{M_C \times L}{3 \times E \times I} &= -\frac{q \times L^3}{24 \times E \times I} + \frac{M_C \times L}{3 \times E \times I} + \frac{M_D \times L}{6 \times E \times I} \\ \frac{q \times L^2}{24} - \frac{M_C}{3} &= -\frac{q \times L^2}{24} + \frac{M_C}{3} + \frac{M_D}{6} \\ \frac{q \times L^2}{12} &= \frac{2 \times M_C}{3} + \frac{M_D}{6} \end{aligned}$$

Fórmula 4.3-15. Ecuaciones del giro en C.

$$\begin{aligned} -\frac{q \times L^3}{24 \times E \times I} + \frac{M_D \times L}{3 \times E \times I} &= \frac{q \times L^3}{24 \times E \times I} - \frac{M_C \times L}{6 \times E \times I} - \frac{M_D \times L}{3 \times E \times I} \\ -\frac{q \times L^2}{24} + \frac{M_D}{3} &= \frac{q \times L^2}{24} - \frac{M_C}{6} - \frac{M_D}{3} \\ \frac{q \times L^2}{12} &= \frac{M_C}{6} + \frac{2 \times M_D}{3} \end{aligned}$$

Fórmula 4.3-16. Ecuaciones del giro en D.

Por simetría se deduce que el valor de M_C tiene que ser igual al de M_D y para simplificar las ecuaciones se denomina M . Sustituyendo y resolviendo las ecuaciones de las ecuaciones “Fórmula 4.3-23” y “Fórmula 4.3-24” se obtiene el valor de los momentos del empotramiento y una vez obtenidos, se plantea el equilibrio de fuerzas y momentos en cada apoyo para encontrar la ecuación que los define. Por simetría se vuelve a obtener que los momentos desde A hacia la derecha (M_1) van a ser iguales que los de B hacia la izquierda (M_2).

$$\begin{aligned} M_D &= M_C = M \\ \frac{q \times L^2}{12} &= \frac{5 \times M}{6} ; M = \frac{q \times L^2}{10} \end{aligned}$$

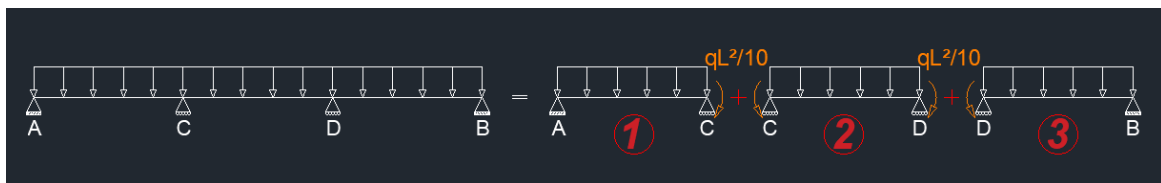


Figura 4.3-14. Descomposición en estructuras isostáticas.

$$\sum M_A = 0 ; -q \times L \times \frac{L}{2} - \frac{q \times L^2}{10} + R_B \times L = 0 ; R_B = \frac{q \times L}{2} + \frac{q \times L}{10} ; R_B = \frac{3 \times q \times L}{5}$$

$$\sum F_V = 0 ; R_B + R_A - q \times L = 0 ; R_A = \frac{2 \times q \times L}{5}$$

$$\overline{M}_1 = \overline{M}_2 = \frac{2 \times q \times L \times x}{5} - \frac{q \times x^2}{2}$$

Fórmula 4.3-17. Ecuaciones de los momentos tramos 1 y 3.

Una vez obtenida la ecuación de los momentos en los tramos 1 y 3 se deriva con respecto a “x” para encontrar el punto donde el momento es máximo en el tramo, obteniéndose el mismo a dos quintos de la longitud. Posteriormente, se sustituye tal valor en “x” sobre la ecuación de momentos y se obtiene el valor máximo del tramo.

$$M'(x) = 0 ; \frac{2 \times q \times L}{5} - q \times x = 0 ; x_{M\acute{A}X} = \frac{2 \times L}{5}$$

$$M_{M\acute{A}X} \left(\frac{2 \times L}{5} \right) = \frac{4 \times q \times L^2}{25} - \frac{4 \times q \times L^2}{50} = \frac{2 \times q \times L^2}{25}$$

Fórmula 4.3-18. Análisis del momento máximo en los tramos 1 y 3.

Se analiza el tramo 2 siguiendo el mismo planteamiento. Finalmente, se concluye que el momento máximo a lo largo de todo el eje se encuentra en los puntos C y D por lo que serán los lugares de estudio tensional.

$$M = \frac{q \times L \times x}{2} - \frac{q \times L^2}{10} - \frac{q \times x^2}{2}$$

$$M'(x) = 0 ; \frac{q \times L}{2} - q \times x = 0 ; x_{M\acute{A}X} = \frac{L}{2}$$

$$M_{M\acute{A}X} \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{q \times L^2}{4} - \frac{q \times L^2}{10} - \frac{q \times L^2}{8} = \frac{q \times L^2}{40}$$

Fórmula 4.3-19. Ecuaciones del momento en el Tramo 2.

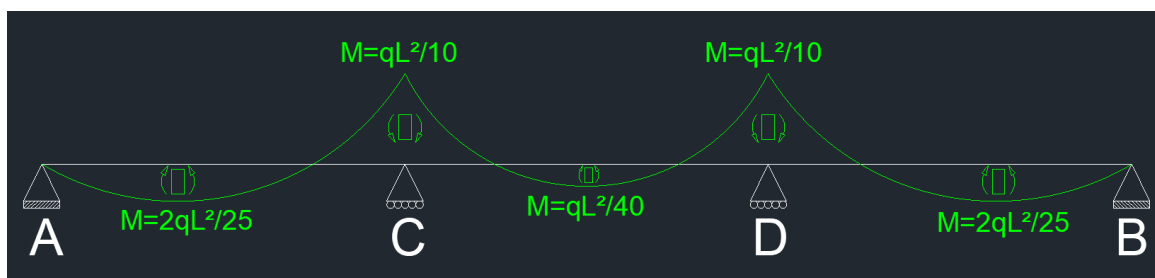


Figura 4.3-15. Diagrama de momentos de la estructura.

Una vez encontrados los puntos más desfavorables y el valor de los momentos en ellos, se analiza el estado tensional de los mismos para verificar que cumplen los criterios de diseño demandados. El planteamiento vuelve a ser el mismo que en los apartados anteriores, pero sustituyendo esta vez por lo momentos máximos obtenidos dividiendo la estructura en cuatro tramos y tres apoyos.

Se despeja el radio de la ecuación y se vuelve a comprobar si cumple los requisitos de longitud y diseño necesarios para verificar la estructura.

$$\Gamma f = \frac{4}{\pi \times r^3} [M_{MÁX1} \times \sin(\alpha) + M_{MÁX2} \times \cos(\alpha)]$$

$$\Gamma f = \frac{4}{\pi \times r^3} \left[\frac{q_1 \times (L/3)^2}{10} \times \sin(\alpha) + \frac{q_2 \times (L/3)^2}{10} \times \cos(\alpha) \right]$$

$$\Gamma f = \frac{4}{\pi \times r^3} \times \frac{(L/3)^2}{10} [q_1 \times \sin(\alpha) + q_2 \times \cos(\alpha)]$$

$$\Gamma f = \frac{4 \times L^2}{90 \times \pi \times r^3} \times [q_1 \times \sin(\alpha) + q_2 \times \cos(\alpha)]$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{4 \times L^2}{90 \times \pi \times \Gamma f} \times [q_1 \times \sin(\alpha) + q_2 \times \cos(\alpha)]}$$

Fórmula 4.3-20. Resolución tensional del dimensionamiento 3.

Los resultados de este dimensionamiento ya sí que cumplen los criterios de diseño planteados, así como que soportan las cargas que se ejercen sobre la estructura permitiendo abarcar los 25,6 m de ancho del río.

Es por ello, por lo que se concluye con este dimensionamiento y con un radio de 4 cm de manera que se consiga minorar la carga tensional limitante.

En la “Figura 4.3-17” se muestra el dimensionamiento y diseño en 3D de la compuerta con las longitudes de tramo y apoyos calculados en este apartado.

DIMENSIONAMIENTO DEL EJE TRANSVERSAL RADIO

1. CÁLCULO MÁS DESFAVORABLE A FLEXIÓN (h=0.5m & M_r=0)

DATOS REFERENCIA			
POLIETILENO	970	kg/m ³	
ACERO INOX304	7930	kg/m ³	234700 kN/m ²
GRAVEDAD	9.8	m/s ²	-

PERFIL (m)	
ESPESOR -e-	0.1
ALA HORIZONTAL -a-	0.3236
ALTURA -h-	0.5

CRITERIOS DEL EJE (m)		
RADIO	MÁX (80%)	0.04
	MÍN (20%)	0.01

ANÁLISIS DE CARGAS PARA R MÁX

EJE "Z"			UNIDADES
FUERZAS SOBRE EL EJE			
F _z	1585.7913		N/m
F _{pp} PH	-212.5835	-640.1012	
F _{pp} PV	-427.517632		
F _{pp} EJE	-390.6331704		
CARGA DISTRIBUIDA 1	555.0570		

EJE "Y"			UNIDADES
FUERZAS SOBRE EL EJE			
F _y	1225.0000		N/m
CARGA DISTRIBUIDA 2	1225.0000		N/m

ANCHURA DEL RÍO Y DE LA COMPUERTA 25.6000

DIMENSIONAMIENTO 3

RADIO	POSICION (GRADOS)	0.0000	24.3756	90.0000	114.3756	180.0000	204.3756	270.0000	294.3756	360.0000	
	RADIO	0.03644099	0.03759295	0.02798921	1.3095E-07	0.03644099	0.03759295	0.02798921	1.6499E-07	0.03644099	
	TENSION R _{MIN}	T1	0.0000	39977.7700	96864.7645	88230.1565	0.0000	-39977.7700	-96864.7645	-88230.1565	0.0000
		T2	213778.6411	194722.2300	0.0000	-88230.1565	#####	#####	0.0000	88230.1565	213778.6411
TOTAL	213778.6411	234700.0000	96864.7645	0.0000	#####	#####	#####	-96864.7645	0.0000	213778.6411	
RADIO NECESARIO	0.0376		RADIO VÁLIDO								

LONGITUD MÁXIMA	LONGITUD ADMISIBLE	29.4405	28.0977	43.7365	#####	29.4405	28.0977	43.7365	#####	29.4405
		NÚMERO DE APOYOS VÁLIDO								

DIAGRAMA DE MOMENTOS EJE "Z"											
T1	POSICION "z"	0	1.04065441	2.08130882	3.12196324	4.16261765	5.20327206	6.24392647	7.28458089	8.3252353	9.36588971
	M(z)	0	1863.42689	3125.74833	3786.96432	3847.07486	3306.07996	2163.97961	420.773813	-1923.53743	-4868.95412
T2	POSICION "z"	9.36588971	10.4065441	11.4471985	12.4878529	13.5285074	14.5691618	15.6098162	16.6504706	17.691125	18.7317794
	M(z)	-4868.95412	-2464.53233	-661.215992	540.994903	1142.10035	1142.10035	540.994903	-661.215992	-2464.53233	-4868.95412
T3	POSICION "z"	18.7317794	19.7724338	20.8130882	21.8537427	22.8943971	23.9350515	24.9757059	26.0163603	27.0570147	28.0976691
	M(z)	-4868.95412	-1923.53743	420.773813	2163.97961	3306.07996	3847.07486	3786.96432	3125.74833	1863.42689	0

DIAGRAMA DE MOMENTOS EJE "Y"											
T1	POSICION "z"	0	1.04065441	2.08130882	3.12196324	4.16261765	5.20327206	6.24392647	7.28458089	8.3252353	9.36588971
	M(z)	0	4112.5467	6898.46543	8357.75619	8490.41899	7296.45382	4775.86068	928.639577	-4245.20949	-10745.6865
T2	POSICION "z"	9.36588971	10.4065441	11.4471985	12.4878529	13.5285074	14.5691618	15.6098162	16.6504706	17.691125	18.7317794
	M(z)	-10745.6865	-5439.17467	-1459.29076	1193.96517	2520.59314	2520.59314	1193.96517	-1459.29076	-5439.17467	-10745.6865
T3	POSICION "z"	18.7317794	19.7724338	20.8130882	21.8537427	22.8943971	23.9350515	24.9757059	26.0163603	27.0570147	28.0976691
	M(z)	-10745.6865	-4245.20949	928.639577	4775.86068	7296.45382	8490.41899	8357.75619	6898.46543	4112.5467	0

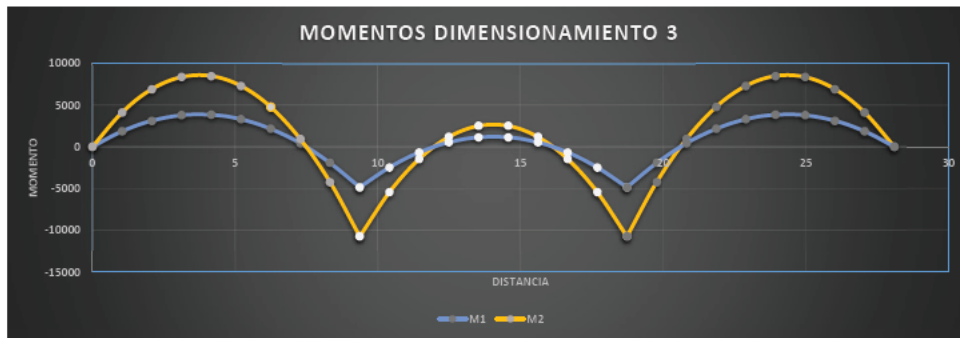


Figura 4.3-16. Resolución del dimensionamiento 3.

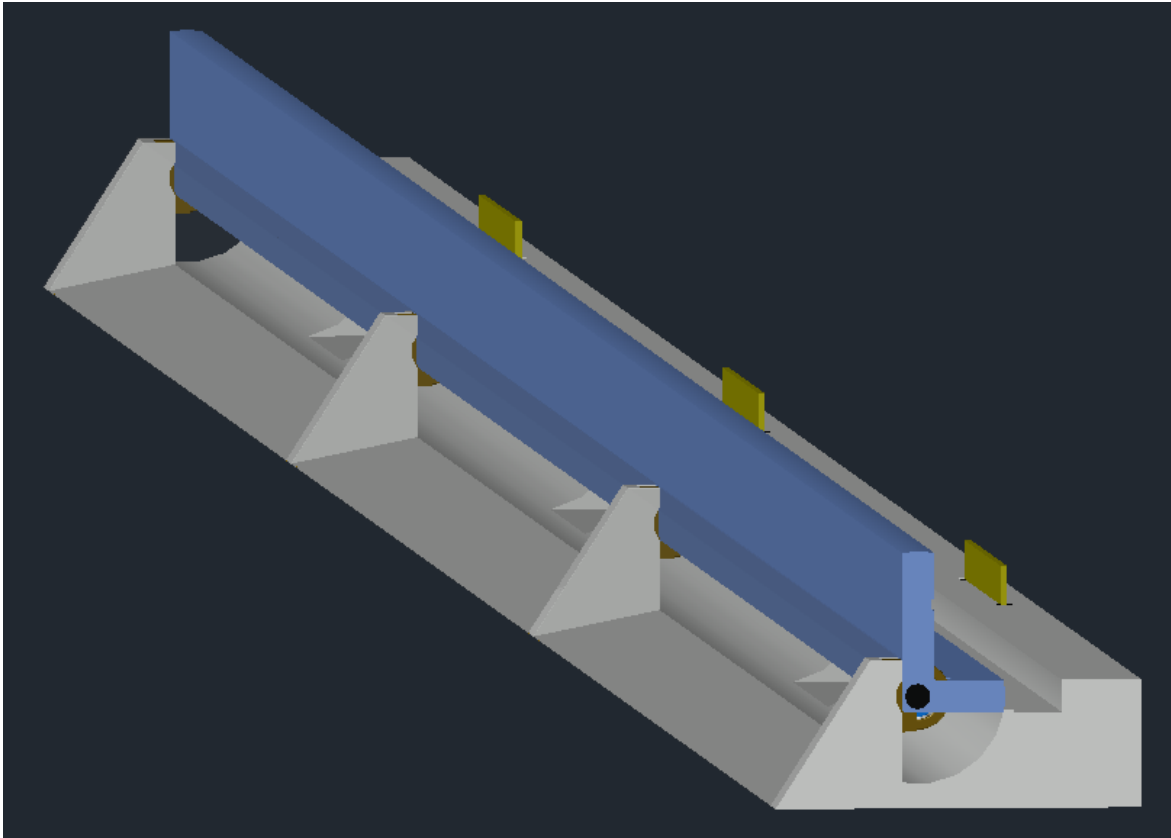


Figura 4.3-17. Eje con cuatro apoyos y tres tramos.

4.4. DIMENSIONAMIENTO DE LA TRAMPILLA DE CAUDAL ECOLÓGICO.

El problema de este apartado reside en que para aplicar los planteamientos del apartado 3. *Análisis del caudal*, para calcular la superficie de paso necesaria para respetar el caudal ecológico, se debe conocer la velocidad del fluido y al no estar construida aún la compuerta, esto resulta imposible y muy costoso. Es por ello por lo que se opta por el siguiente razonamiento.

Tal y como se remarca en el punto 3.5.1. *Estudio hidrológico II*, el caudal mínimo que se debe asegurar por el ramal izquierdo es de 1,62 m³/s. La velocidad del agua que circula por cada orificio de cada tramo es muy elevada en comparación a la obtenida en el apartado 3.3. *Medición de campo* debido a la alta presión del líquido superior, así como la reducida sección de paso.

Para realizar la estimación de las dimensiones de los orificios, se aplica la *Fórmula 1* tomando la velocidad oficiosa del agua de 2.25m/s y respetando el caudal mínimo.

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = S[m^2] \times v \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$1,62 \frac{m^3}{s} = S[m^2] \times 2,25 \left[\frac{m}{s} \right] \quad ; \quad S = 0,72m^2$$

Fórmula 4.4-1. Predimensionamiento de las trampillas.

Una vez obtenida la superficie total de paso, se divide entre tres y se dimensiona cada trampilla con unas medidas de 120x20 cm (2400 cm²).

Además, se sitúan dos carriles de acero verticalmente en los laterales de cada orificio que permiten instalar unas placas para regular el caudal deseado una vez hormigonados los cimientos; bien sea para ajustar el caudal ecológico o para casos de avería o de necesidad de retención de agua por causas mayores.

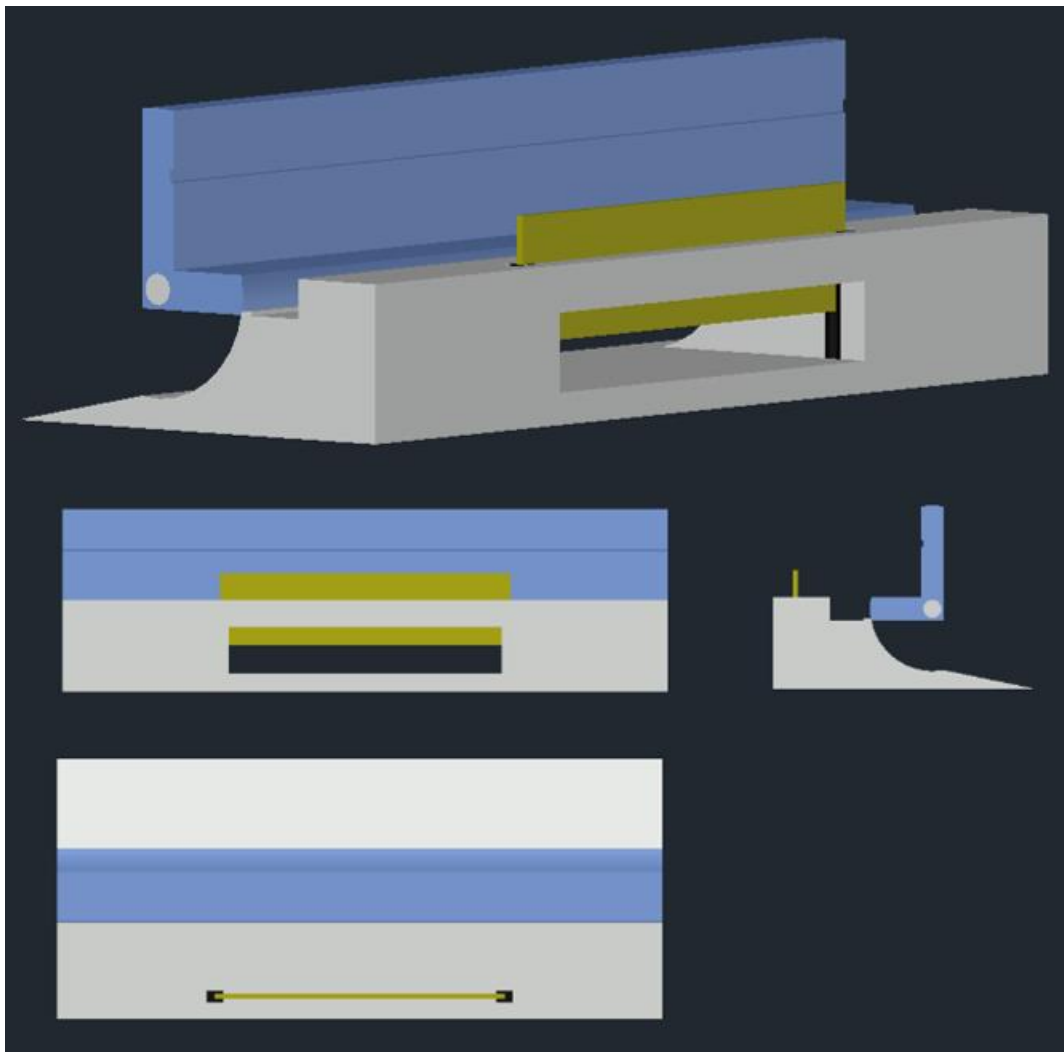


Figura 4.4-1. Trampilla para el caudal ecológico.

5. Distribución de la pendiente.

Otro de los aspectos primordiales y más importantes de este proyecto es conseguir una mejor distribución de la pendiente del canal. Para ello, y al igual que en apartado 3. *Análisis del caudal*, resulta fundamental establecer un método de medición válido, así como una correcta selección y análisis de los datos obtenidos. Ello conlleva a hablar acerca del siguiente punto de desarrollo.

5.1. CRITERIO DE SELECCIÓN DE DATOS.

Como se señalaba anteriormente, la correcta captación, estudio y selección de datos resulta un aspecto fundamental para el desarrollo de este punto, ya que la fiabilidad de los mismos va a condicionar la totalidad de los resultados. Es por ello, por lo que se ha dedicado especial atención a los aspectos mencionados. Cabe destacar y agradecer la colaboración del profesor Don Juan Antonio Cuesta Albertos del Departamento de Matemáticas, Estadística y Computación de la Universidad de Cantabria, quien como referente profesional en la materia ha guiado e instruido en la resolución del problema.

Como se ha indicado, resulta fundamental para el proyecto la elección de un método fiable que permita obtener las mediciones adecuadas del canal en cuanto a cotas de nivel, distancias entre tramos o relaciones entre ellas. De esta manera, se van a poder evaluar condiciones fundamentales como la evolución de la pendiente a lo largo del recorrido navegable, la anchura y la altura del tramo, la superficie de paso y el caudal o, en definitiva, cualquier variable considerada de interés en el futuro.

5.1.1. PLANTEAMIENTO Y MEDICIONES.

Se ha utilizado Google Earth como extractor de coordenadas satelitales para la creación de varias rutas, entendiendo por ruta una agrupación de entre 50 y 500 puntos próximos entre sí, en los lugares de mayor interés del canal. La primera zona de estudio considerada, ha sido la balsa inicial de agua tranquila que establece la cota superior del tramo navegable. Posteriormente se han analizado

once sectores del tramo de aguas bravas y tomado como última referencia la balsa final, lo que ha permitido definir la cota inferior. Posteriormente a través del programa TCX Converter se ha conseguido encontrar la altitud de cada uno de todos los puntos que conforman las trece rutas.

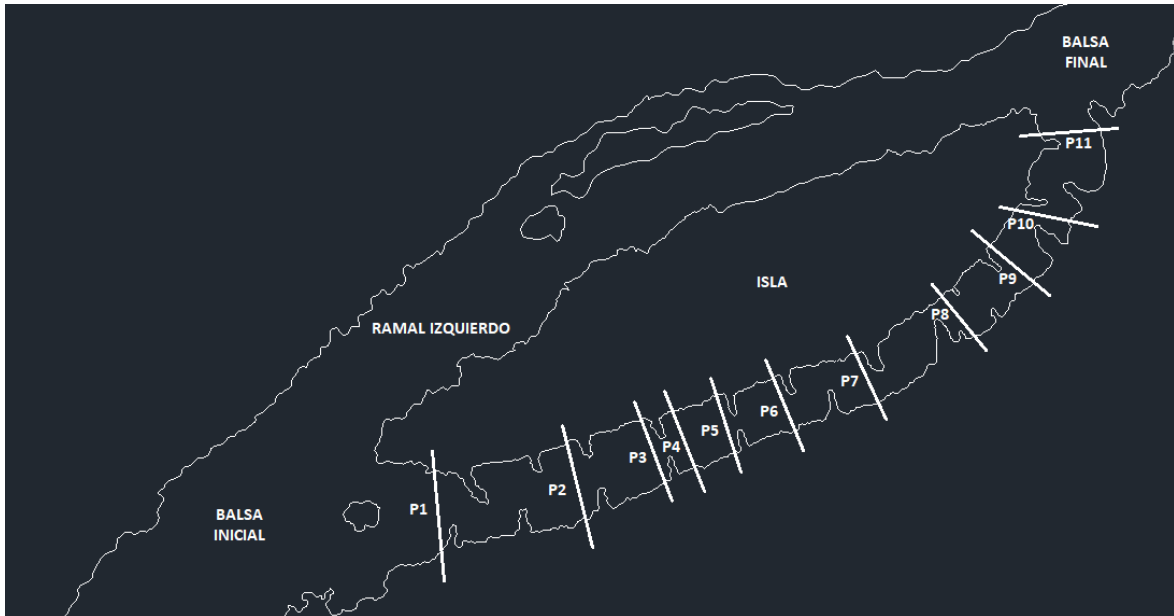


Figura 5.1-1. Localización de las rutas creadas para el estudio de los sectores.

El criterio seguido para la creación de estas rutas se basa en el nivelado hidrostático, procedimiento bien conocido desde la antigüedad romana, y basado en que al tratarse de un mismo líquido, todos los puntos de su superficie tienden a nivelarse y situarse a la misma altura. Es por este hecho, por el que se ha decidido estudiar primeramente los numerosos puntos obtenidos de la ruta planteada en la balsa inicial de 500 puntos, pues al tratarse de agua estancada, la superficie posible donde trazar una ruta es mucho mayor que dentro del propio canal. Los puntos de cada una de las once rutas planteadas a lo largo del canal se han elegido en una recta perpendicular a la corriente para tratar de garantizar, pese a las irregularidades del terreno, que el nivel del agua se encuentre a la misma altura.

Como se deduce del diseño empleado, todos los puntos de una misma ruta se encuentran al mismo nivel. El paso siguiente es estimar esa altitud a partir de las medidas obtenidas. Este proceso requiere realizar una depuración estricta de los datos.

5.1.2. ANÁLISIS MATEMÁTICO.

Cabe la posibilidad de que el sistema de medida introduzca algún tipo de sesgo en las mediciones, si bien este problema no es relevante en el caso de estudio. En primer lugar puesto que es razonable pensar que esta desviación sería la misma en todas las medidas realizadas, (o al menos tan parecida que fuera despreciable). Y en segundo lugar ya que el foco de estudio reside en las diferencias de altitud (y no en las altitudes mismas) entre las diferentes rutas.

Como se explicaba anteriormente, dada la posibilidad de poder manejar un mayor rango de muestreo, el tramo que se ha decidido estudiar para establecer el criterio de análisis ha sido la balsa inicial. De esta forma, a partir del estudio de estos datos se elaborará un mismo sistema de cribado aplicable en los siguientes sectores.

Inicialmente, se representan las altitudes obteniendo una gráfica en la que se repiten numerosas veces las cotas inferiores, pero también hay picos máximos claramente señalados que desvían notoriamente la media de los datos hacia arriba conocidos como outliers. Es entonces, cuando se plantea establecer un criterio que permita eliminar estos picos. También, se puede ver en esta misma gráfica como la distribución de puntos no es normal y por tanto, se descartan datos del estudio mediante una campana de Gauss. Durante los próximos párrafos, se opta por la representación mediante histogramas o gráficos de dispersión de puntos permitiendo, por un lado obtener las gráficas que relacionan la cantidad de puntos en cierto intervalo de alturas y, por otro lado, la altura de los 526 datos de estudio respectivamente.

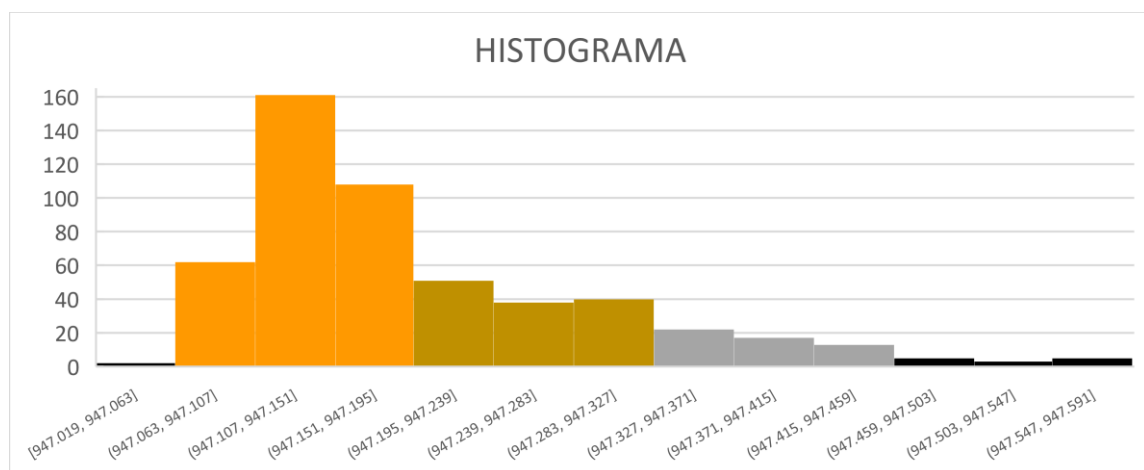


Figura 5.1-2. Histograma de las altitudes recopiladas en la balsa inicial.

Profundizando más en el análisis de la gráfica y de los puntos, se observa que los datos no son completamente independientes, si no que tienden a tener una desviación positiva (de cotas más altas y notoriamente alejadas de la media) los cuales tienen características dependientes, es decir, siguen cierto orden en la dispersión. Por ello, se plantea como primera conclusión que ambos programas utilizados captan datos distintos del nivel del agua durante cada recorrido; bien podría deberse a la detección de una isla o roca en medio de la

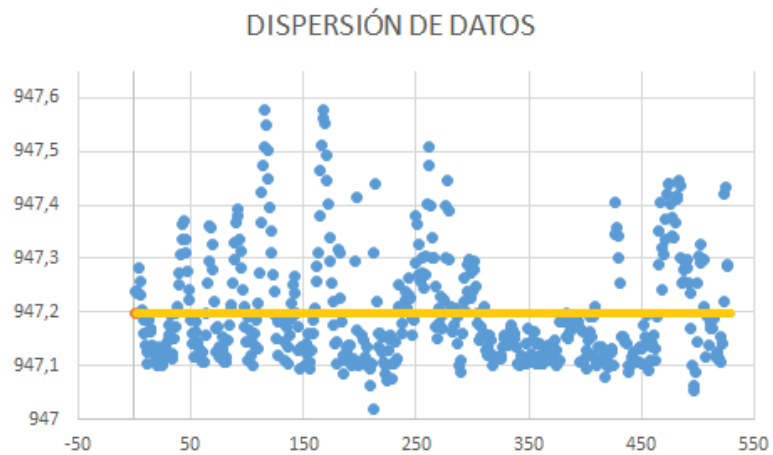


Figura 5.1-3. Representación de puntos y planteamiento inicial

balsa, a un tronco u objeto flotante o a la copa de algún árbol o arbusto situado sobre el curso del río. De estos errores, se concluye que para una correcta evaluación vamos a tener que aplicar un método en el que se consideren medias recortadas imparciales, es decir, hay que establecer un criterio que permita eliminar los puntos más alejados de manera que, al tener que eliminar más puntos superiores que inferiores, se pueda establecer el intervalo con el que se considerarían erróneos los datos de manera arbitraria.

Como todo criterio matemático o científico, el método que se plantea durante los siguientes párrafos resultaría ser simplemente un razonamiento heurístico, a no ser, que se den razones que lo verifiquen. "In God we trust. All others must bring data" W. Edwards Deming.

Para comprobar la veracidad del método sobre una ruta trazada en un punto concreto del que conocemos a la perfección su altitud como es el Ayuntamiento de Segovia. No obstante, para simular tal ruta a las estudiadas en el canal de Sabero, se han modificado y falseado ciertas cotas de Segovia para simular las características a las rutas planteadas anteriormente en el canal. De esta manera, en caso de ser correcto el algoritmo planteado, la modificación de alturas debería ser anulada permitiendo que se obtenga una altitud media final correcta y similar al dato real y contrastado.

Efectivamente, el método matemático ha sido probado y verificado comprobando que pese al fallo de medición introducido, es capaz de descartarlo dando una medición final válida. No obstante, la explicación del criterio de selección de datos, se explica sobre las altitudes del canal, dado que es el estudio de este proyecto.

Tratando de evaluar los puntos que debían descartarse, inicialmente se planteó un método notoriamente erróneo que consistía en la consideración del intervalo válido como la media más menos una constante. Este factor, podría ser acertado. Pues bien,

si el margen permitido es de $\pm 0,1$ sobre la media (representado con líneas rojas en la gráfica) se consiguen descartar los 86 puntos superiores más alejados y los 18

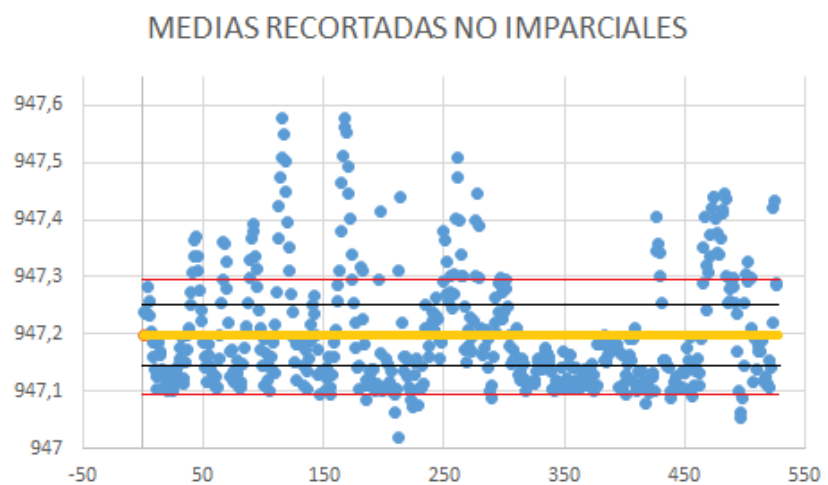


Figura 5.1-4. Imparcialidad del criterio establecido.

inferiores. Bastaría con recalcular la media y volver a iterar el procedimiento y la conclusión podría ser válida.

Por otra parte, si se considera un margen permitido de $\pm 0,05$ sobre la media, representado en líneas negras en la gráfica, se descartarían 219 puntos inferiores y 135 puntos superiores lo que supondría que, al establecer una media inicial, se descartarían numerosos puntos bastante representativos.

Como solución a este problema, lo que se plantea es establecer como en el procedimiento anterior un valor inicial medio. A continuación, se evalúa la fracción representativa del total de puntos situados por encima y por debajo de la media, así como la distancia desde la media a los puntos más alejados superior e inferiormente. Y si la mayor densidad de puntos se encuentra por debajo de la media, el rango de corte, se sitúa como la distancia desde la media al punto inferior más alejado. Si esta condición no se cumple, se considera el rango hasta el punto superior más alejado. De esta forma, se consigue valorar intervalos dependientes de los propios datos, comprobando rápidamente la estabilidad del algoritmo, ya que

con tan sólo una iteración, se consigue establecer que la cantidad de puntos considerados por encima y por debajo de la media sea prácticamente igual además de tener el mismo rango de error. Con ello se asegura la idoneidad de la media final.

En los siguientes gráficos, se aprecia como la media inicial se va viendo modificada a medida que se va iterando el algoritmo de descarte de puntos planteado.

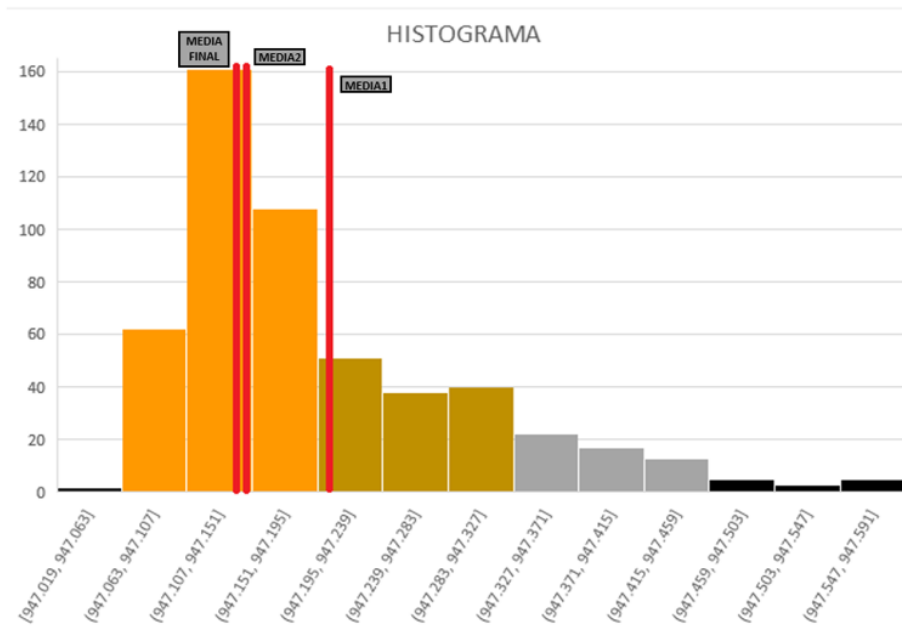


Figura 5.1-5. Histograma. Evolución de la media en cada iteración.

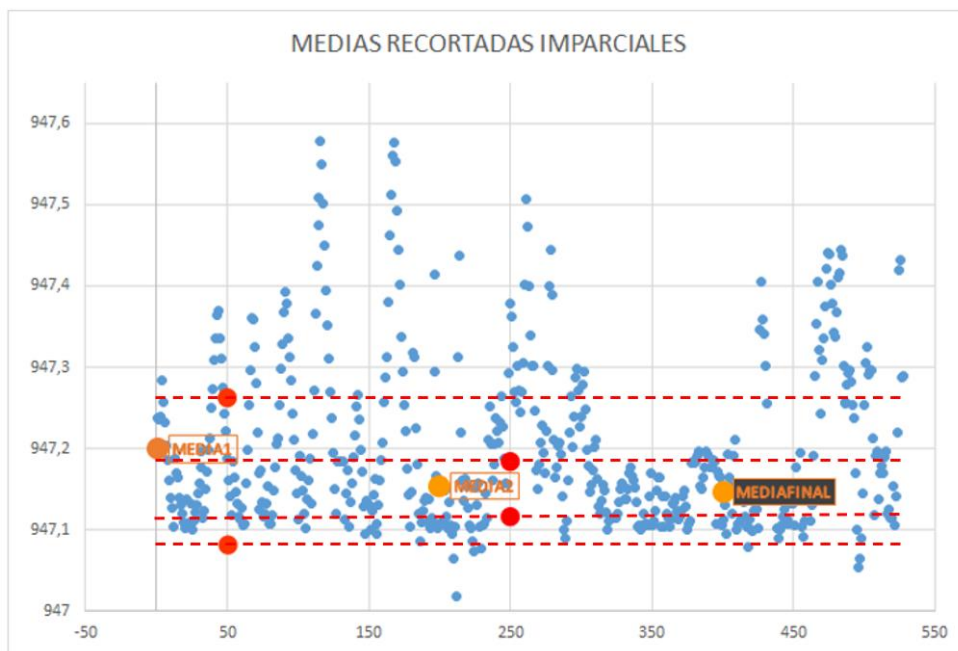


Figura 5.1-6. Diagrama de puntos. Evolución de la media en cada iteración.

Se explican las iteraciones a partir de la “Figura 5.1-6”. Inicialmente se calcula la “media1”, se estudian los puntos y sus características permitiendo establecer un intervalo de puntos adecuado (comprendido entre los dos puntos rojos) descartándose el resto. Posteriormente, se recalcula la llamada “media2” a partir de los puntos supervivientes y se vuelve a recalcular el intervalo de confianza adecuado volviendo a iterar de la misma manera hasta la obtención de la “media final”.

En la tabla siguiente, se muestran 5 de las 526 filas recopiladas en las que se programa el algoritmo anterior consistiendo en puntos cuyas cotas superan el criterio de la primera iteración, pero algunos no consiguen pasar tras la segunda. Una vez descartados, se introducen las condiciones de que esa altitud no se tendrá en cuenta, así como las latitudes y longitudes del punto. Debajo de la tabla se reflejan los valores recopilados para establecer el valor del error, así como la mediana de todas las medidas. Finalmente, como todo criterio matemático, se verifica que la desviación entre ambas conclusiones no es excesiva.

UNIX TIME	TIME	LAT	LONG	ALT	DIST	DIST-TOMA	ERROR1	SUPERIOR	INFERIOR		ERROR2	SUPERIOR	INFERIOR		LAT	LONG				
1179727202	F-05-21T06:00	42.847948	-5.128479	947.203	0.0063778	0.0012538		947.203	947.203	947.203		FALSO	947.203	FALSO						
1179727203	F-05-21T06:00	42.847953	-5.128472	947.185	0.0071382	0.0007604		947.185	947.185	947.185		FALSO	947.185	FALSO						
1179727203	F-05-21T06:00	42.847957	-5.12846	947.161	0.0082094	0.0010712	0.18016319	947.161	947.161	947.161	0.06755138	947.161	947.161	947.161	42.847957	-5.12846				
1179727203	F-05-21T06:00	42.847964	-5.128451	947.139	0.0093138	0.0011044		947.139	947.139	947.139		947.139	947.139	947.139	42.847964	-5.128451				
1179727203	F-05-21T06:00	42.847969	-5.128446	947.127	0.0099723	0.0006585		947.127	947.127	947.127		947.127	947.127	947.127	42.847969	-5.128446				
				947.199163		0.00099425		947.15197	947.201012	947.153551		947.132105	947.170196	947.14626	42.8477663	-5.12817867				
				MEDIANA	947.164															
				ENCIMA	0.34914611		ENCIMA				0.44110276		ENCIMA				0.47150259			
				DEBAJO	0.64895636		DEBAJO				0.55639098		DEBAJO				0.52604167			
				MAX	947.578		0.37883681		MAX		947.258		0.10444862		MAX		947.183		0.03673958	
				MIN	947.019		0.18016319		MIN		947.086		0.06755138		MIN		947.116		0.03026042	

Figura 5.1-7. Programación del algoritmo.

Posteriormente, tras considerar adecuado este proceso de selección, se aplica en todos los datos de las otras 12 rutas, de manera que se obtiene un cribado adecuado de los datos obtenidos. A continuación, se recapitulan todos los puntos de estudio válidos y se establecen las altitudes, latitudes y longitudes globales que posteriormente serán utilizadas para la representación de las características del canal. La conversión de latitudes y longitudes se realiza mediante macros. La obtención de las tres coordenadas, resulta fundamental para poder estudiar la pendiente del canal, pues bien, a través de la longitud y la latitud se encuentra la distancia entre dos puntos, y mediante la diferencia de altitudes, se consigue encontrar el desnivel. Finalmente, se establece alguna columna con criterios de

verificación de los procesos realizados y se incluye el desnivel acumulado y la pendiente entre tramos.

	ALTITUD		COMPROBACIÓN		DESDE	HASTA	DISTANCIA	ACUMULADO	DIF	ACUMULADO	PENDIENTE
	BALSA	P1	P2	P3	ORIGEN		0	0	0	0	#DIV/0!
BALSA	947,1462604	947,1463	BIEN		BALSA	P1	55,85104852	55,85104852	0,021132	-0,021132212	0,037837%
P1	947,1251282	947,1251	BIEN		P1	P2	41,19967525	97,05072377	0,34466	-0,365792332	0,836560%
P2	946,7804681	946,7805	BIEN		P2	P3	22,04910168	119,0998255	0,21314	-0,57893283	0,966663%
P3	946,5673276	946,5673	BIEN		P3	P4	9,031757719	128,1315832	0,153203	-0,732135417	1,696265%
P4	946,414125	946,4141	BIEN		P4	P5	11,07541303	139,2069962	0,116542	-0,848677083	1,052256%
P5	946,2975833	946,2976	BIEN		P5	P6	11,62078353	150,8277797	0,006517	-0,85519375	0,056078%
P6	946,2910667	946,2911	BIEN		P6	P7	29,08310461	179,9108843	-0,01154	-0,843653274	-0,039681%
P7	946,3026071	946,3026	BIEN		P7	P8	33,62533339	213,5362177	0,021166	-0,864819739	0,062948%
P8	946,2814407	946,2814	BIEN		P8	P9	20,88578351	234,4220012	0,59386	-1,458679772	2,843370%
P9	945,6875806	945,6876	BIEN		P9	P10	29,74508479	264,167086	0,43171	-1,890389449	1,451365%
P10	945,255871	945,2559	BIEN		P10	P11	19,07942811	283,2465141	0,64233	-2,532719876	3,366613%
P11	944,6135405	944,6135	BIEN		P11	FINAL	39,15128089	322,397795	0,240711	-2,773431357	0,614824%
FINAL	944,3728291	944,3728	BIEN								

Figura 5.1-8. Características obtenidas de cada tramo.

Como resultado final se representa gráficamente el perfil del canal, el cual se deduce de los cálculos efectuados. Para ello, como se dispone de las tres coordenadas que definen 13 puntos clave del canal, se va a aplicar un método matemático en el que se establecen polinomios de “x” grado y se hacen coincidir las derivadas en el punto conocido. De esta forma, se consigue igualar las pendientes de los polinomios en ese punto por lo que la curva solución resulta ser continua y derivable.

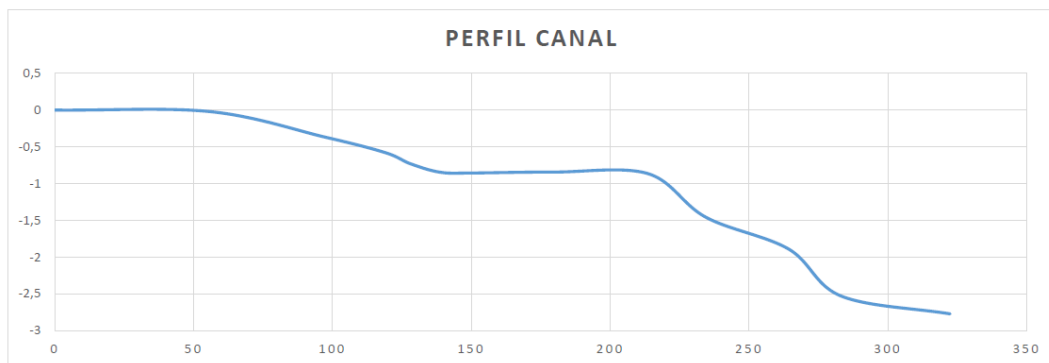


Figura 5.1-9. Perfil del canal.

5.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Tras examinar los datos obtenidos, se deduce que la pendiente del tramo de estudio se distribuye de forma muy desigual; muy pronunciada en la parte inicial y final mientras que es casi plana en la parte media. También se debe resaltar el P7 de estudio ya que estaría situado a mayor altura que los puntos anteriores lo cual, a priori debería ser imposible, salvo que sea el resultado de la colisión del agua contra alguna roca u obstáculo emergente.

A continuación, se muestran imágenes tomadas con un caudal de $8,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en las que se pueden verificar las conclusiones anteriormente mencionadas. El análisis se hace dividiendo el canal en tres tramos de similar pendiente, respetando el tramo inicial tan característico de este canal. El primer tramo es considerado desde el P1 hasta el P6, el tramo medio desde el P6 al P8 y, el tramo final desde el P8 al P11.



Figura 5.2-1. Tramo inicial del circuito.

El tramo inicial consta de tres saltos de agua, dos de ellos forman un rulo y el tercero da como resultado una ola transversal de orilla a orilla. Todos los saltos de agua cuentan con diques paralelos que forman contracorrientes a ambos lados de la vena principal del río. Además, este tramo es el más representativo y característico del canal.

El desnivel acumulado de este tramo, según las mediciones tomadas, es de 0,834m, con una pendiente media de 0,77%.



Figura 5.2-2. Tramo medio del circuito.

El tramo medio del canal tiene un ramal central de corriente muy marcado pero debido a la notoria profundidad y el poco desnivel del tramo, apenas presenta movimientos de agua interesantes para la instalación.

Según los datos tomados el desnivel de este tramo es de 0,16m con una pendiente media del 0,046%.



Figura 5.2-3. Tramo final del circuito.

El tramo final del río tiene el desnivel adecuado para generar movimientos de agua muy interesantes con contracorrientes muy marcadas y un tren de olas de gran interés siendo otra de las partes fundamentales del canal.

Según los datos tomados, presenta un desnivel de 1,908m con una pendiente media de 2,069%.

5.3. PROPUESTA DE MEJORA.

5.3.1. ANÁLISIS DE SITUACIÓN.

El canal de Sabero se pretende establecer como uno de los canales referentes de la ICF, acogiendo competiciones del más alto nivel a nivel internacional por lo que debe cumplir la normativa establecida por la misma.

Tras una consulta detallada de la normativa “rules_canoe_slalom_2022”[11] se encuentran los puntos “8.2-Competition course” y “9.4-Course design requirements” como apartados limitantes respecto a los factores a mejorar.

En el punto 8.2.2. se establece la longitud del circuito adecuada, debiendo estar entre 150 y 400 metros lo cual sí que se cumple en la instalación pero que será tenido en cuenta en esta propuesta de mejora.

8.2.2 - The minimum length for a course is 150 m, the maximum length is 400 m measured from the start line to the finish line down the centre line of the course.

Figura 5.3-1. Reglamento ICF 8.2. Competition course

Por otra parte, en el punto 9.4.5. se establece que la distancia desde la última puerta (el elemento colgante de los cables ya instalados que el palista debe sortear) hasta la línea de meta debe ser como mínimo de 15 metros sin llegar a superar los 25.

9.4.5 - The distance between the last gate and the finish line must be no less than 15 meters and must be no more than 25 meters.

Figura 5.3-2. Reglamento ICF 9.4. Course Design Requirements

Este aspecto, sí que resulta relevante en la disposición actual del canal ya que al estar limitada la longitud del canal por la confluencia de aguas entre los dos ramales del río, se imposibilita la colocación de cualquier puerta en una parte de pendiente significativa, con movimientos de agua muy interesantes. Este hecho supone un desaprovechamiento e inutilidad de un desnivel de en torno a los 70 centímetros, una cifra muy significativa respecto al desnivel total del tramo.

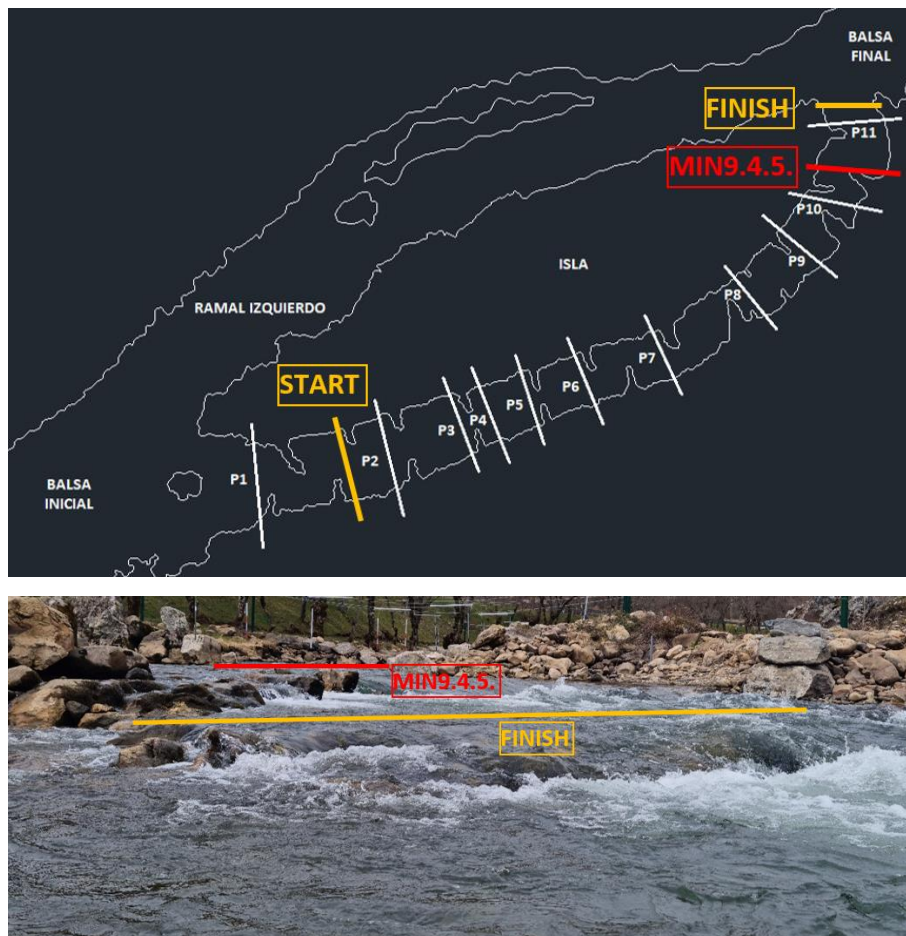


Figura 5.3-3. Limitaciones del artículo 9.4.5 de la normativa ICF.

Como se puede apreciar en la “Figura 5.3-3” no solamente se desaprovecha un desnivel significativo tras respetar la normativa si no que el canal acaba antes de llegar a la balsa final por lo que se desperdicia, a mayores, más desnivel.

5.3.2. REDISTRIBUCIÓN.

Se propone una redistribución de la pendiente de manera que se consiga un mayor desnivel en el tramo medio del recorrido, aprovechando en su totalidad la pendiente del canal. Para ello se plantea alcanzar prácticamente la cota de la balsa final 15 metros antes de la línea de llegada desplazando todo el desnivel ganado al tramo medio. Posteriormente se detalla la redistribución y para ello se divide el perfil modificado en el tramo medio (1) desde el P6 al P8 y el tramo final (2) desde el P8 a la balsa final. Véase la “Figura 5.3-4”. En la que aparecen representados estos aspectos.

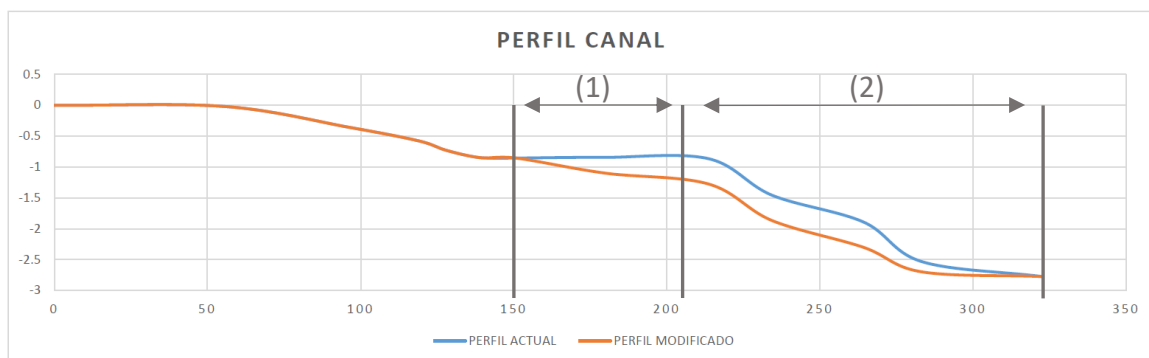


Figura 5.3-4. Comparativa perfil actual y perfil modificado.

5.3.2.1. REDISTRIBUCIÓN TRAMO 1.

Actualmente la zona media del canal tiene una profundidad de entorno a los 2 metros (excesiva para la práctica deportiva) ya que según la “Fórmula 3.1-1” al haber un exceso de superficie de paso, la velocidad del agua se ve frenada. Por ello, otro de los puntos positivos de la redistribución planteada es que de esta manera, se consigue acelerar la velocidad del agua y por lo tanto, la superficie de paso se reduce liberando los diques prácticamente cubiertos con el caudal de verano.

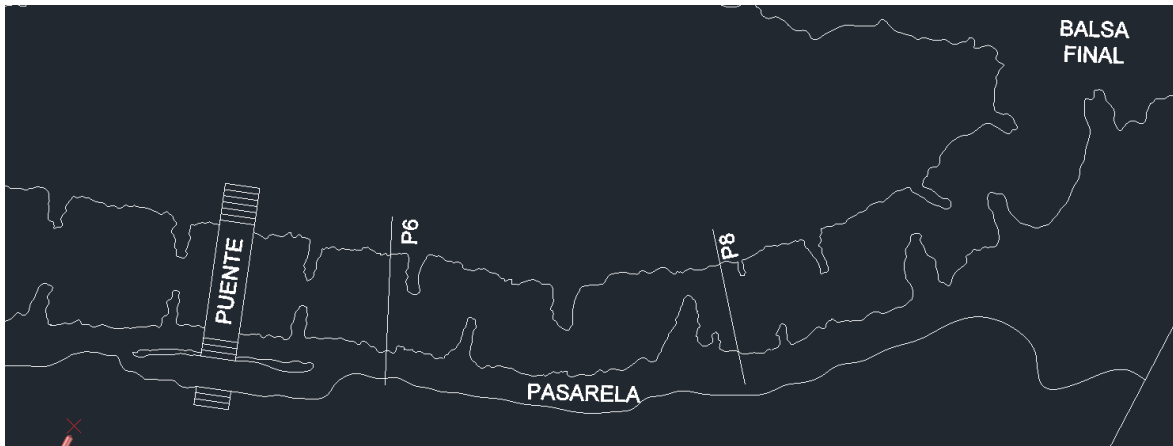


Figura 5.3-5. Localización del tramo (1).

En este tramo se plantea una redistribución de los diques para conseguir crear algún movimiento de agua nuevo a través del desnivel ganado. Analizando la disposición de los espigones, se puede ver cómo a partir del puente estos están alternados por lo que hacen que el agua se mueva serpenteando de una horilla a otra y perdiendo gradualmente altura.

La modificación que se plantea es colocar dos espigones a la par en el P8 de manera que generen un salto de agua puntual con su consiguiente rebufo aportando un punto técnico a la parte media baja del canal.



Figura 5.3-6. Localización de la modificación del tramo (1).

Un rebufo o rulo es un movimiento de agua generado por una caída puntual en la que el agua retorna hacia la zona del desnivel describiendo un movimiento circular y vertical que hace posible que el palista se mantenga en medio de la

corriente. Para generar este movimiento de agua se necesita colocar dos espigones a la par que generen dicho desnivel puntual tal y como ya ocurre en el primer tramo del canal “Figura5.3-7.” Siendo este el motivo de la distribución planteada en la Figura 64. Localización de la modificación del tramo 1.



Figura 5.3-7. Colocación de los espigones para la generación de un rulo.

Uno de los puntos claves de este documento ha sido el número de días útiles de la instalación para lo cual se planteaba la construcción de la compuerta y, por lo tanto, se considera fundamental que la nueva adecuación del río no suponga en ningún momento un factor limitante del caudal si no que se siga pudiendo navegar con los ya ganados $7,84 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para ello, se plantea la construcción de espigones en “V” de manera que con regímenes de caudal escasos, la navegación no se vea limitada ya que todo agua pasará por el punto central más bajo y se mantendrán las contra-corrientes generadas a los laterales mientras que con regímenes de caudal abundantes, el nivel de agua es mayor y se adecúa al paso habilitado.

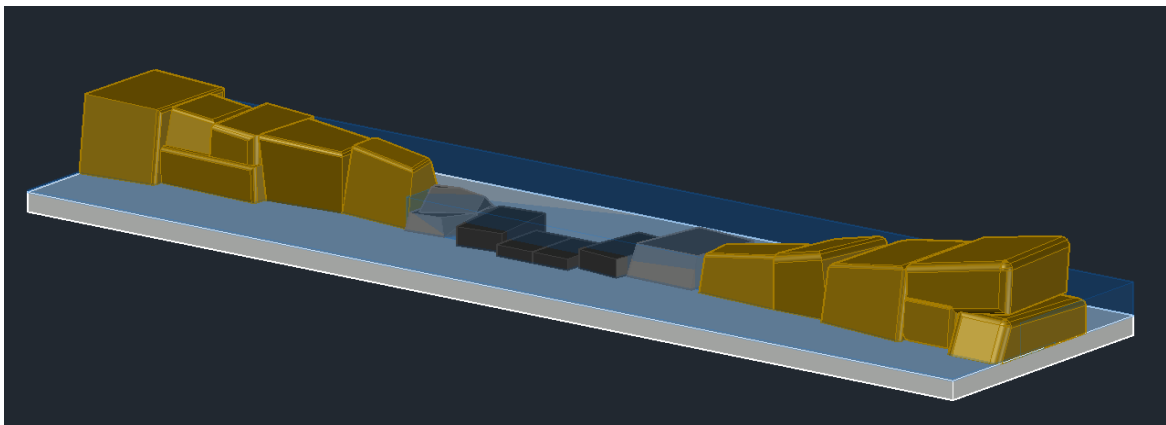


Figura 5.3-8. Representación 3D de los diques de nueva implantación.

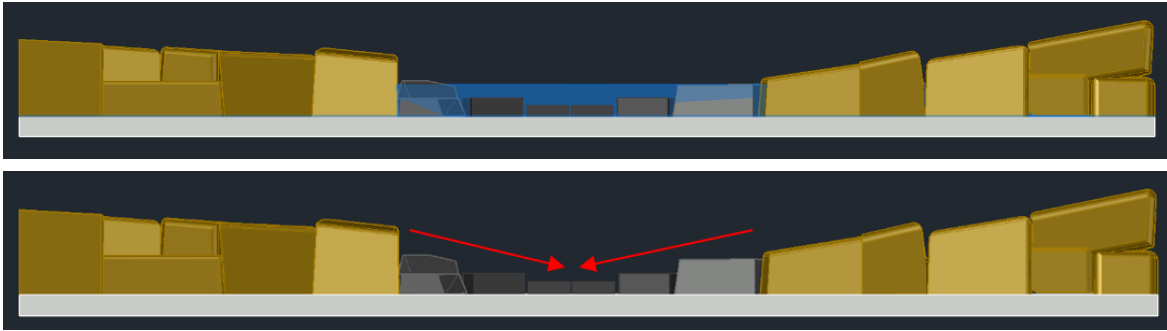


Figura 5.3-9. Vista frontal de los diques de nueva implantación.

Por otra parte, en cuanto a la colocación superior de las piedras causantes del movimiento se propone una disposición no lineal que evite la caída completamente vertical ya que de producirse esta, resultaría un movimiento de agua efecto presa peligroso con retorno muy fuerte. Además, la colocación inclinada de las piedras hacia las orillas permite que estas queden encajadas distribuyendo la tensión del agua hacia las escolleras y asegurando que no se moverán pese a las fuertes corrientes.

Además, la disposición adelantada de las piedras centrales respecto a los diques genera deflectores laterales que dan un amplio abanico de movimientos técnicos para los palistas.

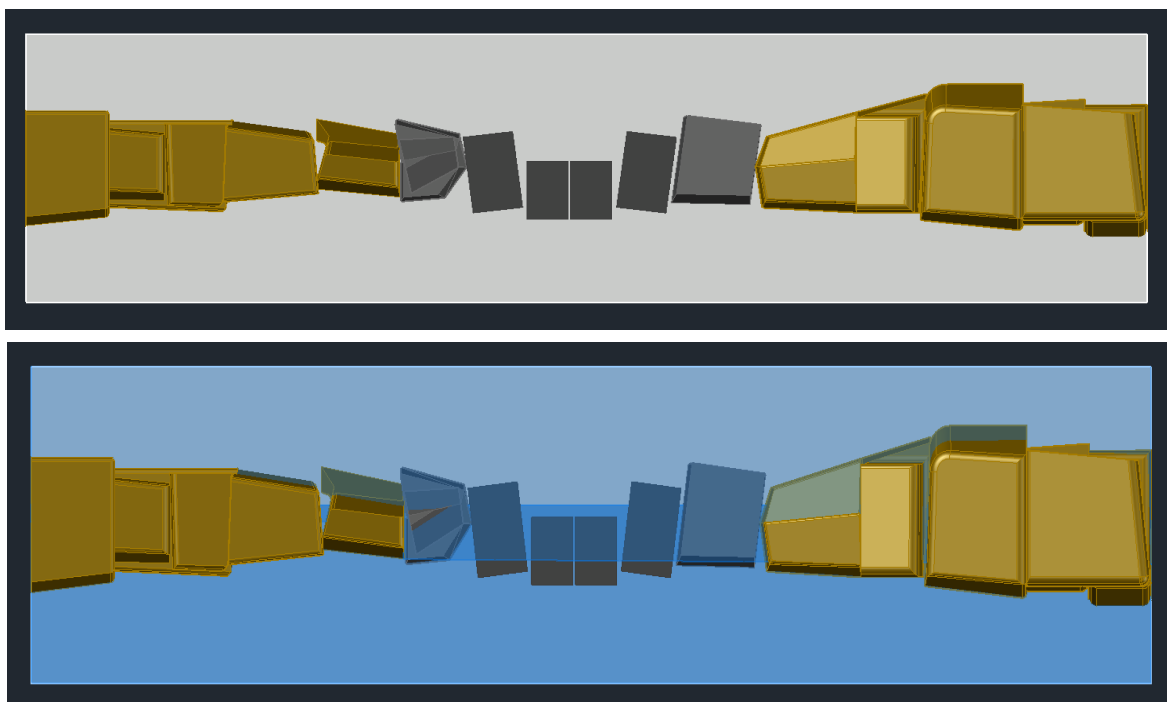


Figura 5.3-10. Vista superior de los diques de nueva implantación.

Finalmente, se plantea una simulación del nuevo obstáculo con la pendiente generada por cada altura del dique. Destacar que la colocación planteada permite el uso del nuevo movimiento con diferentes niveles de agua tal y como se simula en la “Figura 5.3-11”.

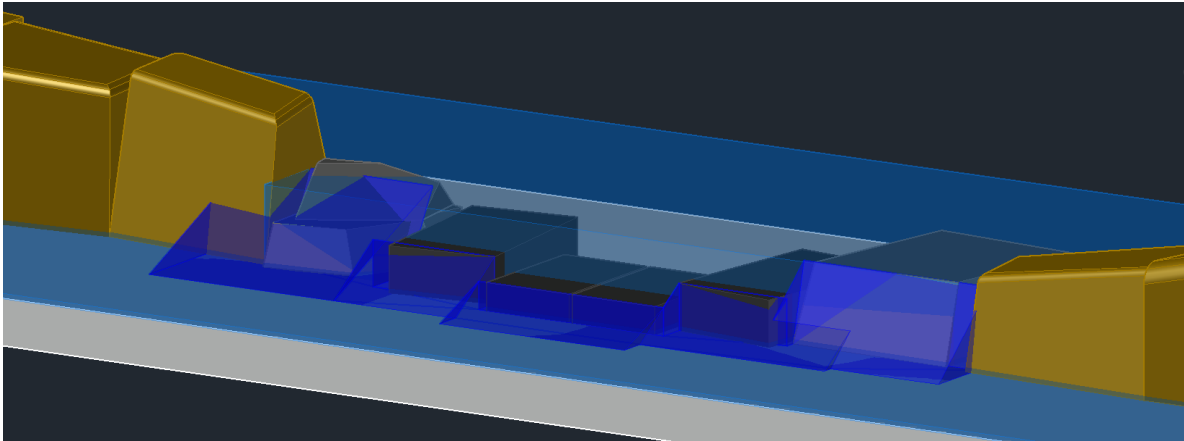


Figura 5.3-11. Simulación de las pendientes de agua generadas por el nuevo perfil.

5.3.2.2. REDISTRIBUCIÓN TRAMO 2.

La redistribución de este tramo se plantea manteniendo la misma forma que tiene ya de por sí el canal en su tramo final, pues se considera adecuada además de que se ahorra una obra de gran tamaño al mantener los diques ya existentes y bien consolidados. No obstante, tras el análisis de cotas realizado anteriormente y como se muestra en la “Figura 5.3-4”. La modificación de este tramo consiste en excavar y reducir medio metro la altura del terreno actual ganando el desnivel aguas arriba y dejando tan solo 20 cm de altura para los últimos 15 metros del canal en los que la normativa no permite poner puertas.

Se estudia el terreno in situ y se concluye que en su mayoría la excavación consiste en retirar sedimento pesado y piedras ya que la roca madre no es superficial de manera que no resulta ningún problema medioambiental ni unos costes excesivos.

6. Conclusiones.

A lo largo de este documento se han desarrollado dos líneas de mejora en cuanto al caudal y el perfil topográfico del canal de aguas bravas de Sabero.

En cuanto a la vía de mejora del caudal, se ha estudiado la viabilidad de la instalación para diferentes caudales y se plantea y diseña una compuerta innovadora y ecológica que permita regular el caudal del ramal de slalom sin necesidad de accionamientos motores y de manera automática siendo el propio caudal el regulador del funcionamiento de esta.

Se considera un diseño innovador, original, real y válido que permitiría habilitar y regular el caudal de la instalación haciéndola practicable casi todo el año cumpliendo por tanto el objetivo inicial de las ayudas europeas de rehabilitación y activación de la zona despoblada.

En cuanto a las mejoras del perfil topográfico del canal se realiza un estudio detallado de altitudes que permite establecer la curva de pendiente del canal haciendo visible los puntos flojos del mismo en el tramo medio.

La propuesta de mejora consiste en la redistribución de la pendiente basándose en las posibilidades que establece la normativa de la International Canoe Federation para un tramo de competición. Además, se propone una adecuación que respete en su mayoría los espigones ya existentes con la incorporación de un único obstáculo de nueva implantación construido de manera que no sea un limitante de caudal, si no que se adecúe a las variaciones de este.

Con esta adecuación se pretende conseguir que el canal tenga la dificultad adecuada para establecer la zona como una de las sedes referentes a nivel nacional e internacional consiguiendo atraer un notorio tránsito turístico-deportivo a la zona.

En definitiva, el estudio se focaliza en dos soluciones que mejorarán la viabilidad y la calidad de la instalación de Sabero lo cual se transmitirá positivamente en el plan de reactivación económica y social de la zona.

7. Agradecimientos.

Un día mientras entrenaba apareció César comentando que se iba a realizar una obra en el canal de Sabero y que querían construir una cinta remontadora y un sistema de bombeo, dos soluciones inviables e inapropiadas ya que el canal no es circular por lo que la cinta remontadora es impensable y el bombeo no solo sería en vertical si no que sería de una longitud impensable y claramente inviable.

Recuerdo volver a casa preocupado y enfadado y, tras dar mil vueltas en la cama, me decidí a desarrollar mi propio proyecto en el que planteara soluciones viables y que de verdad supusieran un antes y un después en el canal.

Es entonces, cuando empiezo con los agradecimientos ya que tras una videoconferencia con mi tutora Marta Menéndez contándole la impotencia que me creaba la situación y el entusiasmo que me generaba mi propio proyecto, me apoyó y se volcó conmigo al 200% apoyándome en la difícil decisión de abandonar el TFG que estábamos ya desarrollando para empezar uno nuevo que a priori no sabíamos ni por dónde empezar. Muchas gracias Marta por apoyar y compartir mi locura (que en algún momento no ha sido fácil), incentivar mi entusiasmo y permitir que haya podido disfrutar tantísimo con este TFG que tanto me ha aportado y que pone fin a una etapa que une mi mundo deportivo y académico. También me siento agradecido por la enseñanza que me ha aportado la ULE y creo demostrar en este Trabajo de Fin de Grado.

Por supuesto que también doy gracias a mi familia y a Lucía por compartir mis ilusiones y apoyarme en todo momento. Pero en especial a mi tío Juan Antonio por inspirarme en el comienzo del TFG desarrollando un método de cálculo que me lanzó e inspiró para desarrollar todos los demás temas tratados. No obstante, en especial agradezco a mi padre por haberme inculcado este deporte y sobre todo por las innumerables aportaciones y correcciones que ha realizado en este documento haciéndolo igual de mío que suyo.

Finalmente, muchas gracias a todos los que habéis formado parte de este camino y a todos los que aún no saben que lo formarán.

8. Bibliografía.

- [1] “Alejico -Ayuntamiento de Sabero.” <http://www.aytosabero.es/los-pueblos/alejico.html> (accessed Jul. 01, 2022).
- [2] E. el País and E. el País, “Editorial | Morir en Riaño,” *EL PAÍS*, 1987, Accessed: Jul. 01, 2022. [Online]. Available: http://www.elpais.com/articulo/opinion/LEON/RIANO_/LEON/GUARDIA_CIVIL/Morir/Riano/elpepiopi/19870712elpepiopi_1/Tes
- [3] “saihduero.es.” <https://www.saihduero.es/ficha-risr?r=EA103> (accessed Jun. 20, 2022).
- [4] J. L. J. J. V. Jorge Helmbrecht¹, “Cálculo de incertidumbres en la medida de caudales en ríos y canales: herramientas y aplicaciones prácticas innovadoras”.
- [5] “ANEJO 4. CAUDALES ECOLÓGICOS PLAN HIDROLÓGICO DE LA PARTE ESPAÑOLA DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO PROYECTO DE PLAN HIDROLÓGICO DE CUENCA ANEJO 4 CAUDALES ECOLÓGICOS Valladolid, 30 de noviembre de 2012.”
- [6] C. Hidrográfica and D. Duero, “Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero Revisión de tercer ciclo (2022-2027) ANEJO 4 CAUDALES ECOLÓGICOS MAYO 2021.”
- [7] “ANEXO IV CARACTERIZACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES Valladolid, noviembre de 2006.”
- [8] U. de Valladolid, “Apuntes para una breve introducción a la RESISTENCIA DE MATERIALES.”
- [9] “Unidad Resistencia de Materiales Curso ‘Resistencia de Materiales Aplicada’ A P U N T E S.”
- [10] I. Carolina Pérez Taboada, “PRINCIPIO DE TRABAJOS VIRTUALES.”
- [11] International Canoe Federation, “CANOE SLALOM”, Accessed: Jun. 20, 2022. [Online]. Available: www.canoaicf.com.



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

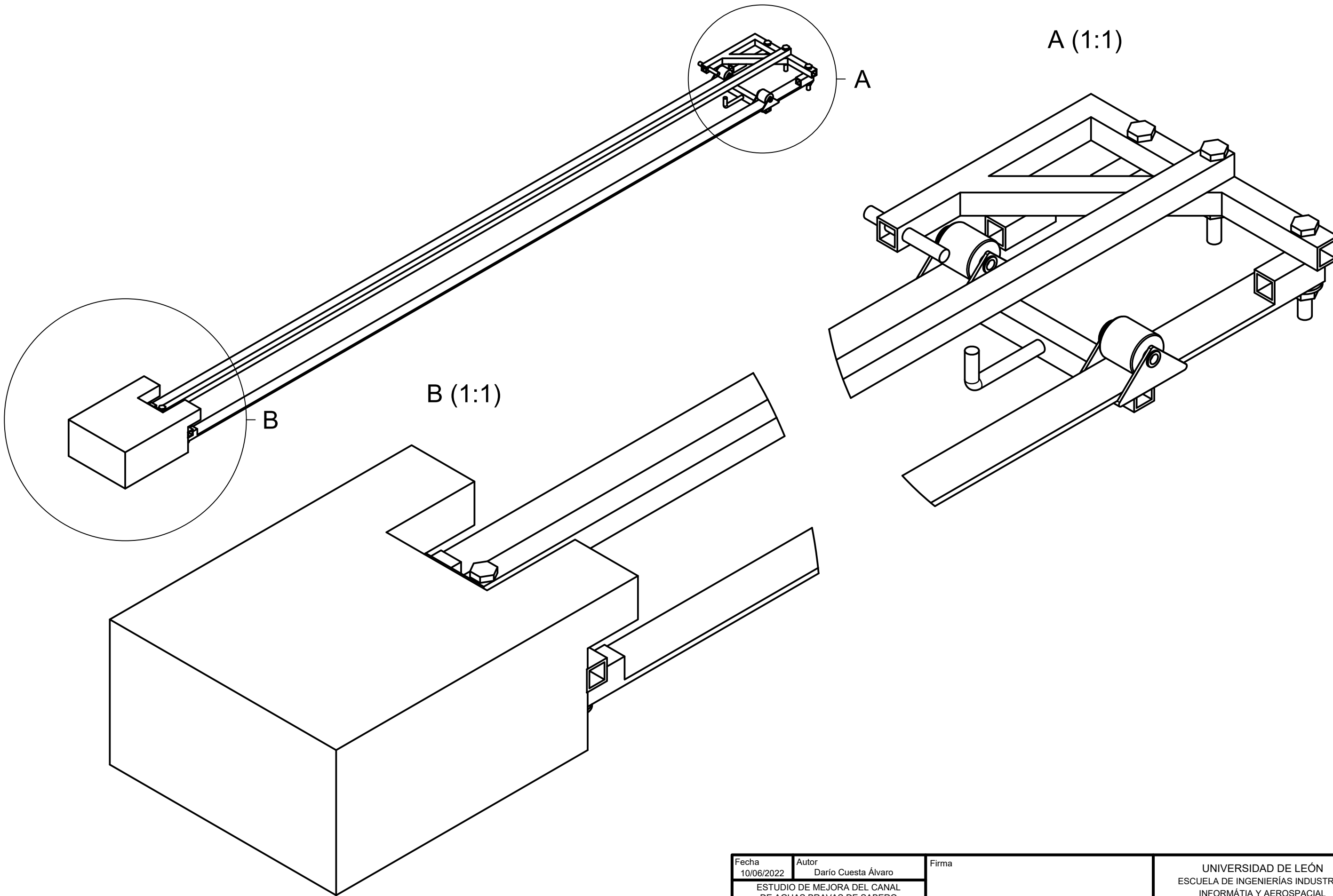
ANEXO PLANOS

PROYECTO DE ESTUDIO Y MEJORA DEL CANAL DE
AGUAS BRAVAS DE SABERO

STUDY AND IMPROVEMENT PROJECT OF SABERO'S
WHITEWATER COURSE

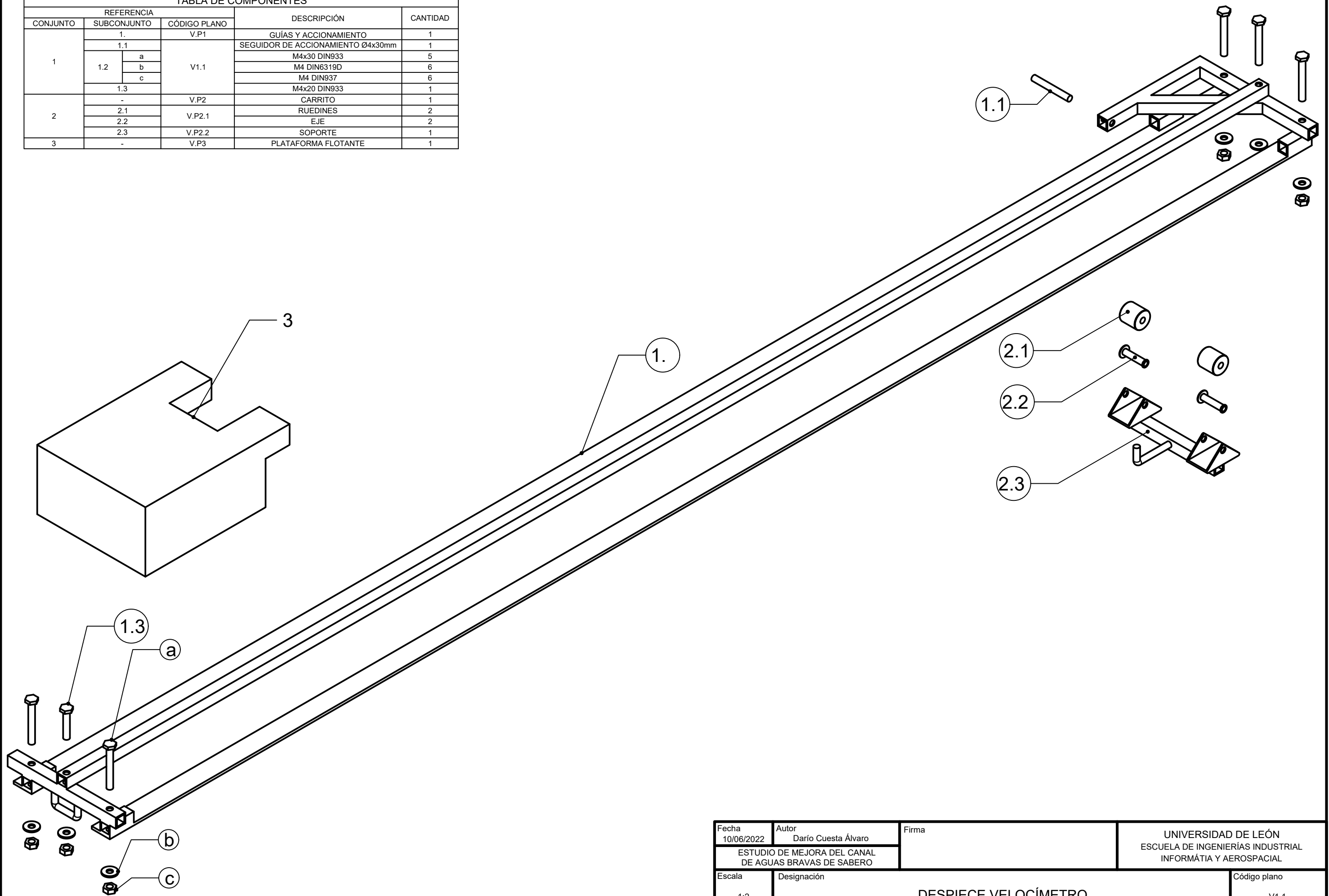
Autor: Darío Cuesta Álvaro
Tutor: Marta Menéndez

(Julio, 2022)

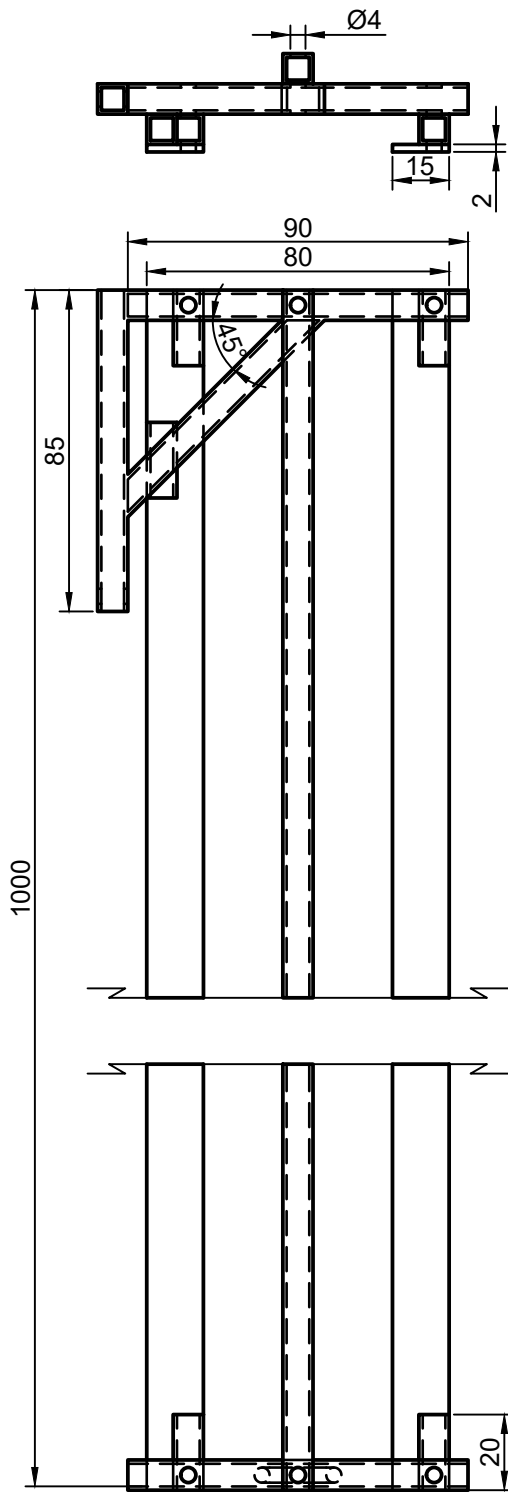


Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:4	Designación	VELOCÍMETRO	
			Código plano V1

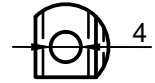
TABLA DE COMPONENTES				
CONJUNTO	REFERENCIA		DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
	SUBCONJUNTO	CÓDIGO PLANO		
1	1.	V.P1	GUÍAS Y ACCIONAMIENTO	1
	1.1	V1.1	SEGUIDOR DE ACCIONAMIENTO Ø4x30mm	1
	a		M4x30 DIN933	5
	b		M4 DIN6319D	6
	1.2	c	M4 DIN937	6
1.3	M4x20 DIN933		1	
2	-	V.P2	CARRITO	1
	2.1	V.P2.1	RUEDINES	2
	2.2		EJE	2
	2.3	V.P2.2	SOPORTE	1
3	-	V.P3	PLATAFORMA FLOTANTE	1



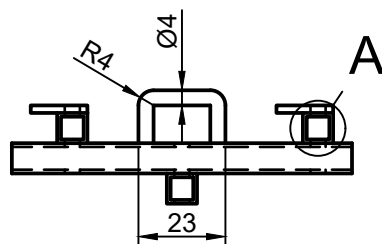
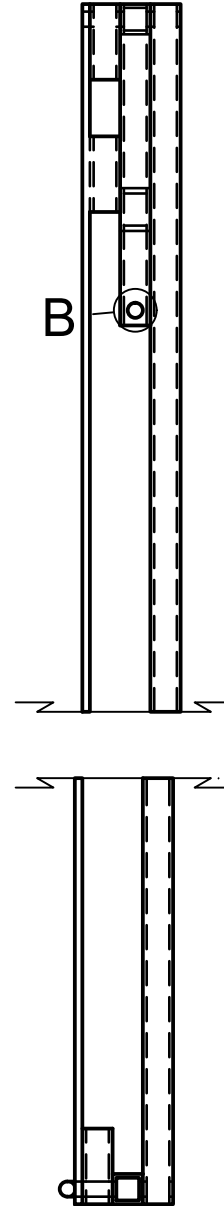
Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:2	Designación	DESPIECE VELOCÍMETRO	
			Código plano V1.1.



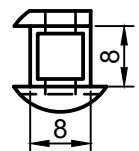
B (1:1)



Detalle inserción del seguidor de acoplamiento (1.1)

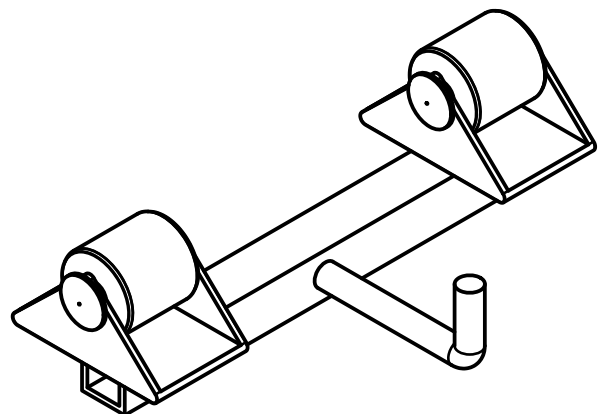
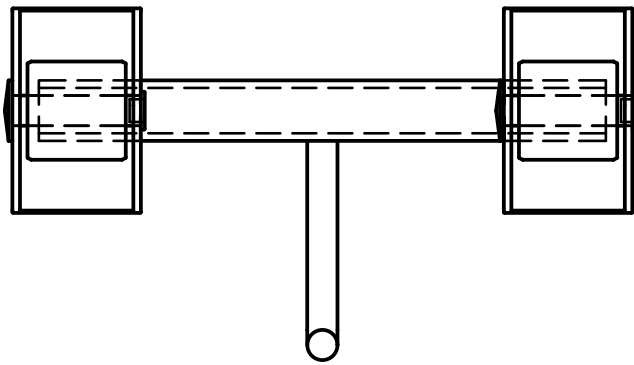
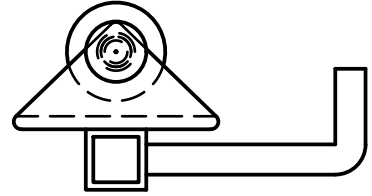
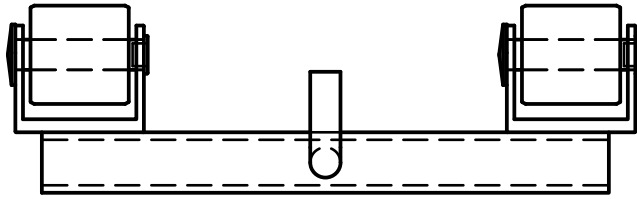


A (1:1)

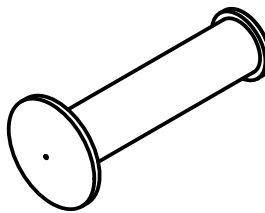
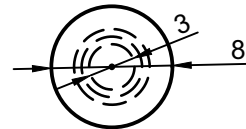
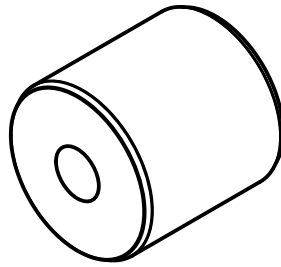
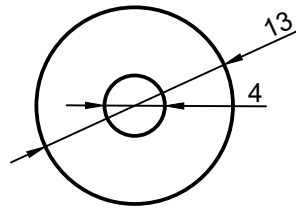
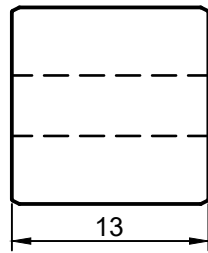


Perfil cuadrado de 8x8mm y 1mm de espesor.

Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPAICIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:2	Designación	GUÍAS Y ACOPLAMIENTO	
			Código plano V.P1.

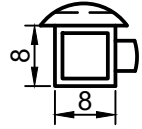


Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:1	Designación	CARRITO	
			Código plano V.P2

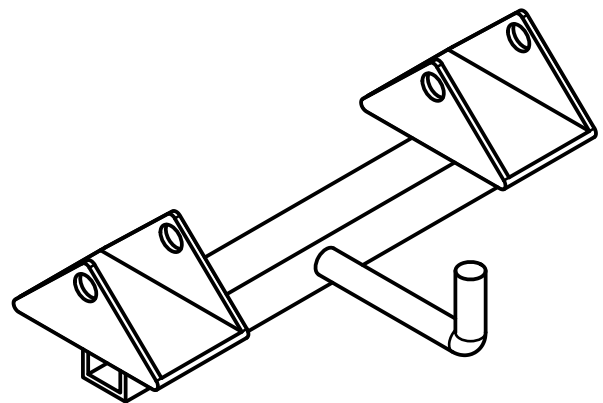
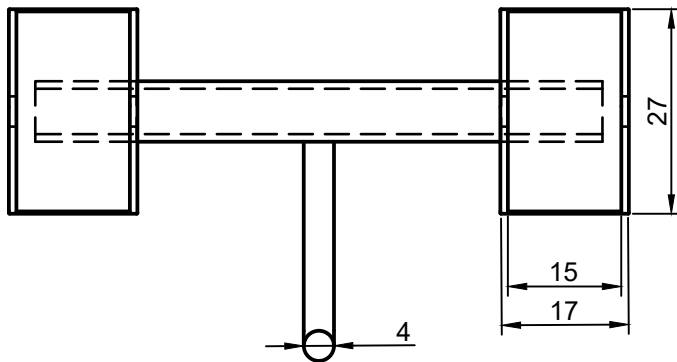
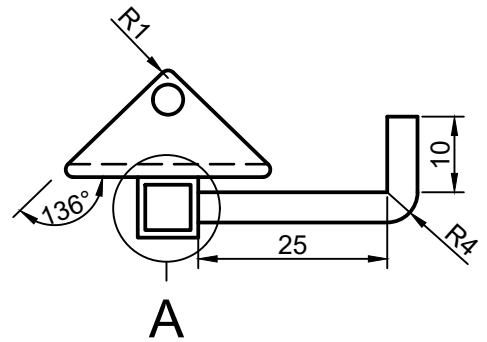
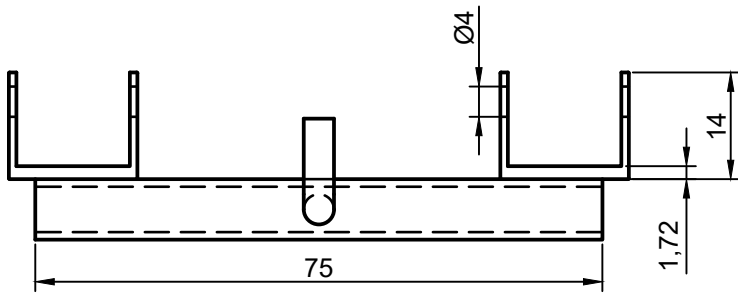


Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 2:1	Designación	RUEDINES Y EJE	Código plano V.P2.1

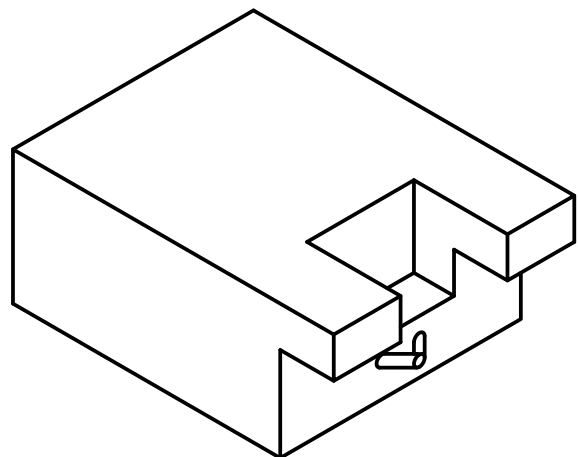
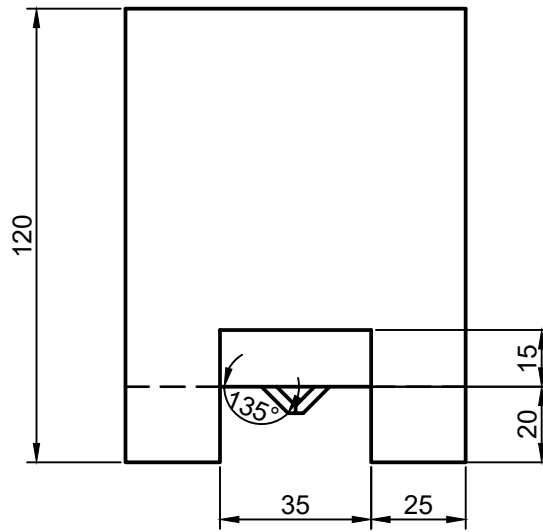
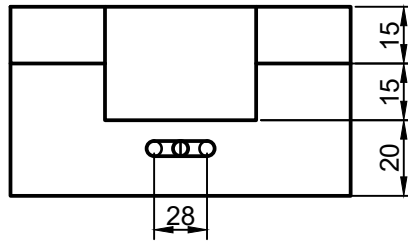
A (1:1)



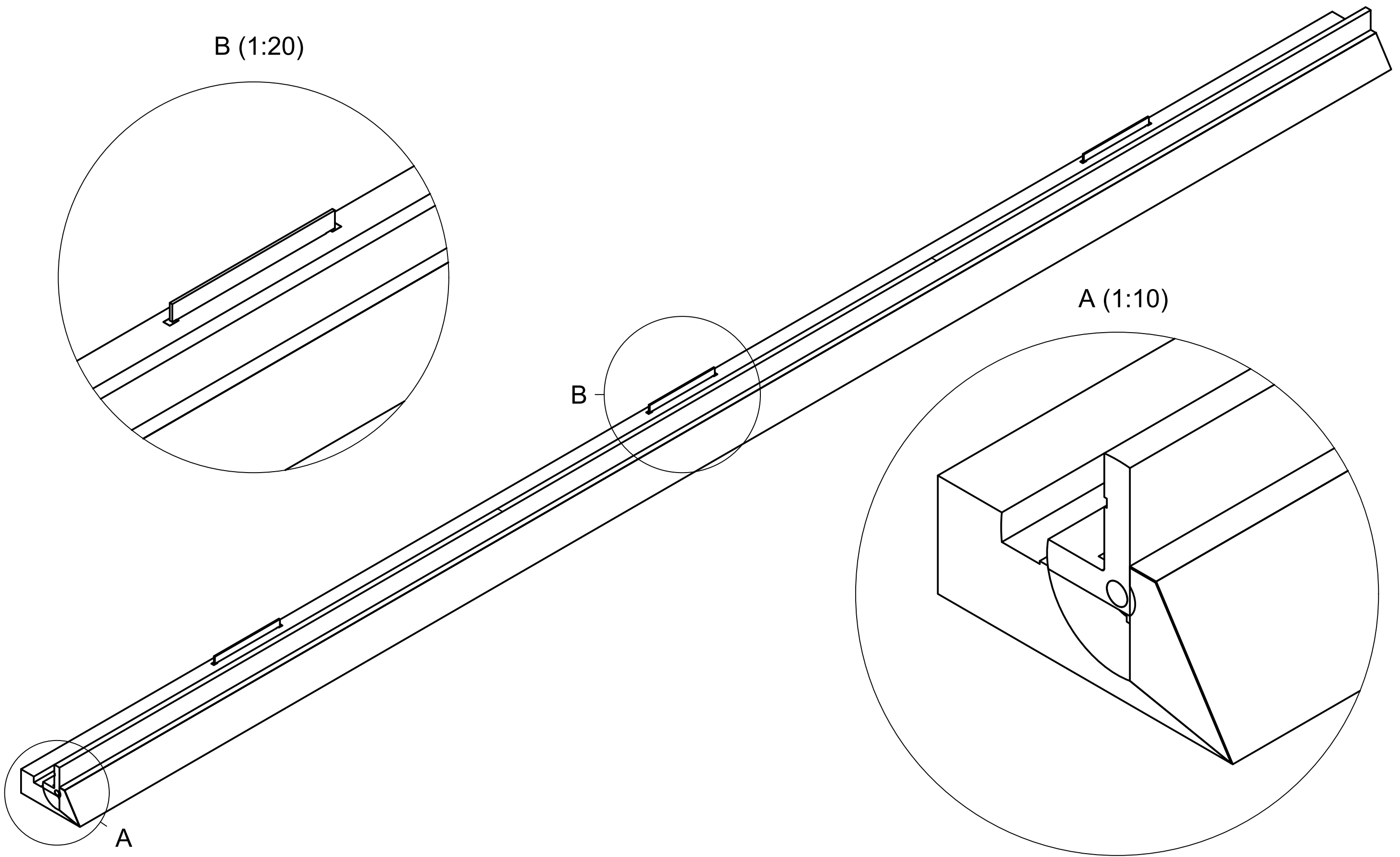
Perfil cuadrado de 8x8mm y 1mm de espesor.



Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:1	Designación SOPORTE		Código plano VP2.2



Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:2	Designación	PLATAFORMA FLOTANTE	Código plano VP3



B (1:20)

A (1:10)

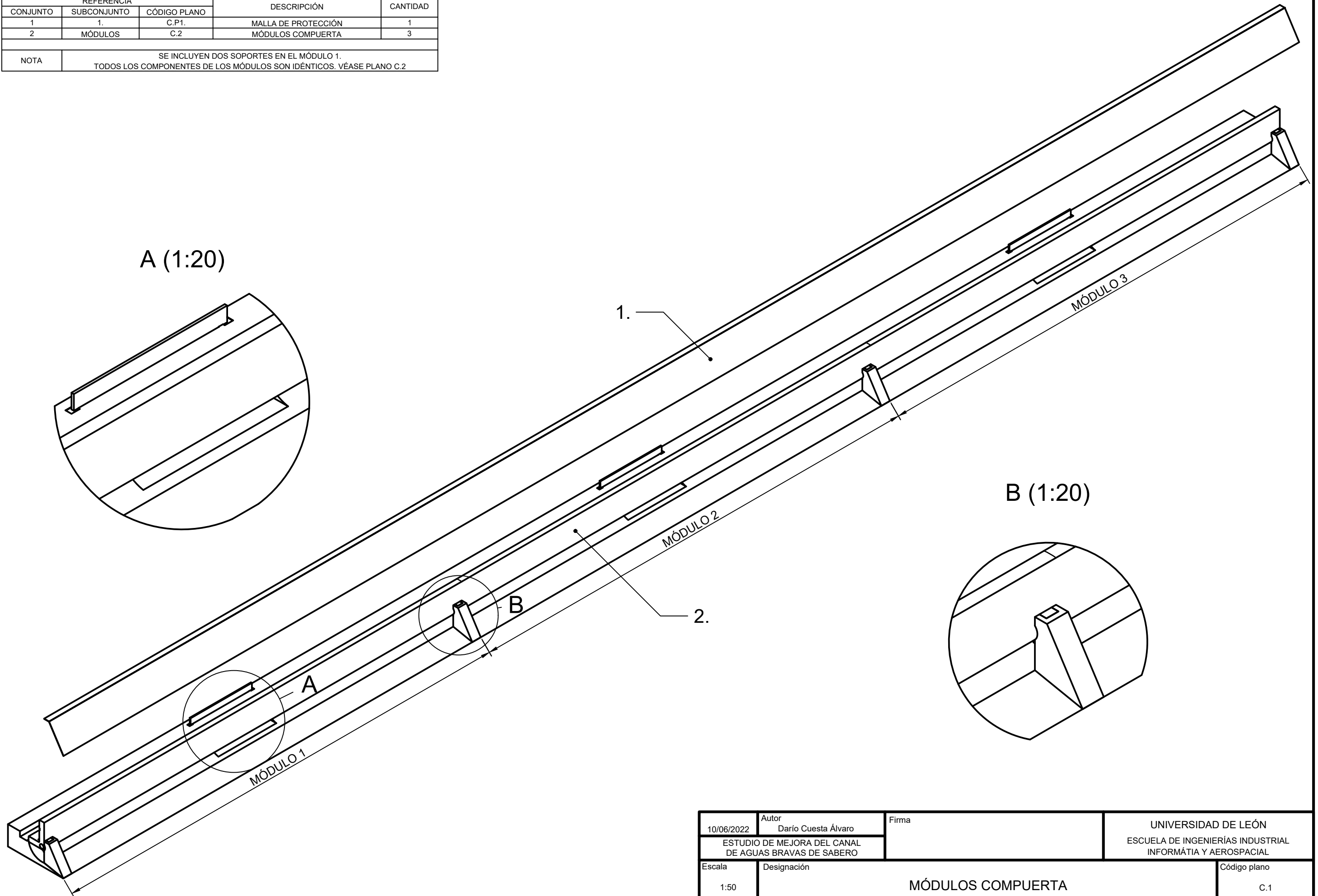
B

A

10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:50	Designación COMPUERTA		Código plano C.

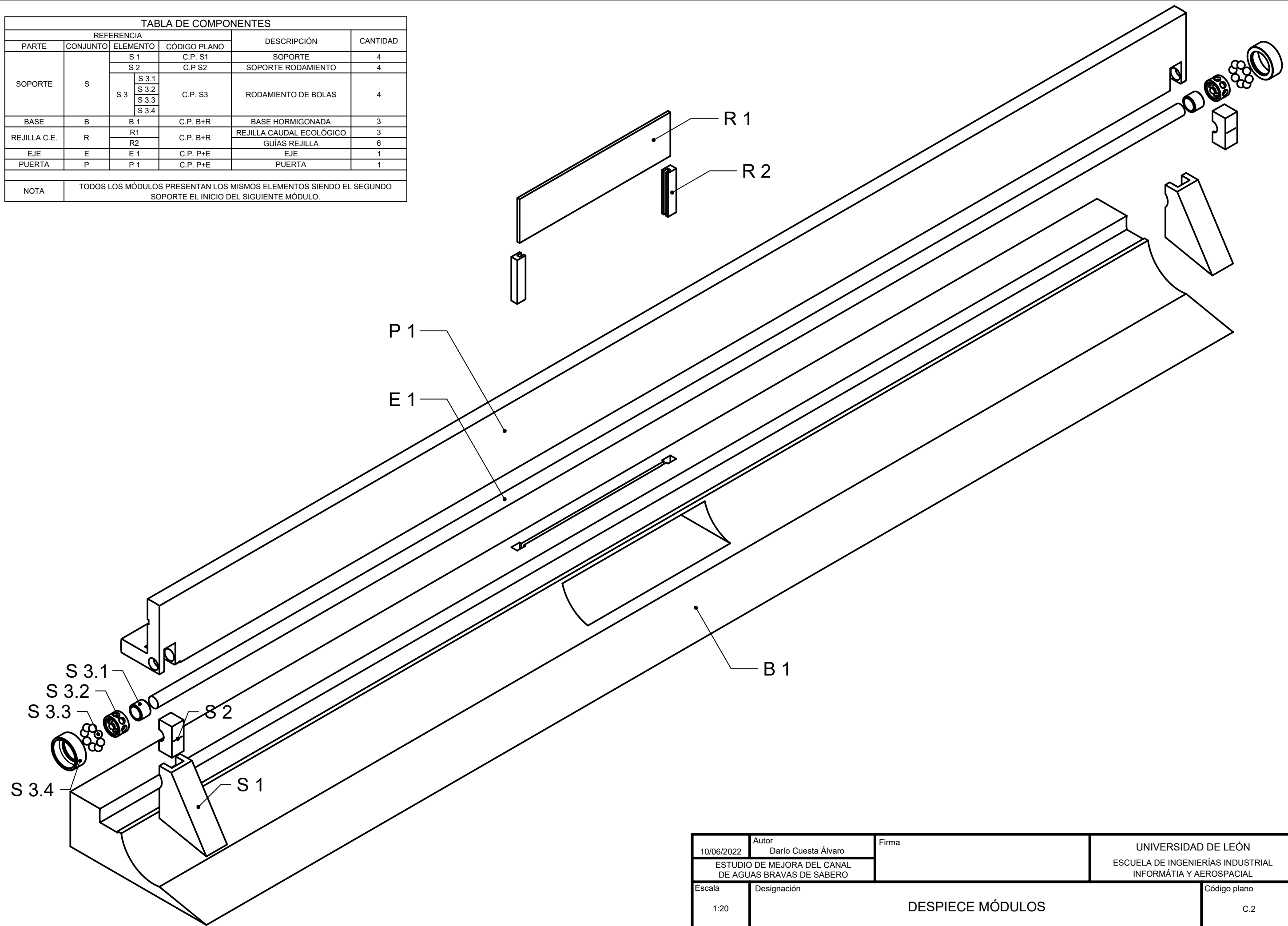
TABLA DE COMPONENTES				
REFERENCIA			DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
CONJUNTO	SUBCONJUNTO	CÓDIGO PLANO		
1	1.	C.P1.	MALLA DE PROTECCIÓN	1
2	MÓDULOS	C.2	MÓDULOS COMPUERTA	3

NOTA: SE INCLUYEN DOS SOPORTES EN EL MÓDULO 1.
TODOS LOS COMPONENTES DE LOS MÓDULOS SON IDÉNTICOS. VÉASE PLANO C.2

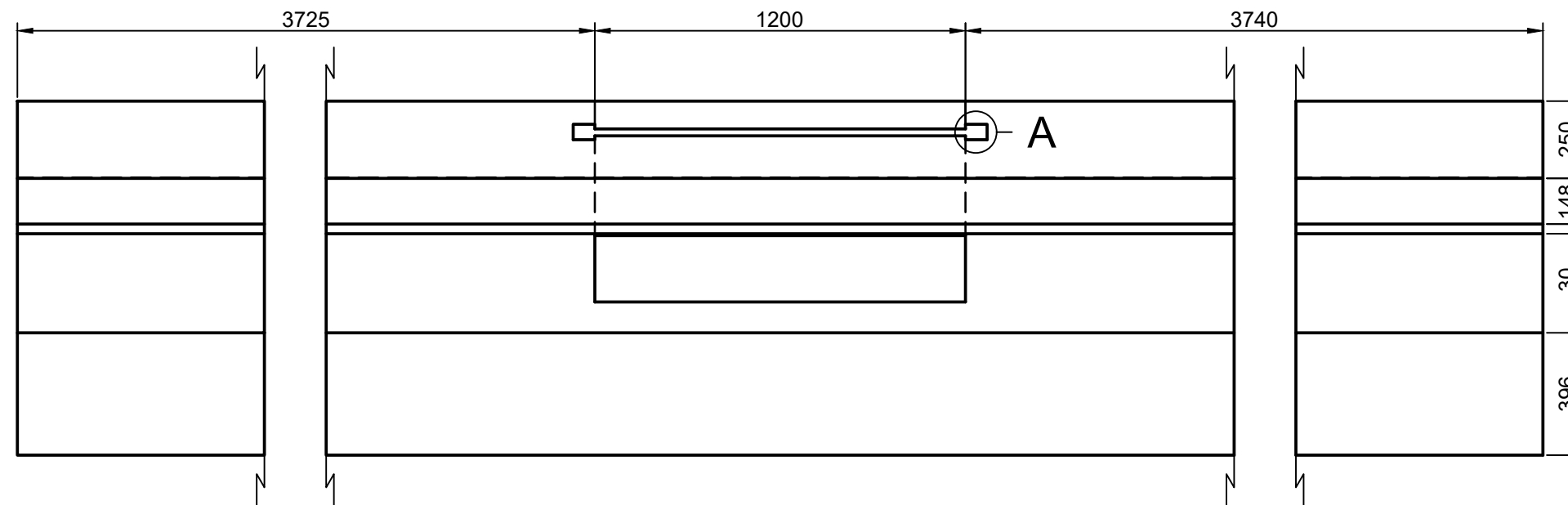
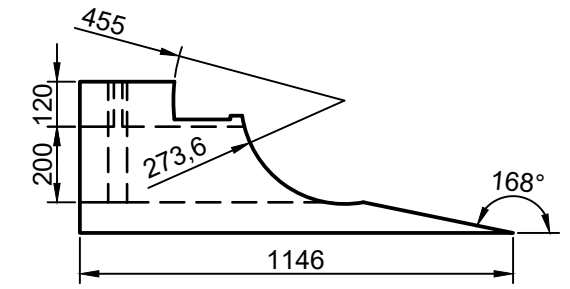
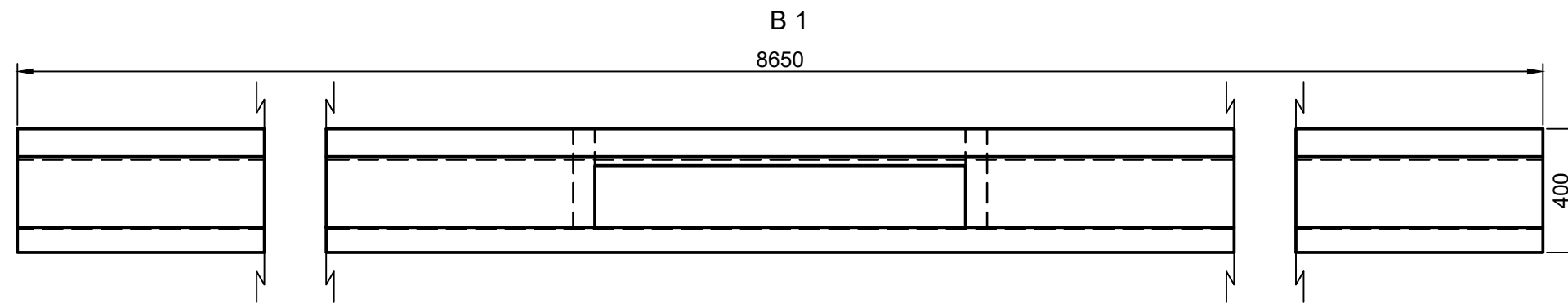


10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:50	Designación MÓDULOS COMPUERTA		Código plano C.1

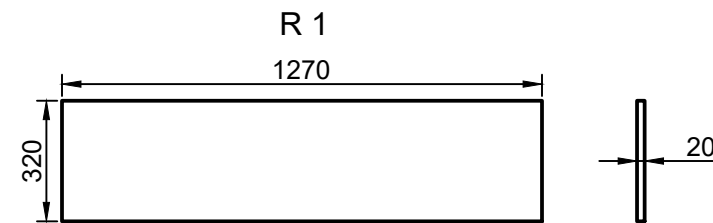
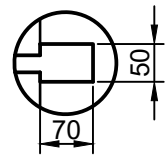
TABLA DE COMPONENTES						
PARTE	CONJUNTO	REFERENCIA		DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	
		ELEMENTO	CÓDIGO PLANO			
SOPORTE	S	S 1	C.P. S1	SOPORTE	4	
		S 2	C.P. S2	SOPORTE RODAMIENTO	4	
		S 3	S 3.1	C.P. S3	RODAMIENTO DE BOLAS	4
			S 3.2			
			S 3.3			
S 3.4						
BASE	B	B 1	C.P. B+R	BASE HORMIGONADA	3	
REJILLA C.E.	R	R1	C.P. B+R	REJILLA CAUDAL ECOLÓGICO	3	
		R2		GUÍAS REJILLA	6	
EJE	E	E 1	C.P. P+E	EJE	1	
PUERTA	P	P 1	C.P. P+E	PUERTA	1	
NOTA	TODOS LOS MÓDULOS PRESENTAN LOS MISMOS ELEMENTOS SIENDO EL SEGUNDO SOPORTE EL INICIO DEL SIGUIENTE MÓDULO.					



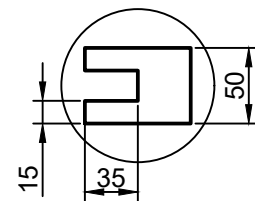
10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:20	Designación DESPIECE MÓDULOS		Código plano C.2



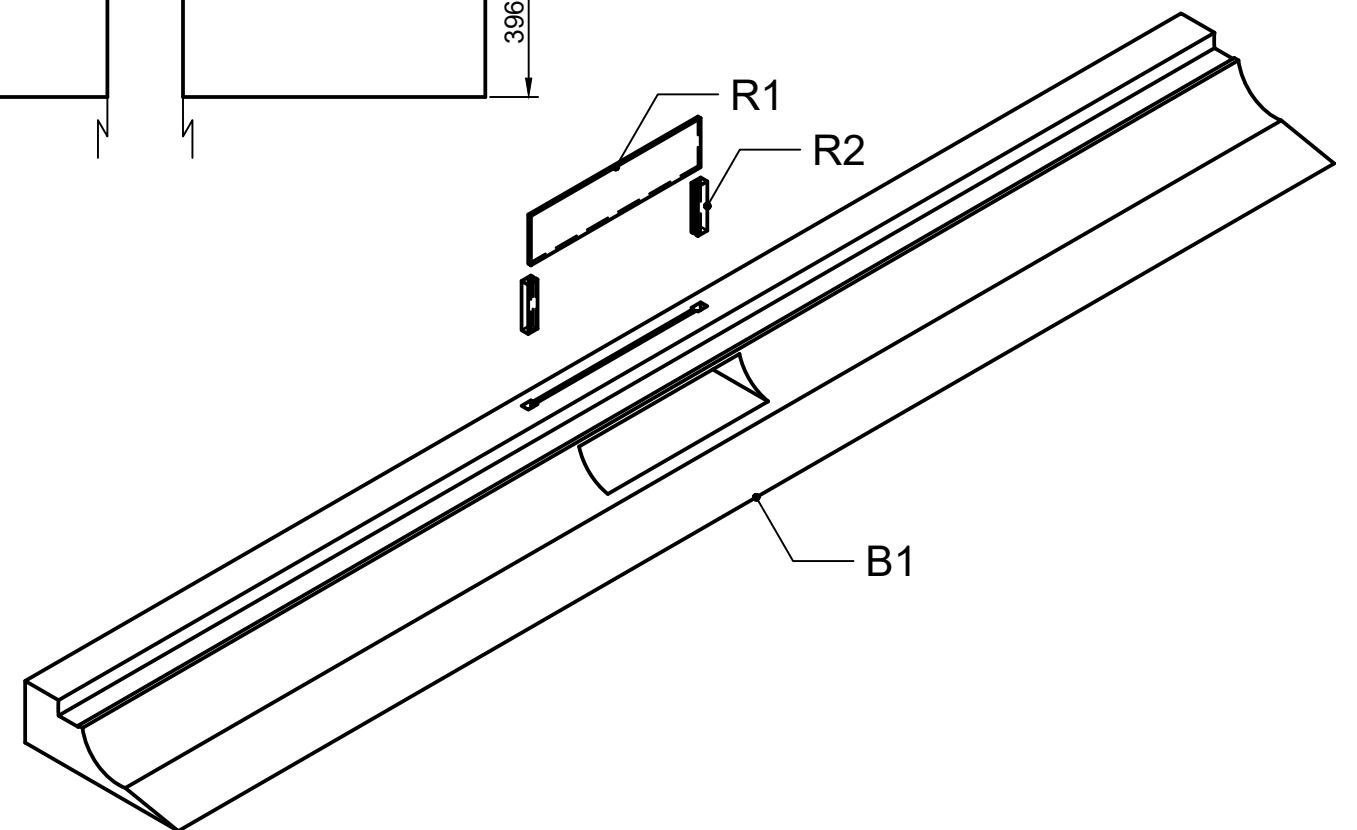
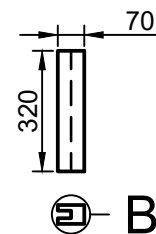
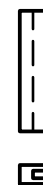
A (1:1)



B (2:1)

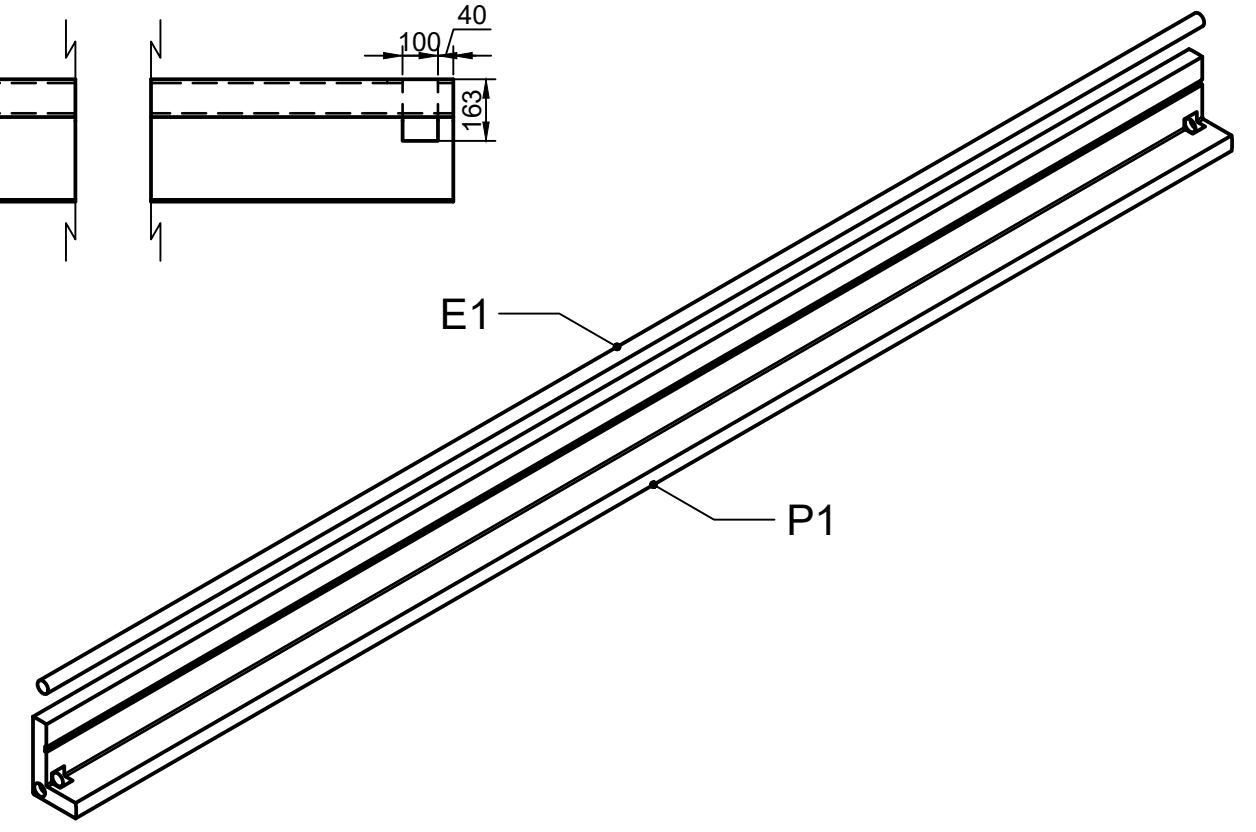
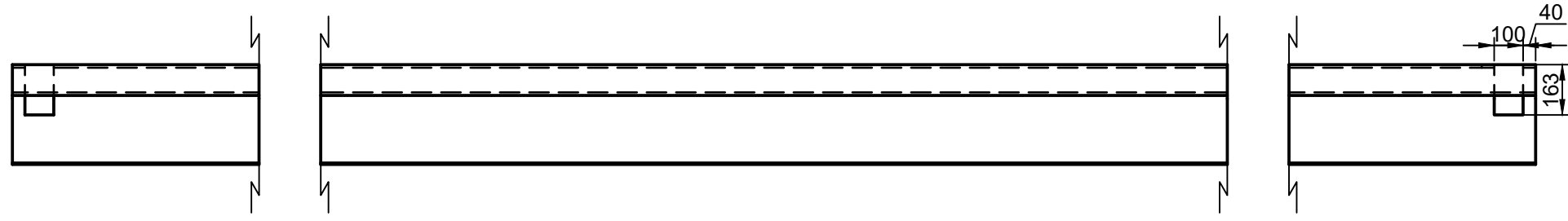
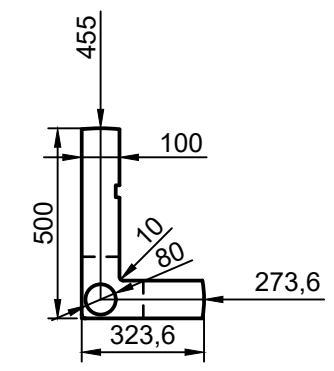
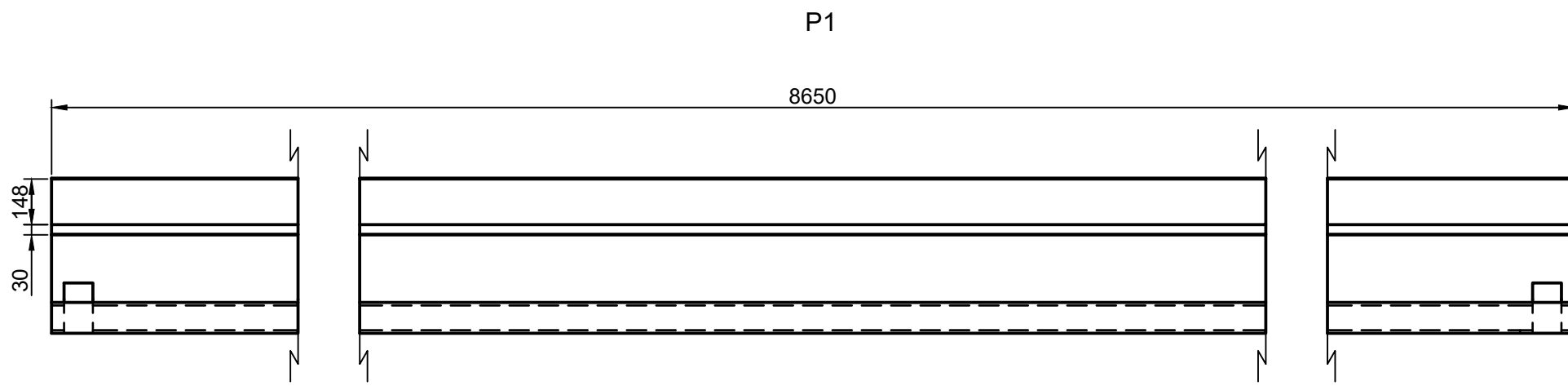
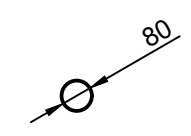
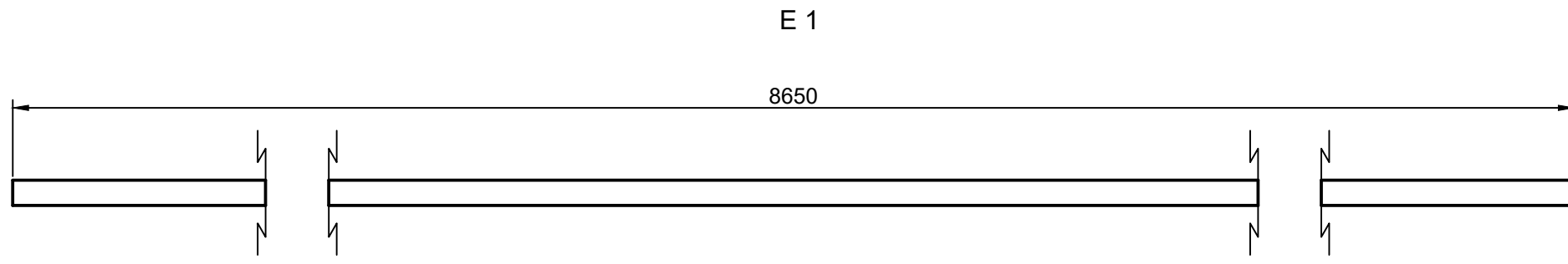


R 2



NOTA	LONGITUD TOTAL DEL MÓDULO 1 (2 SOPORTES DE 175mm) 8650 mm LONGITUD DEL MÓDULO 2 Y 3 (1 SOPORTE DE 175 mm) 8475 mm ESCALA BOCETO IZQUIERDO 1:40
------	--

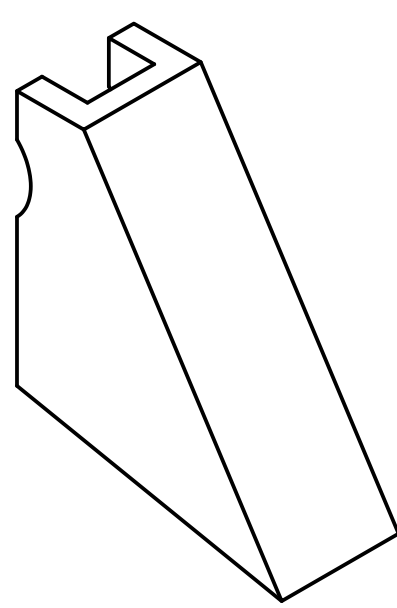
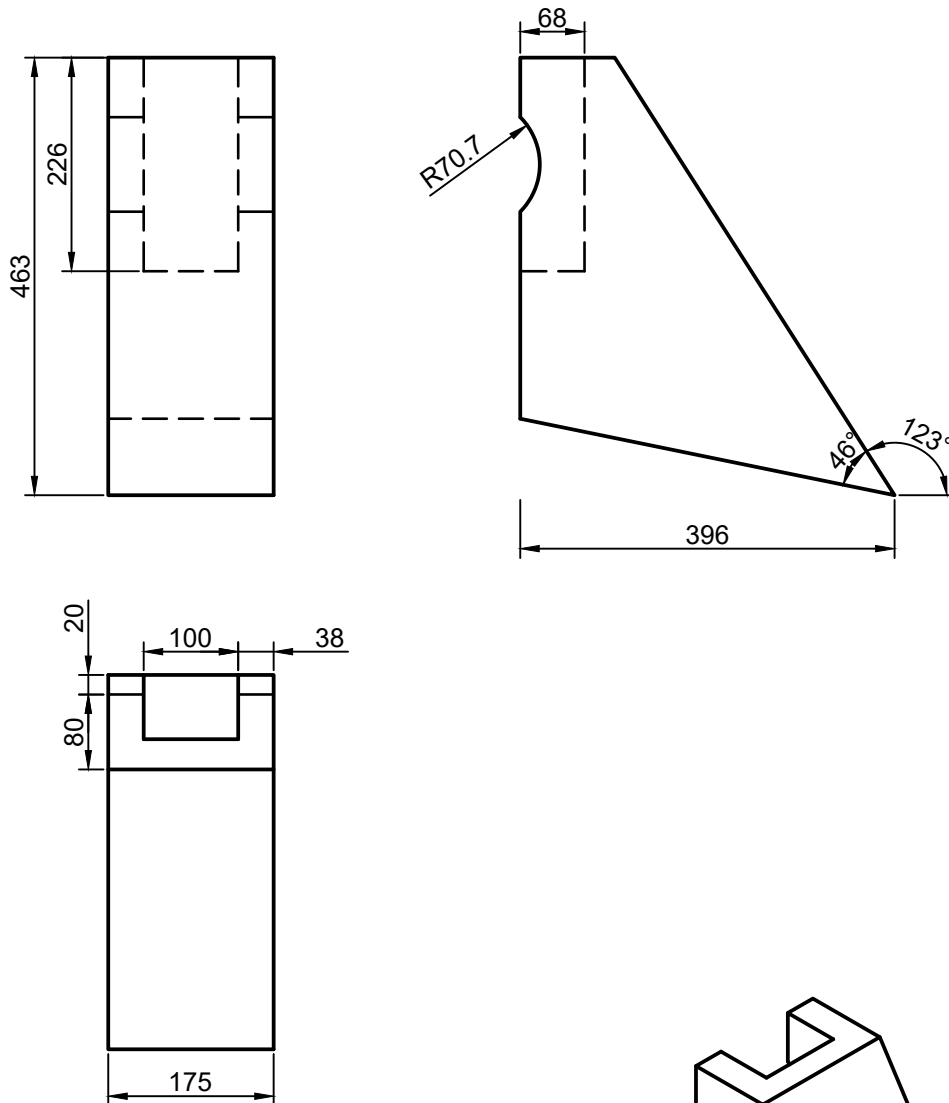
10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:20	Designación BASE Y TRAMPILLA CAUDAL ECOLÓGICO		Código plano C.P B+R



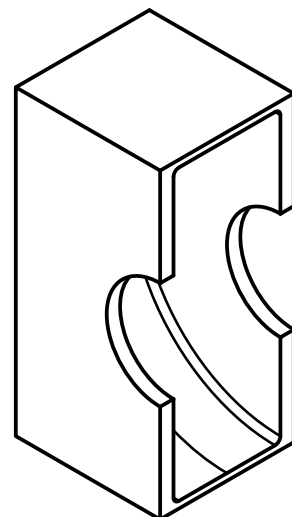
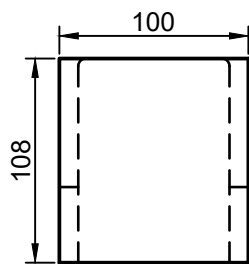
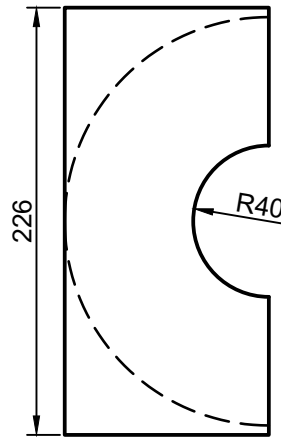
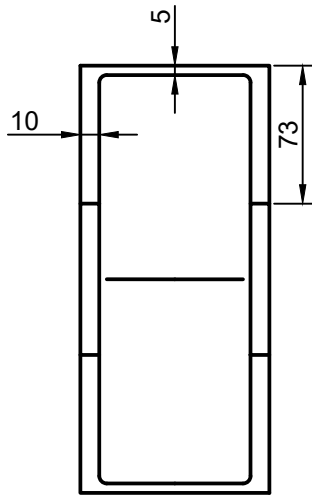
NOTA

LONGITUD TOTAL DEL MÓDULO 1 (2 SOPORTES DE 175mm) 8650 mm
 LONGITUD DEL MÓDULO 2 Y 3 (1 SOPORTE DE 175 mm) 8475 mm
 ESCALA BOCETO IZQUIERDO 1:40

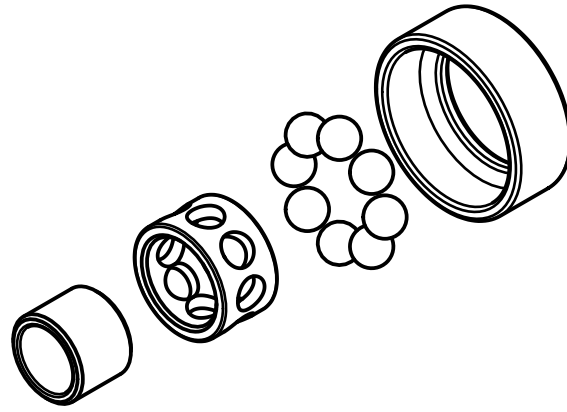
10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:20	Designación PERFIL EN "L" Y EJE		Código plano C.P P+E



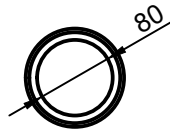
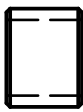
Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:8	Designación SOPORTE		Código plano C.P. S1



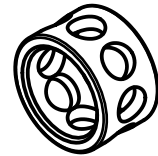
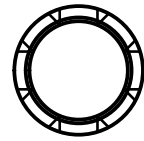
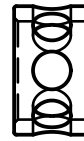
Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:4	Designación SOPORTE RODAMIENTO		Código plano C.P. S2



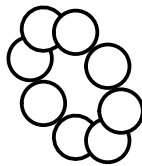
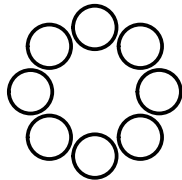
S 3.1



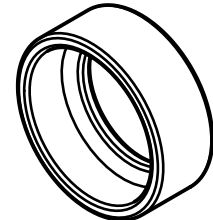
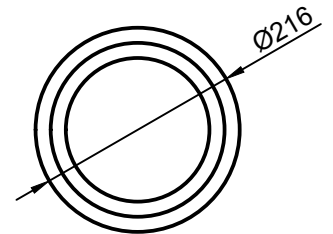
S 3.2



S 3.3



S 3.4



NOTA

VALORES ACOTADOS NECESARIOS PARA EL ACOPLAMIENTO AL EJE Y AL SOPORTE.
TODOS LOS DEMÁS ELEMENTOS ESTÁN SUJETOS AL DIMENSIONAMIENTO DEL
FABRICANTE TRAS SER INDEPENDIENTES A LA ESTRUCTURA.

Fecha 10/06/2022	Autor Darío Cuesta Álvaro	Firma	UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL INFORMÁTICA Y AEROSPACIAL
ESTUDIO DE MEJORA DEL CANAL DE AGUAS BRAVAS DE SABERO			
Escala 1:4	Designación	RODAMIENTO	
			Código plano C.P. S3