

Ilustración 1 (Gonzalez, 2012)

# Análisis estructural por medio de los métodos gráficos

---

*Comparación de métodos en Arco de Cabanes y aplicación en el Ermitorio de San Francisco Javier de Soneja, Castellón.*

Alumno: Adán Casado Ferrer  
Tutores: José Manuel Portoles Flaj  
Ángel Albert Esteve

TFG Arquitectura Técnica



## Índice

<b>1. MEMORIA .....</b>	<b>7</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.2. ANTECEDENTES.....	11
1.3. OBJETIVOS .....	13
1.4. MARCO TEÓRICO .....	14
1.4.1. MATERIALES.....	18
1.4.2. PARTES DEL ARCO, ELEMENTOS Y DIMENSIONES.....	20
1.4.3. FUNCIONAMIENTO DEL ARCO.....	22
1.4.4. DETERMINACION DE LA ESTABILIDAD A TRAVES DE LA GEOMÉTRICA.....	27
1.5. MÉTODO DE CÁLCULO UTILIZADO.....	31
1.6. EL ARCO ROMANO DE CABANES .....	32
1.6.1. LOCALIZACIÓN.....	32
1.6.2. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA.....	32
1.6.3. ESTADO DE CONSERVACIÓN ACTUAL.....	32
1.6.4. GEOMETRÍA.....	32
1.6.5. MATERIALES.....	35
1.6.6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	36
1.6.7. RESULTADOS.....	38
1.7. ERMITA DE SAN FRANCISCO JAVIER DE SONEJA.....	39
1.7.1. LOCALIZACIÓN.....	39
1.7.2. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA.....	39
1.7.3. ESTADO ACTUAL DE CONSERVACIÓN.....	39
1.7.4. GEOMETRÍA.....	40
1.7.5. MATERIALES.....	40
1.7.6. ANÁLISIS LIMITE.....	41
1.7.7. RESULTADOS.....	46
1.8. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN .....	47
1.9. RESUMEN DEL PRESUPUESTO .....	49
1.10. CONCLUSIONES .....	50
1.11. BIBLIOGRAFIA .....	51
<b>2. ANEXOS.....</b>	<b>52</b>
2.1. MÉTODO GRÁFICO MÉRY.....	52
2.2. ANALIS LÍMITE Y LA SEGURIDAD EN ARCOS.....	65
2.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS LÍMITE MEDIANTE GEOGEBRA.....	81
<b>3. PLIEGO DE CONDICIONES.....</b>	<b>87</b>
3.1. CONDICIONES SOBRE LOS MATERIALES.....	87
3.2. CONDICIONES SOBRE LA GEOMETRÍA .....	89
3.3. CONDICIONES DE APLICABILIDAD DEL MÉTODO .....	92
3.4. CONDICIONES DE LA INTERVENCIÓN.....	94
<b>4. PRESUPUESTO .....</b>	<b>95</b>
<b>5. PLANOS.....</b>	<b>106</b>
5.1. ARCO DE CABANES .....	106
5.2. ERMITA DE SAN FRANCISCO JAVIER DE SONEJA.....	110



## Indie de imágenes y tablas.

Ilustración 1 (Gonzalez, 2012) .....	1
Ilustración 2 (Martínez, 2003).....	15
Ilustración 3 (Martínez, 2003).....	16
Ilustración 4 (Martínez, 2003).....	16
Ilustración 5 .....	21
Ilustración 6.....	21
Ilustración 7- Puente portable. Códice Madrid.....	23
Ilustración 8. Esquema de armado de puente autoportante.....	24
Ilustración 9. Verificación de estabilidad en Arco Romano de Cabanes.....	29
Ilustración 10 Alzado de la cara SE y sección del monumento (Abad Casal, 1988) .....	34
Ilustración 11 Alzado de la cara NO (Abad Casal, 1988) .....	34
Ilustración 12 Planta del monumento (Abad Casal, 1988).....	35
Ilustración 13 Alzado cara NE y cara SE (Abad Casal, 1988) .....	35
Ilustración 14 (Castellon Virtual).....	36
Ilustración 15 Cálculo del empuje mínimo con coeficiente de seguridad grado3, dado que la Línea de Empujes no sale del 1/3 central (núcleo de inercia).....	37
Ilustración 16 Polígono funicular y de fuerzas hasta cimentación.....	38
Ilustración 17 .....	41
Ilustración 18. Posición del ángulo $\alpha$ .....	42
Ilustración 19. comparación del espesor límite con el núcleo del 1/3 central.....	43
Ilustración 20 Posición de las rotulas, puntos de paso del funicular.....	43
Ilustración 21. Funicular, tramo 1 .....	44
Ilustración 22. Funicular, tramo 2.....	44
Ilustración 23. Funicular, tramo 3.....	45
Ilustración 24. Detalle punto de salida de la Línea de empujes de la geometría del muro.....	46
Ilustración 25, Croquis refuerzo .....	47
Ilustración 26. Secuencia de bataches. Orden de excavación y hormigonado.....	48
Ilustración 27 Cálculo geométrico de peso propio más sobrecargas. Fuente (Lepore).....	53
Ilustración 28 (Lepore).....	54
Ilustración 29 (Lepore).....	55
Ilustración 30 Aplicación de cargas y ángulo de formación de rotula. ....	56
Ilustración 31. Puntos de paso de la Línea de Empujes en estado de mínimo esfuerzo horizontal.....	56
Ilustración 32. Trazado del polígono funicular para hallar Q .....	59
Ilustración 33 Línea de acción de la Resultante.....	59
Ilustración 34. Proyección de líneas h y e pasando por las rotulas.....	60
Ilustración 35 Resultados del primer tramo. ....	60
Ilustración 36 Cálculo del empuje mínimo con coeficiente de seguridad grado3, dado que la línea de Empujes no sale del 1/3 central (núcleo de inercia).....	61
Ilustración 37 Cálculo del empuje máximo con coeficiente de seguridad 3, dado que la línea de Empujes no sale del 1/3 central (núcleo de inercia).....	62
Ilustración 38. Trazado del 2º tramo del funicular hasta cimentación. ....	63
Ilustración 39, (a) Arco en equilibrio confortable; (b) arco limite; (c) meca- mismo de colapso del arco limite (Heyman 1999).....	65
Ilustración 40 Arco de mínimo espesor convertido en mecanismo de 5 rotulas.....	66
Ilustración 41 Definición de la geometría de un arco de fábrica de dovelas radiales, en su estado original (Ochsendorf 2002). ....	68

Ilustración 42 Arco circular en la situación de mínima relación e/R. Se trata de un mecanismo de cinco rótulas que en la práctica puede llegar a ser de cuatro debido a pequeñas imperfecciones en geometría (Ochendorf J. A., 2002) .....	68
Ilustración 43 .....	69
Ilustración 44 Arco Romano de Cabanes paramerizado.....	70
Ilustración 45, Ratio K de espesor límite para el arco Romano de Cabanes con ángulo $\alpha$ de $70,5^\circ$ .....	70
Ilustración 46, Comparación de la sección del 1/3 central y del espesor límite en el arco Romano de Cabanes.....	71
Ilustración 47, ángulo de posición inicial $\beta_0$ .....	72
Ilustración 48, ángulo $\beta_0$ ( $44,6^\circ$ ) de posición inicial de la 4° y 5° rotula en el Arco Romano. Según el valor K obtenido .....	73
Ilustración 49, ángulo $\beta_0$ de posición inicial de la 4° y 5° rotula en el Arco Romano.....	73
Ilustración 50. Región central del arco límite. (Ochendorf H. y., 2003) .....	74
Ilustración 51 .....	75
Ilustración 52 .....	76
Ilustración 53. Posición inicial del ángulo $\beta_0$ .....	77
Ilustración 54 Posición del ángulo $\alpha$ y $\beta_0$ en la bóveda de canon de la Ermita de San Francisco Javier.....	78
Ilustración 55 Región central del arco límite, en azul.....	79
Ilustración 56 Posición de las rotulas, puntos de paso del funicular.....	79
Ilustración 57 .....	81
Ilustración 58 .....	81
Ilustración 59 .....	83
Ilustración 60 .....	83
Ilustración 61 .....	84
Ilustración 62 .....	84
Ilustración 63 .....	85
Ilustración 64. Revestimiento de la bóveda.....	87
Ilustración 65. Composición del muro.....	87
Ilustración 66. Fisura en la bóveda de cañón de la Ermita de San Francisco Javier.....	89
Ilustración 67, Sección de análisis.....	89
Ilustración 68 .....	90
Ilustración 69 .....	90
Ilustración 70 Encuentro de viguetas de cubierta con el muro. Ermita de San Francisco Javier. ....	91
Ilustración 71. Cargas del arco y del contrarresto. ....	92
Ilustración 72. Fachada oeste de la Ermita de San Francisco Javier. Calle Ermita. ....	94

# 1. MEMÓRIA

## 1.1. INTRODUCCIÓN

### APORTACIONES DE LA ESTÁTICA GRÁFICA A LA EXPERIENCIA ESTRUCTURAL DE LA CONSTRUCCIÓN

Desde los albores de la construcción, el conocimiento ha sido transmitido de forma oral. El oficio de maestro de obra pasaba de generación en generación sin dejar constancia escrita. La experiencia, cargada de aciertos y errores en la forma de cortar la piedra y su colocación posterior, era el modo principal a la hora de transmitir la enseñanza a los aprendices.

Tampoco los griegos se resistieron a basarse en la experiencia a la hora de construir sencillos dinteles de madera. La observación de la flexión de la madera les llevo a obtener la relación más apropiada entre la luz a salvar y el canto a emplear.

Los antiguos arquitectos y maestros de obras no se amilanaron ante el desconocimiento del comportamiento de los distintos materiales utilizados en los elementos constructivos, al

contrario, el ensayo-error de distintas soluciones arquitectónicas propicio la aceptación de unas soluciones en lugar de otras en función del número de aciertos encontrados.

La prudencia hizo que el dimensionado de estas soluciones constructivas se decantara del lado de la seguridad, dando como resultado elementos sobredimensionados y muy alejados de ser una solución óptima desde el punto de vista económico.

En los inicios del desarrollo de la construcción se utilizó una de las ciencias de la física, La Estática que, a través de los métodos gráficos como principal herramienta, ayudó a determinar la óptima posición estructural de los elementos a la hora de construir.

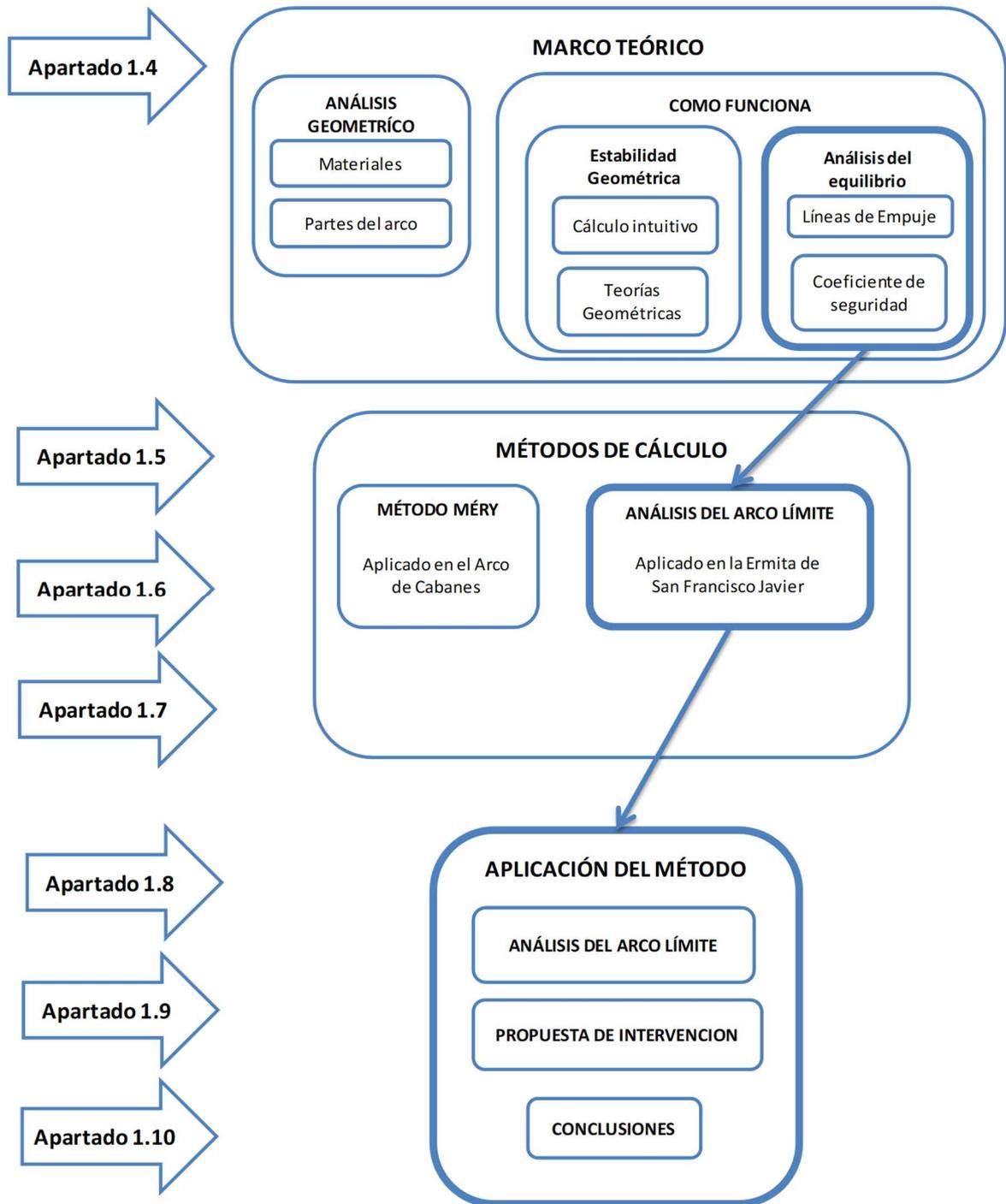
El uso de la **Estática Gráfica** en el diseño de estructuras permitió conjugar el diseño, cálculo y construcción ayudando al diseñador a tener conciencia de la forma de la estructura y del flujo de las fuerzas en todo momento, estando éstas en continua relación. **Los Métodos Gráficos Manuales** cayeron en desuso por su inexactitud y fueron adelantados a mediados del siglo XIX por las rutinas matemáticas.

La estática gráfica quedo entonces desplazada utilizándose básicamente para el análisis estructural. Esta simplificación llevó a la estática gráfica a un segundo plano, quedando tan solo como herramienta de apoyo al diseño.

Esta simplificación en el diseño ha supuesto el encarecimiento de proyectos debido al sobredimensionado de elementos ya que los componentes estructurales son un porcentaje muy importante del precio final de las construcciones. La falta de diseño ha obligado a incorporar métodos adicionales de sujeción de las estructuras.

Pero en la actualidad, las herramientas gráficas basadas en programas informáticos nos dan la certidumbre suficiente para poder plantear un uso protagonista.

ORGANIZACION DEL TRABAJO





## 1.2. ANTECEDENTES

### BREVE EVOLUCIÓN HISTÓRICA

#### **BABILONIA**

Tenemos que remontarnos unos 6.000 años para encontrar las primeras civilizaciones que utilizaron el arco como elemento estructural. Tal y como argumenta, (Santiago, 2005), el arco es un elemento que NO se encuentra en la naturaleza de forma espontánea, fue una invención de los Babilonios y más tarde también fue usado por los egipcios. Aunque este elemento arquitectónico no fue el más característico de su arquitectura, no hay vestigio de cómo llegaron a él ya que en otras culturas coetáneas no dieron con esta solución.

#### **ETRUSCOS**

El pueblo Etrusco llegó a dominar la construcción de arcos de dovelas con juntas orientadas perpendicularmente a la línea de intradós y llegó a conocer el funcionamiento de los arcos de dovelas que trabajaban a compresión. Se considera que ellos fueron los que transmitieron sus conocimientos a los ROMANOS.

(Sánchez, 2011)

#### **ROMANOS**

Esta forma de cubrir espacios solo con elementos sometidos a compresión fue llevado por los romanos a un estado de perfeccionamiento tal que hoy en día aún se conservan y se siguen manteniendo en pie grandes prodigios arquitectónicos. A pesar de ello después de esta época el arte de la construcción de arcos de fábrica cayó en desuso durante mucho tiempo.

#### **EDAD MEDIA**

En esta época, bajo la influencia de la iglesia, se retoma la construcción de arcos como elementos estructurales, pero con influencias de oriente medio que dieron lugar a arcos apuntados que, a pesar de no suponer una innovación arquitectónica notable, permitió conseguir naves con mayores luces y menores esfuerzos horizontales.

## RENACIMIENTO

Durante el renacimiento surge una nueva corriente de diseño del arco de fábrica. El arco de medio punto entra en desuso por su elevada altura, que en muchas ocasiones condicionaba la luz. La opción era decantarse por los arcos rebajados que permiten un abanico de posibilidades en la altura. Esta posibilidad de disminuir la altura manteniendo la luz, suponía un incremento de dimensión en los elementos de contrarresto. De esta época datan los arcos de fábrica con mayor luz. Hacia finales del renacimiento, y por primera vez en la historia, se introduce el arco carpanel, cuyo trazado se aproxima a las condiciones óptimas de resistencia.

Es evidente que el proceso de construcción de un arco no es intuitivo. Para conseguir que un arco se sustente, es necesaria la utilización de andamiajes y cimbras que mantengan las dovelas (inertes) hasta que con la colocación de la dovela clave y posterior descimbrado se produce la “**magia**”. Es en este preciso instante en el que la gravedad se ocupa del resto. Las dovelas gravitan unas sobre otras descargando su peso y compensándolo con la dovela posterior. El esfuerzo recorrerá el interior de la estructura hasta conducir la suma de todas las cargas hasta los estribos y de ellos al suelo. Si estos esfuerzos consiguen quedarse dentro de la geometría del arco, este no caerá y se considerará en equilibrio. Según un proverbio árabe citado por Fernández Casado (1933), a partir de este momento,

### ***“el arco nunca duerme”***

Hay infinitas situaciones de equilibrio para un mismo arco, tantas como recorridos puedan realizar los esfuerzos que viajan a través de la estructura. Pero esto no sucede siempre y si estos esfuerzos se salen de la geometría del arco este colapsará.

El arco se convirtió en el elemento estructural que más curiosidad ha despertado a lo largo de la historia. El ensayo error no será suficiente para dar con las proporciones idóneas que eviten el colapso. Entender su funcionamiento ha sido objeto de estudio para maestros albañiles, ingenieros y arquitectos a lo largo de la historia. Como se verá a continuación muchos de ellos establecerán normas y reglas de dimensionado que tendrán en cuenta la relación entre altura, luz y espesor de la rosca, con las que se intentara encontrar las dimensiones óptimas.

## 1.3. OBJETIVOS

El presente trabajo técnico viene motivado por la realización del Trabajo de Final de Grado de Arquitectura Técnica en la Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales de Castellón, Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcciones.

Este TFG está encaminado a:

- a) investigar cómo se han ido utilizando los Métodos Gráficos a lo largo de su historia;
- b) posibilidad de aplicarlos como herramienta para el análisis en estructuras que nunca fueron calculadas por métodos analíticos.

Concretamente se proporcionará ayuda a la hora de identificar el origen de patologías que, bien por error de diseño o bien por variaciones del entorno, han afectado o pueden afectar a la estabilidad estructural. Un método que permita relativizar de forma gráfica lo cerca o lejos que se encuentra la estructura del estado límite del equilibrio.

Del mismo modo se pretende poner en valor la estática gráfica también como herramienta de diseño principal gracias a las posibilidades que, en la actualidad, nos proporcionan los programas informáticos. Conjugando así un método que asegura en todo momento el equilibrio de fuerzas del sistema y la certidumbre que nos aportan las herramientas informáticas en la actualidad.



Para este propósito, se plantea la comparación de diferentes métodos en:

- EL Arco Romano de Cabanes, por tratarse de un ejemplo puro y prácticamente modelizado.

Y la aplicación del método de análisis límite en:

- El Ermitorio de San Francisco Javier, de Soneja, Castellón, por tratarse de una estructura “no calculada” que presenta una patología muy evidente y definida.

## 1.4. MARCO TEÓRICO

El principal objetivo es demostrar porque es estable cualquier arco de fábrica, dentro del marco de la teoría del Análisis Limite de Estructuras de Fábrica.

Para la realización del estudio del comportamiento de un arco de fábrica, se ha aplicado la teoría de Análisis Limite de Estructuras de Fábrica.

En función de la complejidad de los modelos de cálculo necesarios para cada situación y de la precisión que se requiera (según la precisión de los datos de entrada), se pueden agrupar las diferentes herramientas en unos grupos que se denominan “niveles de análisis”. En cada nivel de análisis se introduce en el modelo un nuevo grupo de ecuaciones a cumplir Tabla 1.

Nivel de análisis	Ecuaciones	Ejemplo
<b>Nivel 0</b>	Ninguna	Reglas Históricas de dimensionamiento
<b>Nivel 1</b>	Ecuaciones de equilibrio	Estática Grafica Bloques Rígidos Análisis Limite
<b>Nivel 2</b>	Ecuaciones de equilibrio Ecuaciones Constructivas	Análisis límite con control seccional
<b>Nivel 3</b>	Ecuaciones de equilibrio Ecuaciones Constructivas Ecuaciones de Compatibilidad	Análisis Matricial no Lineal MEF no lineal

Tabla 1. (Martínez, 2003)

### Nivel 0

En el nivel cero, en el que no se impone condición alguna a la estructura, se incluyen las reglas históricas de dimensionamiento. Estas reglas se basaban en ir estableciendo las dimensiones de los diversos elementos de un edificio en función de un parámetro que se consideraba determinante.

Varios tratados de construcción de edificios del siglo XVI recogen reglas muy parecidas en

lugares geográficos relativamente alejados (España, Alemania e Italia) (Huerta, 1990) lo que implica una clara señal de que todos estos tratados se nutrieron de una misma fuente, que posiblemente no fue escrita, pero se consolidó en Europa durante los siglos anteriores.

### Nivel 1

Las ecuaciones que se imponen en los métodos de primer nivel son las de equilibrio. Se parte de una geometría y unas cargas conocidas y mediante cálculos sencillos y rápidos se obtiene un orden de magnitud del problema. Lógicamente las hipótesis que se admiten en el cálculo son poco precisas y puede que no del todo conservadoras.

Aunque en principio tan sólo se aplican las ecuaciones del equilibrio, de forma indirecta se admite un comportamiento del material ya nombrada en este trabajo,

1. Resistencia nula a tracción.
2. Resistencia a compresión infinita
3. Rozamiento infinito.

$$\sum F_{\text{int}} + \sum F_{\text{ext}} = 0$$

*Ilustración 2 (Martínez, 2003)*

En general se trata de un problema indeterminado ya que existen infinidad de soluciones para el mismo, lo que no supone un problema aplicando los teoremas de la plasticidad.

En este nivel se encuentra el análisis límite y las comprobaciones de equilibrio puro que son por un lado sencillas y con una eficacia probada para obtener una primera aproximación al comportamiento de la fábrica.

### Nivel 2

En el segundo nivel los métodos de análisis impondrán dos de los tres grupos de ecuaciones, en general, las de equilibrio y las constitutivas.

$$\sum F_{\text{int}} + \sum F_{\text{ext}} = 0$$

$$\sigma_n = f(\varepsilon_i)$$

*Ilustración 3 (Martínez, 2003)*

Se trata de un problema más riguroso y con mayor necesidad de entrada de datos que los análisis de primer nivel. Los cálculos también se complican.

Lo normal de estos métodos de cálculo es emplear un cálculo a nivel estructura y otro a nivel sección. El primero puede ser un cálculo esencialmente elástico con el que obtener esfuerzos, para después en un cálculo a nivel seccional, tener en cuenta las no linealidades del material. En el caso de estructuras de fábrica, un método cálculo de nivel 2 es el desarrollado en (Martínez, 2003), en el que se plantea la posibilidad de realizar un análisis de la estructura mediante las ecuaciones de equilibrio y un posterior análisis seccional mediante diagramas de interacción de flexo-compresión y cortante. Como en el caso de los métodos de primer nivel la solución es indeterminada.

Una aplicación para el caso de estructuras de fábrica de un método de segundo nivel podría ser una comprobación del equilibrio a nivel estructural apoyado con un cálculo seccional mediante diagramas de interacción.

### Nivel 3

Para el tercer nivel de análisis los datos necesarios son todavía más numerosos. En este nivel de análisis se van a imponer mediante un único cálculo los tres grupos de ecuaciones: de equilibrio, las constitutivas y las de compatibilidad.

$$\sum F_{\text{int}} + \sum F_{\text{ext}} = 0$$

$$\sigma_n = f(\varepsilon_i)$$

$$\varepsilon_{i,n} = \varepsilon_{i,m}$$

*Ilustración 4 (Martínez, 2003)*

Se trata del problema más riguroso y con mayor necesidad de entrada de los diferentes métodos de análisis. Los cálculos también se complican, pero la solución obtenida es única.

En este tipo de cálculos se trabaja directamente con un único modelo. No es posible separar por un lado el comportamiento a nivel estructural y por otro el comportamiento seccional. Se trabaja con tensiones y no con esfuerzos como en los casos anteriores.

En este nivel se pueden destacar las técnicas de micro y macro modelización por medio de elementos finitos, la formulación matricial generalizada y las teorías de daño. Todos ellos potentes recursos que reproducen de manera satisfactoria el comportamiento de la fábrica.

### 1.4.1. MATERIALES

La obra de fábrica es el resultado de la combinación de materiales básicos que se detallan a continuación. Es habitual encontrar fábricas que combinan diversos materiales dando lugar a fábricas mixtas, por tanto, estas composiciones suelen ser las más comunes.

#### 1.4.1.1. PIEDRA

En la construcción de arcos se ha recurrido a los materiales autóctonos o más próximos, con el fin de economizar los trabajos. Pero es evidente que se ha prescindido de las más frágiles.

Los principales factores de su elección son:

- Resistencia
- Durabilidad
- Ductilidad

Los materiales utilizados habitualmente son de alta resistencia a compresión, pero no así a tracción, siendo esta una de sus debilidades. Por otro lado, la piedra que ha de quedar vista y expuesta a los elementos ha de ser capaz de soportar oscilaciones térmicas, así como ser lo suficientemente impermeable como para que sus propiedades mecánicas no se vean alteradas.

Resulta curiosa la recomendación que antiguamente se argumentaba para la elección de la piedra nueva. Según, (Vitruvio, 15 a.c.) se han de escoger las “aprobadas por la naturaleza” y esto consistía en dejar a la intemperie las piedras elegidas durante dos años, a modo de ensayo, y elegir las que mejor resistan para los elementos exteriores.

#### 1.4.1.2. LADRILLO

Se trata de la piedra artificial fabricada a base de arcillas. Hay que remontarse a la era Mesopotámica para encontrar los orígenes del ladrillo. Sus propiedades mecánicas son inferiores a las de la piedra, destacando la baja resistencia a compresión e incluso aún menor la resistencia a tracción llegando a 4% de la resistencia. Estas condiciones varían en función del acabado, distinguiendo entre el ladrillo crudo (propio de construcciones humildes) y el ladrillo cocido en horno. Estos últimos alcanzaron gran importancia durante la época Romana. En cuanto a las dimensiones han ido varando a lo largo de los siglos.

### 1.4.1.3. Mortero

Para conseguir corregir las imperfecciones entre el encuentro de los sillares o ladrillos, se dispone del mortero o argamasa que ayuda a conseguir un asiento uniforme entre piezas. La resistencia de los morteros es aún menor que la de los elementos a los que sirve de unión. La principal cualidad es la adherencia que consigue entre piedras o ladrillos. Originalmente, la propia tierra arcillosa servía de argamasa, aunque pronto fueron sustituidos por los morteros de cal. De nuevo los romanos consiguieron morteros de gran calidad mezclando arena, agua y cal, (calidad que no fue superada hasta el S.XIX.

## 1.4.2. PARTES DEL ARCO, ELEMENTOS Y DIMENSIONES

Existen diversos tratados de construcción que han servido de transmisores del conocimiento, en los que se detalla los nombres y funciones de cada uno de los elementos del arco. Esto es sin duda de gran ayuda ya que el diseño de un arco precisa de un conjunto de definiciones que permita detallar las dimensiones relativas entre elementos.

A continuación, se detallan las principales dimensiones y elementos de un arco de fábrica.

### ELEMENTOS

1. **Dovelas:** Todas las piezas que componen el arco y dispuestas de forma radial.
2. **Dovela clave.** Es la dovela que cierra el arco en su parte superior.
3. **Contra claves.** Son las dos dovelas adyacentes a la dovela clave.
4. **Extradós.** Parte exterior de la dovela.
5. **Intradós.** Parte interior de la dovela.
6. **Salmer.** Es la primera dovela del arranque.
7. **Imposta.** Pieza horizontal que sirve de asiento y transición entre salmer y estribo.
8. **Riñón.** Conjunto de dovelas comprendidas entre el arranque o imposta y la clave
9. **Estribo.** Elemento vertical que sirve de soporte a ambos lados del arco.
10. **Zócalo.** Apoyo de los estribos y unión entre estribo y suelo.
11. **Rosca.** Faja de material de fábrica con entidad portante, comprendida entre intradós y extradós.

### DIMENSIONES

1. **Luz.** Distancia interior entre estribos.
2. **Semiluz.** La mitad de la anchura del arco.
3. **Flecha.** Altura del arco, medida desde el arranque hasta el intradós de la clave.
4. **Espesor.** Dimensión radial de la rosca.
5. **Esbeltez.** Relación entre flecha y luz = (FLECHA / LUZ).
6. **Altura.** Dimensión vertical total desde la base del zócalo a la parte superior del arco.
7. **Generatriz o directriz:** Línea imaginaria inscrita en el interior de la geometría del arco, que esta equidistante entre intradós y extradós.

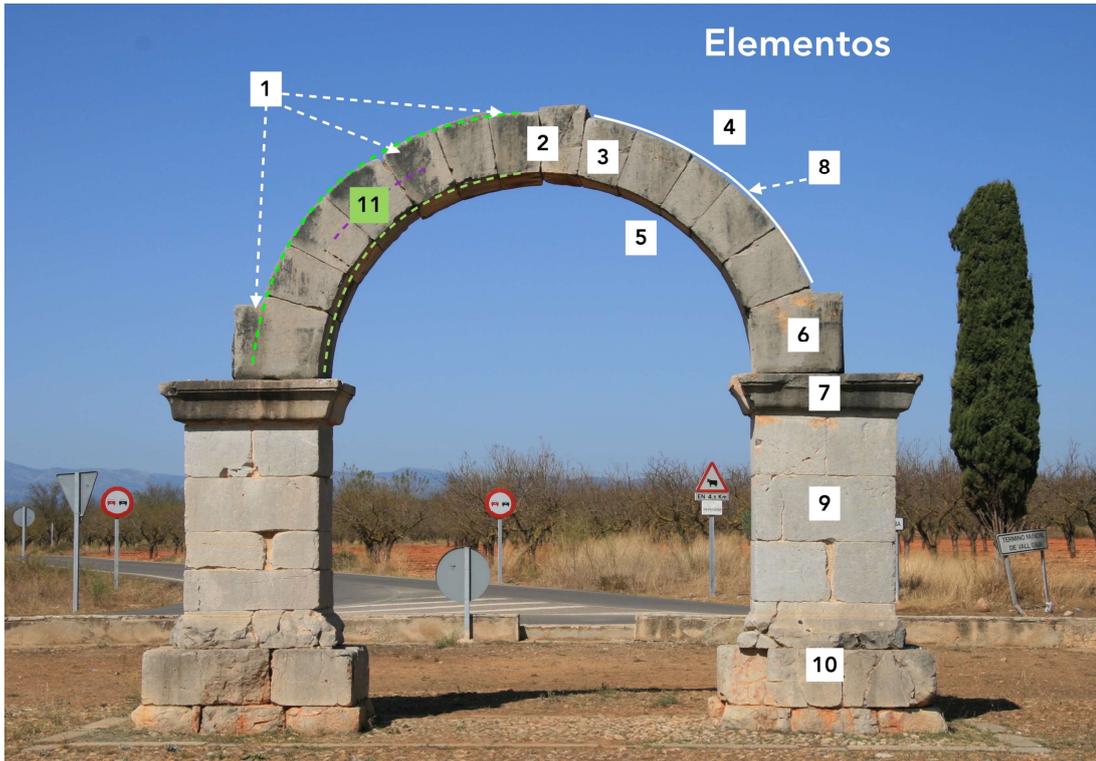


Ilustración 5

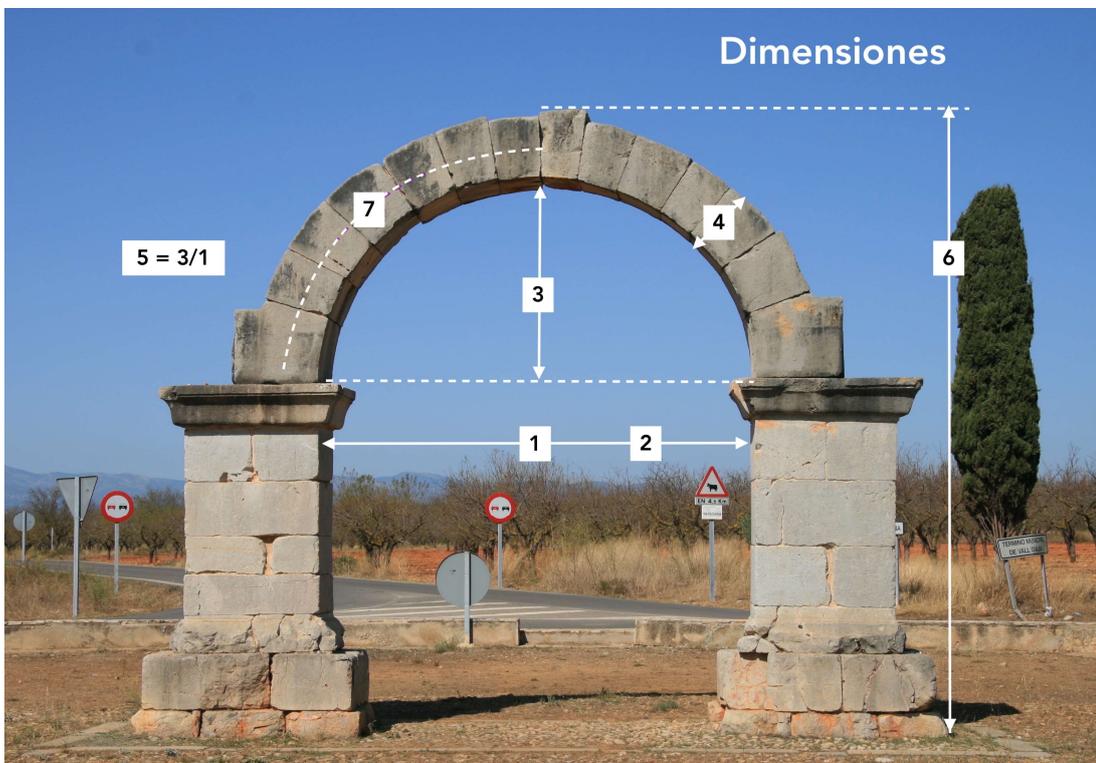


Ilustración 6

### 1.4.3. FUNCIONAMIENTO DEL ARCO

#### 1.4.3.1. CÁLCULO TRADICIONAL O INTUITIVO

La aplicación de la Física y de la Geometría en los procesos del diseño y ejecución estructural arquitectónico han sido siempre de máxima importancia. Pero la aparición de la Estática Gráfica se concreta como una consecuencia de la aplicación de los conceptos que la Geometría Proyectiva había propuesto como alternativa a la Geometría Euclídea, combinados con los conocimientos de la Mecánica Vectorial para la representación de sistemas de fuerzas.

La Dualidad, la Reciprocidad y la Proyectividad de figuras planas y en el espacio, junto con los sistemas focales de fuerzas y las propiedades proyectivas del plano focal y de su foco y los poliedros recíprocos o conjugados, condujeron a la conclusión, expuesta por Karl Culmann, James Clerk Maxwell y Luigi Cremona casi al mismo tiempo, de que los polígonos funiculares y los polígonos de fuerzas son figuras recíprocas. Punto de partida de las aplicaciones prácticas que la Estática Gráfica puso en manos de la inmensa mayoría de los arquitectos e ingenieros desde el último cuarto del S. XIX hasta el último del XX. Nuestra investigación se adentra en la Grafostática, explicando, en primer lugar, los conceptos de la Nueva Geometría, más tarde llamada Geometría Proyectiva, de donde proviene, profundizando en el análisis de sus enunciados, que para muchos matemáticos de esta época (S.XIX), resultaban sorprendentes, o fruto de aventuras vanguardistas poco científicas.

#### PRIMERAS TEORÍAS GRÁFICAS O GEOMÉTRICAS

La estática gráfica aparece antes que la herramienta analítica y ambas avanzan conjuntamente hasta poco después de la mitad del siglo XIX, momento en que, con la aparición del ordenador y su consolidación, la estática gráfica empieza a desaparecer, dejando protagonismo a la herramienta numérica.

Muchos han sido los autores que han contribuido a entender el funcionamiento del arco a través de métodos gráficos durante más de cinco siglos. En este apartado se tratan las líneas de desarrollo de las primeras aportaciones hasta la actualidad.

## LEONARDO DA VINCI

Leonardo Da Vinci (1452-1519) fue el primero en intentar estudiar el funcionamiento mecánico de los arcos en el Renacimiento S. XV. En 1500, introduce la base fundamental de la estática gráfica con la ley del paralelogramo. Esta fue aplicada en sus dibujos acerca de la descomposición de fuerzas, aplicándolo después en sus primeros inventos.



### Puente Da Vinci

*“el arco no es más que una fuerza causada por dos debilidades: en efecto, el arco en los edificios está compuesto por dos cuartos de círculo, y cada uno de ellos, débil por sí mismo, desea caer, pero oponiéndose cada uno a la ruina del otro, las dos debilidades se transforman en una sola fuerza... los cuartos se empujan mutuamente”, además indica que “el arco trabaja de forma análoga puesto del derecho que del revés”,*

Esto último demuestra que conocía que la catenaria debía ser el antifunicular de las fuerzas sobre las dovelas del arco.

Leonardo Da Vinci es quien establece uno de los primeros estudios geométricos y estructurales de la reciprocidad en torno al año 1500. Un ejemplo de la utilización de una estructura recíproca es el puente en el código Madrid de Da Vinci donde describe la construcción de un puente autoportante (imagen 1), como herramienta militar. Esta consiste en un conjunto de elementos apoyados entre sí en un circuito cerrado, la base de su equilibrio está en que cada elemento se apoya en otro, bajo el principio de la auto sustentación.

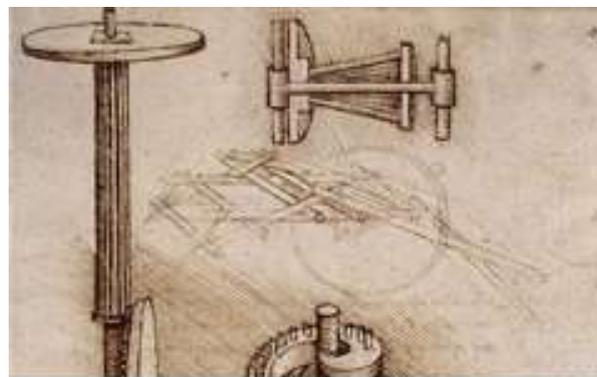


Ilustración 7- Puente portable. Código Madrid.

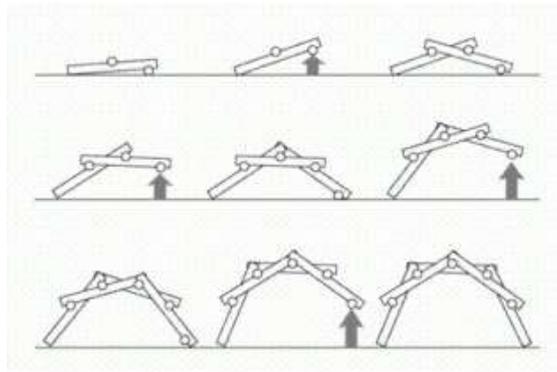


Ilustración 8. Esquema de armado de puente autoportante.

Fuente [https://wiki.ead.pucv.cl/Archivo:Catenaria\\_estelle14.jpg](https://wiki.ead.pucv.cl/Archivo:Catenaria_estelle14.jpg)

El puente consiste en piezas de madera encastradas entre sí, de modo que cada tramo transversal queda aprisionado entre dos tramos longitudinales. Describiendo una forma arqueada, que corresponde a la curva resultante de la longitud de los elementos longitudinales y de la fuerza de gravedad. Esta estructura se autosostiene dada su disposición geométrica, de modo que no requiere de apoyos adicionales a sus dos bases, permitiendo salvar una luz que queda determinada por la magnitud de sus piezas, que definen la amplitud de la curva.

## RODRIGO GIL DE HONTAÑÓN

Hasta el s. XVII las teorías sobre el dimensionado de los arcos se recogerán en numerosos tratados de arquitectura. Se trata en todos los casos, de reglas geométricas que tratan de determinar el espesor del arco y las dimensiones de los estribos para compensar los empujes horizontales.



Uno de estos tratados es el de **Rodrigo Gil de Hontañón** (1500-1577), El manuscrito nunca publicado, está datado entre 1544 y 1554, y copiado antes de desaparecer por Simón García en 1681.

### 1.4.3.2. CÁLCULO CIENTÍFICO

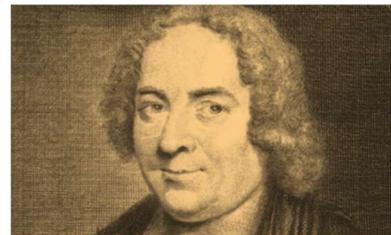
#### SIMON STEVIN

Simon Stevin en 1586 fue el primero en anticipar el teorema de Varignon relativo a la resultante de las fuerzas y momentos en un cuerpo (Stevin, 1586), el cual resultaría el inicio de la estática gráfica. Stevin demostró el equilibrio de un cuerpo sobre un plano inclinado gráficamente.



#### PIERRE VARIGNON

El matemático francés Pierre Varignon, es el primero en tratar conceptos de la estática gráfica, sin definirla como tal, en 1725 en su trabajo "Nouvelle Mécanique ou Statique" (Varignon, 1725). A partir de un experimento en el que colgaba una serie de pesos de un hilo y analizaba la forma generada por dicho hilo. Comienza a introducir la idea del polígono funicular (forma generada por el hilo) y polígono de fuerzas (diagrama que representa el flujo de las fuerzas en el interior de la geometría). Estudia la relación que existe entre las fuerzas ejercidas por dichos pesos sobre el hilo con la forma generada por el hilo.



#### KARL CULMANN

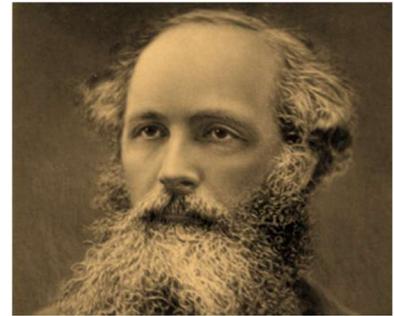
El ingeniero alemán Karl Culmann profundiza en la relación existente entre el polígono funicular y el polígono de fuerzas (idea ya introducida por Varignon), en su obra publicada en 1865 "Die graphische Statik" (CULMANN.K, 1865). Culmann no publicó su trabajo terminado ya que trabajó en el campo ideal, fue su alumno Wilhelm Ritter quien publicó entre 1888 y 1906 el trabajo sobre la estática gráfica más reconocido, el libro técnico formador de generaciones de ingenieros editado en cuatro volúmenes (RITTER.W, 1888-1906). Culmann estudió la relación directa entre el polígono de fuerzas y el funicular del sistema de



fuerzas y sus reciprocidades (fig.4). Numerosos autores colocan a Culmann como el origen de la estática gráfica. Culmann consideraba al dibujo como el verdadero lenguaje de lo ingenieril oponiéndose al método del análisis matemático. Daba tal valor a la estática gráfica debido a la rápida comprensión que el sistema aporta y su relación inmediata entre la forma y las fuerzas.

### JAMES CLERK MAXWELL

James Clerk Maxwell (físico británico) en 1870 estableció que los nodos, líneas y áreas de la geometría tienen su recíproco en el polígono de fuerzas (MAXWELL.JC, 1870): cada nodo de la geometría se ve representado en un área del polígono de fuerzas, cada línea de la geometría en otra línea del polígono de fuerzas, y cada área de la geometría en un nodo de las fuerzas. La relación recíproca que expuso Maxwell entre elementos era de perpendicularidad.



## 1.4.4. DETERMINACION DE LA ESTABILIDAD A TRAVES DE LA GEOMÉTRICA

### 1.4.4.1. HIPOTESIS PRINCIPALES

La construcción de los arcos de fábrica se ejecuta con materiales compuestos y heterogéneos. Este hecho se convierte en el primer gran problema puesto que no conocemos el comportamiento real del material con el que estamos trabajando. Esto nos obliga a simplificar las hipótesis de partida con el fin de decantarnos del lado de la seguridad. A continuación, se exponen las consideraciones que se realizaron en los siglos XVIII y XIX y fueron sistematizadas por el profesor (Heyman, 1969)

#### NO RESISTENCIA A TRACCIÓN

Se considera que la fábrica es muy débil a las solicitaciones a tracción y se considera una resistencia nula a efectos de análisis.

#### RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL MATERIAL CUASI INFINITA

Por el contrario, la resistencia a compresión puede considerarse infinita porque incluso en edificios de gran magnitud, las tensiones soportadas por el material están muy lejos de las tensiones de rotura. (Santiago, 2005), expone un ejemplo claro que explica este hecho. La tensión media en la base de los pilares, tambor y cúpula de San Pedro en Roma, pesan 400.000kN y esta carga repartida en la cimentación, supone que ésta tan solo debe soportar 1,7 N/mm<sup>2</sup>, muy alejado de la tensión de rotura de cualquier piedra. Aproximadamente un 5% de su capacidad.

#### NO DESPLAZAMIENTO POR ROZAMIENTO

Por último, se considera que no puede haber deslizamiento entre dovelas ya que el rozamiento es muy elevado y el peso favorece que este efecto no se produzca.

#### 1.4.4.2. LÍNEAS DE EMPUJES

La forma en la que los esfuerzos internos que soporta un arco de fábrica viajan a través de la estructura, se denomina Línea de Empujes. (Huerta, 1996)

Estas fuerzas pueden variar o moverse debido a variaciones en las acciones de las cargas, ya sea por las cargas del peso propio o por verse incrementado por las cargas puntuales o accidentales que gravitan sobre él. Conocer con exactitud esta trayectoria ha sido la gran incógnita para resolver. Los maestros albañiles de antaño, de forma intuitiva, intentaron establecer reglas de proporciones geométricas que ayudaron a construir de forma segura. Estas reglas basadas en la experiencia hicieron entender que la estabilidad del arco depende directamente de la relación de esta línea de empujes y la geometría del propio arco.

Como norma, el semicírculo ha sido tomado como la geometría que, de forma empírica, funcionó como solución para asumir la línea de esfuerzos dentro de la fábrica. La experiencia basada en el ensayo error proporcionó a los maestros albañiles la posibilidad de determinar qué proporciones del arco funcionaban con mayor éxito.

Pero fue en el S XVII cuando Robert Hooke (1670) hizo un descubrimiento revolucionario a nivel estructural en relación con la línea de empujes y la curva que forman las fuerzas que recorren un arco de fábrica. Se dio cuenta de que estas fuerzas siguen la forma de la catenaria invertida y la forma analítica de expresarlo es  $Y = \cosh \alpha$ , (coseno hiperbólico).

Lo “mágico” de este descubrimiento es que cualquier arco que solo sostenga su propio peso, podría reducir su sección a la mínima expresión sin colapsar. Siempre y cuando la forma de este siguiera la forma de la catenaria.

### 1.4.4.3. EQUILIBRIO Y SEGURIDAD

Estos son los principales conceptos perseguidos por los diferentes autores en los últimos siglos y la principal conclusión es que el equilibrio se alcanza a través de la geometría, (Huerta, 2019). Esto quiere decir que geometría del elemento estructural, (que soporta las cargas) ha de ser capaz de contener la línea de esfuerzos dentro de esta geometría. Como ya se ha comentado, la línea de esfuerzos o empujes, varía de posición en función de la variación de las condiciones de contorno. Las fuerzas accidentales o de uso, pueden variar la trayectoria de esta línea. Por este motivo el equilibrio debe estar dotado de un coeficiente de seguridad, **Coficiente Geométrico de Seguridad**.

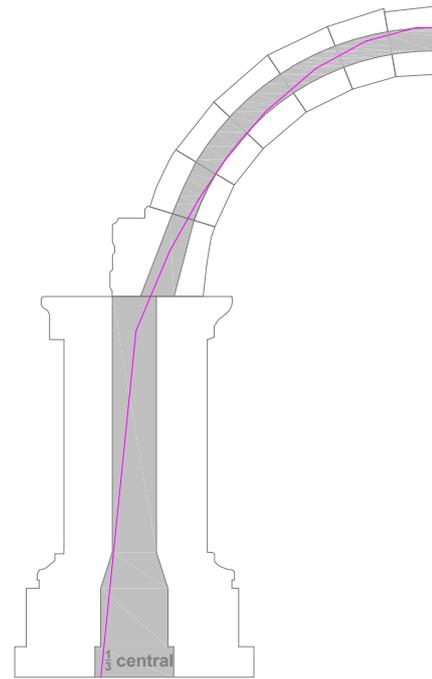


Ilustración 9. Verificación de estabilidad en Arco Romano de Cabanes

Este coeficiente no es más que la distancia relativa entre las fibras por las que se moverá la Línea de Empujes y la última fibra de intradós o extradós de la geometría con capacidad estructural.

#### COEFICIENTE GEOMÉTRICO DE SEGURIDAD EN ARCOS

El coeficiente geométrico de seguridad relaciona el espesor de la rosca real  $E$  y el espesor mínimo  $e$ , en el que se han de contener los esfuerzos de la Línea de Empujes. Tradicionalmente se ha considerado que la relación debe ser superior a **3**, en el caso de los arcos. De este modo se puede garantizar que la Línea de Empujes podrá adquirir infinidad de posiciones validas y seguras, siempre que se mueva en el rango de empuje máximo y mínimo que se establece en el 1/3 central. Es cierto que este grado **3** de coeficiente geométrico de seguridad, resultara excesivo, siendo más aconsejable dejarlo en grado **2** en el caso de los arcos. (Heyman, 1982).

#### COEFICIENTE GEOMÉTRICO DE SEGURIDAD EN ESTRIBOS

En el caso de los estribos el coeficiente geométrico de seguridad es suficiente con que sea superior a **3**. Para que esto suceda, la resultante de todos los esfuerzos debe quedar dentro del tercio central. En realidad, lo importante es que este dentro del núcleo central de inercia para evitar la aparición de fisuras del material que llevaría a una reducción de la capacidad del material y de su seguridad, (Ochendorf H. y., 2003).

## 1.5. MÉTODO DE CÁLCULO UTILIZADO

Para la comprobación de la estabilidad del Arco Romano de Cabanes y la bóveda de la Ermita de san Francisco Javier de Soneja, sujetos a estudio en este TFG, se emplearán 2 métodos,

- Método Méry para analizar el grado de estabilidad del Arco Romano de Cabanes. Método que está basado en el trazado de polígono funicular para observar si la Línea de Empujes transcurre por el núcleo del  $1/3$  central, y
- El análisis del arco límite empleado en el cálculo de la estabilidad de la bóveda de la Ermita de San Francisco Javier de Soneja.

Se han seleccionado estos métodos porque tienen la ventaja de poder elaborar con relativa sencillez análisis de estabilidad ya que los parámetros necesarios para su elaboración son relativamente pocos y los resultados obtenidos son de sencilla interpretación.

## 1.6. EL ARCO ROMANO DE CABANES

### 1.6.1. LOCALIZACIÓN

El arco se encuentra situado en el municipio de Cabanes, en la provincia de Castellón, y en medio de la llanura conocida como el Pla de L'Arc,

### 1.6.2. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Esta zona que durante mucho tiempo fue muy apta para el cultivo ayudo a que se convirtiera en una zona con una importante densidad de poblamiento a lo largo de la historia. Este debió ser un motivo por el cual una civilización como la romana, decidiera construir este monumento. No en vano Cabanes se convirtió en un hito de referencia en la comarca desde muy antiguo, y como tal se encuentra en la carta puebla de Cabanes del año 1243.

### 1.6.3. ESTADO DE CONSERVACIÓN ACTUAL

Del arco de Cabanes, que fue declarado monumento Histórico-Artístico por decreto de 3 de junio de 1931, se conservan aún en pie los dos pilares y la rosca del propio arco, así como algunos dibujos antiguos que, en su mayoría, lo reproducen en un estado similar al actual.

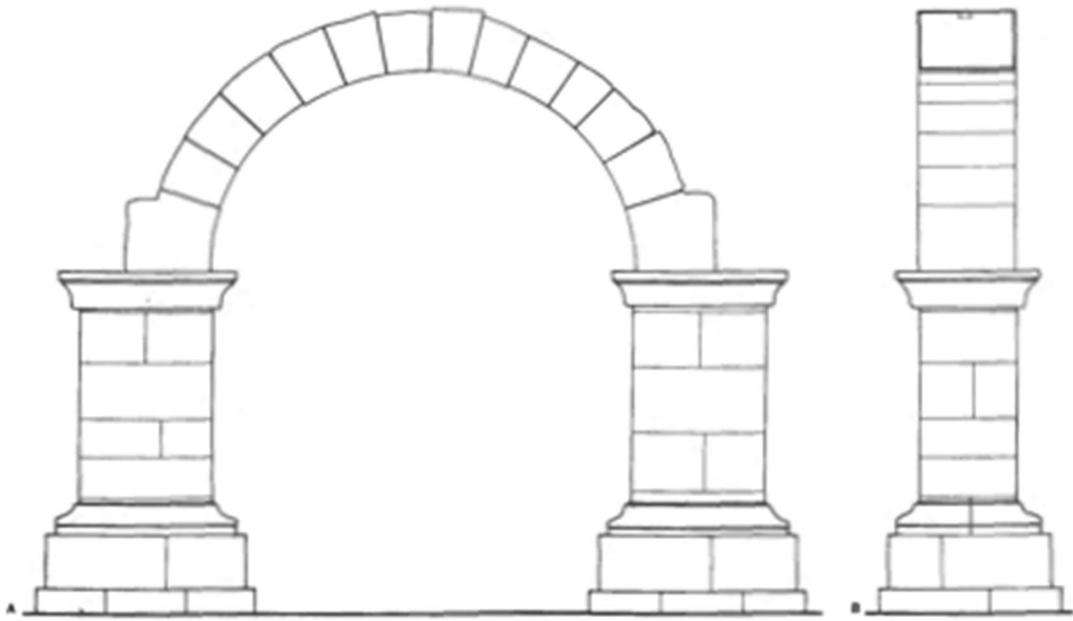
### 1.6.4. GEOMETRÍA

Lo que se conserva del Arco de Cabanes corresponde a los dos zócalos del arco de un monumento de un solo vano. Los dos estribos son sencillos, y están compuestas, de abajo a arriba, por un pequeño zócalo que tiene la finalidad de asentar el arco sobre el terreno natural y que se pierde por debajo del pavimento colocado en el año 1873. La erosión producida por el paso del tiempo es muy acusada y resulta imposible medir sus dimensiones originales. El zócalo, compuesto en cada uno de los estribos por cuatro sillares de dimensiones similares de 51,3 x 189 x 156 cm. en el pilar suroccidental, mejor conservado, aunque el correspondiente al pilar nororiental es ligeramente más alto 1,9 cm. que el otro, con lo que se palía en parte el hecho de que el plano de asentamiento de los

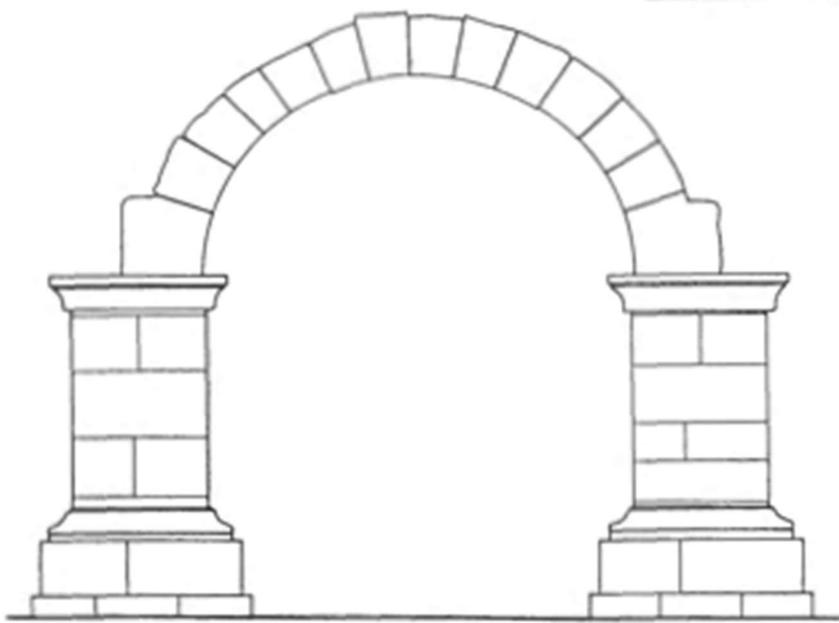
sillares no se encuentre a la misma altura en ambos, sino ligeramente más elevado en el suroccidental 2,6 cm.

El cuerpo principal del estribo está delimitado, por arriba y por abajo, por dos molduras bastante similares. La inferior, labrada en dos sillares longitudinales. Por encima, otro filete, bastante más pequeño, constituye el punto de unión con el cuerpo principal del estribo. Estos están compuestos por una serie de sillares que en un caso son seis, dispuestos en tres hiladas de a dos, de aproximadamente la misma altura, y en otro (el suroccidental) son siete, distribuidos de la misma forma sobre un único sillar inferior. La altura total de los pilares es de 184,6 cm., y su sección en planta, de 126,3 x 93,3 cm. El nororiental es de 7,1 cm. más alto que el otro, siendo su altura total, desde el nivel actual del suelo, de 324,8 cm., en tanto que la del suroccidental es de 325,7 cm. Esta diferencia, de tan sólo 0,9 cm., se hace más acusada en cambio al nivel de la línea de imposta, donde llega a alcanzar los 2,3 cm. a favor del primero. Esta diferencia de cota, patente también tanto en la zapata (+ 2,6 cm.) como en el zócalo (+ 2,5), da como resultado un cierto desequilibrio que pudo haber influido en la estabilidad del arco y de su entablamento. Sobre la imposta del arco, se asientan los salmeres, formados por sendos sillares escuadrados en sus caras laterales, en tanto que la trasera, muestra dos planos: uno corto, ligeramente inclinado hacia abajo, que constituye el soporte de la siguiente dovela, y otro largo, vertical. Las dovelas siguientes muestran la forma de cuña característica de los arcos romanos, cuyo extradós se aproxima bastante a la forma circular. Siete de las dovelas centrales tienen un hueco en el extradós, y al menos las dos contiguas de cada lado lo tienen en las caras internas. Sus dimensiones medias son 6 x 10 x 4 cm (Abad Casal, 1988).

Aparte de estas consideraciones de orden técnico, se hay que destacar la escasa simetría existente entre los pilares del arco, con sillares de diferentes dimensiones y alturas, e incluso con cuatro hiladas de sillares en uno de ellos y tres en otro, y la inexistencia de una clave en el arco, ya que el número de dovelas (catorce, incluyendo los salmeres), lo impide.



*Ilustración 10* Alzado de la cara SE y sección del monumento (Abad Casal, 1988)



*Ilustración 11* Alzado de la cara NO (Abad Casal, 1988)

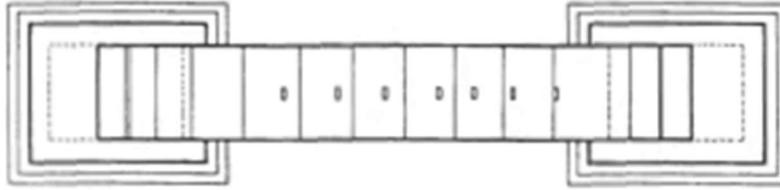


Ilustración 12 Planta del monumento (Abad Casal, 1988)

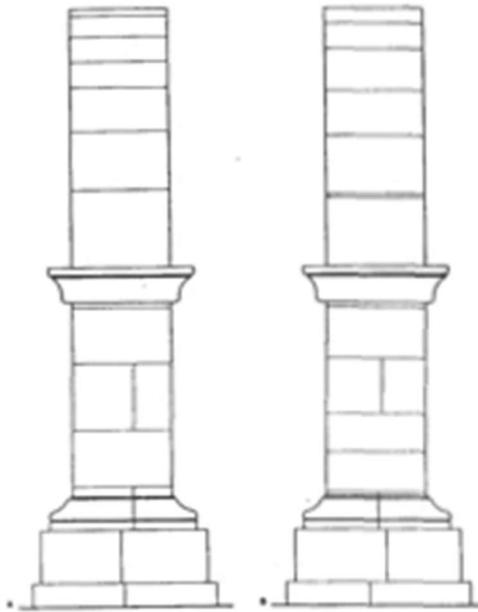


Ilustración 13 Alzado cara NE y cara SE (Abad Casal, 1988)

### 1.6.5. MATERIALES

El monumento de un solo vano está construido con piedra caliza autóctona, de color gris azulado. Entre los sillares de los estribos, se encuentra restos de una capa de mortero, que parece corresponder a la obra original. Esto desmiente la afirmación, de que la obra se encuentra realizada en seco. Las dovelas de la rosca del arco muestran la forma de cuña característica de los arcos romanos. Sus juntas también presentan restos de mortero y algunas pequeñas cuñas del mismo tipo de piedra

## 1.6.6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD



Ilustración 14 (Castellon Virtual)

El Arco Romano de Cabanes, es un monumento con más de 18 siglos de antigüedad y aún sigue en pie. Esto no es por casualidad, los romanos desarrollaron la construcción de arcos y bóvedas de medio punto, consiguiendo estructuras robustas y sobredimensionadas, que han sobrevivido hasta nuestros días.

**¿Cuál será su grado de estabilidad geométrica?**

El procedimiento de verificación de la estabilidad por el método Méry nos permitirá determinar de forma sencilla la trayectoria de la Línea de Empujes y poder así verificar si se encuentra dentro de la geometría y en qué grado de seguridad. apartado 1.4.4.3 página 29

### RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE VERIFICACION DE LA ESTABILIDAD METODO MÉRY

1. Trazar un Polígono de fuerzas de polo arbitrario.
2. Determinar la resultante  $R$ .
3. Trazar el tercio central y fijar la posición del  $E$  min. y  $E$  máx.
4. Cortar la  $R$  en  $h$  y  $e'$ .
5. Unir  $h$  y  $e'$  e  $Q$ .
6. Trazar paralela y determinar el polígono de distancia para el  $E$  máx. y  $E$  min.

El método Méry se desarrollará en el apartado 2.1 página 52

### TRAZADO DE ESFUERZOS MÍNIMOS.

Es necesario realizar el trazado de los polígonos por tramos, puesto que el funicular solo puede pasar por dos puntos fijos por donde queremos que pase la línea de esfuerzo. En el primer tramo Ilustración 15, el punto de inicio tiene que pasar horizontalmente en la clave, por el margen más próximo al extradós del  $1/3$  central y tangente en el límite del intradós

del  $1/3$  central en el salmer.

Esta línea nos define por completo la magnitud del empuje horizontal, así como la dirección de la reacción en la base. Podemos ahora dibujar la línea de empujes en el tramo de salmer y estribo Ilustración 16. para comprobar que en este caso el arco además de ser estable, la línea de empujes está contenida en todos sus puntos dentro del núcleo central de inercia de las secciones.

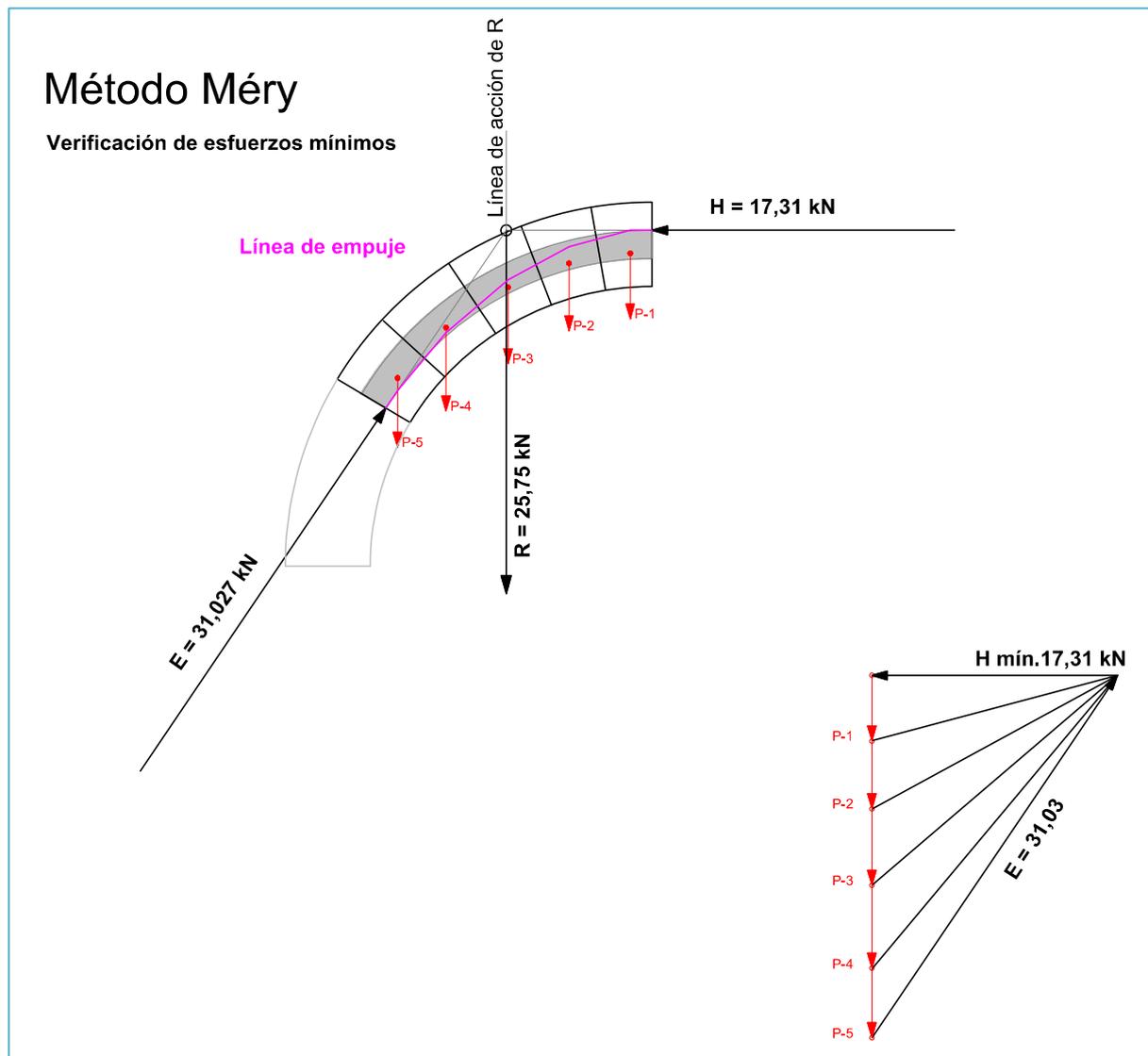


Ilustración 15 Cálculo del empuje mínimo con coeficiente de seguridad grado 3, dado que la Línea de Empujes no sale del  $1/3$  central (núcleo de inercia)

### Verificación de estabilidad

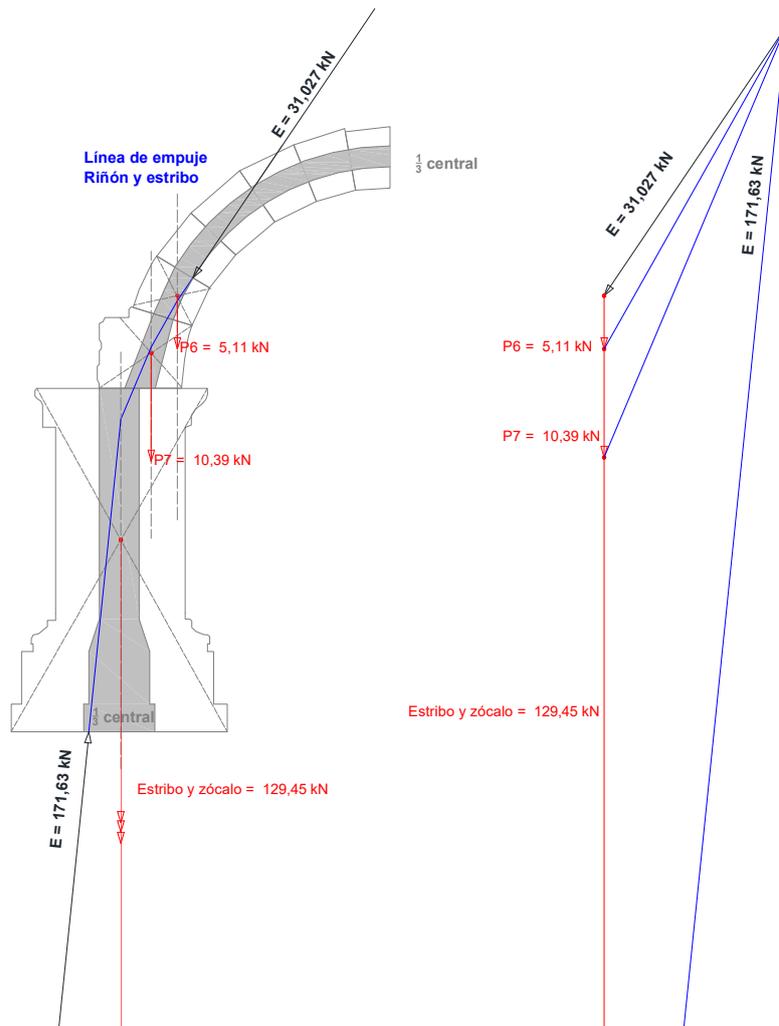


Ilustración 16 Polígono funicular y de fuerzas hasta cimentación.

### 1.6.7. RESULTADOS

El criterio de aceptación para considerar que el arco es estable es el explicado en el apartado 1.4.4.3 EQUILIBRIO Y SEGURIDAD página 29. Se puede observar que la resultante de Línea de Empujes no se sale de la geometría del estribo. Esto significa que el arco en su conjunto será estable. Además, lo es con un grado geométrico de seguridad **3** ya que esta línea se encuentra dentro del  $1/3$  central.

Esta solución geométrica del Arco Romano de Cabanes es segura y goza de un margen de seguridad suficiente que permitirá reacomodar la distribución de cargas.

## 1.7. ERMITA DE SAN FRANCISCO JAVIER DE SONEJA

### 1.7.1. LOCALIZACIÓN.

El ermitorio de San Francisco Javier, este situado en la calle del Maestro Aguilar, 16, del municipio de Soneja, Castellón.

### 1.7.2. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Tradicionalmente se ha datado en el siglo XVI aunque la primera noticia que hace referencia a ella es de 1714, con lo que más bien habría que fijar la fecha de su construcción a finales del siglo XVII. En todo caso su antigüedad es venerable y ha pasado por períodos de olvido y abandono:

Según indicaba una nota parroquial de 1738 (ya desaparecida), parece ser que fue costeada por Josefa Gil de Miguel. Pero a falta de datos documentales más precisos, no se puede concretar la fecha de su construcción, pero dadas las similitudes que presenta su fábrica respecto a la iglesia vieja, hace pensar que su antigüedad se remonta a la primera mitad del s. XVII.

Desde 1777, con motivo del Decreto de 10 de mayo, hasta los años 60 del último siglo se destinó a escuela de niños. En 1980 el Ayuntamiento devolvió a la Iglesia Católica el inmueble, siendo restaurada en 1982. Su uso para el culto se limita a unos pocos días al año.

### 1.7.3. ESTADO ACTUAL DE CONSERVACIÓN

La cubierta se encuentra gravemente afectada por dos grietas que recorren su techo y cubierta longitudinalmente, debido al lento pero progresivo vencimiento de los muros laterales. En consecuencia, la cubierta corre peligro de un futuro resquebrajamiento y, tal vez, desplome. En 1919 se taparon ya estas grietas, según consta en las inscripciones de una pared: "Se retaparon estas grietas el día 27 de octubre de 1919 por Rafael Fornas, Vicente Capilla / Francisco Simón de Segorbe / Soneja 27 octubre 1919".

ELEMENTOS IMPROPIOS: La espadaña requiere ser hecha de sillería, pues la restauración de 1982 tan sólo imitó tal sillería.

ESTADO DE CONSERVACIÓN: Malo

#### 1.7.4. GEOMETRÍA

De planta rectangular, posee una sola nave de 164 m<sup>2</sup> de superficie, con cubierta de teja a dos vertientes, coro alto a los pies, sacristía y casa del ermitaño. La fachada muestra una portada de medio punto adovelada, flanqueada por dos ventanas y con un pequeño vano sobre ella. Remata la fachada una espadaña de un solo cuerpo (restaurada en 1982) que contiene una campana barroca, cuya epigrafía muestra la fecha 1691.

El interior es de una sola nave con bóveda de cañón con lunetos horadados y bóvedas de crucería en su primer tramo, soportada toda ella por pilares en los laterales. Tiene una hornacina en el presbiterio con una imagen de san Francisco Javier en escayola, del s. XIX..

Con posterioridad hubo modificaciones en su estructura. En 1770 se alargó la nave un tercio con una crujía más a la altura del presbiterio, se construyó la sacristía y se eliminó el pórtico que existía en la fachada.

#### 1.7.5. MATERIALES

Su fábrica es de mampostería con sillares en las esquinas y ladrillo en la comisa lateral. La fachada, al igual que las ventanas frontales y el pequeño vano sobre la puerta, son de sillería.

### 1.7.6. ANÁLISIS LIMITE



Ilustración 17

El ermitorio de San Francisco Javier de Soneja, Ilustración 17 presenta en la actualidad una patología que, en principio, parece un síntoma de un problema que puede comprometer la estabilidad de la bóveda de cañón. Se trata de una gran grieta que cruza longitudinalmente la nave Ilustración 66. Fisura en la bóveda de cañón de la Ermita de San Francisco Javier. Es evidente que hasta el momento de la reducción de este TFG es estable, pero,

#### ¿cuánto falta para que deje de ser estable?

Sería interesante poder tener una idea del grado de seguridad que tiene esta estructura.

El concepto de arco límite consiste en comparar el espesor del arco real  $E$  con el espesor que tendría el arco de espesor mínimo o límite  $e$ . (Heyman, 1969), establece la relación entre los ángulos de arranque de los arcos y el ángulo de formación de las rotulas que convierten al arco en un mecanismo. En función de estos datos se consigue un coeficiente geométrico de seguridad, servirá como dato de partida para definir los puntos de formación de rotulas y utilizarlos como puntos de paso del polígono funicular.

#### RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO:

- a) Definir ángulo  $\alpha$
- b) Determinar el coeficiente  $K$
- c) Deducir el espesor mínimo  $e$ ,
- d) Angulo  $\beta_0$  de formación 4ª y 5ª rotula
- e) Trazar el funicular que pase por los 2 puntos, extradós de la rótula de la clave y en el intradós de la 4ª rotula, ambos dentro del rango del espesor mínimo  $e$ .

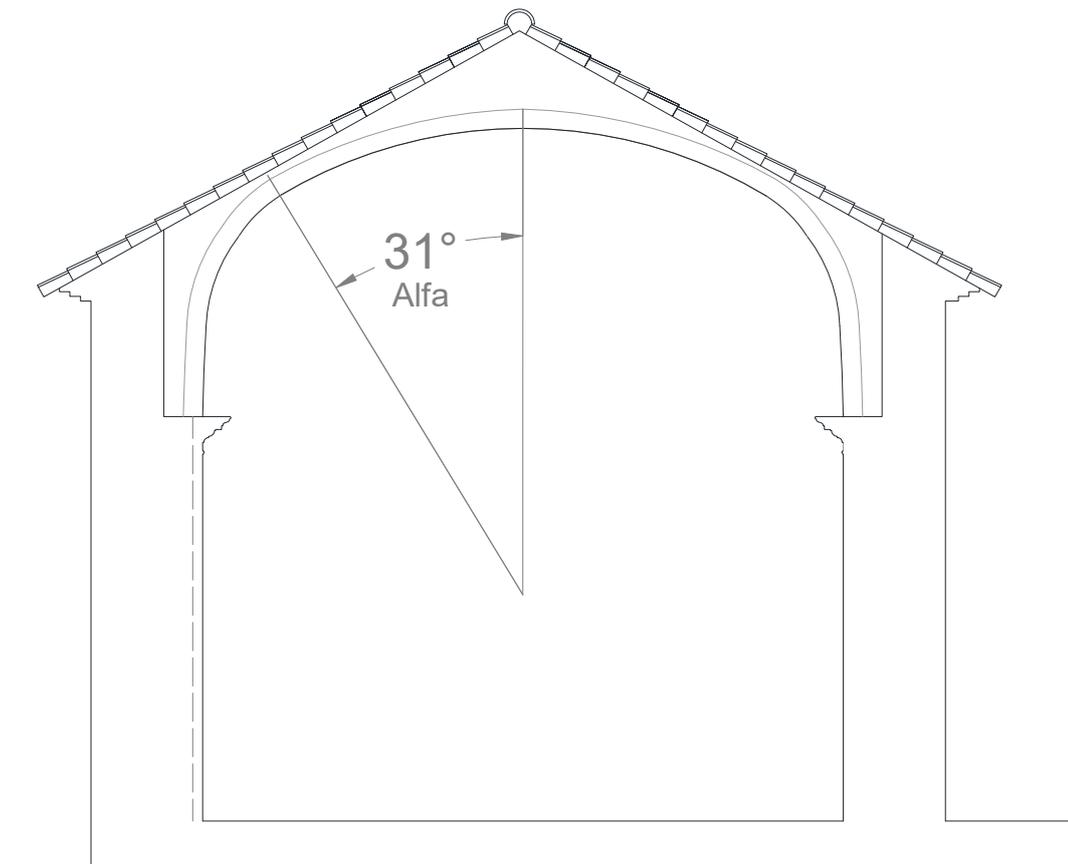
El procedimiento se desarrolla en el apartado 2.2 página 65

En este método, el trazado del funicular en esfuerzo mínimo ha de pasar por el interior del núcleo central que formaría el espesor mínimo  $e$ .

Aplicando el procedimiento y con los datos de partida del ángulo  $\alpha$ , en este caso  $31^\circ$  Ilustración 18, y el espesor del arco limite es tan solo de 0,6 cm. Ilustración 19 deducido con el método. Trazaremos el polígono funicular del primer tramo puesto que la condición es que la Línea de Empujes pase por el extradós de este espesor mínimo en la clave y el intradós del espesor mínimo en la formación de la 4ª / 5ª rotula. Tal y como se indica en la Ilustración 20.

*El resultado del empuje se ira transmitiendo, dibujando los funiculares de las cargas sucesivas hasta llegar al base del muro.*

Ilustración 21, Ilustración 22 y Ilustración 23



*Ilustración 18. Posición del ángulo  $\alpha$*

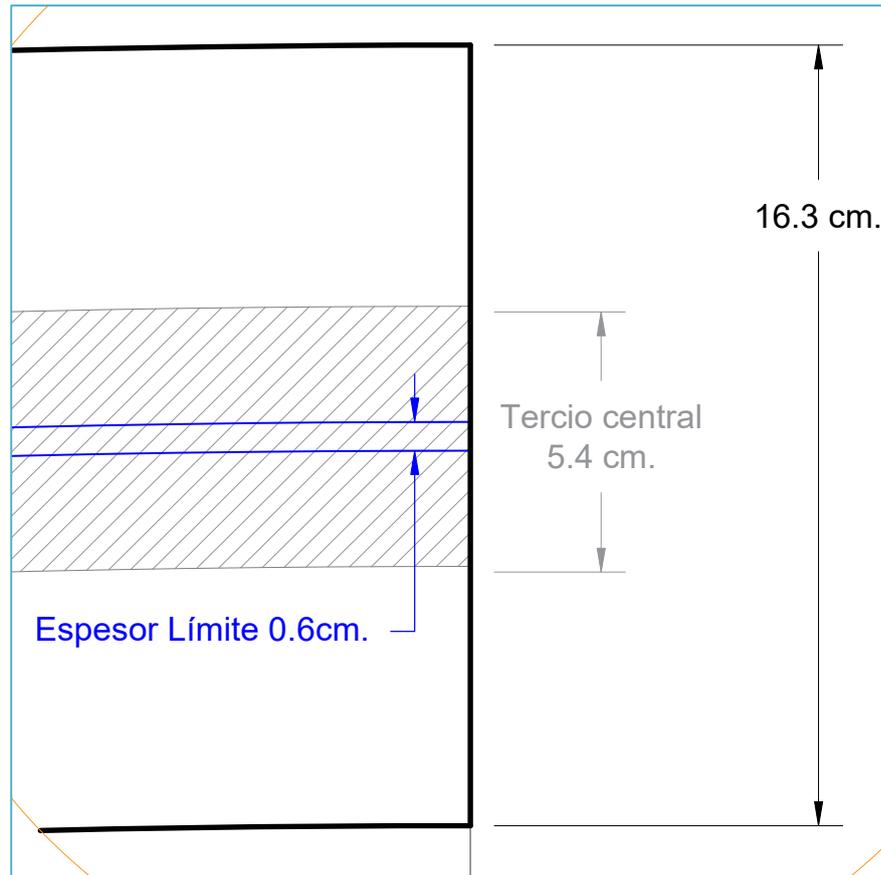


Ilustración 19. comparación del espesor límite con el núcleo del 1/3 central

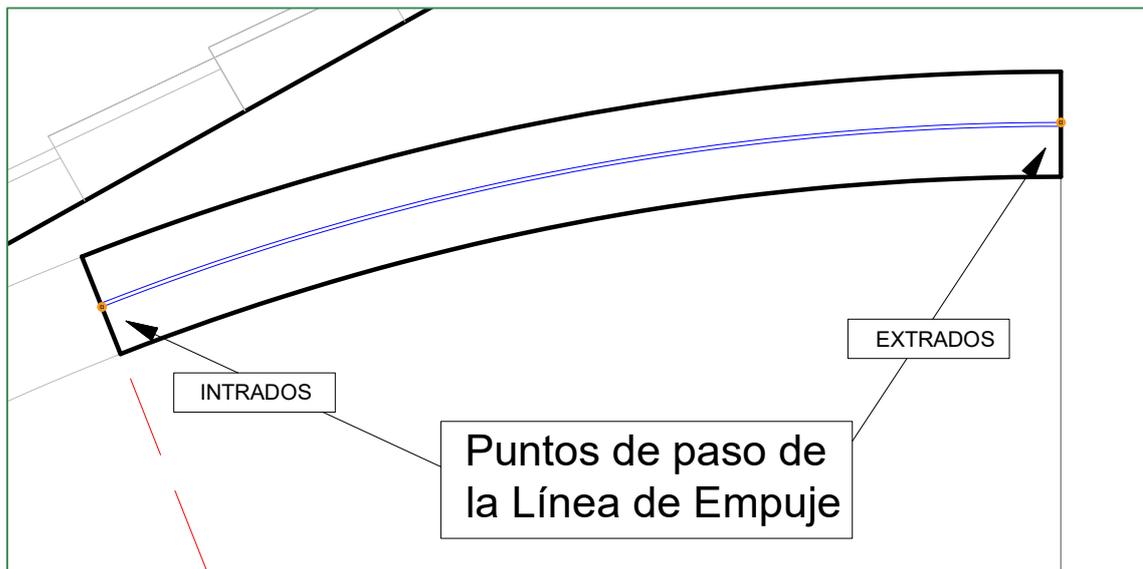


Ilustración 20 Posición de las rotulas, puntos de paso del funicular.

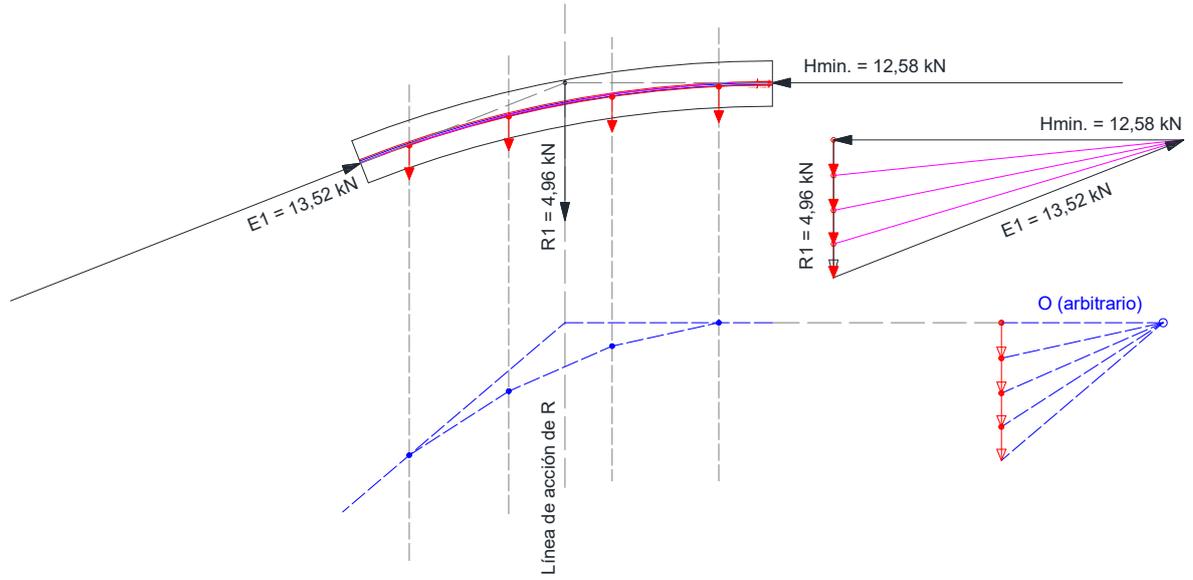


Ilustración 21. Funicular, tramo 1

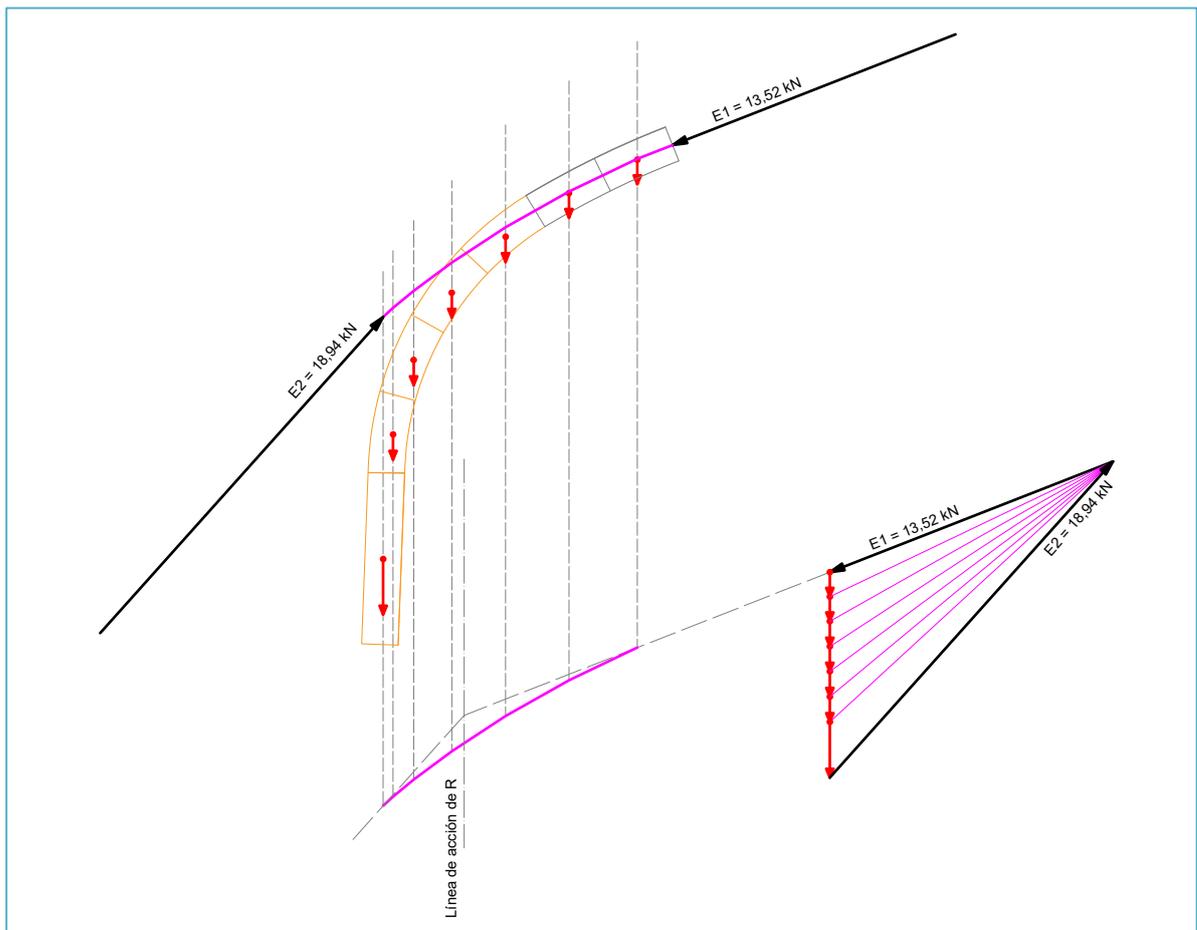


Ilustración 22. Funicular, tramo 2

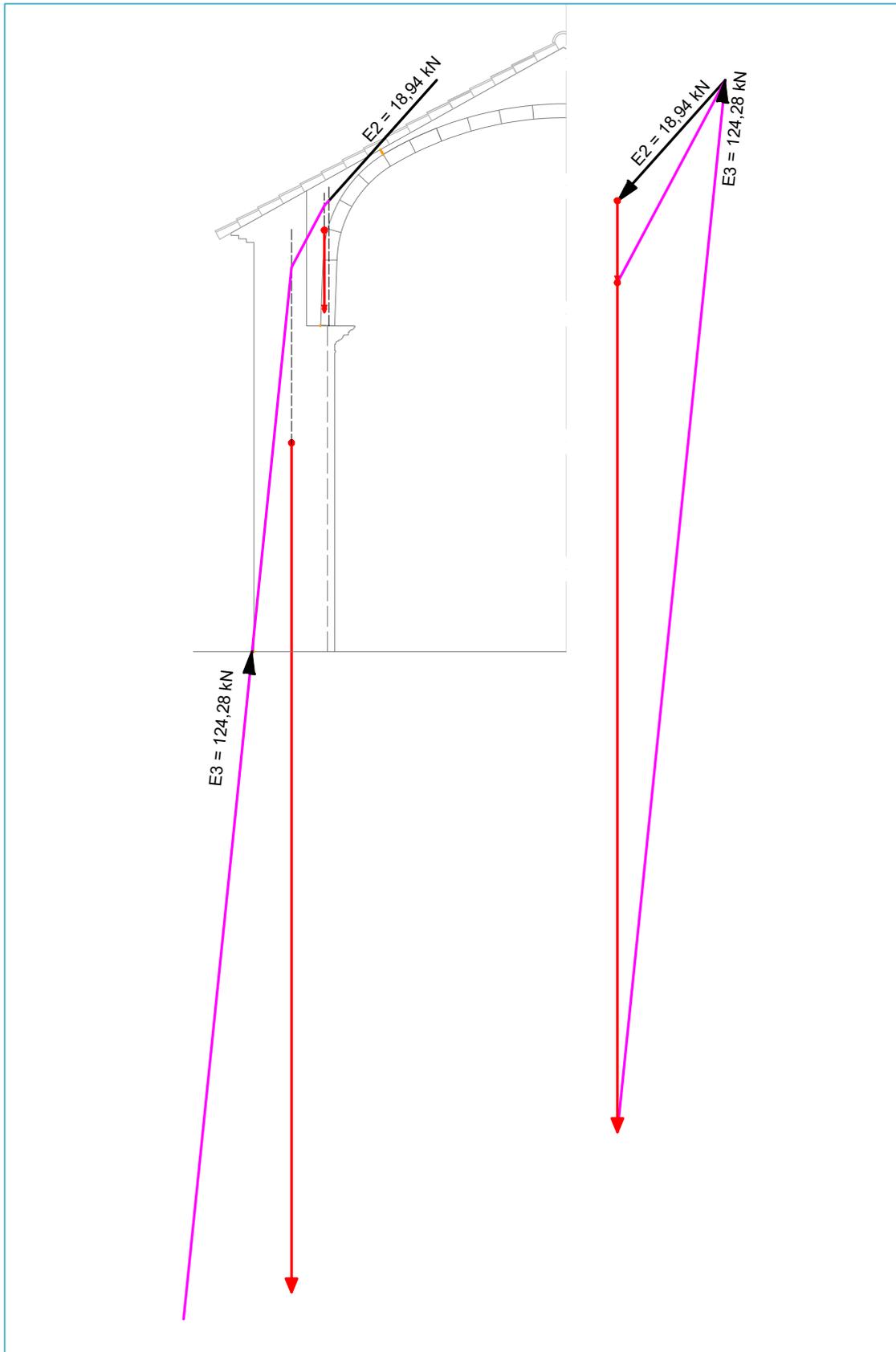


Ilustración 23. Funicular, tramo 3



## 1.8. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

### ANTECEDENTES

En los últimos años, en la calle Ermita de Soneja, que pasa por el lateral oeste de la ermita, se realizó una mejora en el vial para ajustar la cota al vial adyacente calle Maestro Aguilar. Estos trabajos consistían en rebajar la cota de la calle Ermita y ajustarlo a la altura de los ya existentes. Con el fin de realizar un posterior reasfaltado se ejecutó un rebaje provocando que el encuentro de la base del muro y de la cimentación quedaran al descubierto.

### CONSECUENCIAS

Con motivo de la variación de la cota del vial, se ha modificado la geometría por la que debía transcurrir Línea de Empujes de las cargas que el muro transmite a la cimentación, afectando a la estabilidad de la bóveda.

### PROPUESTA

Se propone la realización de un murete resistente que recalce lateralmente y de forma longitudinal la fachada oeste de la ermita Ilustración 25. Bastaría con bajar hasta la cimentación original del muro y el terreno natural, retirando las capas de asfalto y relleno. A continuación, armar y hormigonar un prisma longitudinal que quedara integrado a modo de banco, de 30 centímetros de altura y 60 centímetros de profundidad.

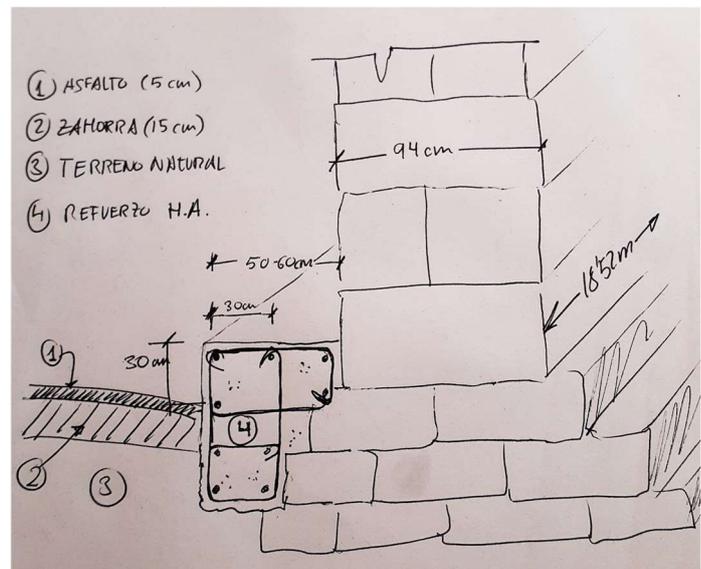


Ilustración 25, Croquis refuerzo

Para evitar descalces y con estos nuevos movimientos que podrían provocar daños mayores a la estructura, la excavación se realizará por el sistema de bataches. La secuencia de excavación y hormigonado por bataches se explica en el croquis de Ilustración 26

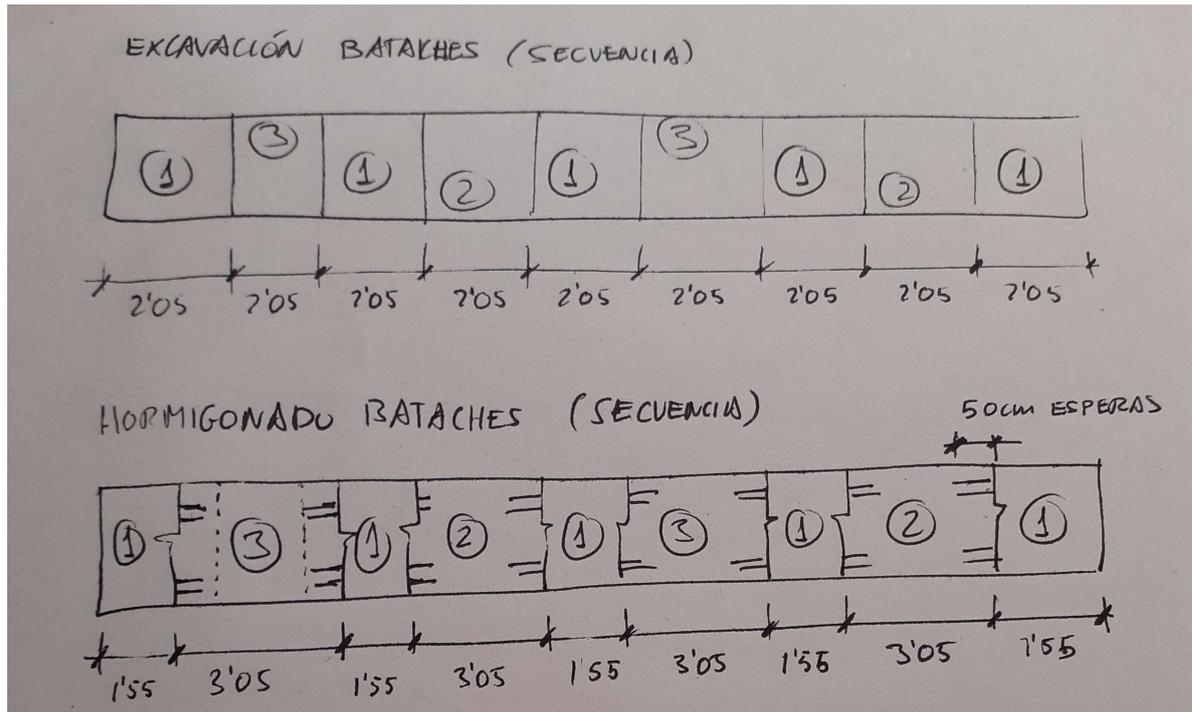


Ilustración 26. Secuencia de batches. Orden de excavación y hormigonado.

## 1.9. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

[Cap_1#]	MOVIMIENTO Y ADECUACION DEL TERRENO	446,45 €
[Cap_2#]	CIMENTACIONES SOLERAS Y MUROS	7.980,66 €
[Cap_3#]	SEGURIDAD Y SALUD	190,55 €
[Cap_4#]	CONTROL DE CALIDAD	287,24 €
[Cap_5#]	GESTION DE RESIDUOS	26,81 €

Total, Ejecución Material	8.931,71 €
6% Beneficio Industrial	535,90 €
6% Gastos Generales	535,90 €
Total, Presupuesto Contrata	10.003,52 €
21% I.V.A.	2.100,74 €
Total, Presupuesto Contrata con Impuestos	12.104,25 €

Asciende el siguiente presupuesto a la expresada suma de  
DOCE MIL CIENTO CUATRO CON VEINTICINCO Euros

Almassora, 6 de noviembre de 2020

Adán Casado Ferrer  
Noviembre 2020

## 1.10. CONCLUSIONES

En el desarrollo de este TFG el resultado obtenido en relación con la estabilidad de la Ermita de San Francisco Javier, es de colapso, ya que la Línea de Empujes se sale de la geometría de la estructura en la base del muro. Es cierto que se trata de un margen mínimo. Es evidente que la estructura de la Ermita de San Francisco Javier sigue en pie, a pesar del resultado obtenido en este ejercicio académico, como evidente es que los medios con los que se ha trabajado en la toma de datos, así como las hipótesis asumidas no son estrictamente correctas, tal y como se refleja en el pliego de condiciones. Además, no hay que olvidar que este análisis se ha realizado en una sección aislada sin contar con el resto de los elementos estructurales que trabajan de forma solidaria en su conjunto.

Aun así, se puede considerar que, en esta estructura, no hay margen de seguridad que permita reacomodar la línea de empujes ante cualquier variación de contorno. De hecho, en la actualidad, la Ermita de San Francisco Javier está siendo sometida a una restauración en la que se está trabajando en estos aspectos.

Adán Casado Ferrer

Noviembre 2020

## 1.11. BIBLIOGRAFIA

- Abad Casal, L. (1988). *El Arco Romano de Cabanes (Castellón)*. Alicante: Archivo Español de Arqueología, 61, 1988, 81-117.
- Castellon Virtual. (s.f.). [https://www.castellonvirtual.es/lugares\\_interes/arco-de-cabanes/](https://www.castellonvirtual.es/lugares_interes/arco-de-cabanes/).
- Fernandez, S. H. (2008). *Informe sobre la estabilidad del coro alto de la iglesia Aciprestal de Morella (Castellón)*.
- FineSoftwareGeotécnico. (s.f.). Obtenido de <https://www.finesoftware.es/ayuda-en-linea/geo5/es/peso-propio-de-rocas-01/>
- Gonzalez, C. (2012). *Casiopea*. Obtenido de [http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Estudio\\_y\\_relaciones\\_entre\\_Gaud%C3%AD\\_\(sa\\_grada\\_familia\)\\_y\\_Frei\\_Otto\\_-\\_estadio\\_de\\_munich/\\_stuttgart\\_21](http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Estudio_y_relaciones_entre_Gaud%C3%AD_(sa_grada_familia)_y_Frei_Otto_-_estadio_de_munich/_stuttgart_21)
- Heyman, J. (1969). *The safety of masonry arches*.
- Heyman, J. (1982). *The Masonry Arch*. Chichester: Ellis Horwood.
- Heyman, J. (1999). *La ciencia de las estructuras*. Instituto Herrera.
- Huerta, S. (1990). *Diseño estructural de Arcos, Bóvedas y Cúpulas en España 1500-1800*.
- Huerta, S. (1996). *La teoría del arco de fábrica: desarrollo histórico*. Obra Pública.
- Huerta, S. (2019). *El arco límite: breve historia de un problema estructural*.
- Lepore, P. M. (s.f.). *CORSO DI PROGETTAZIONE DI SISTEMI COSTRUTTIVI*.
- Martínez, J. M. (2003). *Determinación teórica y experimentalde diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicacion al análisis de construcciones históricas*. Tesis doctoral.
- Mas-Guindal Lafarga, A. (2011). *MECANICA DE LAS ESTRUCTURAS ANTIGUAS*. Madrid: Munilla-Leria.
- Mohrmann. (1890). *“Lehrbuch der gotischen Constructionen” de Ungewitter*.
- Ochendorf, H. y. (2003). *Análisis a rotura de estribos de fábrica*. *Revista de obras públicas*, 27 a 42.
- Ochendorf, J. A. (2002). *Collapse of masonry structures (Doctoral thesis)*.
- R. Clemente, M. C. (2007). *ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS MEDIANTE MODELOS LOCALIZADOS DE FISURACIÓN*. Barcelona: CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA.
- S. H. (2005). *MECÁNICA DE LAS BÓVEDASDE FÁBRICA: EL ENFOQUE DEL EQUILIBRIO*. *Informes de la construcción*, vol. 56, núm. 496.
- Sánchez, N. S. (2011). *Geometria de los arcos. Guia para la construccion y trazado de arcos*. Murcia: Consejería de Educacion, formación y empleo.
- Stevin, S. (1586). *De Beghinselen*.
- Ungewitter, G. y. (1890). *Lehrbuch der gotischen Konstruktionen*.
- Varignon, P. (1725). *Nouvelle Mecanique ou Statique*.
- Vitrubio, M. (15 a.c.). *Tratado de arquitectura*.

## 2. ANEXOS

### 2.1. MÉTODO GRÁFICO MÉRY

Los métodos gráficos permiten obtener con facilidad líneas posibles de empujes a partir de los sistemas de cargas que se deducen de las hipótesis preliminares (planos de corte, actuación del relleno), y son, por tanto, especialmente adecuados a los trabajos de verificación de estabilidad de arcos o bóvedas existentes.

El primer método gráfico fue propuesto por Méry en su memoria sobre líneas de empujes; por su claridad y sencillez es, probablemente el que ha gozado de mayor difusión. No es un método puramente geométrico pues los sistemas de cargas se calculan aritméticamente. Poncelet desarrolló un método puramente geométrico de un alto nivel de generalidad, que, quizá debido a su complicación, no gozó de tanta difusión como el de Méry. Por último, es preciso citar el método propuesto por Fuller que permite comprobar todas las posibles líneas de empujes para un arco dado. A continuación, veremos los métodos de Méry y Fuller, con vistas a su posterior aplicación en la verificación de las reglas empíricas, (Huerta, 1990).

El método consiste en esencia en lo siguiente. Sabemos que para los arcos el antifunicular de las cargas se aproxima con precisión suficiente a la línea de empujes correspondiente; por otro lado, según el primer teorema fundamental del análisis a rotura, si existe una línea de empujes contenida dentro del arco éste es estable.

Se trata, pues, de averiguar de forma gráfica si esto posible.

Dado un sistema de cargas existen infinitas soluciones posibles de equilibrio, infinitos polígonos funiculares. El sistema queda determinado fijando tres puntos de paso del polígono (dos en los casos de simetría).

El procedimiento aparece descrito en detalle en cualquier manual de estática gráfica, pero lo resumiremos brevemente para nuestro caso de un arco simétrico sometido a su propio peso y sin relleno sobre su extradós (aunque el método permite contemplar hipótesis de carga en bóvedas de cañón con sobre carga de relleno Ilustración 27)

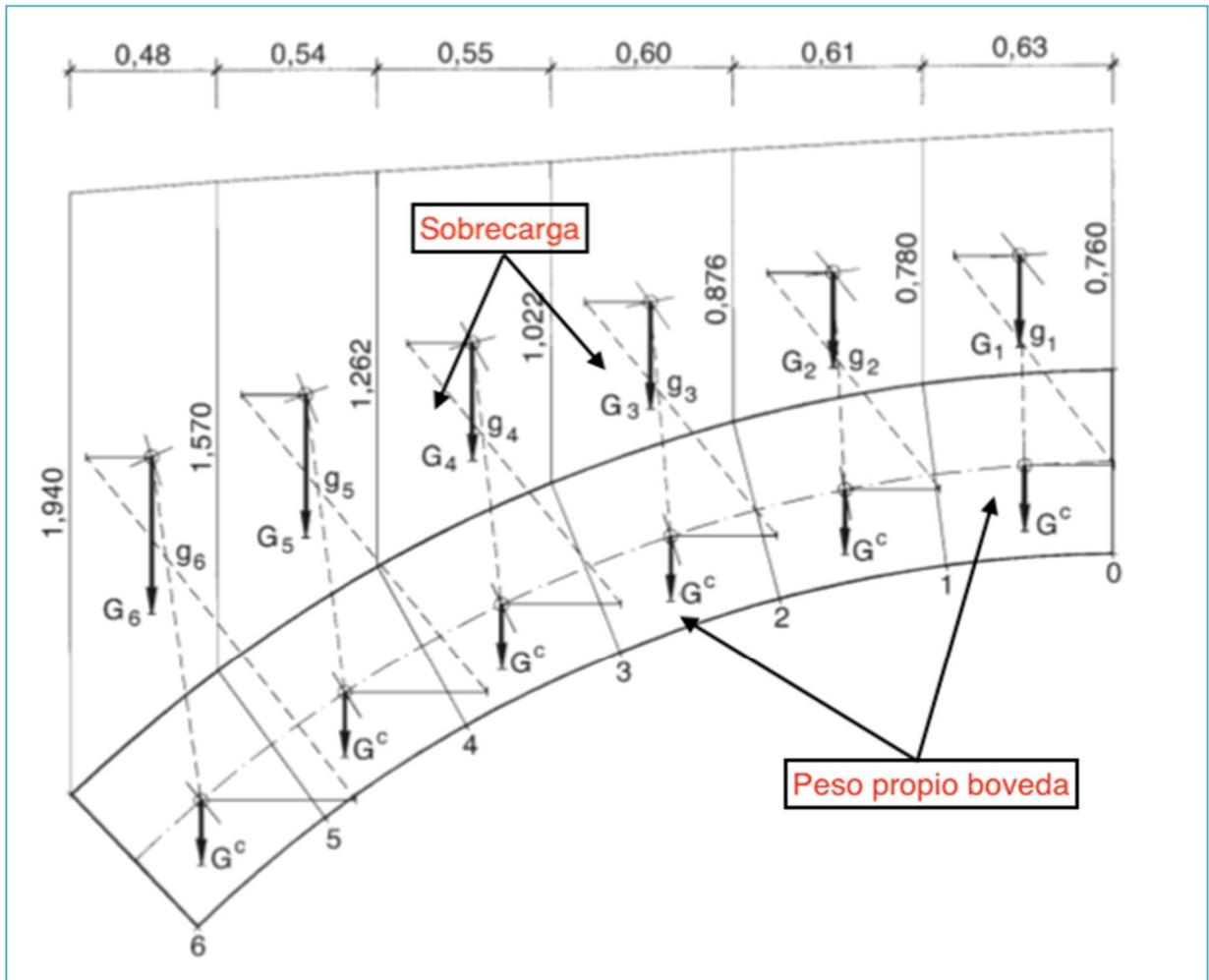


Ilustración 27 Cálculo geométrico de peso propio más sobrecargas. Fuente (Lepore)

Resumen del procedimiento:

- Trazar un Polígono de fuerzas de polo arbitrario.
- Determinar la resultante  $R$ .
- Trazar el tercio central y fijar la posición del  $E$  min. y  $E$  máx.
- Cortar la  $R$  en  $h$  y  $e'$ .
- Unir  $h$  y  $e'$  e  $Q$ .
- Trazar paralela y determinar el polígono de distancia para el  $E$  máx. y  $E$  min.

## FALLOS DE UN ARCO

En primer lugar, identificamos:

- a) El arco rebajado es más estable, pero podría mostrar lesiones en las proximidades de la clave (riesgo de descenso adicional)
- b) El arco de medio punto, se repite el esquema anterior, pero destacando la posibilidad de la formación de más fisuras en el extradós Ilustración 28, con la formación de la 4ª y 5ª rotula (en azul). Ilustración 29 Esto nos asegura que la línea de empuje pasara próxima al extradós en estos puntos.
- c) arco apuntado que representa el arco con el mecanismo de colapso más peligroso.

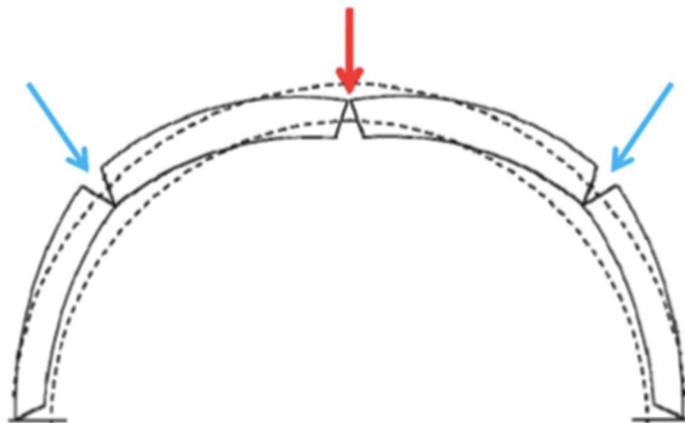


Ilustración 28 (Lepore)

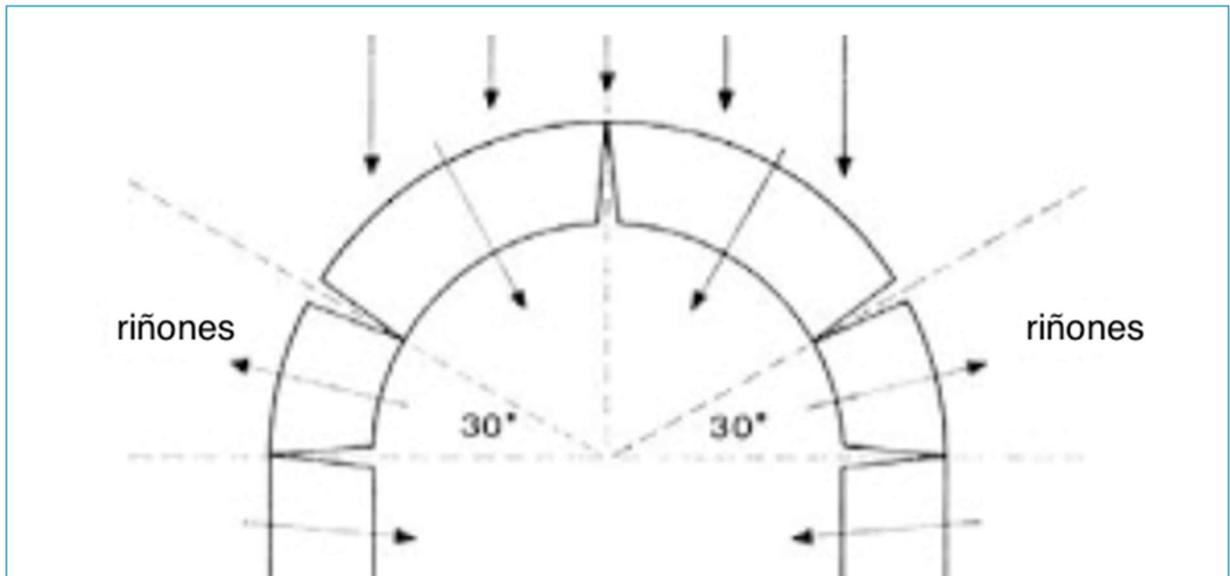


Ilustración 29 (Lepore)

La formación de rotulas se produce en torno a los 30° desde la horizontal Ilustración 29

#### APLICACIÓN DEL MÉTODO EN ARCO DE CABANES

La revisión de la estabilidad del arco consiste en asegurarse de que no haya fuerzas de tracción en sus tramos. Para un arco con sección transversal rectangular, es necesario verificar que la curva de presión esté contenida dentro del núcleo delimitado por el 1/3 central de todas las secciones transversales.

Las cargas que actúan sobre el arco se determinan considerando las partes de estructura que contiene cada segmento, tanto las del peso propio como el de la carga que pueda tener sobre él. Las fuerzas se aplican en el centro de gravedad de cada sección delimitada Ilustración 30.

Dado que el arco es simétrico y está cargado por igual, la revisión se limita a la mitad del arco.

Esta fuerza tiene una línea de acción horizontal en la clave y se considera aplicada al tercio medio superior de la propia sección Ilustración 31.

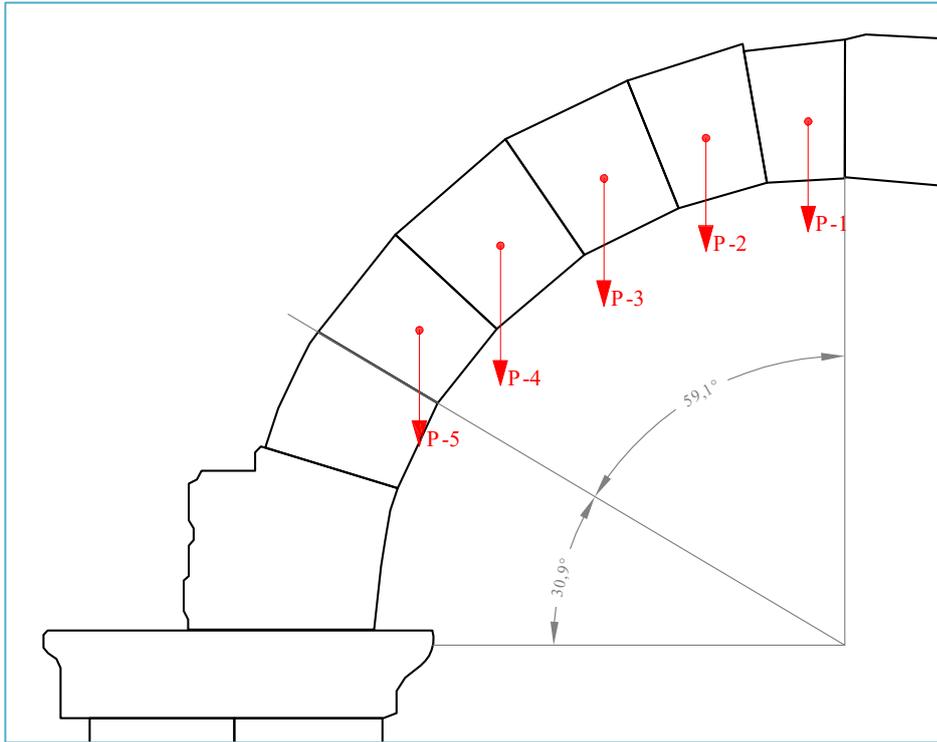


Ilustración 30 Aplicación de cargas y ángulo de formación de rotula.

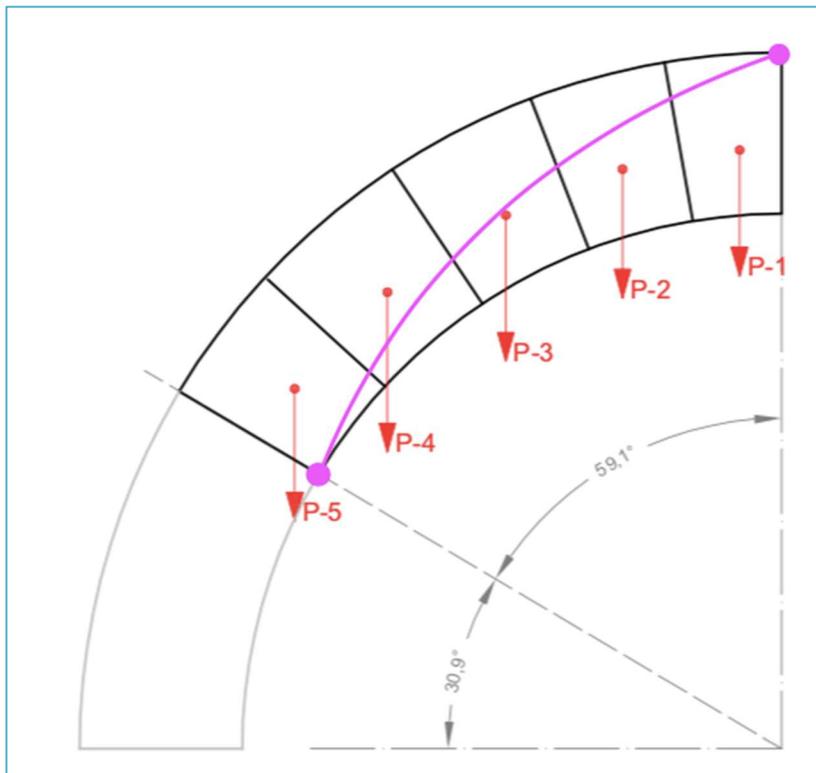


Ilustración 31. Puntos de paso de la Línea de Empujes en estado de mínimo esfuerzo horizontal.

En el caso de nuestro ejemplo la rótula se formaría entre la 5ª y 6ª dovela, buscando la junta natural entre las mismas.

De este modo se fija el paso de la **Línea de Empujes** Ilustración 31 por el extradós de la clave y por la parte del intradós a la altura de la rótula formada en el riñón.

Queremos saber si el arco es estable. Por simetría trabajaremos sobre la mitad del arco. En primer lugar, hay que dividir en un cierto número de partes iguales para, a través del volumen determinar una carga de peso propio y aplicarlas en los centros de gravedad de cada porción. En nuestro caso seguiremos las juntas de las dovelas dando como resultado 5 porciones.

A cada una de estas partes (divisiones) les corresponde una porción de relleno que se proyectaría en vertical desde el extradós y se representara con un vector de magnitud equivalente al peso de cada dovela. En nuestro caso no existe relleno ni sobrecarga.

Hallamos la resultante, para cada elemento, de la parte de bóveda.

De esta forma obtendremos un sistema de fuerzas P1, P2, ..., P5. Tabla 2. Peso propio de las dovelas

<b>LADO IZQUIERDO DEL ARCO</b>					
ELEMENTO	ÁREA	ANCHO	VOLUMEN	PESO ESPECIFICO	PESO PROPIO
	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN
Dovela 01	0,26	0,83	0,21	22,00	4,68
Dovela 02	0,26	0,83	0,22	22,00	4,81
Dovela 03	0,30	0,83	0,25	22,00	5,42
Dovela 04	0,32	0,83	0,27	22,00	5,89
Dovela 05	0,27	0,83	0,22	22,00	4,94
	<b>1,41</b>		<b>1,17</b>		<b>25,7</b>

Tabla 2. Peso propio de las dovelas

En principio, lo habitual es no conocer el valor del empuje horizontal. Para averiguarlo hay que determinarlo de la siguiente manera:

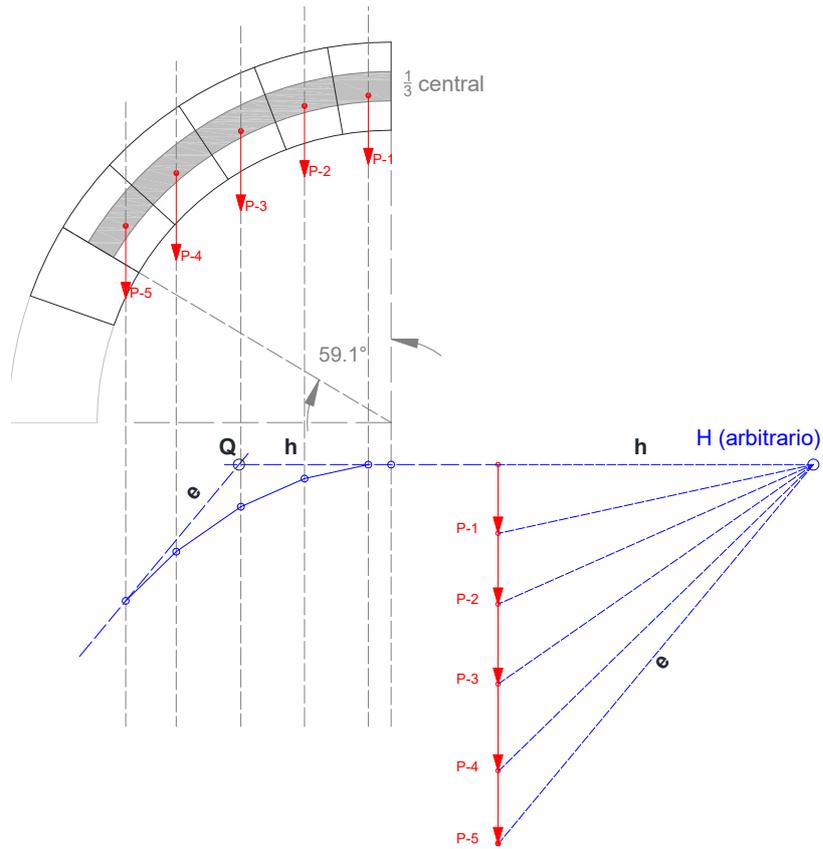
Se construye el polígono de fuerzas Ilustración 32 a partir de un polo  $H$ . cualquiera (arbitrario).  $P$  serán los pesos de cada una de las secciones que hemos representado que darán lugar a la resultante  $R$ .

A continuación, se construye el polígono de las fuerzas, para finalmente trazar el polígono funicular y así identificar la posición  $Q$  de paso de la resultante  $R$ , Ilustración 33

De acuerdo con la Hipótesis de Méry, para que el arco esté en equilibrio, requiere que  $R$  esté compensado por 2 fuerzas, una de los cuales es el empuje horizontal en clave,  $H$  pasando por el límite superior del tercio central; el otro es el empuje a los riñones,  $E$ , Ilustración 36 que pasa por el límite inferior del tercio medio.

Para equilibrar las tres fuerzas deben encontrarse en el punto,  $Q$ ; que resulta de la intersección de las líneas  $h$  y  $e$  que son la prolongación de  $H$  y  $E$ . De esta manera se determinan las líneas de acción y se pueden calcular por descomposición de  $R$ .

La descomposición de  $R$  permite determinar el polo  $H_{min}$ ; el polígono funicular identificado, por este motivo es único y cumple tres condiciones de la curva de presión



Trazado de polígono funicular

Trazado de polígono de fuerzas

Ilustración 32. Trazado del polígono funicular para hallar Q

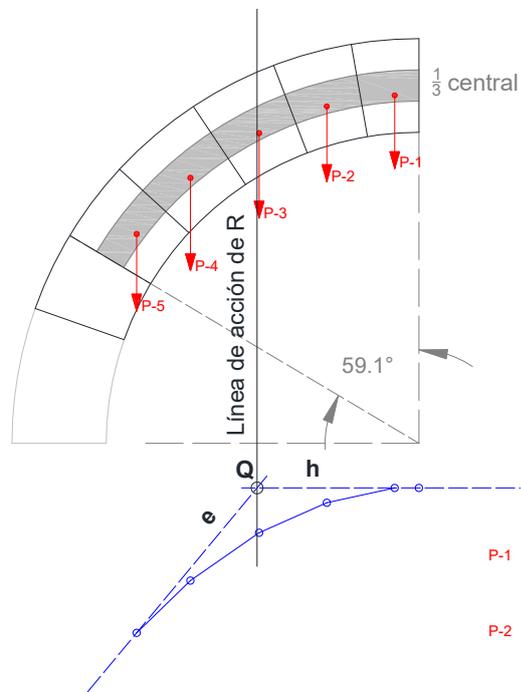


Ilustración 33 Línea de acción de la Resultante

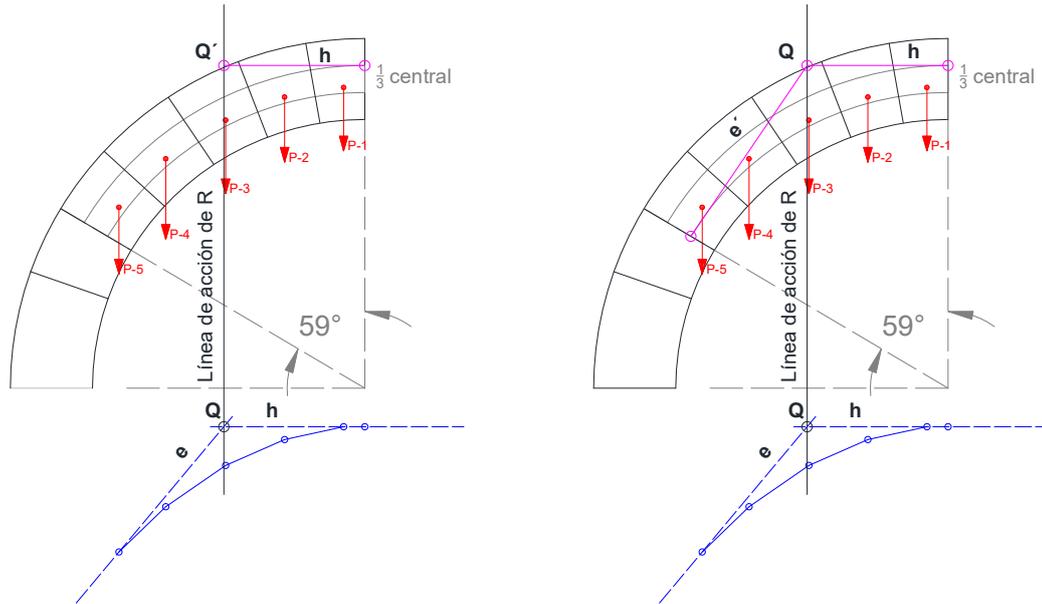


Ilustración 34. Proyección de líneas h y e pasando por las rotulas.

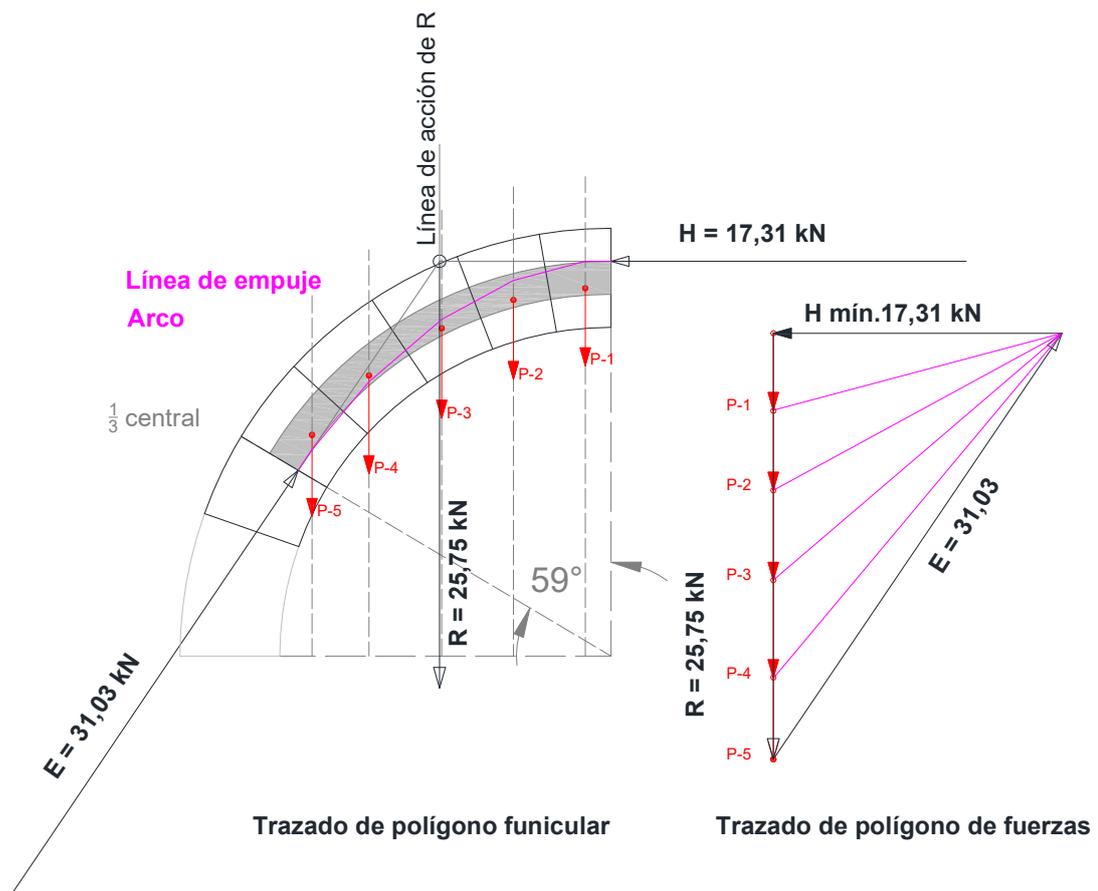


Ilustración 35 Resultados del primer tramo.

## EMPUJE MÁXIMO Y MÍNIMO CON COEFICIENTE GEOMÉTRICO DE SEGURIDAD DEL TERCIO CENTRAL.

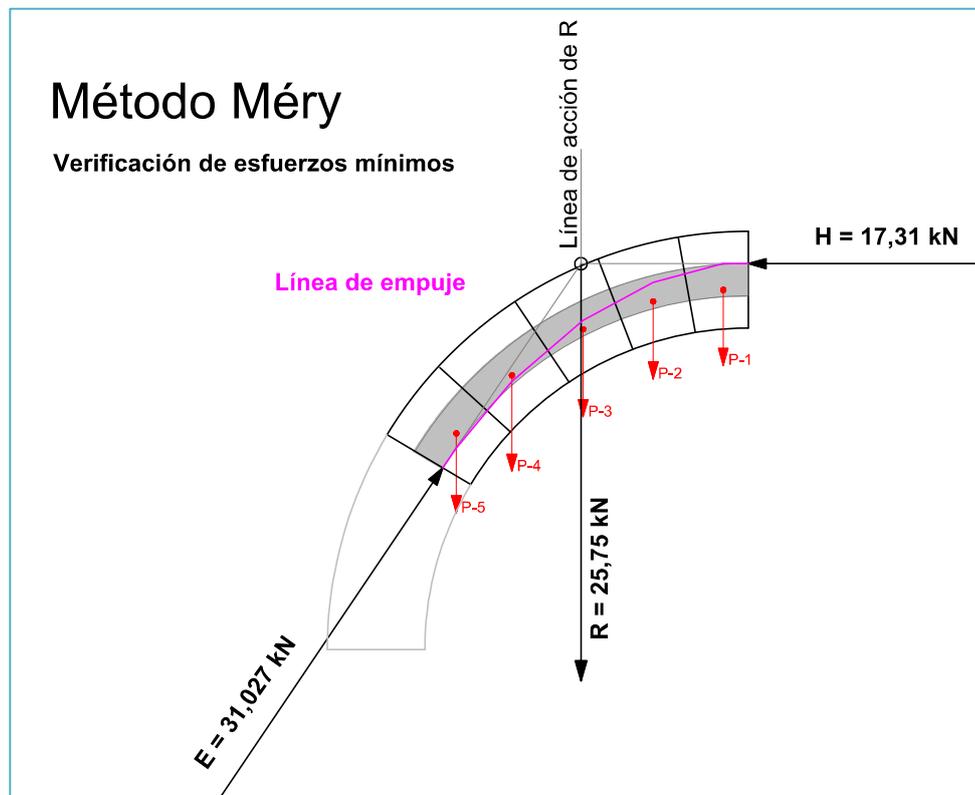


Ilustración 36 Cálculo del empuje mínimo con coeficiente de seguridad grado3, dado que la línea de Empujes no sale del 1/3 central (núcleo de inercia)

Delimitaremos el 1/3 central que es la zona de la que no debe salir la línea de empuje Ilustración 36. Este núcleo central nos indica los 2 puntos de paso por los que tenemos que forzar la trayectoria inicial del empuje. Para el empuje mínimo, es en el extradós de la clave y en el intradós de la rótula.

Esta línea de acción será la misma, para los siguientes tanteos iterativos y nos define por completo la dirección del empuje horizontal, así como la reacción en la base. Podemos ahora dibujar la línea de empujes y comprobar, que en este caso no sólo el arco es estable, sino que la línea de empujes está contenida en todos sus puntos dentro del núcleo central de inercia de las secciones.

Haremos el mismo procedimiento para calcular el esfuerzo máximo Ilustración 37, en este caso los puntos de paso son, el intradós en la zona de la dovela clave y el extradós en la zona de la formación de la rótula.

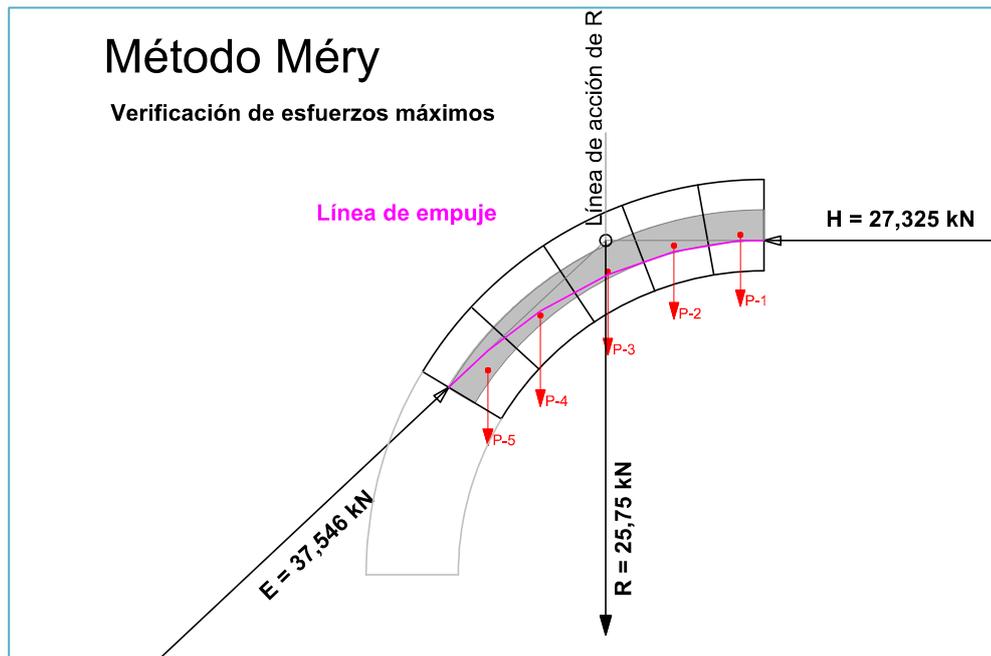


Ilustración 37 Cálculo del empuje máximo con coeficiente de seguridad 3, dado que la línea de Empujes no sale del 1/3 central (núcleo de inercia)

De este modo, para que el arco sea estable y además seguro, es suficiente que se pueda dibujar una línea de empuje dentro de la sección del 1/3 central. El valor de la línea de empuje que buscamos debe estar comprendida entre el valor de empuje Máximo y Mínimo.

- Empuje Mínimo: 17,31 kN
- Empuje Máximo: 27,33 kN

Ya solo queda verificar la estabilidad del arco en su conjunto, para ello basta con seguir trazando el polígono funicular con el esfuerzo mínimo, a lo largo del resto de la estructura, es decir riñón y estribo. Ilustración 38

Para el trazado del funicular hasta cimentación, se aplica la magnitud y dirección del empuje obtenido en el tramo anterior. Ilustración 37, y las cargas gravitatorias del riñón, imposta, estribo y zócalo de la Tabla 3

<b>LADO IZQUIERDO DEL ARCO</b>					
ELEMENTO	ÁREA	ANCHO	VOLUMEN	PESO ESPECIFICO	PESO PROPIO
	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN
Dovela 06	0,28	0,83	0,23	22,00	5,11
Dovela 07	0,57	0,83	0,47	22,00	10,39
Imposta	0,56	1,31	0,73	22,00	16,15
Estribo	2,75	0,93	2,56	22,00	56,23
Zócalo	1,49	1,60	2,38	22,00	52,45
	<b>5,65</b>		<b>6,38</b>		<b>140,3</b>

Tabla 3. Peso propio dovelas riñón, imposta, estribo y zócalo.

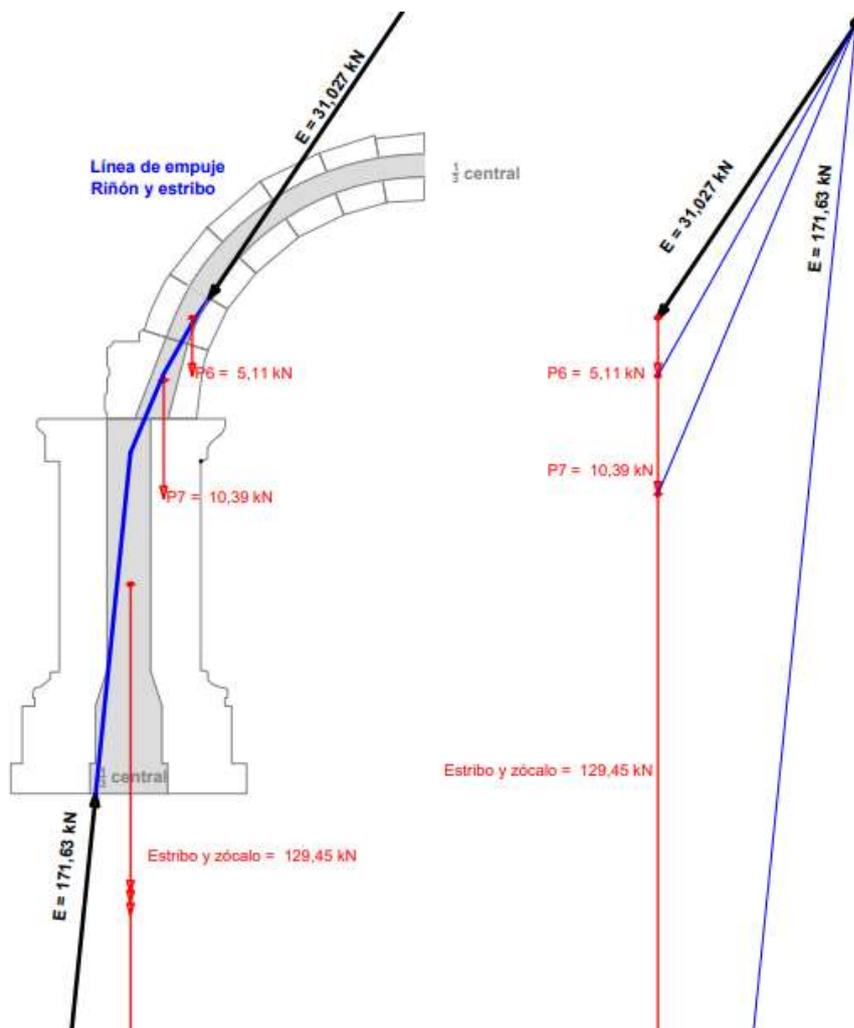


Ilustración 38. Trazado del 2º tramo del funicular hasta cimentación.



## 2.2. ANALIS LÍMITE Y LA SEGURIDAD EN ARCOS.

El profesor Jacques Heyman de la universidad de Cambridge, sintetiza varios de estos enfoques llegando a una conclusión, la absoluta importancia de la geometría. En *Análisis Límite de Estructuras de Fábrica* desarrolla la herramienta más apropiada para comprender y analizar las construcciones de fábrica.



En su artículo "The safety of masonry arches" 1969, pone en valor el concepto de arco límite para comparar el espesor del arco real  $E$  con el espesor que tendría el arco límite  $e$ . Se trata de dar con un coeficiente geométrico de seguridad.

En este ejemplo de la Ilustración 39 el arco original (a) sería el doble de ancho, (2 veces de espesor de rosca) que el arco límite (b), cuyo mecanismo de colapso sería el representado en (c).

Esto supondría un coeficiente geométrico de seguridad de 2.

$$[E/e = 2]$$

La regla del 1/3 central implica un coeficiente geométrico de seguridad 3, que se ha demostrado que es excesivo.

$$[E/e = 3]$$

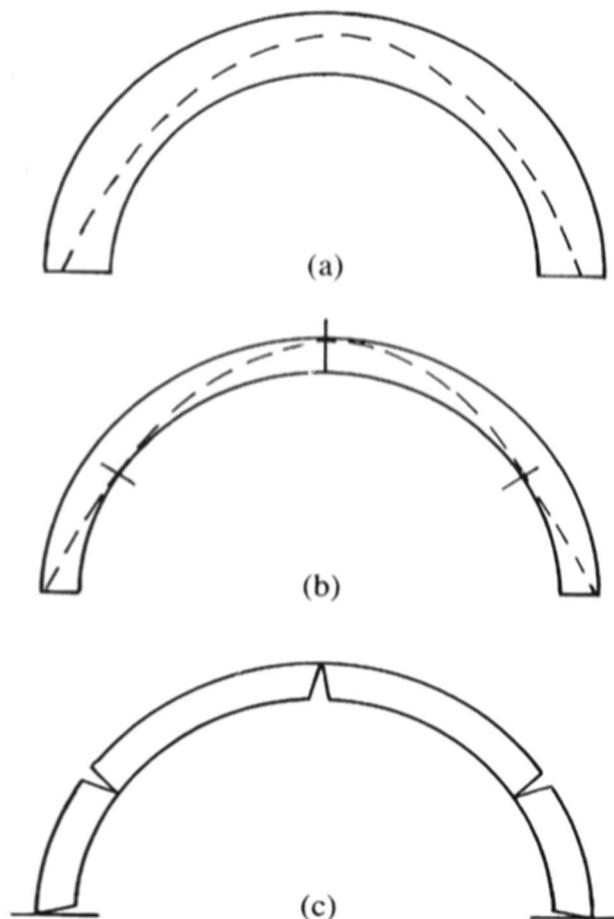


Ilustración 39, (a) Arco en equilibrio confortable; (b) arco límite; (c) mecanismo de colapso del arco límite (Heyman 1999)

La situación del arco (b), es la de colapso inferior, (mínima carga) y en esta situación no admitiría ninguna variación de contorno.

### PRINCIPALES HIPOTESIS

1. Resistencia “infinita” a compresión
2. Resistencia nula a tracción
3. No fallo por deslizamiento.

La utilización óptima de material y la búsqueda del espesor mínimo para que un arco se sostenga de forma segura ha sido un problema clásico a la hora de diseñar una estructura de fábrica. El efecto natural es la separación de los estribos, problema común en los arcos circulares sometidos a esfuerzos horizontales que origina la bóveda. En estos arcos limite, se forma un mecanismo simétrico de 5 rotulas Ilustración 40, tres en el extradós (una en la clave y por simetría 2 en los arranques) y dos por simetría en el intradós a un ángulo  $\beta$  determinado.

Esta situación de colapso limita el espesor del arco. Esto se convierte en un factor importante a la hora de razonar su seguridad, ya que por debajo de ese valor los arcos se desplomarán.

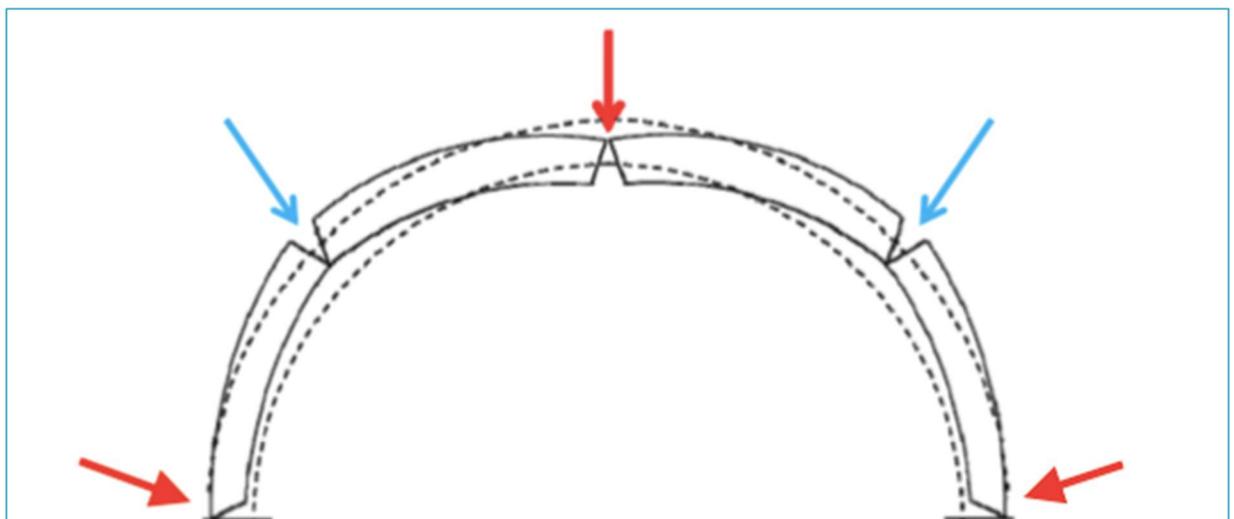


Ilustración 40 Arco de mínimo espesor convertido en mecanismo de 5 rotulas.

---

## PROCEDIMIENTO PARA LA COMPROBACIÓN DEL EMPUJE MÍNIMO

### EXPLICACIÓN DEL MÉTODO APLICADO EN EL ARCO DE CABANES.

Para poder determinar el grado de seguridad que tiene una estructura, seguiremos los pasos del procedimiento de empuje mínimo.

- a) Definir ángulo  $\alpha$
- b) Determinar el coeficiente  $K$
- c) Deducir el espesor mínimo  $e$ ,
- d) Angulo  $\beta_0$  de formación 4ª y 5ª rotula
- e) Trazar el funicular que pase por los 2 puntos, extradós de la rótula de la clave y en el intradós de la 4ª rotula, ambos dentro del rango del espesor mínimo  $e$ .

El espesor mínimo  $e$  está relacionado siempre con el radio  $R$  del arco medido en su directriz dando como resultado un coeficiente  $K$ .

$$K = e/R.$$

El primer paso es buscar la ratio  $e/R$  de espesor mínimo que le corresponde a un arco dado, según su ángulo  $\alpha$ . Este ángulo es el que se forma desde la vertical hasta el arranque del arco en la imposta. Ilustración 41

El arco límite es una situación ficticia en la que el arco está en el punto de colapso. Un arco que se encuentra en este punto Ilustración 42, NO admite ningún aumento de luz porque se encuentra en el punto de colapso, sin movimiento de los estribos. (Ochendorf J. A., 2002).

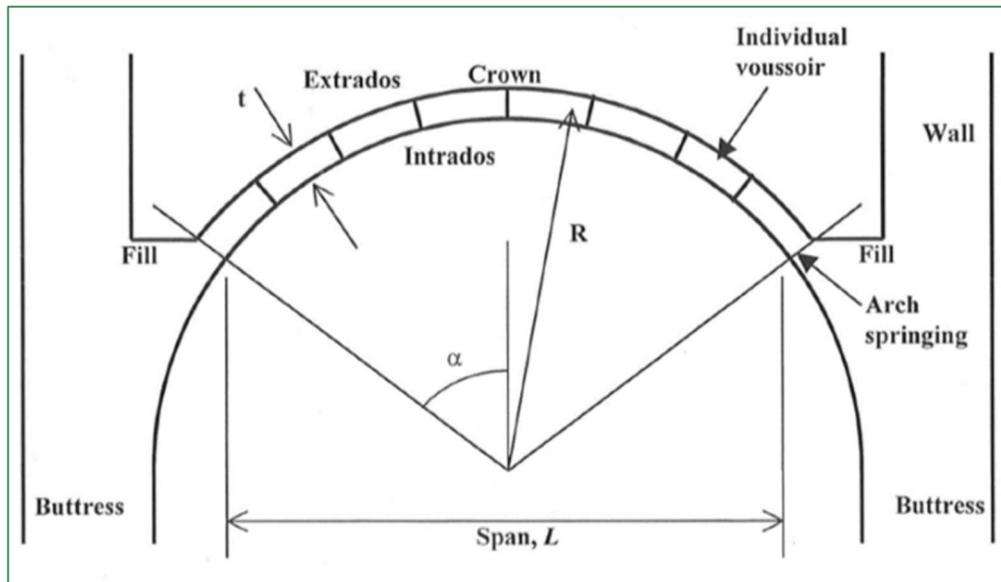


Ilustración 41 Definición de la geometría de un arco de fábrica de dovelas radiales, en su estado original (Ochsendorf 2002).

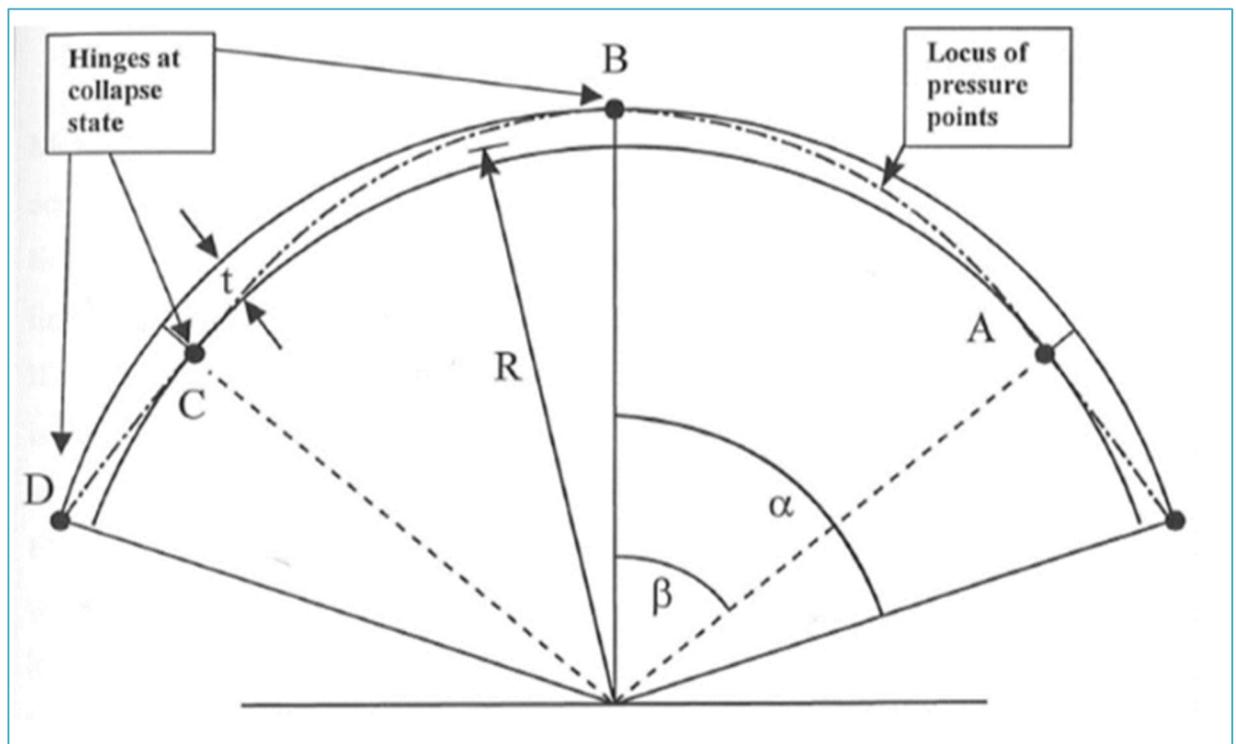


Ilustración 42 Arco circular en la situación de mínima relación  $e/R$ . Se trata de un mecanismo de cinco rótulas que en la práctica puede llegar a ser de cuatro debido a pequeñas imperfecciones en geometría (Ochsendorf J. A., 2002)

(Heyman, 1999) dedujo una expresión matemática que representa la relación entre el espesor límite  $e$  y el radio  $R$  medido hasta la directriz [ $k = e / R$ ] y el ángulo  $\alpha$ .

La siguiente gráfica Ilustración 43 representa el concepto de mínimo espesor, por debajo del cual los arcos se desplomarán.

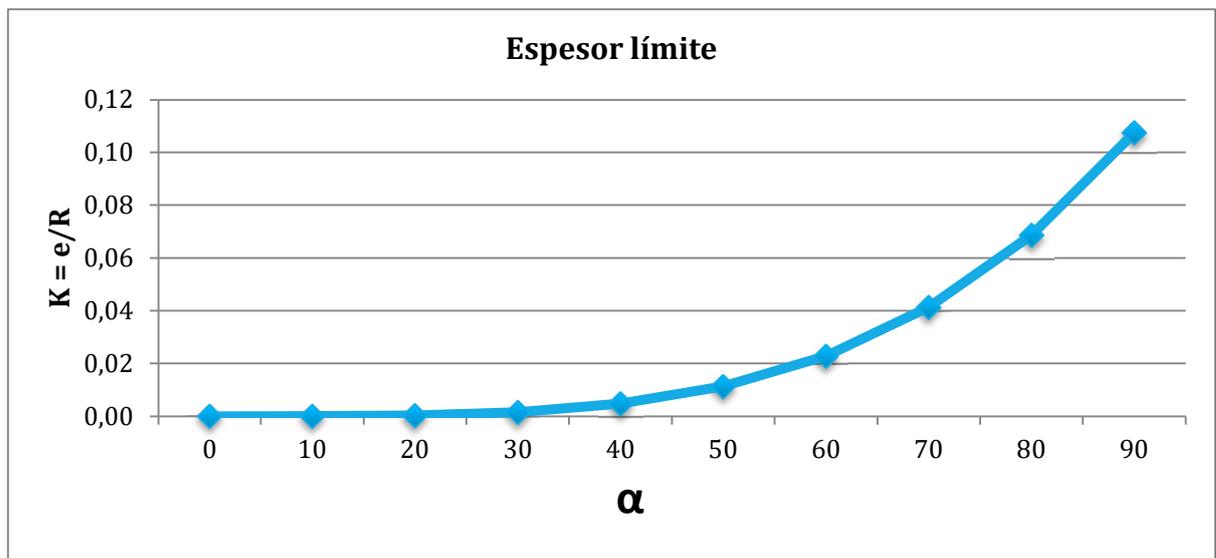


Ilustración 43

Espesor límite de arcos circulares (Heyman 1999)		
Medio ángulo $\alpha$	Mínima relación K	Ángulo a rótula $\beta$
0 °	0,0000	0,0 °
10 °	0,0000	8,4 °
20 °	0,0003	15,2 °
30 °	0,0015	21,5 °
40 °	0,0047	27,4 °
50 °	0,0113	33,6 °
60 °	0,0228	39,5 °
70 °	0,0413	45,0 °
80 °	0,0687	49,9 °
90 °	0,1075	54,5 °

Tabla 4. Coeficiente K para deducción del espesor límite. (Heyman, 1999)

- a) Para el caso del arco romano de Cabanes el ángulo  $\alpha$  es 70, 5° (ángulo medido desde la vertical hasta la imposta) Ilustración 44
- b) A este ángulo le corresponde un K de 0,0413, Ilustración 45

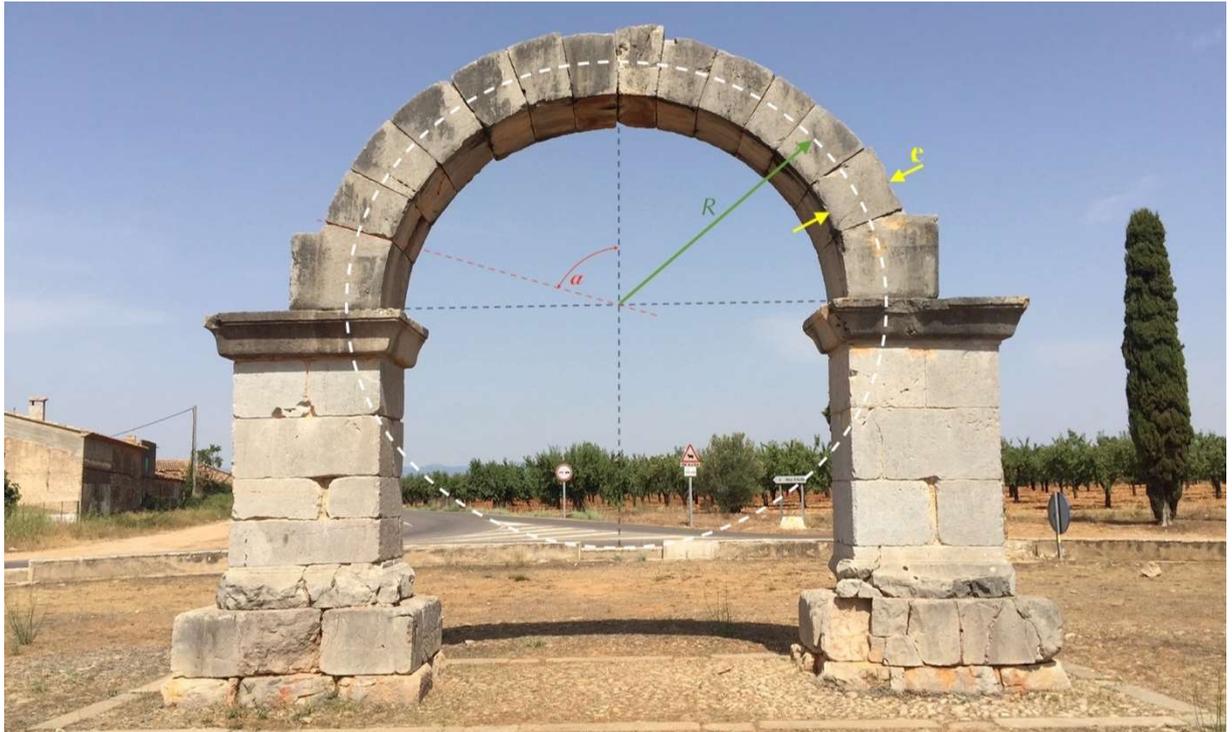


Ilustración 44 Arco Romano de Cabanes paramerizado.

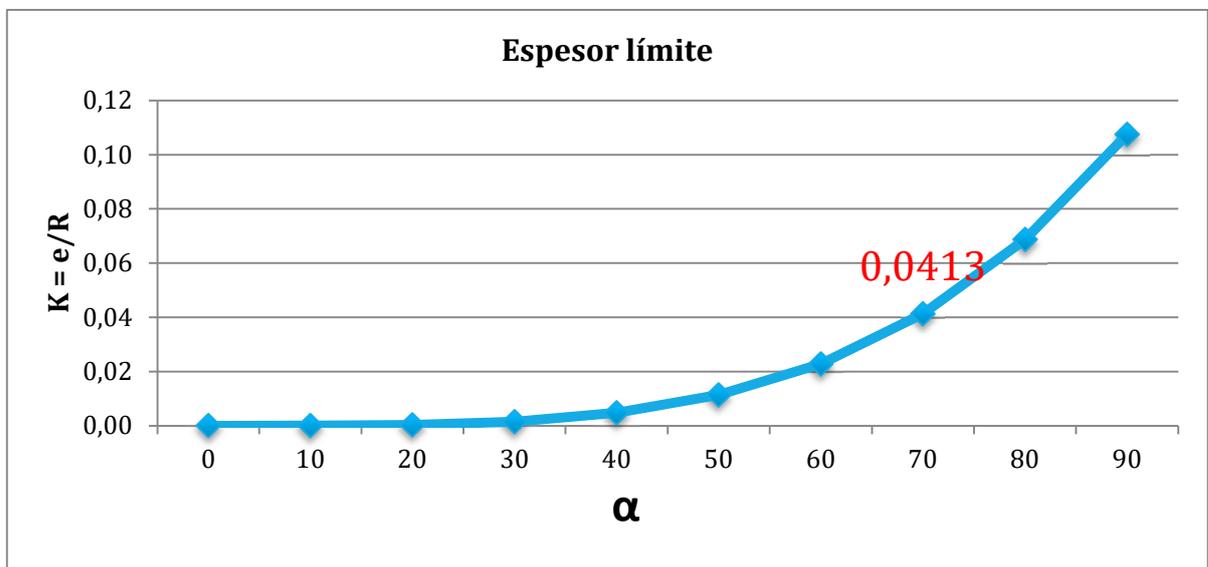


Ilustración 45, Ratio K de espesor límite para el arco Romano de Cabanes con ángulo  $\alpha$  de  $70,5^\circ$

- c) Teniendo en cuenta que la relación  $e/R$  es de 0,0413, podemos deducir el espesor mínimo  $e$  despejando en la expresión del coeficiente  $K = e/R$  obteniendo que el espesor mínimo es,  $e = 9,46$  cm.

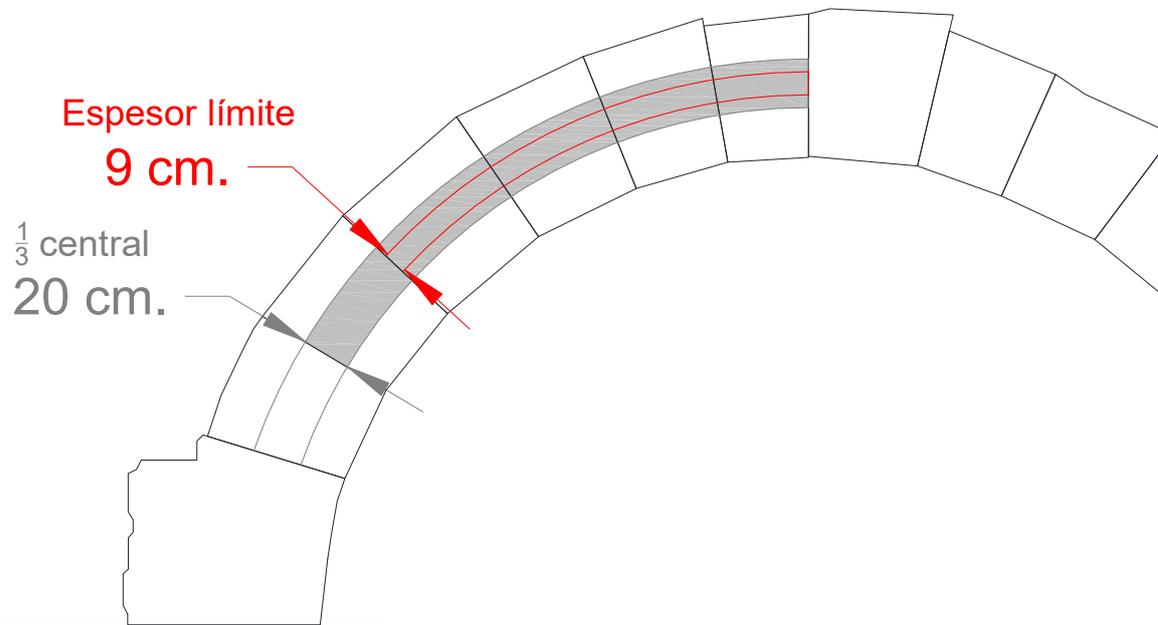


Ilustración 46, Comparación de la sección del 1/3 central y del espesor límite en el arco Romano de Cabanes.

En esta Ilustración 46 se puede observar que el coeficiente geométrico de seguridad de tercio central permite más libertad de movimiento a la línea de empujes que el obtenido por el método del espesor límite que es más restrictivo. No en vano se trataría de la representación del espesor mínimo que podrá tener un arco con este peso propio. Mas allá de este espesor, el arco colapsaría. Con estos resultados se deduce:

Coeficiente geométrico de seguridad	
1/3 central	$\frac{60,00 \text{ cm.}}{20,00 \text{ cm.}} = 3$
Espesor Límite	$\frac{60,00 \text{ cm.}}{9,46 \text{ cm.}} = 6$

Tabla 5. Comparación de los coeficientes geométricos de seguridad 1/3 central y Espesor Límite

Como se ha visto en el punto 1.4.4.3 página 29, el coeficiente geométrico de seguridad relaciona el espesor de la rosca real  $E$  y el espesor mínimo  $e$ , en el que se han de contener los esfuerzos de la Línea de Empujes. Esta relación es suficiente con que sea superior a **2**. En el ejemplo del Arco Romano de Cabanes, el coeficiente geométrico del espesor límite indica claramente que es muy superior, ya que como se puede apreciar, queda más margen de seguridad dentro de la geometría del arco.

- d) El valor de  $K$  obtenido nos permite hallar el ángulo  $\beta_0$  medido desde la vertical, donde se localizará la 4ª y 5ª rótula en el intradós del arco. Los valores  $\beta_0$  se resumen en la Ilustración 47

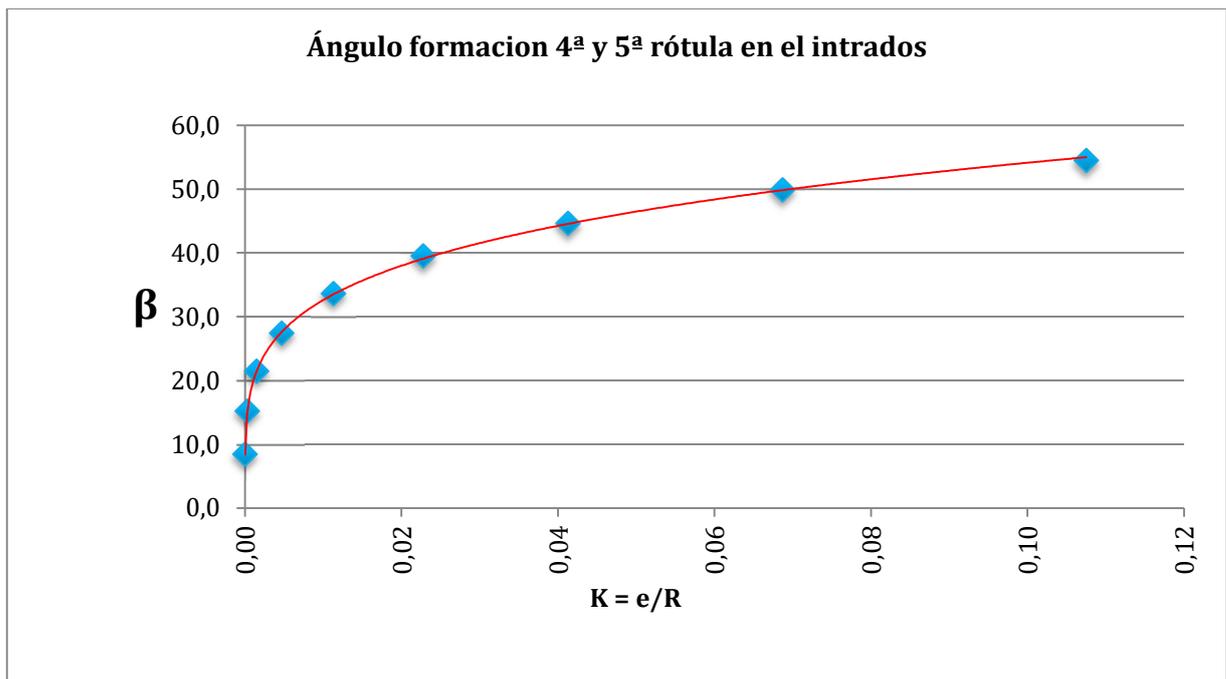


Ilustración 47, ángulo de posición inicial  $\beta_0$

En el caso del Arco Romano de Cabanes la 4ª y 5ª rótula se formará a los 44,6° desde la vertical, Ilustración 48 e Ilustración 49 y determinará el paso de la línea de empujes por el intradós del arco.

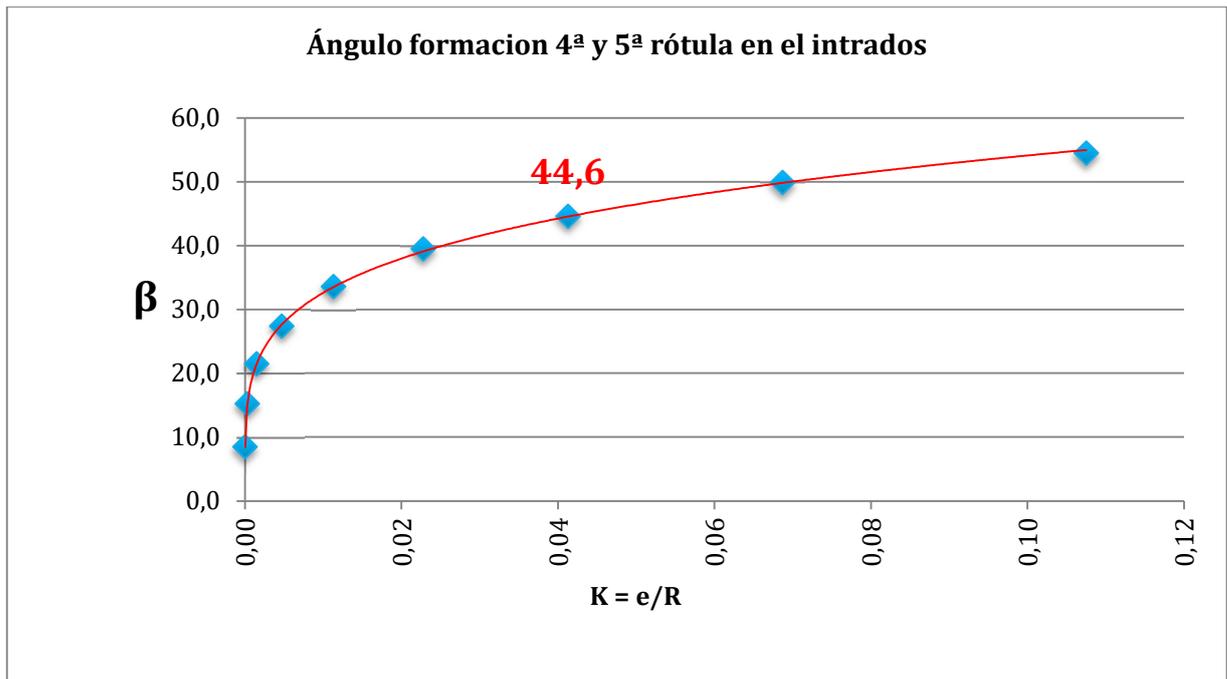


Ilustración 48, ángulo  $\beta_0$  (44,6°) de posición inicial de la 4ª y 5ª rotula en el Arco Romano. Según el valor K obtenido

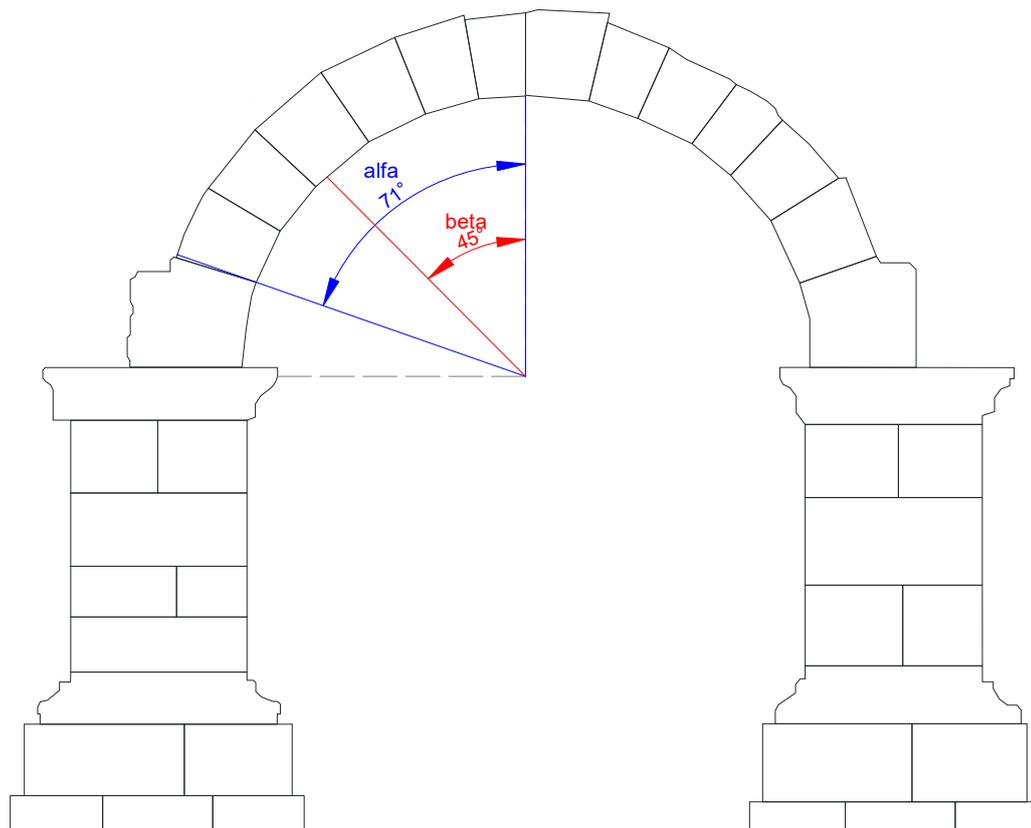


Ilustración 49, ángulo  $\beta_0$  de posición inicial de la 4ª y 5ª rotula en el Arco Romano

- e) Este método semigráfico, parte de una posición de rotulas correspondiente a la geometría del arco. Posteriormente hay que comprobar que la línea de empujes no sale del espesor mínimo hallado en la configuración de la región central que nos ha dado como resultado, ilustración 48, En caso de no cumplirse esta condición, se repetirá de forma iterativa hasta conseguir el empuje mínimo de colapso que quede contenido dentro de la nueva geometría.

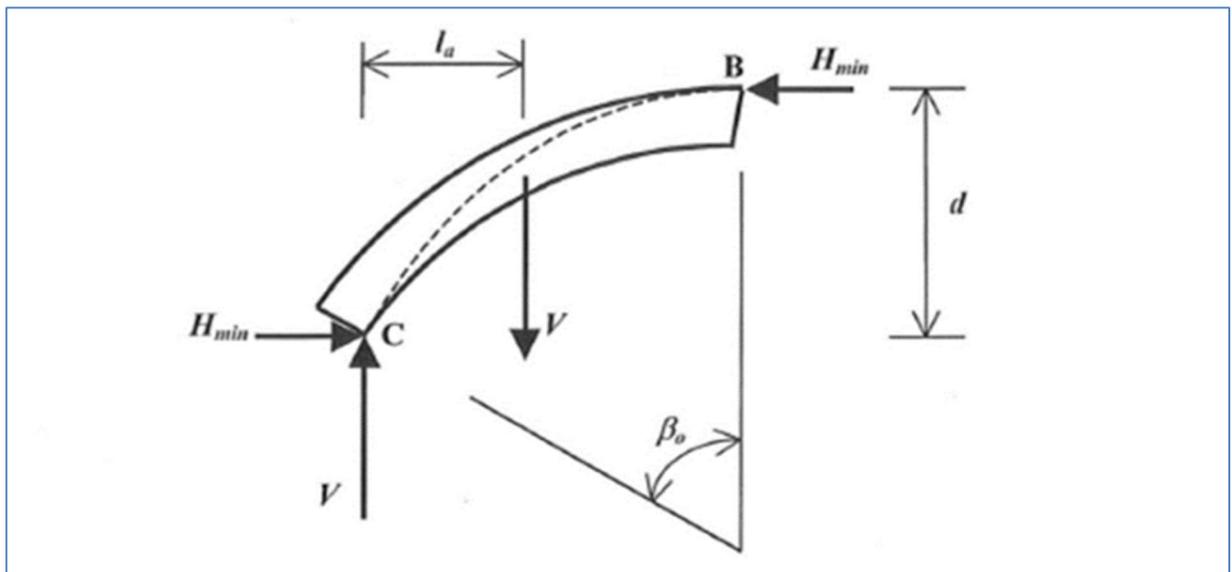


Ilustración 50. Región central del arco límite. (Ochendorf H. y., 2003)

Sólo queda entonces trazar el polígono funicular correspondiente a la región central. En la que se calculará la línea de empujes que no salga del espesor mínimo, de esta forma se conseguirá hallar el empuje mínimo de colapso.

## EXPLICACIÓN DEL MÉTODO APLICADO EN LA ERMITA DE SAN FRANCISCO JAVIER

Para poder determinar el grado de seguridad que tiene la estructura de la Ermita de San Francisco Javier en este momento, seguiremos los pasos del procedimiento de empuje mínimo.

- a) Definir ángulo  $\alpha$ , desde la vertical hasta el arranque.
  - b) Determinar el coeficiente  $K$
  - c) Deducir el espesor mínimo  $e$ , rango que no ha de sobrepasar la Línea de Empujes.
  - d) Angulo  $\beta_0$  donde se formará la 4ª rótula, y por simetría la 5ª.
  - e) Trazar el funicular que pase por los 2 puntos deseados, extradós de la rótula de la clave y en el intradós de la 4ª rotula, ambos dentro del rango del espesor mínimo  $e$ .
- a) Establecemos el ángulo  $\alpha$  en  $31^\circ$ , en la posición del inicio del relleno Ilustración 51 por tratarse del arranque del arco rebajado.

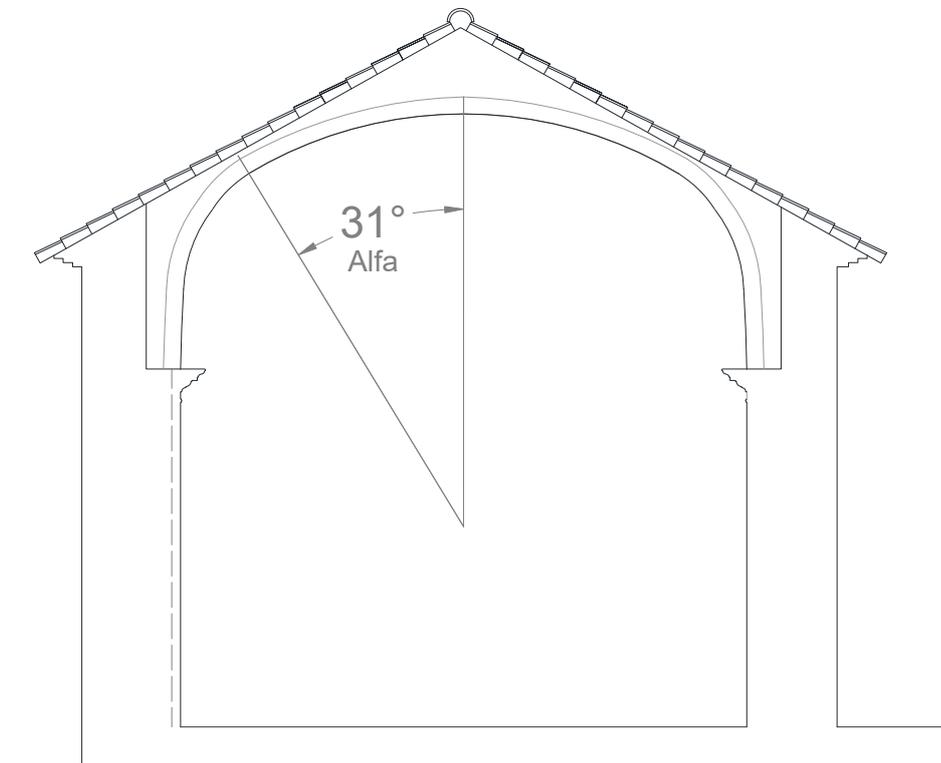


Ilustración 51

b) Como ya se ha visto en este TFG, el espesor mínimo  $e$  está relacionado con el radio del arco  $R$ , medido en su directriz, dando como resultado un coeficiente  $K$  representado en la siguiente expresión.

$$K = e/R.$$

Este coeficiente  $K$  lo deduciremos de la Tabla 6 de doble entrada que relaciona  $K$  con el ángulo  $\alpha$  que se forma desde la vertical hasta el arranque del arco. Para el valor de  $\alpha = 31^\circ$ , le corresponde un  $K = 0,0015$

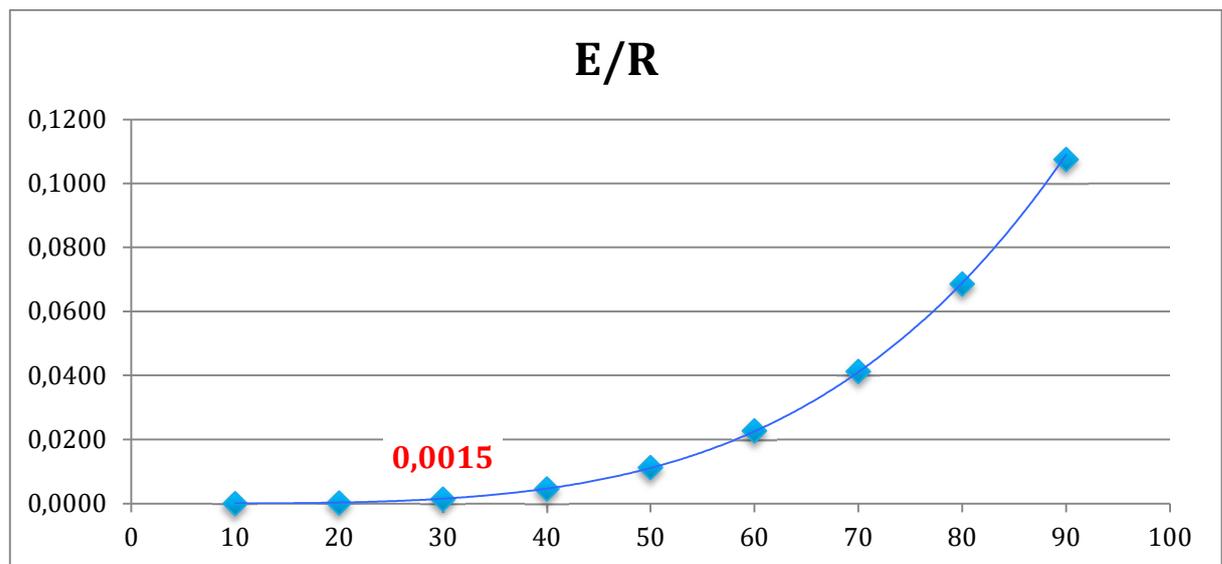


Tabla 6- Coeficiente  $K$

c) Por lo tanto, el espesor mínimo  $e$  Ilustración 47 se obtiene despejando de la expresión del coeficiente  $K$ , puesto que disponemos del radio  $R$  medido hasta la directriz.

- $K = 0,0015$
- $R = 4,04 \text{ m}$
- $e = 0,6 \text{ cm} \rightarrow$  Espesor mínimo del arco límite

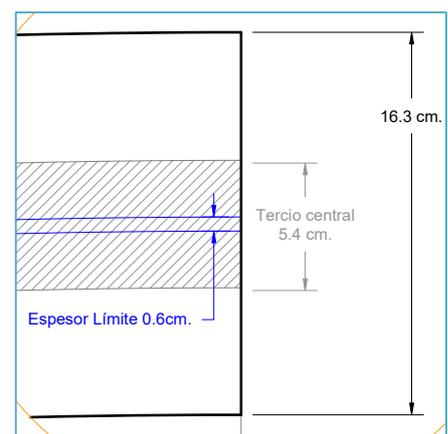


Ilustración 52

Se trata, realmente, de un rango muy reducido por el que ha de trazarse el recorrido de las fuerzas desde la clave hasta la 4ª - 5ª rótula.

- d) Sólo queda entonces averiguar donde se provocará la rótula debida al empuje mínimo previo al colapso. Basta con deducir el dato de la siguiente gráfica Ilustración 48 que obedece a la siguiente expresión matemática.

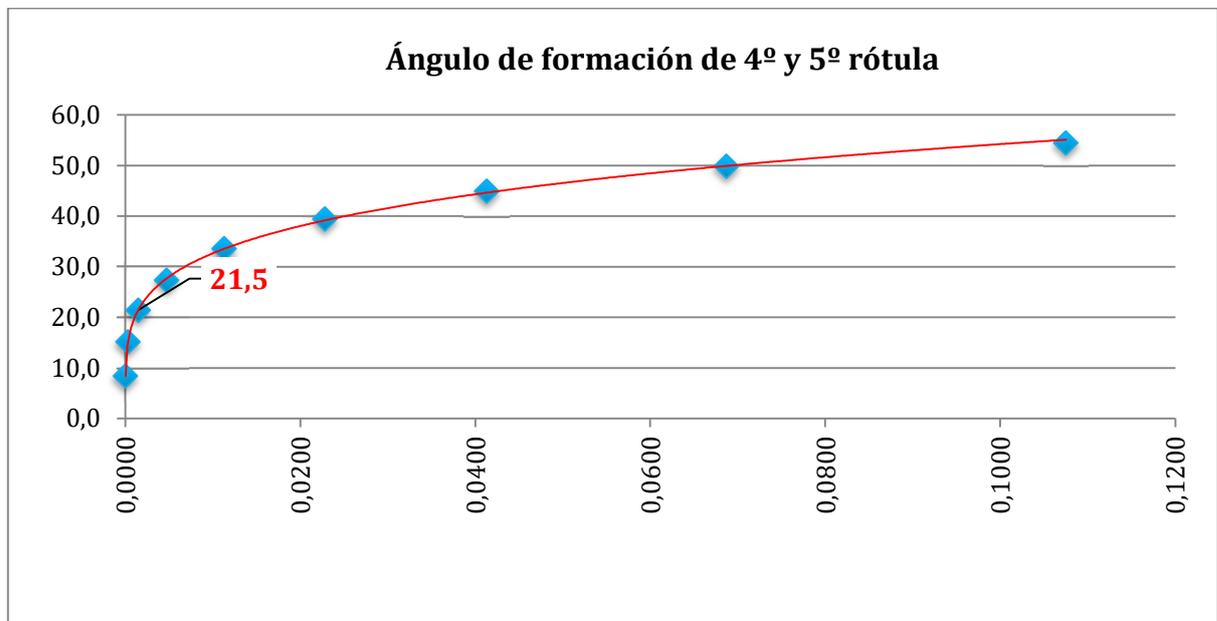
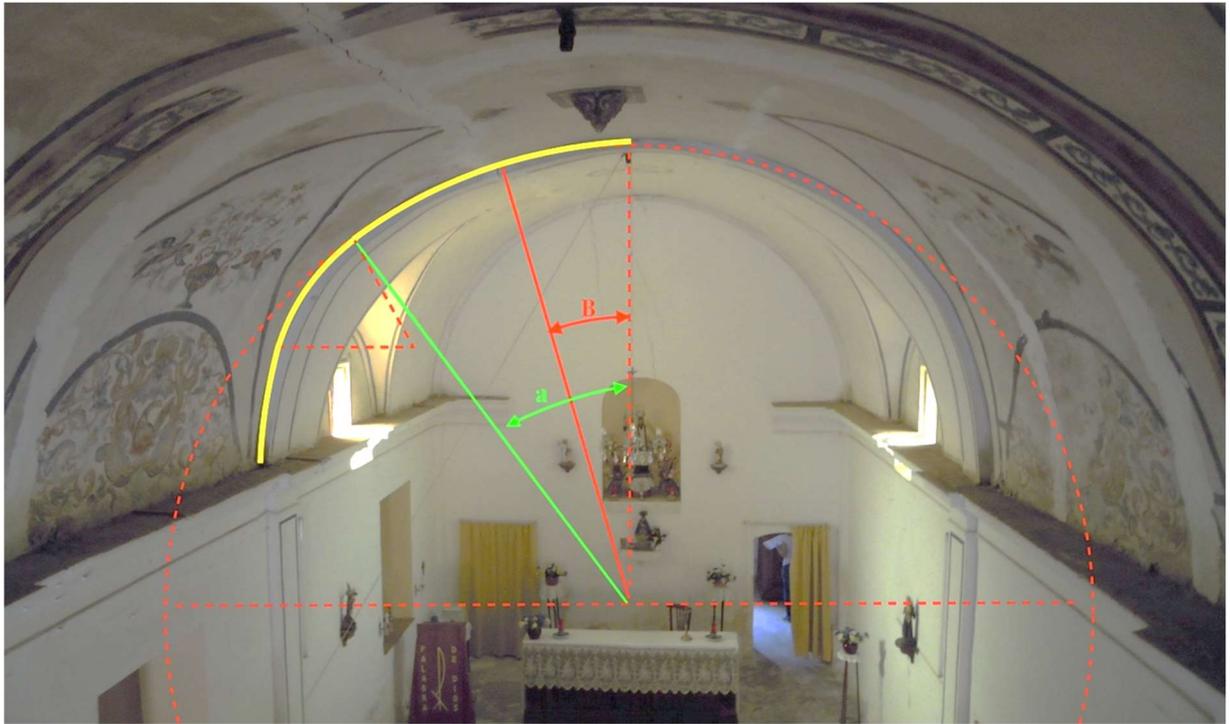


Ilustración 53. Posición inicial del ángulo  $\beta_0$

En el caso de nuestro ejemplo, el ángulo  $\beta_0$  quedaría en  $21,5^\circ$  desde la vertical. Esto se acerca curiosamente a la zona donde se ha provocado la fisura que cruza prácticamente toda la nave Ilustración 49

- e) A partir de este momento ya tenemos delimitados los puntos de paso que debe cumplir el funicular Ilustración 56, así como el valor y posición de las cargas, tal y como se ve en Ilustración 71 página 92. Podemos, pues, trazar la Línea de Empuje Mínimo y observar si ésta queda dentro de la geometría de la estructura y poder determinar el grado seguridad de esta.

Una vez configurada la región central se procede a trazar el polígono funicular, haciendo pasar la línea de empujes por las rotulas y no salga de la geometría de esta región central. Ver apartado Anexo 5 pagina 106 PLANOS



*Ilustración 54 Posición del ángulo  $\alpha$  y  $\beta$  en la bóveda de canon de la Ermita de San Francisco Javier.*

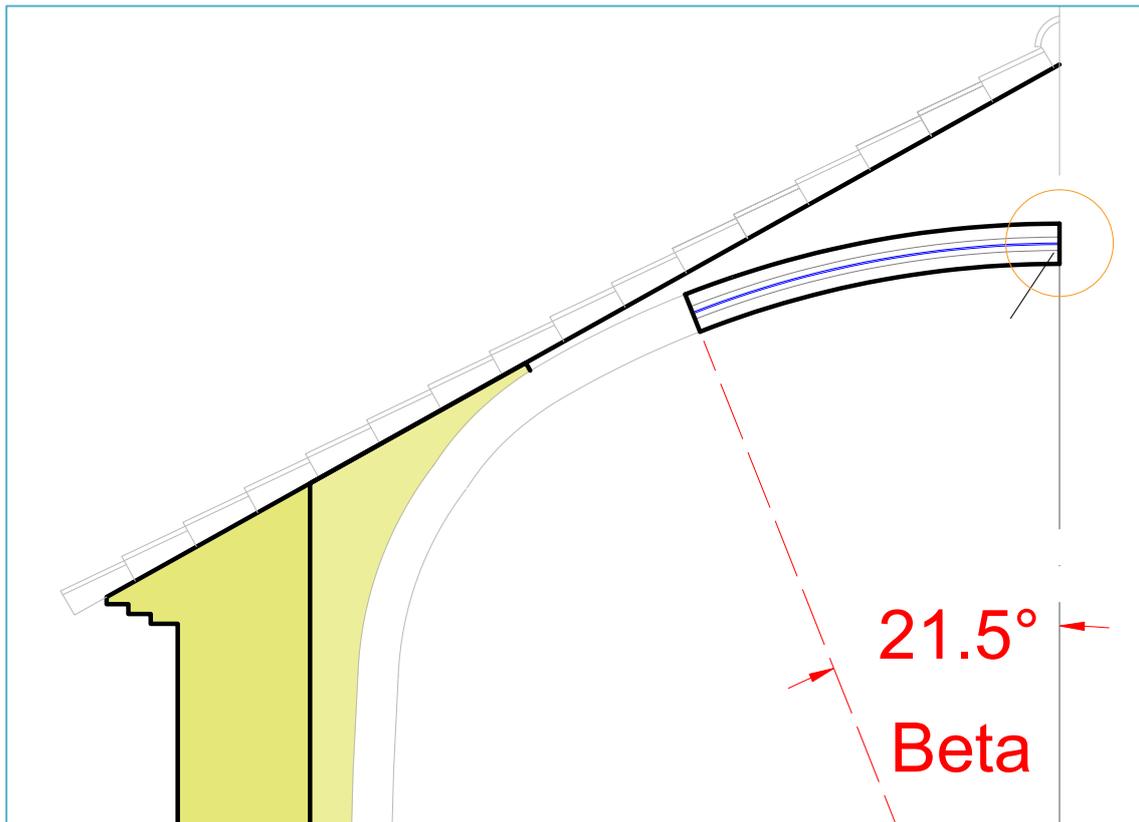


Ilustración 55 Región central del arco límite, en azul.

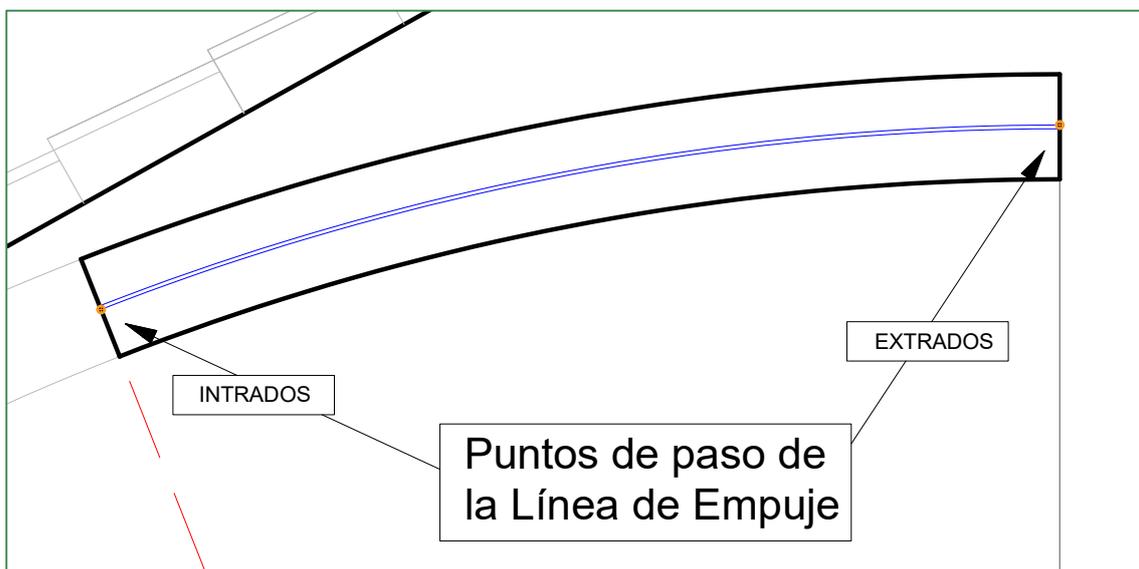


Ilustración 56 Posición de las rotulas, puntos de paso del funicular.

El trazado del polígono funicular se realiza en el apartado RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO: página 41



## 2.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS LÍMITE MEDIANTE GEOGEBRA.

GeoGebra es un software interactivo de matemáticas que reúne directamente geometría, análisis, álgebra estadística y cálculo en un interfaz gráfico que permite un uso sencillo y muy potente en relación con las funciones de interconexión entre elementos y la posibilidad de ejecutar modificaciones a tiempo real. Esta herramienta parece haber sido diseñada para trazar polígonos de fuerzas y funiculares que, pueden moverse sincronizadamente y modificar sus valores, de una forma dinámica y muy visual, Ilustración 57 y Ilustración 58. Este software permite reproducir estos efectos y es aplicable a cualquier tipo de arco.

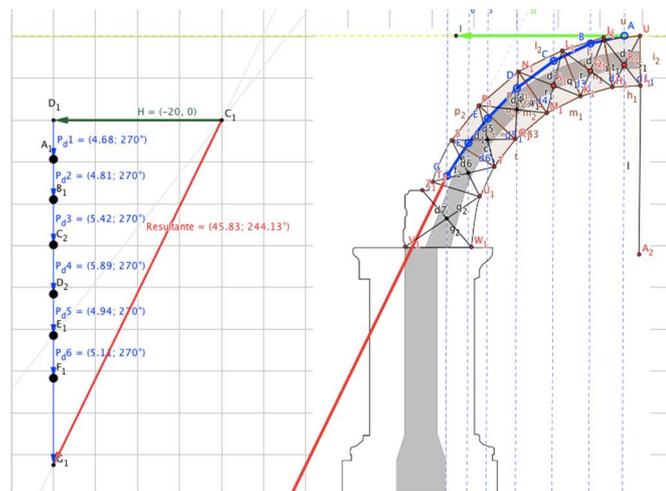


Ilustración 57

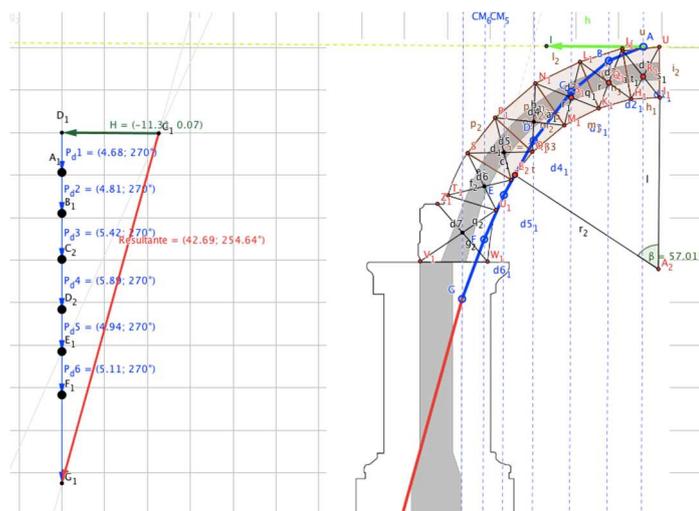


Ilustración 58

PROCEDIMIENTO:

Existen manuales que explican el funcionamiento de la herramienta informática. A con situación se explica el proceso de aplicación al caso que nos ocupa.

1. Consiste en aplicar la magnitud de los pesos propios Tabla 7 en forma de vectores, y cerrarlo con vectores de H (empuje horizontal) y R (resultante), de forma análoga a como se traza el polígono de fuerzas. Ilustración 59.
2. Unir los finales de cada vector que representa el peso propio de cada dovela, con el punto arbitrario, (inicio del vector H).
3. Ubicar los puntos de Centros de Masas (CM) en cada dovela y trazar una recta perpendicular que pase por cada CM, para preparar el trazado del polígono funicular, Ilustración 60
4. En el polígono funicular, trazar líneas dependientes a las líneas del polígono de fuerzas. que unan estos CM de dos en dos Ilustración 61.
5. Dibujar segmentos entre los CM para visualizar la línea de empujes Ilustración 62.
6. Trazar ángulo desde la vertical y dejar dependiente del punto de corte con la geometría del arco dibujado Ilustración 63, (el extradós o intradós en función del esfuerzo H buscado).
7. Completar el polígono de funicular que se moverá en función de como movamos el vector H en el polígono de fuerzas.

<b>LADO IZQUIERDO DEL ARCO</b>					
ELEMENTO	ÁREA	ANCHO	VOLUMEN	PESO ESPECIFICO	PESO PROPIO
	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN
Dovela 01	0,26	0,83	0,21	22,00	4,68
Dovela 02	0,26	0,83	0,22	22,00	4,81
Dovela 03	0,30	0,83	0,25	22,00	5,42
Dovela 04	0,32	0,83	0,27	22,00	5,89
Dovela 05	0,27	0,83	0,22	22,00	4,94
	<b>1,41</b>		<b>1,17</b>		<b>25,7</b>

Tabla 7

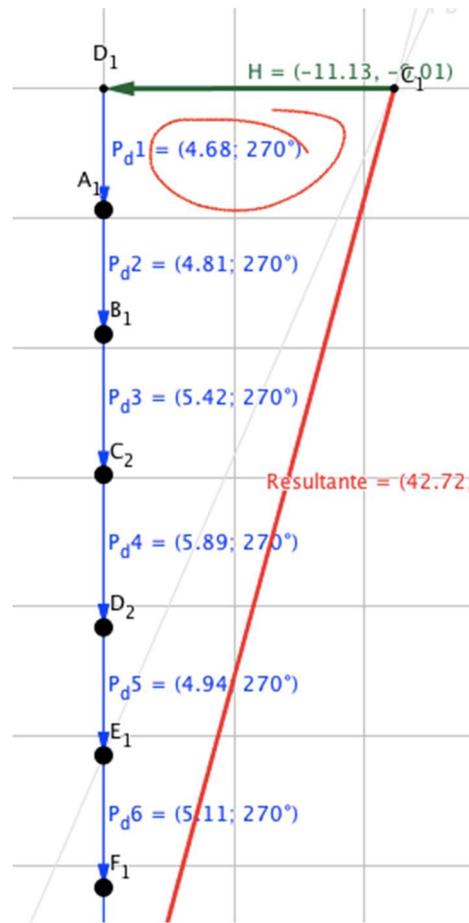


Ilustración 59

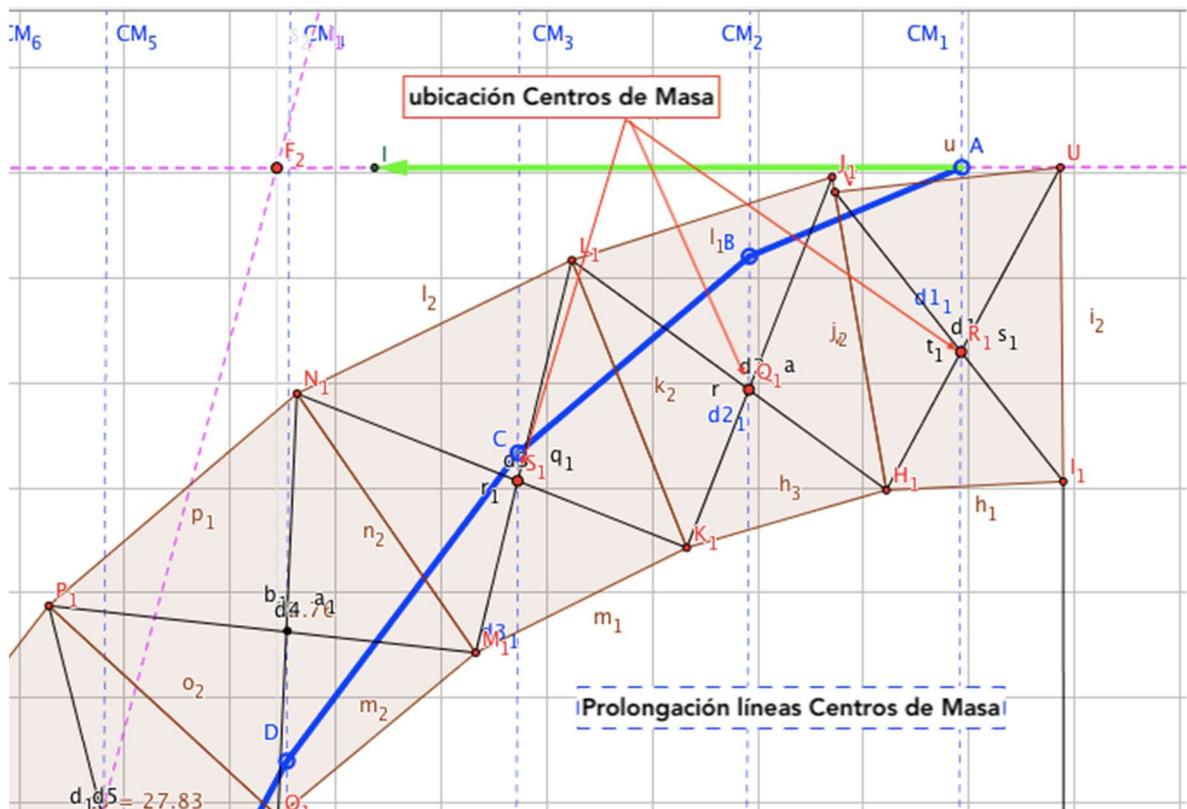


Ilustración 60

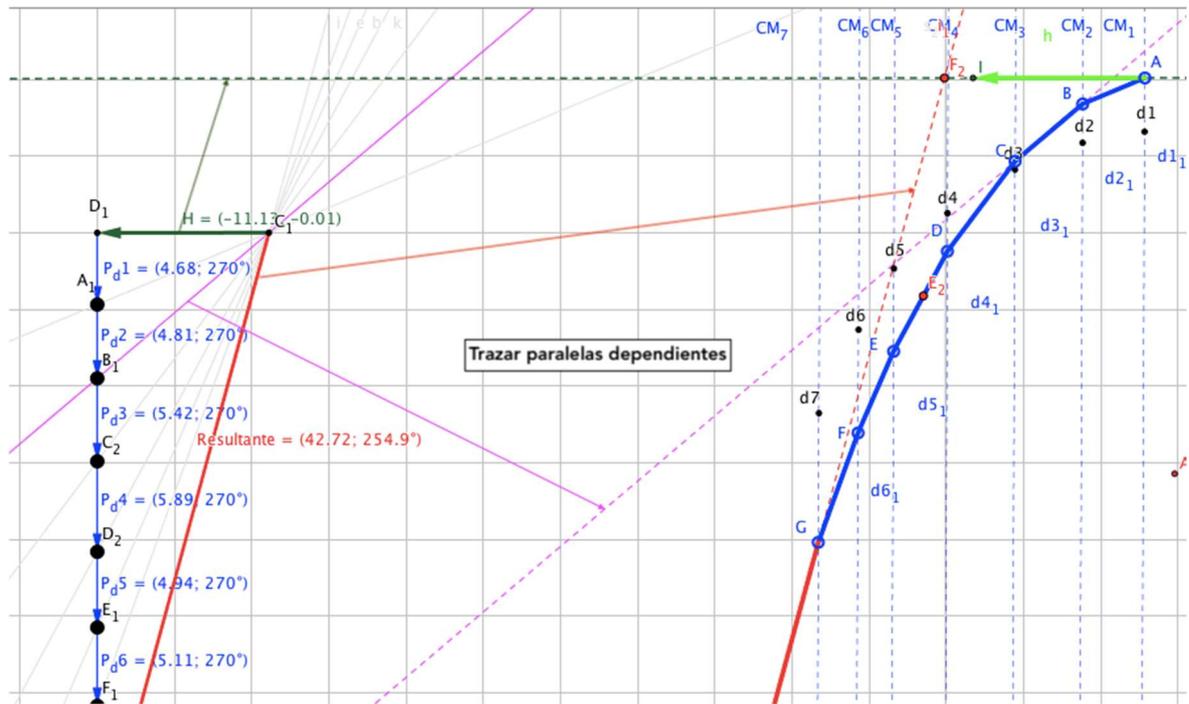


Ilustración 61

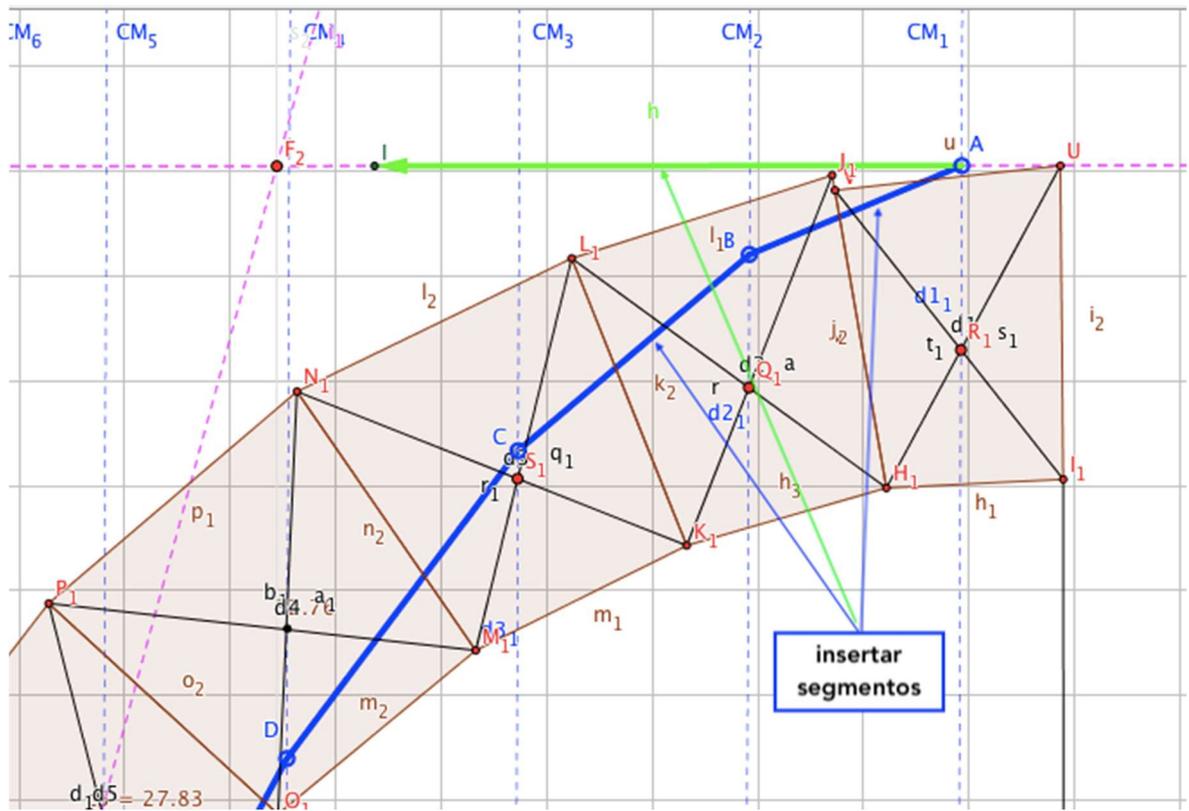
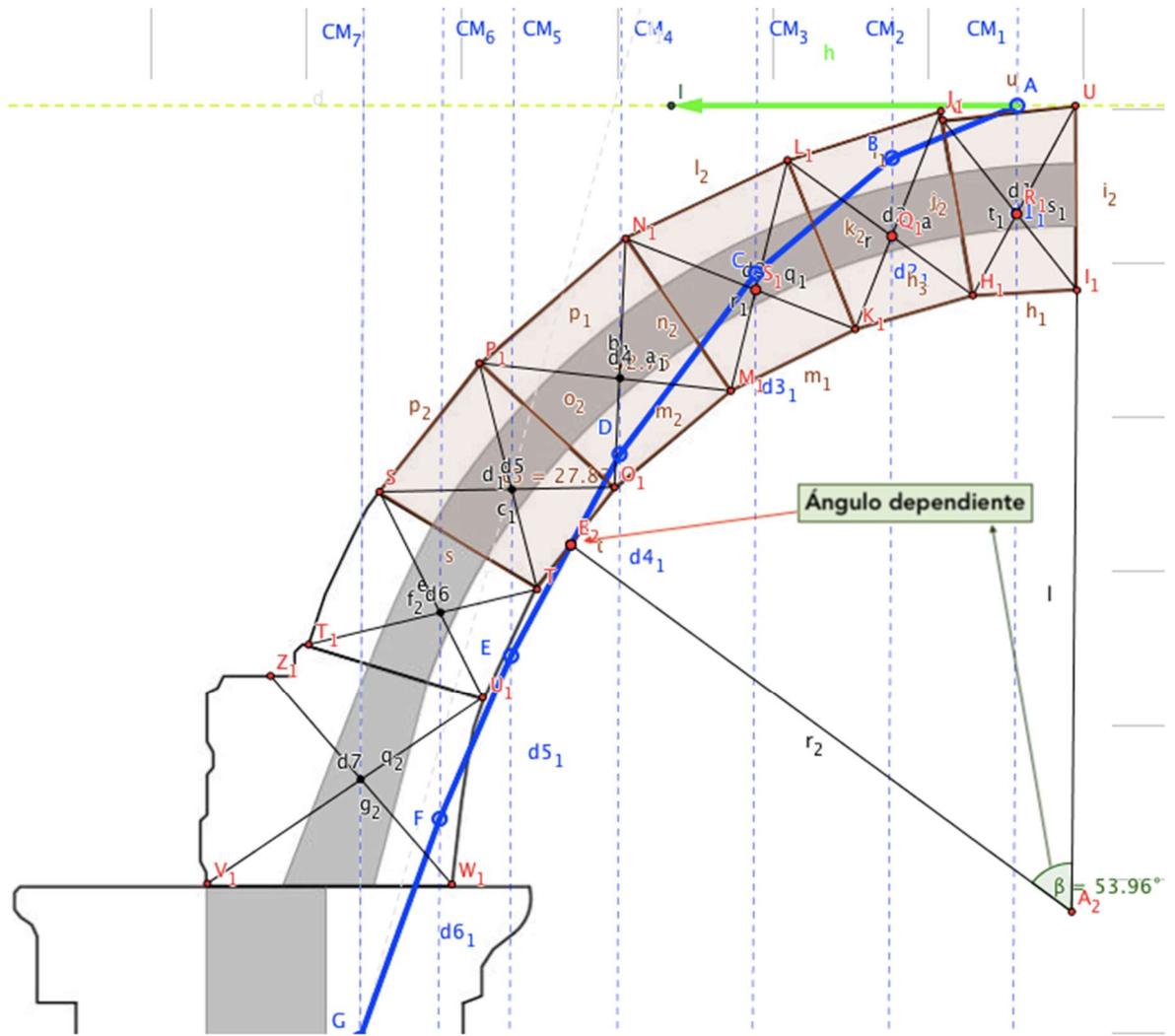


Ilustración 62





### 3. PLIEGO DE CONDICIONES

#### 3.1. CONDICIONES SOBRE LOS MATERIALES

El acabado de los revestimientos interiores de la Ermita de San Francisco Javier se realizaron en base de cal, Ilustración 64, por este motivo no es posible apreciar a simple



vista el material con el que están contruidos los arcos. Para la realización de los cálculos en este caso, para decantarnos del lado de la seguridad, supondremos que el material con el que están contruidos los arcos es de arenisca con una densidad de 23 kN/m<sup>3</sup>. (FineSoftwareGeotécnico)

*Ilustración 64. Revestimiento de la bóveda.*

También, por no ser observable a simple vista, para el relleno del riñón consideraremos que tendrá la misma densidad de 22 kN/m<sup>3</sup>, (FineSoftwareGeotécnico) ya que en este trabajo académico no se realizaron catas.

Por último y dado que en el exterior de la ermita el paramento está desprovisto de



revestimiento, Ilustración 65 sí que podemos determinar la densidad del material de una forma más realista, por tanto, para el resto de materiales de contraresto, muro-estribo y coronación de muro se considera que la densidad es equivalente al de la roca caliza, de 24 kN/m<sup>3</sup>, (FineSoftwareGeotécnico).

*Ilustración 65. Composición del muro.*

Este es pues Tabla 8, el resumen de los pesos específicos que se consideraran de aplicación

en los materiales que se encuentran en cada elemento estructural que se va a analizar.

<b>DENSIDAD ESTIMADA MATERIALES</b>	
<b>ELEMENTO</b>	<b>PESO ESPECIFICO</b>
	kN/m <sup>3</sup>
Dovelas e imposta	23,00
Relleno Riñón	22,00
Contrarresto	24,00

Tabla 8. Densidad estimada de los materiales que componen la estructura (FineSoftwareGeotécnico)

## 3.2. CONDICIONES SOBRE LA GEOMETRÍA

Durante las visitas al Ermitorio de San Francisco Javier, se recopiló toda la información necesaria para la elaboración de planos y se realizó el reportaje fotográfico que sirvió de ayuda a la hora de determinar criterios para la estimación de los datos de densidad de materiales.

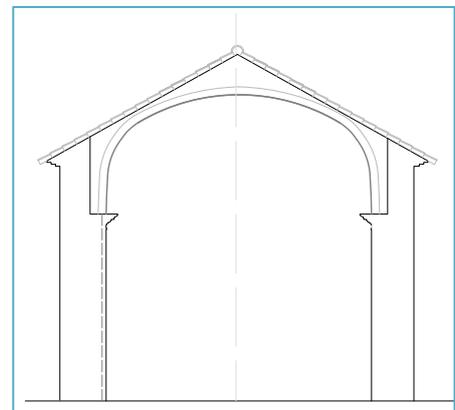


*Ilustración 66. Fisura en la bóveda de cañón de la Ermita de San Francisco Javier.*

Como se observa en las fotografías y se detalla en la memoria, además de las reparaciones de las grietas que recorren verticalmente la bóveda (desde el arco hasta la imposta), se observa una fisura longitudinal que prácticamente cruza toda la nave. La altura en la que se localiza esta grieta en la rosca es muy significativa, como se ha observado en Ilustración 54

### PARAMETRIZACIÓN.

Para el levantamiento se realizó una toma básica de datos. Se anotaron las dimensiones principales, para poder deducir los volúmenes de la ermita. Con flexómetro, (en el caso de las cotas accesibles y mediante medidor laser para las dimensiones en altura, que ayudaron a deducir la forma del arco. Todo



*Ilustración 67, Sección de análisis*

esto sirvió para la realización de los planos 5.2 página 110. Esto permitió dimensionar las partes de la estructura y dotar de volumen a los elementos que están sujetos a estudio.

Como se observa en la Ilustración 68 e Ilustración 69 la bóveda tiene unos nervios que sobresalen del plano, unos 8 centímetros, que también se prolongan hasta la base de los estribos a modo de pilares embebidos en los muros. Estos nervios propician en estos puntos de la bóveda un espesor de 16 centímetros totales de rosca. Con este dato y el radio hasta la generatriz del arco, podremos calcular el espesor mínimo necesario para iniciar el procedimiento.



Ilustración 68

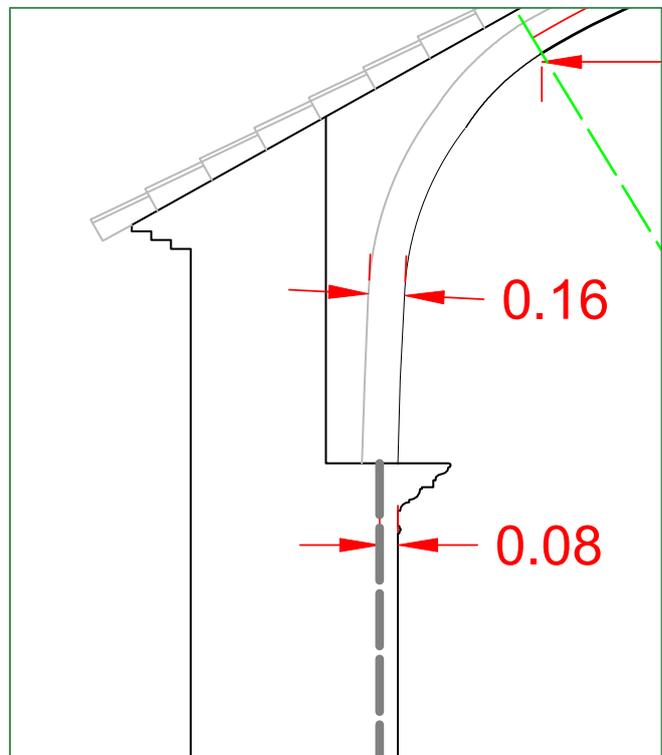


Ilustración 69

Durante una de las visitas se pudo acceder a la cubierta y se observó que las viguetas que sujetan la teja descansaban sobre el muro, Ilustración 70

Además, se podía apreciar en el encuentro con el muro, material que hace suponer que la

zona del extradós del riñón este relleno. Esta es una solución que propiciara que la línea de empujes se reconduzca en vertical, favoreciendo que a que esta no salga de la geometría.



*Ilustración 70 Encuentro de viguetas de cubierta con el muro. Ermita de San Francisco Javier.*

### 3.3. CONDICIONES DE APLICABILIDAD DEL MÉTODO

#### ASIGNACIÓN DE CARGAS

Unas de las tareas más laboriosas del procedimiento gráfico, es asignar las cargas a cada elemento de la estructura. Hay que identificar, por un lado, cada uno de los diferentes elementos de la estructura. A continuación, ubicar la posición en su Centro de Masas Local donde aplicar una magnitud de carga en forma de vector Ilustración 71. Estas cargas resultaran de calcular el volumen de cada pieza y multiplicando por la densidad del material con el que están construidas, tal y como se ve en la estimación de la Tabla 9.

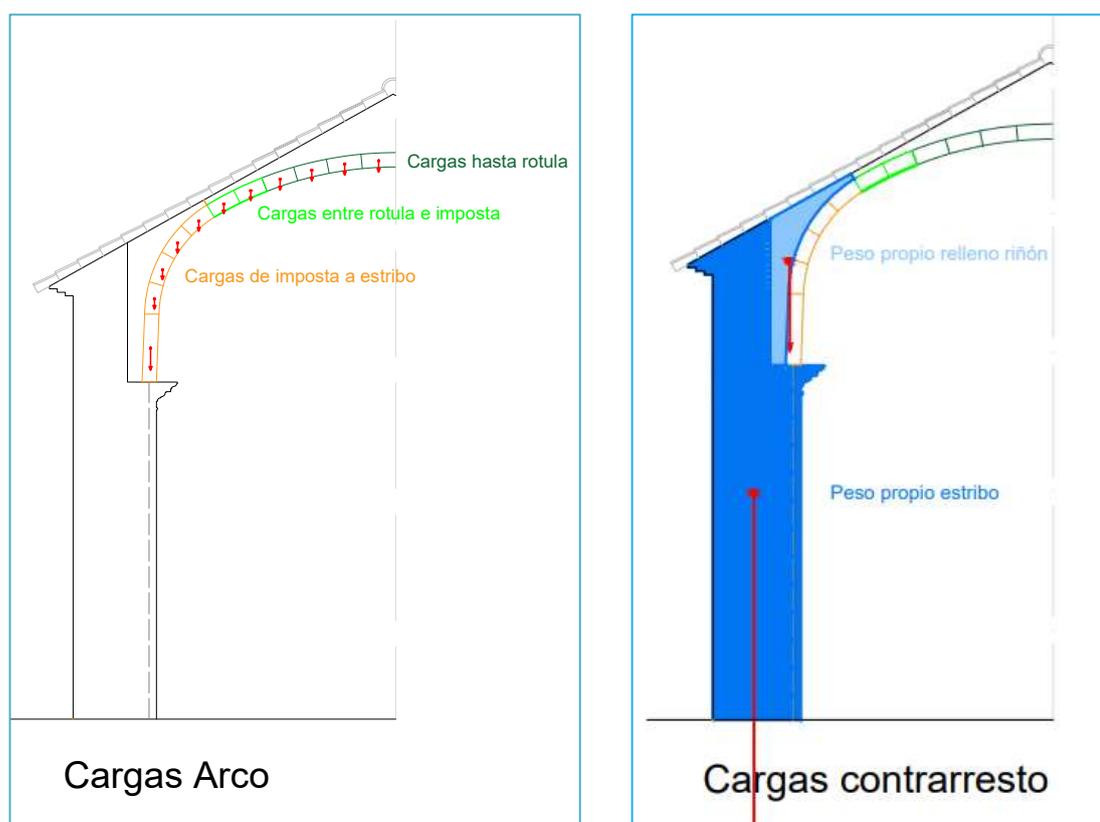


Ilustración 71. Cargas del arco y del contrarresto.

Para el cálculo del volumen de cada pieza se ha considerado 1 metro de profundidad, sin tener en cuenta los huecos en fachada como, lunetos o ventanas.

En la Tabla 9, se detallan los volúmenes y pesos propios de los elementos que intervienen en el cálculo. Para este modelo, no se han considerado otras cargas puntuales como la acción del viento, por tratarse de una estructura pesada.

<b>LADO IZQUIERDO DEL ARCO</b>					
<b>ELEMENTO</b>	<b>ÁREA</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>VOLUMEN</b>	<b>PESO ESPECIFICO</b>	<b>PESO PROPIO</b>
	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN
Dovela 01	0,064	1,00	0,06	23,00	1,48
Dovela 02	0,063	1,00	0,06	23,00	1,45
Dovela 03	0,061	1,00	0,06	23,00	1,40
Dovela 04	0,061	1,00	0,06	23,00	1,39
Dovela 05	0,055	1,00	0,06	23,00	1,27
Dovela 06	0,055	1,00	0,06	23,00	1,27
Dovela 07	0,057	1,00	0,06	23,00	1,30
Dovela 08	0,056	1,00	0,06	23,00	1,29
Dovela 09	0,056	1,00	0,06	23,00	1,29
Dovela 10	0,056	1,00	0,06	23,00	1,29
Imposta	0,125	1,00	0,12	23,00	2,87
Relleno Riñón	0,482	1,00	0,48	22,00	10,59
Estribo	4,536	1,00	4,54	24,00	108,87
			<b>5,73</b>		<b>135,8</b>

Tabla 9.. Relación de cargas de la estructura de la ermita.

### 3.4. CONDICIONES DE LA INTERVENCIÓN

La propuesta de intervención en la Ermita de san Francisco Javier viene motivada por los resultados obtenidos en el análisis límite de estabilidad desarrollado en el presente TFG, apartado 1.7.7, página 46.

Asumiremos los resultados obtenidos como hipótesis de partida para plantear la intervención. Estos resultados indican que la Línea de Empujes sale de la geometría del muro a una altura de 20 centímetros sobre la rasante y se proyecta a 2 centímetros hacia el exterior del muro recayente a la calle Ermita, tal y como se aprecia en los resultados Ilustración 24.

Como se observa en Ilustración 72, la base del muro se ensancha por encima de la cota del asfalto, invadiendo la calzada. Se toma como inicio de la cimentación del muro.



*Ilustración 72. Fachada oeste de la Ermita de San Francisco Javier. Calle Ermita.*

## 4. PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

**1 [Cap\_1#] MOVIMIENTO Y ADECUACION DEL TERRENO 446,45 €**

**1.1 m CORTE HORM / ASFALTO. hasta 10 cm**

**[PESICA100\_1]**

Corte de superficie asfáltica o de hormigón de hasta 100 mm. de profundidad, para separar la zona de excavación del resto de pavimento a conservar. Trabajo previo a la realización de la excavación.

Longitud total zona abovedada	1,00	18,52			18,52
		18,52 m	8,59 €		159,09 €

**1.2 [PUDM200] m3 LEVANTADO a MÁQUINA PAVIMENTO ASFÁLTICO**

Levantado a máquina de pavimento asfáltico, realizado mediante empuje a máquina de retro pala con martillo rompedor incorporado, con retirada de escombros a carga, sin incluir transporte al vertedero. Incluyendo limpieza y medios auxiliares. Estimando volumen a realizar en su medición.

Pavimento asfaltico a retirar	1,00	18,52	0,60	0,05	0,56
		0,56 m3	31,03 €		17,38 €

**1.3 [PUDM300] m3 LEVANTADO a MÁQUINA BASE GRANULAR**

Levantado a máquina de base granular completo, realizado mediante empuje a máquina de retroexcavadora con retirada de escombros a carga, sin incluir transporte al vertedero. Incluyendo limpieza y medios auxiliares. Estimando volumen a realizar en su medición.

Base del pavimento asfaltico a retirar	1,00	18,52	0,60	0,15	1,67
		1,67 m3	20,69 €		34,55 €

**1.4 m3 EXCAVACIÓN BATACHES T. COMPACTOS CON MÁQUINA**

**[PEAECB200]**

Excavación de terrenos compactos en bataches, ejecutada mecánicamente. Incluyendo replanteo, medios de seguridad y salud, y perfilado de paredes y fondos. Sin incluir carga ni transporte. Estimando volumen teórico sin esponjamiento en su medición.

Apertura de bataches (Puesta 1)	2,00	1,55	0,60	0,40	0,74
	3,00	1,05	0,60	0,40	0,76
Apertura de bataches (Puesta 2)	2,00	3,06	0,60	0,40	1,47
Apertura de bataches (Puesta 3)	2,00	3,06	0,60	0,40	1,47
		4,44 m3	23,45 €		104,12 €

**1.5 [PEATCT100]m3 CARGA MECÁN. T. EXCAV. + TRANSP. MÁX. 10 km.**

Carga de tierras de la excavación, ejecutada mecánicamente con pala cargadora y colocadas sobre camión basculante, con transporte al vertedero de un trayecto máximo de 10 km. Sin incluir canon de vertido. Estimando volumen teórico sin esponjamiento en su medición.

Pavimento asfáltico a retirar	1,15	0,56	0,64
Base de zahorra bajo pavimento asfáltico	1,10	1,67	1,84
Bataches	1,15	4,44	5,11
		7,59 m3	17,30 €
			131,31 €

**2 [Cap\_2#] CIMENTACIONES SOLERAS Y MUROS 7.980,66 €**

**2.1 m3 H. LIMPEZA HL-150 TM. 20 mm. NORMAL V. MANUAL [PECSZHL100]**

Hormigón de limpieza fabricado en obra con dosificación mínima de cemento de 150 kg/m<sup>3</sup>., cualquier tipo de consistencia, con tamaño de árido hasta 20 mm. y para ambientes no agresivos o normales en zapatas, zanjas y vigas riostras. Incluyendo vertido manual. Estimando planta teórica por profundidad real en su medición.

Bataches (Puesta 1)	2,00	1,55	0,60	0,10	0,19
	3,00	1,05	0,60	0,10	0,19
Bataches (Puesta 2)	2,00	3,06	0,60	0,10	0,37
Bataches (Puesta 3)	2,00	3,06	0,60	0,10	0,37
			1,12 m3	111,80 €	125,22 €

**2.2 m3 H.ARM. HA-25 TM.20mm. NORM V.M. ZAPATA B500S E.MAD [PECSZMDBM100]**

Hormigón armado fabricado de central de resistencia 25 N/mm<sup>2</sup>., cualquier tipo de consistencia, con tamaño de árido hasta 20 mm. y para ambientes no agresivos y normales en zapatas, zanjas, vigas riostras y demás elementos asimilables. Incluyendo armado de acero corrugado B-500-S, con montaje "in situ" por bataches, para una cuantía de acero de 60 Kg/m<sup>3</sup>, encofrado y desencofrado de madera, vertido manual y vibrado. Incluso parte proporcional de confección de encofrado lateral de cada batache para colocación de junta de PVC. Con acabado superficial fratasado a mano, con una pendiente hacia la calzada del 2%. Estimando volumen teórico en su medición.

Elemento de refuerzo (Puesta 1)	2,00	1,55	0,60	0,60	1,12
	3,00	1,05	0,60	0,60	1,13
Elemento de refuerzo (Puesta 2)	2,00	3,06	0,60	0,60	2,20
Elemento de refuerzo (Puesta 3)	2,00	3,06	0,60	0,60	2,20
			6,65 m3	1.160,53 €	7.717,52 €

**2.3 m JUNTA ESTANQUEIDAD MURO C/PVC. [PEUPMLO300]**

Suministro y colocación de junta de estanqueidad en muros de sótano realizado mediante banda a base de PVC blando; colocadas en el proceso de hormigonado. Incluyendo pérdidas, limpieza y pequeño material. Estimando metro lineal realizado.

Elemento de refuerzo (Puesta 1)	2,00			0,80	1,60
	6,00			0,80	4,80
			6,40 m	21,55 €	137,92 €

<b>3 [Cap_3#]</b>	<b>SEGURIDAD Y SALUD</b>		<b>190,55 €</b>
<b>3.1 [PSO600]</b>	<b>u MEDIDAS PREVENTIVAS</b>		
	Medidas preventivas conforme a lo recogido en el Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.		
Medidas preventivas durante la ejecución de los trabajos	1,00		1,00
		1,00 u	190,55 €
			190,55 €

**4 [Cap\_4#] CONTROL DE CALIDAD 287,24 €**

**4.1 [PCECC100] u ENSAYO COMPLETO BARRAS CORRUG. ACERO**

Ensayo completo para determinar la calidad de las barras corrugadas de acero destinadas a formar parte en estructuras de hormigón armado mediante; la determinación de las características geométricas y ponderales; comprobando la ovalidad por calibrado, la sección equivalente y desviación de la masa y las características geométricas de los resaltos; ensayo físico completo para mediante una serie de pruebas de doblado-desdoblado; y ensayo mecánico completo determinando el límite elástico, tensión de rotura, alargamiento de rotura, registro continuo del diagrama cargas-deformaciones y módulo de elasticidad.

Ensayo acero suministrado	1,00		1,00
		1,00 u	122,48 €
			122,48 €

**4.2 [PCEH200] u ENSAYO CONSISTENCIA y 4 PROBETAS HORMIGÓN**

Ensayo para comprobar la calidad del hormigón destinado a uso estructural obteniendo; consistencia en estado fresco mediante cono de Abrams, fabricación de 4 probetas cilíndricas, posterior conservación para curado en cámara húmeda durante un período de 28 días, refrentado y rotura a compresión.

Ensayo consistencia y resistencia hormigón empleado	1,00		1,00
		1,00 u	164,76 €
			164,76 €

---

**5 [Cap\_5#] GESTION DE RESIDUOS 26,81 €**
**5.1 [PRNA100] m3 GESTIÓN RESIDUOS AGLOMERADO ASFÁLTICO VERTEDERO**

Tasa para la deposición directa de residuos de construcción de aglomerado asfáltico exentos de materiales reciclables en vertedero autorizado por la comunidad autónoma correspondiente. Sin incluir carga ni transporte. Según operación enumerada D5 de acuerdo con la orden MAM 304/2002 por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos.

Pavimento asfáltico a retirar	1,15	0,56	0,64
		0,64 m3	3,56 €
			2,28 €

---

**5.2 [PRNI100] m3 GESTIÓN RESIDUOS TIERRAS VERTEDERO**

Tasa para la deposición directa de tierras de excavación separadas exentas de materiales reciclables en vertedero autorizado por la comunidad autónoma correspondiente. Sin incluir carga ni transporte. Según operación enumerada D5 de acuerdo con la orden MAM 304/2002 por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos.

Base de zahorra bajo pavimento asfáltico	1,10	1,67	1,84
Bataches	1,15	4,44	5,11
		6,95 m3	3,53 €
			24,53 €

---

**total, del presupuesto: 8,931.71 €**

CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

**1 MOVIMIENTO Y ADECUACION DEL TERRENO**

**1.1 PESICA100\_1 m CORTE HORM / ASFALTO. hasta 10 cm**

Corte de superficie asfáltica o de hormigón de hasta 100 mm. de profundidad, para separar zona de excavación del resto de pavimento a conservar. Trabajo previo a la realización de excavación.

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Subtotal
SOM200	Oficial 1ª	0,30	20,89 €	6
SPMI440_1	Cortadora a gasoil para asfalto u hormigón	0,10	20,76 €	2
%CI	Costes indirectos	0,08	3,00 €	0
Total:				8,59 €

**1.2 PUDM200 m3 LEVANTADO a MÁQUINA PAVIMENTO ASFÁLTICO**

Levantado a máquina de pavimento asfáltico, realizado mediante empuje a máquina retro pala con martillo rompedor incorporado, con retirada de escombros a carga, sin incluir transporte al vertedero. Incluyendo limpieza y medios auxiliares. Estimando volumen a realizar en su medición.

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Subtotal
SOM100	Peón	0,50	17,65 €	8
SMD325	Retro pala c/martillo rompedor	0,40	53,25 €	21
%CI	Costes indirectos	0,30	3,00 €	0
Total:				31,03 €

**1.3 PUDM300 m3 LEVANTADO a MÁQUINA BASE GRANULAR**

Levantado a máquina de base granular completo, realizado mediante empuje a máquina retroexcavadora con retirada de escombros a carga, sin incluir transporte al vertedero. Incluyendo limpieza y medios auxiliares. Estimando volumen a realizar en su medición.

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Subtotal
SOM100	Peón	0,40	17,65 €	7
SMD275	Retroexcavadora c/neumáticos	0,20	65,15 €	13
%CI	Costes indirectos	0,20	3,00 €	0
Total:				20,69 €

**1.4 PEAECB200 m3 EXCAVACIÓN BATACHES T. COMPACTOS CON MÁQUINA**

Excavación de terrenos compactos en bataches, ejecutada mecánicamente. Incluye replanteo, medios de seguridad y salud, y perfilado de paredes y fondos. Sin incluir carga y transporte. Estimando volumen teórico sin esponjamiento en su medición.

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Subtotal
SOM100	Peón	0,25	17,65 €	4
SMTE150	Retroexcavadora	0,35	52,43 €	18
%CI	Costes indirectos	0,23	3,00 €	0
Total:				23,45 €

**1.5 PEATCT100 m3 CARGA MECÁN. T. EXCAV. + TRANSP. MÁX. 10 km.**

Carga de tierras de la excavación, ejecutada mecánicamente con pala cargadora y coloca sobre camión basculante, con transporte al vertedero de un trayecto máximo de 10 km. incluir canon de vertido. Estimando volumen teórico sin esponjamiento en su medición.

<b>Código</b>	<b>Resumen</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Subtotal</b>
SMTC100	Pala cargadora	0,10	53,18 €	5
SMTC300	Camión basculante	0,20	57,34 €	11
%CI	Costes indirectos	0,17	3,00 €	0
<b>Total:</b>				<b>17,30 €</b>

**2 CIMENTACIONES SOLERAS Y MUROS****2.1 PECSZHL100 m3 H. LIMPEZA HL-150 TM. 20 mm. NORMAL V. MANUAL**

Hormigón de limpieza fabricado en obra con dosificación mínima de cemento de 150 kg/r cualquier tipo de consistencia, con tamaño de árido hasta 20 mm. y para ambientes agresivos o normales en zapatas, zanjas y vigas riostras. Incluyendo vertido man Estimando planta teórica por profundidad real en su medición.

<b>Código</b>	<b>Resumen</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Subtotal</b>
SOM100	Peón	0,60	17,65 €	10
SPHH300	Hormigón limpieza de central HL-150/P/20	1,10	89,04 €	97
%CI	Costes indirectos	1,09	3,00 €	3
<b>Total:</b>				<b>111,80 €</b>

**2.2 PECSZMDBM10 m3 H.ARM. HA-25 TM.20mm. NORM V.M. ZAPATA B500S E.MAD 0**

Hormigón armado fabricado de central de resistencia 25 N/mm<sup>2</sup>., cualquier tipo consistencia, con tamaño de árido hasta 20 mm. y para ambientes no agresivos y normales: zapatas, zanjas, vigas riostras y demás elementos asimilables. Incluyendo armado de ac corrugado B-500-S, con montaje "in situ" por bataches, para una cuantía de acero de Kg/m<sup>3</sup>, encofrado y desencofrado de madera, vertido manual y vibrado. Incluso p proporcional de confección de encofrado lateral de cada batache para colocación de junta PVC. Con acabado superficial fratasado a mano, con una pendiente hacia la calzada del Estimando volumen teórico en su medición.

<b>Código</b>	<b>Resumen</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Subtotal</b>
PECSZHABM100	H. ARM. HA-25 TM. 20mm. NORMAL V.MAN. ZAPATA B500S	1,00	1.070,89 €	1.070
PECSZE200	ENCOFRADO MADERA ZAPATAS, ZANJAS Y RIOSTRAS	2,50	22,33 €	55
%CI	Costes indirectos	11,27	3,00 €	33
<b>Total:</b>				<b>1.160,53 €</b>

**2.3 PEUPMLO300 m JUNTA ESTANQUEIDAD MURO C/PVC.**

Suministro y colocación de junta de estanqueidad en muros de sótano realizado mediante banda a base de PVC blando; colocadas en el proceso de hormigonado. Incluyendo pérdida de limpieza y pequeño material. Estimando metro lineal realizado.

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Subtotal
SOB100	Oficial 1º impermeabilización.	0,25	22,29 €	5
SOB200	Peón especializado impermeabilización.	0,25	18,09 €	4
SPE925	Banda de PVC blando p/sellado junta muro sótano.	1,05	9,91 €	10
%SRO200	Otros pequeños materiales	0,21	2,00 €	0
%CI	Costes indirectos	0,21	3,00 €	0
			Total:21,55 €	

**3 SEGURIDAD Y SALUD**

**3.1 PSO600 u MEDIDAS PREVENTIVAS**

Medidas preventivas conforme a lo recogido en el Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Subtotal
SVSO60	Medidas preventivas específicas trabajos a realiza	1,00	185,00 €	185
%CI	Costes indirectos	1,85	3,00 €	5
			Total:190,55 €	

**4 CONTROL DE CALIDAD**

**4.1 PCECC100 u ENSAYO COMPLETO BARRAS CORRUG. ACERO**

Ensayo completo para determinar la calidad de las barras corrugadas de acero destinadas a formar parte en estructuras de hormigón armado mediante; la determinación de características geométricas y ponderales; comprobando la ovalidad por calibrado, la sección equivalente y desviación de la masa y las características geométricas de los resaltes; ensayo físico completo para mediante una serie de pruebas de doblado-desdoblado; y ensayo mecánico completo determinando el límite elástico, tensión de rotura, alargamiento de rotura y registro continuo del diagrama cargas-deformaciones y módulo de elasticidad.

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Subtotal
SEC130	Ensayo geométrico barras corrug. de acero	1,00	38,90 €	38
SEC160	Ensayo físico barras/alambres corrug. acero	1,00	17,78 €	17
SEC170	Ensayo mecánico barras corrug. acero	1,00	62,23 €	62
%CI	Costes indirectos	1,19	3,00 €	3
			Total:122,48 €	

**4.2 PCEH200 u ENSAYO CONSISTENCIA y 4 PROBETAS HORMIGÓN**

Ensayo para comprobar la calidad del hormigón destinado a uso estructural obtenier consistencia en estado fresco mediante cono de Abrams, fabricación de 4 probetas cilíndric posterior conservación para curado en cámara húmeda durante un período de 28 d refrentado y rotura a compresión.

<b>Código</b>	<b>Resumen</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Subtotal</b>
SEC210	Consistencia horm. fresco cono de Abrams	4,00	6,66 €	26
SEC900	Ensayo resistencia compresión 1 probeta	4,00	33,33 €	133
%CI	Costes indirectos	1,60	3,00 €	4
<b>Total:</b>				<b>164,76 €</b>

**5 GESTION DE RESIDUOS****5.1 PRNA100 m3 GESTIÓN RESIDUOS AGLOMERADO ASFÁLTICO VERTEDERO**

Tasa para la deposición directa de residuos de construcción de aglomerado asfáltico exei de materiales reciclables en vertedero autorizado por la comunidad autónoma correspondie Sin incluir carga ni transporte. Según operación enumerada D5 de acuerdo con la orden N 304/2002 por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos.

<b>Código</b>	<b>Resumen</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Subtotal</b>
SVGN575	Tasa vertido residuos aglomerado asfalto. vertedero	1,00	3,47 €	3
%CI	Costes indirectos	0,03	3,00 €	0
<b>Total:</b>				<b>3,56 €</b>

**5.2 PRNI100 m3 GESTIÓN RESIDUOS TIERRAS VERTEDERO**

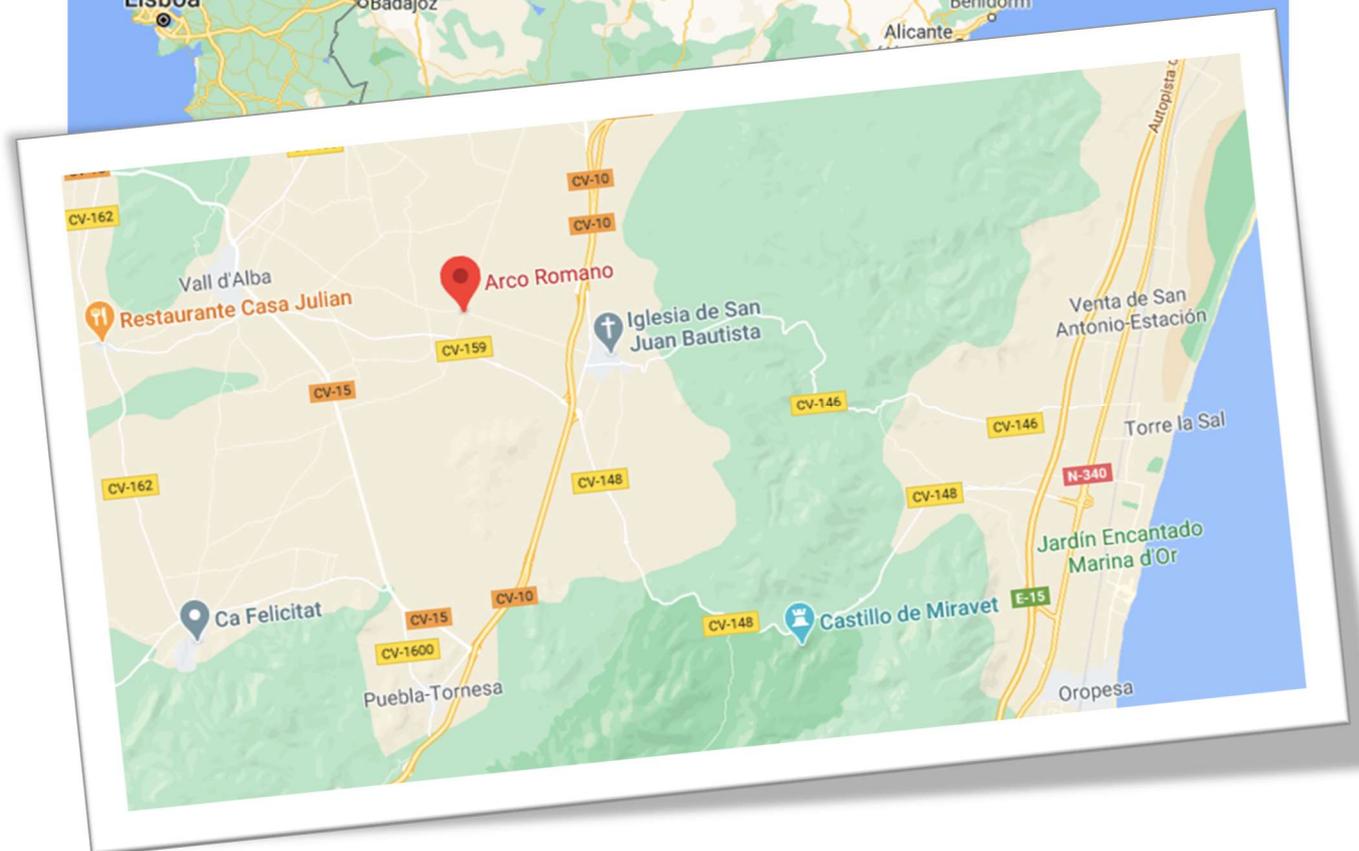
Tasa para la deposición directa de tierras de excavación separadas exentas de materi reciclables en vertedero autorizado por la comunidad autónoma correspondiente. Sin in carga ni transporte. Según operación enumerada D5 de acuerdo con la orden MAM 304/2 por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos.

<b>Código</b>	<b>Resumen</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Subtotal</b>
SVGN102	Tasa vertido residuos tierras excavación vertedero	1,00	3,44 €	3
%CI	Costes indirectos	0,03	3,00 €	0
<b>Total:</b>				<b>3,53 €</b>

## 5. PLANOS

### 5.1. ARCO DE CABANES

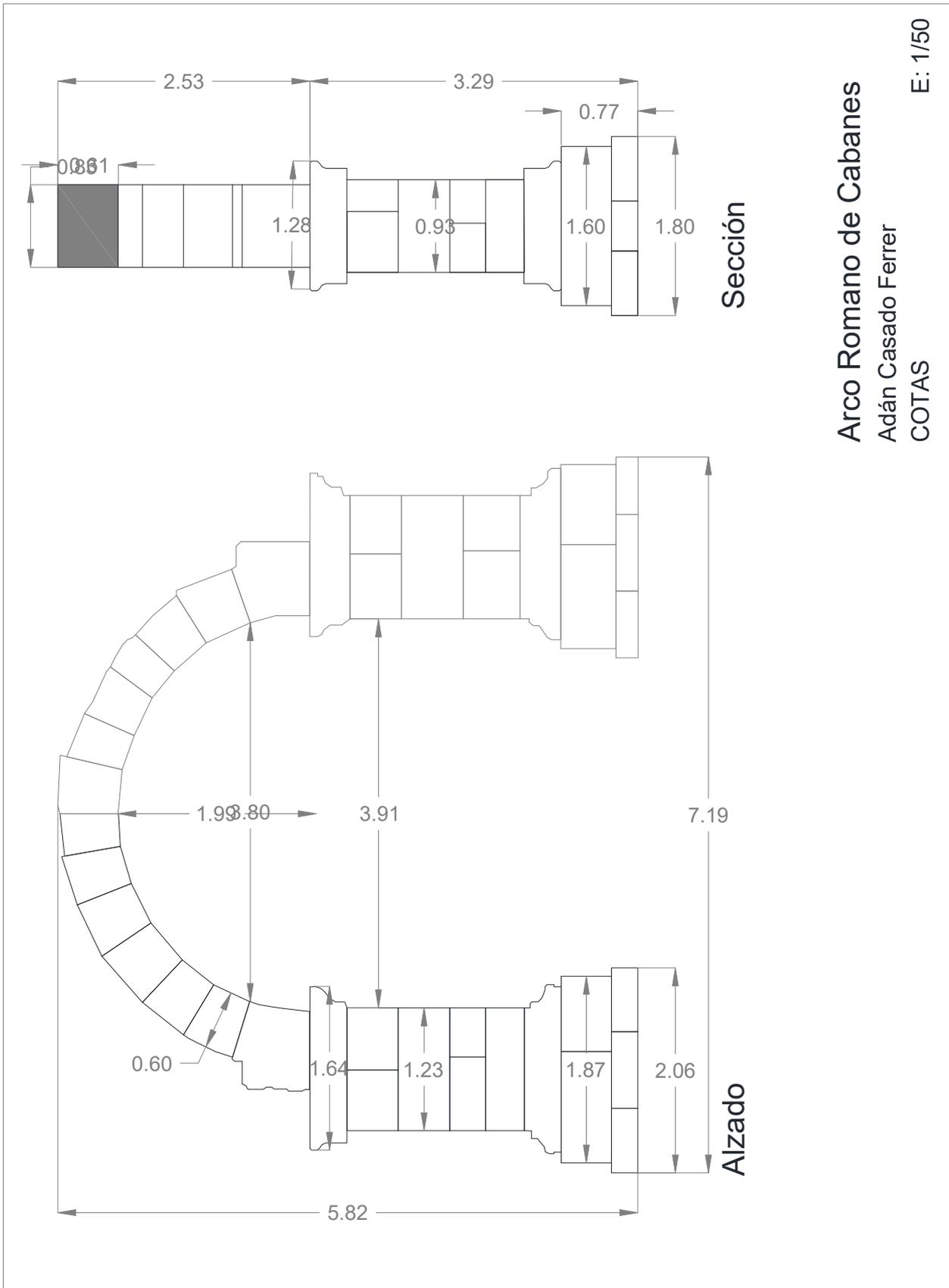
#### SITUACIÓN



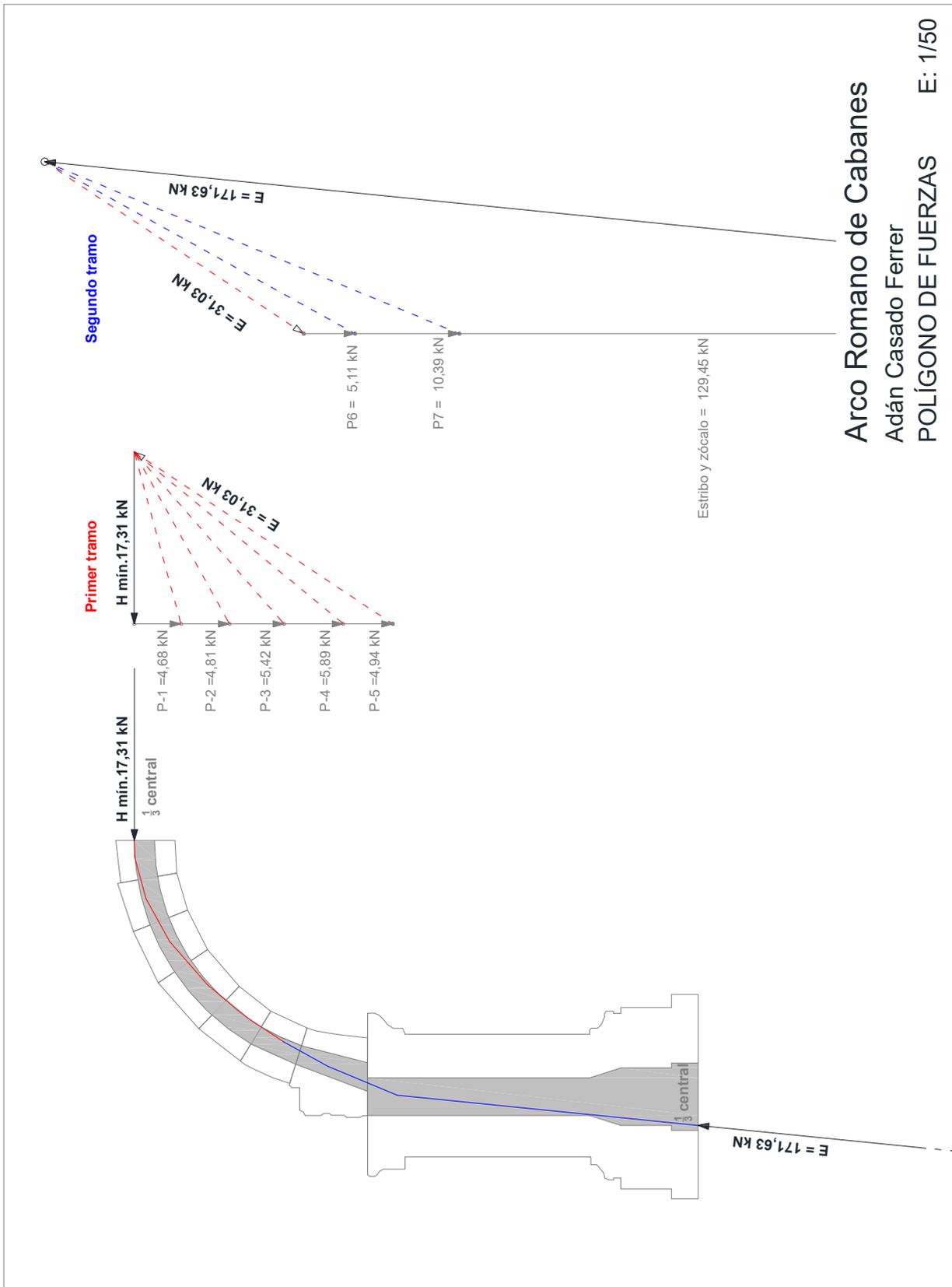
EMPLAZAMIENTO



ALZADO Y PERFIL



ARCO CON POLIGONO DE FUERZAS

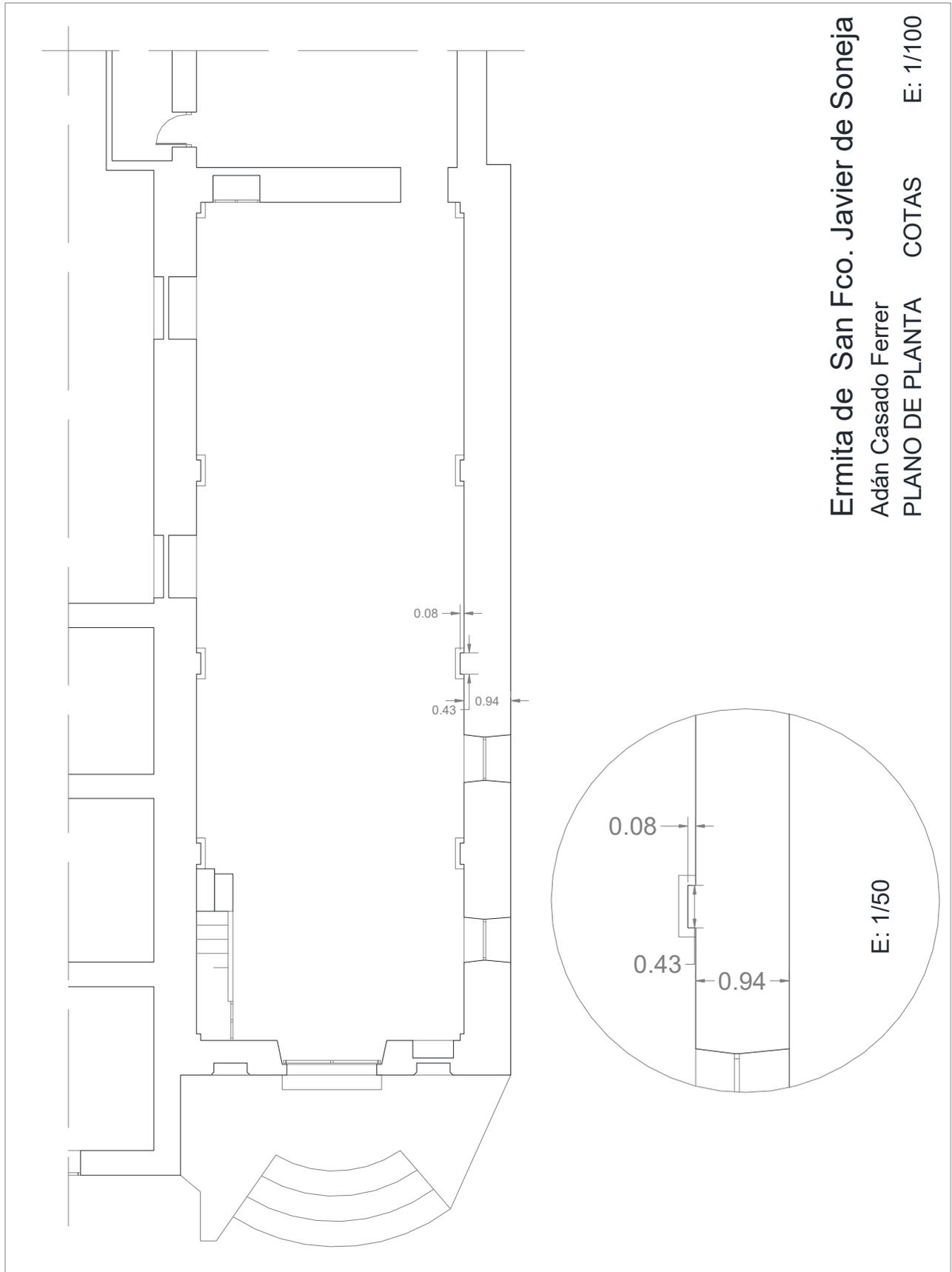


## 5.2. ERMITA DE SAN FRANCISCO JAVIER DE SONEJA

### EMPLAZAMIENTO



PLANTA



**Ermita de San Fco. Javier de Soneja**  
Adán Casado Ferrer  
PLANO DE PLANTA COTAS E: 1/100

ALZADO

