



Universidad
Zaragoza

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DEL ESTADO ACTUAL DEL PUENTE DE
PIEDRA DE ZARAGOZA: SIMULACIÓN POR
ELEMENTOS FINITOS**

I / II



Autor

ARIZA GRACIA, Miguel Ángel

Directores

**José Manuel García Aznar
Luis Fernández Ramón**

Escuela Universitaria de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

2013

A mis seres queridos,

“Un arco no es otra cosa que
una fortaleza formada por dos debilidades”

Leonardo Da Vinci

AGRADECIMIENTOS

Cuando se me ofreció la oportunidad de realizar este Proyecto, presentía que dedicaría una gran cantidad de trabajo y esfuerzo personal durante el último año de mis estudios. Sin embargo, debido a la ingenuidad que caracteriza a un principiante, desconocía que no hubiera sido posible sin la extensa y desinteresada colaboración de múltiples personas.

Por ello me gustaría agradecer a:

D. José Manuel García Aznar y D. Luis Fernández Ramón por su dedicación y guía a lo largo de la génesis proyectual.

D. Carlos Pérez Anadón (Consejero de Urbanismo, Infraestructuras, Equipamientos y Vivienda) y D. José Abadía Tirado (Director de Servicios de Información y Organización) por permitir acceso total a la documentación recogida por el Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza en el Archivo Municipal del Seminario y del palacio de Montemuzo.

D.^a Úrsula Heredia e D.^a Isabel Oliva (Oficina Técnico Administrativa de Urbanismo) por su valioso tiempo y el libro obsequiado.

Al personal de los Archivos por su buen hacer y su amabilidad.

D. Jesús Giménez Pérez (Jefe de Servicios de Conservación de Infraestructuras), D. Javier Mozota Bernad (Jefe del Departamento de Planificación y Desarrollo de Infraestructuras), D. José Ramón Entralgo Layunta (Jefe del Departamento de Conservación y Explotación de Infraestructuras) y D. Ricardo Vázquez Castro (Jefe de la Unidad de Proyectos y Obras de Conservación Infraestructuras) por su diligencia en el intercambio de información.

D. Jorge Santolaria Mazo (profesor del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación) por aportar tangibilidad a mi proyecto.

D. José Luis Sánchez Lamata (Urbanos de Zaragoza) por la información técnica relativa a los autobuses.

D. Juan Antonio Ros Lasierra (profesor del Área de Ingeniería de la Construcción) por su experiencia, conocimientos y amables palabras.

D. José Félix Rodríguez Matas (profesor del Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras) por su tiempo invertido, sus vastos conocimientos pero, sobre todo, su alegría y cercanía.

D. Enrique Cano Suñén (profesor del Área de Ingeniería de la Construcción) porque, con su experiencia personal, aportó claridad en los momentos de duda.

D. José Luis Bernal Agustín (profesor del Área de Ingeniería Eléctrica) por su tutela desde el primer momento.

Todas las personas que mostraron su interés en el proyecto y transmitieron sus críticas constructivas.

Para todos mis amigos: Julio, Marta, Carlos, Fernando, Bea, Jorge, Juanjo, Miriam, Sergio, Alberto... por saber cómo arrancarme una sonrisa en los peores momentos.

A mi familia, los que están y los que estuvieron; especialmente a mi abuela Francisca por sus rezos y sus comidas; a mi madre Gemma por su empatía, su saber escuchar y sus ánimos; a mi padre Miguel Ángel por su estoicismo ante la adversidad, su confianza en mis habilidades y su destreza con las maquetas; y, finalmente, a mi hermano Daniel, por hacerme desarrollar una mente fría y crítica y, a la vez, ampliar la estrechez de miras por la que a veces nos caracterizamos.

A todos, muchas gracias.



RESUMEN

El Puente de Piedra, uno de los símbolos de la ciudad inmortal de Zaragoza, resiste impertérrito el paso del tiempo gracias a su indudable poderío, vigía de los ciudadanos a los que cuida y guía en su travesía, mudo testigo que atesora en su fría piedra los siglos de historia, siendo memoria física de aquéllos que lo construyeron y transitaron, y que será, dentro de unos años, la nuestra propia.

Dota a su entorno de la misma solidez y consistencia con la que fue construido abriéndose paso a través de las inclemencias del tiempo y del servicio abnegado.

Pero ¿sigue, en el tiempo, soportando los nuevos usos y actividades con una seguridad admisible?

A través de la colaboración con el Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza, se realizó una investigación documental en los Archivos Municipales (Seminario, Infraestructuras y Palacio de Montemuzo) que dotase de la información necesaria para abordar un análisis cualitativo constructivo-estructural, así como ampliar los conocimientos históricos acerca de este emblema de la ciudad.

Tras realizar una exhaustiva lectura de la documentación, se extrajeron los datos necesarios de historia, localización y entorno, dimensiones geométricas, materiales que lo conforman, remodelaciones importantes sufridas y el estado constructivo y patológico actual del puente.

En primera instancia, se procedió a realizar el modelo 3D continuo del Puente con el software de cálculo por elementos finitos “Abaqus CAE” y que serviría, a posteriori, para realizar una impresión plástica tridimensional. Además, en paralelo, se realizó un estudio de los componentes generales que suelen estar presentes en todo puente de piedra, el comportamiento cualitativo estructural de los mismos y los procesos constructivos que solían aplicarse para la construcción; de este modo los conocimientos revertían en el modelado al existir una realimentación.

Seguidamente, en el clúster de cálculo Hermes del Instituto Universitario de Investigación I3A, se realizó el ajuste de los parámetros necesarios para una correcta ejecución y convergencia del análisis estructural, así como el propio análisis ante las cargas indicadas en la vigente normativa para puentes y, como complemento, ante una carga de servicio real no contemplada en la misma: el paso de autobuses.

Para finalizar el estudio por elementos finitos, se comprobó su resistencia estructural según las propiedades mecánicas de la piedra (Criterio de Rankine), su peso, la flecha máxima sufrida y sus frecuencias naturales para evaluar su correcta aptitud ante el servicio.

Por último, se realizó una breve propuesta de restauración ante las patologías más comunes que sufre el puente: mal estado superficial, grietas y fisuras, sillería desprendida e iluminación inadecuada.

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. ANTECEDENTES	11
1.2. OBJETIVOS	11
1.3. ALCANCE	11
1.4. SECCIONES	12
2. MEMORIA HISTÓRICA	15
2.1. EL ARCO	15
2.2. ANTIGUA ROMA	16
2.2.1. COMERCIO Y REDES DE DISTRIBUCIÓN	16
2.2.2. LA CIUDAD DE "CAESARAUGUSTA"	18
2.2.3. IMPORTANCIA DE LA EXISTENCIA DE UN PUENTE	20
3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y CONSTRUCTIVA DEL PUENTE DE PIEDRA DE ZARAGOZA	21
3.1. HISTORIA	21
3.2. PARTES Y FUNCIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS PUENTES DE PIEDRA	23
3.3. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS PUENTES DE PIEDRA	28
3.4. CÁLCULO TRADICIONAL Y CIENTÍFICO	33
3.5. ESTADO ACTUAL Y REMODELACIONES DEL PUENTE DE PIEDRA DE ZARAGOZA	35
3.5.1. REMODELACIONES Y ACTUACIONES PREVIAS	35
3.5.2. DIMENSIONES	36
3.5.3. PATOLOGÍAS	37
4. ESTUDIO ESTRUCTURAL: MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS	39
4.1. HIPÓTESIS Y RESTRICCIONES	39
4.2. MODELADO	41
4.3. MATERIALES	45
4.3.1. PIEDRA CALIZA	45
4.3.2. RELLENO DE GRAVA-CEMENTO	45
4.3.3. HORMIGÓN ARMADO	46
4.4. CONDICIONES DE CONTORNO Y VARIABLES DE SALIDA	47
4.4.1. CARGAS	47
4.4.2. DESPLAZAMIENTOS	56
4.4.3. VARIABLES DE SALIDA	56
4.5. MALLADO	56
4.6. COSTES COMPUTACIONALES	59
5. ESTUDIO ESTRUCTURAL: ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
5.1. COMPROBACIÓN DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL	62
5.2. FISURACIÓN	75
5.3. COMPROBACIONES DE FLECHA MÁXIMA	81
5.4. COMPROBACIÓN DE FRECUENCIAS NATURALES	82
6. PROPUESTA DE RESTAURACIÓN	85
6.1. PRINCIPALES AFECCIONES SOBRE MONUMENTOS HISTÓRICOS	87
6.1.1. METEORIZACIÓN Y CLIMA	87
6.1.2. ALTERACIÓN MECÁNICA	87
6.1.3. ALTERACIÓN EN AMBIENTES CONTAMINADOS	88

6.2. PROPUESTAS DE RESTAURACIÓN	89
6.2.1. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	89
6.2.2. TRATAMIENTOS DE GRIETAS Y FISURAS	90
6.2.3. ILUMINACIÓN	93
7. CONCLUSIONES	97
ÍNDICE DE FIGURAS	101
ÍNDICE DE TABLAS	105
ANEXOS	
ANEXO A. MATERIALES (TOMO I)	
ANEXO B. CARGAS (TOMO I)	
ANEXO C. CONSTRUCCIÓN (TOMO I)	
ANEXO D. FABRICACIÓN ADITIVA (TOMO I)	
ANEXO E. MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS (TOMO I)	
ANEXO F. RESULTADOS ESTRUCTURALES (TOMO I)	
ANEXO G. RESTAURACIÓN (TOMO I)	
ANEXO H. DOCUMENTACIÓN DEL AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA (TOMO II)	
ANEXO I. PLANOS Y LÁMINAS DEL AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA (TOMO II)	
BIBLIOGRAFÍA	

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La idea de realizar un estudio estructural e histórico del puente de piedra de Zaragoza, como tema de un Proyecto Final de Carrera, surgió a partir de la polémica suscitada, y recogida por los medios de comunicación, entre los vecinos de Zaragoza sobre la conveniencia de un uso exclusivamente peatonal del puente derivando el tráfico rodado ante las dudas sobre su capacidad estructural.

1.2. Objetivos

Aceptada la propuesta del Estudio del Puente de Piedra como Proyecto Fin de Carrera, se decide acometer un estudio integral del monumento que abarcase su valores histórico, artístico, documental, constructivo y estructural con los consiguientes objetivos:

- Conocer los antecedentes históricos que rodean al Puente de Piedra de Zaragoza
- Conocer los antecedentes constructivos del Puente de Piedra de Zaragoza
- Conocer las remodelaciones previas del Puente de Piedra de Zaragoza
- Realizar un análisis estructural del Puente de Piedra de Zaragoza mediante el método de los elementos finitos (FEM) con el software de cálculo “Abaqus CAE”.

El estudio mediante elementos finitos pretende establecer un primer análisis para conocer el comportamiento estructural del puente.

1.3. Alcance

El alcance del proyecto consiste en realizar una revisión histórica, constructiva y estructural de los archivos relacionados con el Puente de Piedra. En primer lugar a través de la consulta de los Archivos Municipales localizados en el Seminario y Montemuzo, así como la información obtenida en el departamento de Infraestructuras del Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza.

Posteriormente se realiza un modelado tridimensional por elementos finitos del puente de piedra gracias al cual se pueda establecer un punto de referencia de cálculo.

En ningún caso se pretende que este documento sea un proyecto técnico avanzado capaz de realizar un análisis cuantitativo de la capacidad estructural del puente de piedra de una manera detallada y profunda ya que, para ello, sería preciso utilizar herramientas de cálculo aún más precisas. Así pues este proyecto pretende:

- Ser una primera aproximación que nos permita analizar los resultados estructurales cualitativamente
- Realizar unas propuestas de intervención para la restauración de los elementos más dañados
- Redactar las conclusiones desde un punto de vista global: construcción, estructura, patología y propuestas de intervención

1.4. Secciones

Este apartado tiene como misión introducir una breve descripción de los apartados que se abordarán durante la memoria así como de sus anexos:

2. Memoria Histórica

Se pretende establecer una justificación para la necesidad de construir un puente de piedra como elemento vertebrador del territorio y núcleo de comercio, recorriendo brevemente los acontecimientos históricos relevantes que relacionen el origen de los arcos con los puentes de piedra a través de la cultura del Imperio Romano.

3. Evolución Histórica y Constructiva del Puente de Piedra de Zaragoza

Se pretende establecer una línea histórica de la evolución del Puente de Piedra de Zaragoza, el estado actual del monumento, así como unas pautas generales de la composición de un puente de piedra, su comportamiento estructural y su proceso constructivo.

4. Estudio Estructural: Modelado por Elementos Finitos

Se establecerán las hipótesis, bases según la vigente normativa, y datos necesarios para comprender y afrontar el posterior cálculo realizado en "Abaqus CAE" a través del conocimiento de la geometría, modelado, materiales, condiciones de contorno, mallado y costes computacionales.

5. Estudio Estructural: Análisis de Resultados

Se analizará el flujo de resultados obtenido del programa de cálculo por elementos finitos para comprobar la resistencia estructural ante las cargas definidas por la normativa y por el paso de autobuses, peso, desplazamientos y las frecuencias naturales de resonancia del puente.

6. Propuesta de Restauración

Se pretende dar una idea general sobre cómo se podría afrontar la restauración de las patologías detectadas en el Puente de Piedra de Zaragoza respecto a: tratamiento superficial, tratamiento de grietas y fisuras e iluminación.

7. Conclusiones

Se realiza una breve conclusión estructural y de restauración tras lo expuesto durante el estudio.

Anexo A. Materiales

Se recogen, de la documentación aportada por el Ayuntamiento y la bibliografía, los datos necesarios para determinar las propiedades mecánicas de los tres materiales que conforman el puente: piedra caliza, hormigón y relleno de grava-cemento

Anexo B. Cargas

Se desarrolla el cálculo de cargas a aplicar según la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). Además se incluyen las combinaciones de las hipótesis de carga contempladas para el Puente de Piedra de Zaragoza.

Anexo C. Construcción

Incorpora los extractos consultados de dos libros de la bibliografía: "Arcos, Bóvedas y Cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica" de Santiago Huerta y "El arte de construir en Roma" de Auguste Choisy. Además, se incorporan los diagramas de detalles constructivos desarrollados por el proyectista para ilustrar el proceso constructivo general de un puente de piedra.

Anexo D. Fabricación Aditiva

Se pretende introducir a las tecnologías de fabricación de prototipado rápido y su aplicación al campo de la Ingeniería Civil mediante la creación de un modelo plástico del Puente de Piedra de Zaragoza, basada en el modelado tridimensional realizada por el proyectista.

Anexo E. Modelado por Elementos Finitos

Se pretende dar una idea general de los pasos seguidos para realizar el modelado tridimensional del Puente de Piedra de Zaragoza en el software "Abaqus CAE", así como los planos en los que se basa el proyectista para realizar la geometría.

Anexo F. Análisis de Resultados

Se adjuntan los datos analizados para los sillares de piedra del puente, criterios de análisis, diagramas de campos de tensiones máximas principales y mínimas principales, comprobación estructural, comprobación de desplazamientos y de frecuencias naturales.

Anexo G. Restauración

Se amplían los conocimientos de intervenciones sobre puentes de piedra, posibles afecciones sobre los monumentos y cómo realizar las intervenciones.

Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza

Se incluye parte de la documentación relativa a historia, geometría, geotecnia, informes de piedra, proyecto de recalce, patologías... aportada por el Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza, recabada en

el Archivo Municipal del Seminario, Infraestructuras y el Palacio de Montemuzo.

Anexo I. Planos y Láminas del Ayuntamiento de Zaragoza

Se incluyen parte de los planos y láminas aportadas por el Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza, recabada en el Archivo Municipal del Seminario, Infraestructuras y el Palacio de Montemuzo.

2. Memoria Histórica

2.1. El arco

La construcción de fábrica (piedra, ladrillo o adobe) surge en los primeros asentamientos humanos siendo posteriormente, en Mesopotamia y Egipto hace unos 6.000 años, cuando surge el arco como forma natural de salvar una distancia, superando los pobres



Figura 1. Antiguo arco de piedra (Fuente: es.dreamstime.com)

límites del pórtico de fábrica y los conseguidos a base de maderos con problema de duración.

Un arco típico se construye colocando cuidadosamente piedras unas a lado de otras, con forma de “dovelas”, sobre una estructura auxiliar de madera o “cimbra”. La cimbra da la forma y sostiene durante la construcción al arco; a partir de ahí se colocan las piedras desde los arranques, colocada la última piedra en el centro, la “clave”, y cargando superiormente la estructura, se retira la cimbra produciéndose un descenso de las piedras transmitiéndose los esfuerzos por compresión y rozamiento.

Los esfuerzos transmitidos por las piedras crean unos empujes en los arranques que tienden a abrirlo, y que son absorbidos por los machones o estribos ya que, como dice un antiguo proverbio árabe:

“El arco nunca duerme”

Actualmente se calculan basándose en la teoría de estructuras, que al ser del siglo XVII y XVIII se considera reciente, y que aplica las leyes de la mecánica y de la resistencia de materiales.

Antiguamente, por el contrario, la construcción se realizaba a través de un conjunto de procedimientos o “recetas”, basadas en la experiencia, que permitían ejecutar las obras con cierta seguridad. Los avances se realizaban por el procedimiento “prueba-error”, es decir, se construía “in situ” superando límites anteriores y del error, o acierto, los maestros albañiles extraían nuevas experiencias.

Hasta el nacimiento del metal y el hormigón como materiales estructurales fueron estas tipologías de arcos y bóvedas, con grandes estribos a modo de contrafuerte, las básicas para generar grandes

espacios interiores perdurando hasta nuestros días con indudable genio (Anexo C. Construcción).

2.2. Antigua Roma

2.2.1. Comercio y Redes de Distribución

La cultura romana ha sido considerada desde la antigüedad como uno de los pilares fundamentales de la civilización actual, basando su poder en el genio comercial y la ingeniería militar recogiendo toda la tradición y saber griego y, a la vez, siendo destacados hombres de negocios y grandes estrategas que consiguieron perpetuar su imperio a lo largo de los siglos.

El transporte de las mercancías a lo largo del Imperio Romano se realizó mediante rutas terrestres y fluviales para su posterior venta en el Foro Romano de la urbe que, como centro neurálgico de la ciudad romana, atraía a los comerciantes forasteros y a los ciudadanos por igual. Es un hecho que todas las nuevas ciudades romanas se ordenaron según un plano ortogonal que hacía que la distribución de mercancías y el tránsito se realizase de manera ordenada y efectiva.

Gran parte del éxito comercial romano se debió a la combinación de dos recursos de transporte: el terrestre mediante las calzadas romanas y el fluvial mediante los barcos y puertos de las ciudades costeras. Las ciudades fueron interconectadas por una competente red de calzadas romanas y, a su vez, los ríos navegables fueron extensamente explotados.

La calzada romana fue, por tanto, el modelo vertebrador del Imperio Romano que permitía un rápido desplazamiento militar de tropas y mercancías. En su apogeo, la red de carreteras romanas llegó a tener aproximadamente 100.000-120.000 km.

El proceso de construcción de una calzada consistía en varias fases (1):

- Deforestación y desbrozado del trazado elegido
- Explanación y allanado del firme, desmontes y terraplenes si fueran necesarios.
- Delimitación del firme o anchura mediante dos bordillos laterales
- Cementación mediante una capa de piedra en bruto.
- Capas intermedias, o rellenos de arena y gravas, en diferentes tongadas con posterior compresión y de mayor a menor granulometría conforme ascendían hacia la superficie de tránsito.
- Capa de rodadura formada por cantos rodados apisonados mezclados con arena. Usaban zahorras de grano fino (4-5 mm) o jabre (arena natural de granito de 1 cm). En las ciudades podían adoquinarse o enlosarse con piedra.

Además, dependiendo del tipo de uso que se le diera, se podían distinguir varios tipos de calzada romana:

■ “Viae publicae”

Son las vías principales del imperio que unían las ciudades más importantes con un ancho promedio de 6-12 m. Son también llamadas “viae praetoriae” (vías pretorianas), “viae militares” (vías militares) o “viae consulares” (vías consulares).

■ “Viae vicinales”

Nacían como ramificaciones de la “viae publicae” teniendo como misión unir distintas villas o pueblos de la región y con una anchura promedio de 4 m.

■ “Viae privatae”

Unían las principales propiedades y eran privadas y de uso exclusivo del propietario con una anchura media de 2'5 m a 4 m.

La *Tabula Peutingeriana* (Figura 3) es un documento de bella factura que muestra la distribución de las calzadas romanas. Fue elaborado en el siglo III por Castorius y representa el mundo conocido en esa época, desde Inglaterra a África del Norte y del Atlántico hasta la India.



Figura 2. Calzada romana en Mérida (España) (Fuente: Ayuntamiento de Mérida)

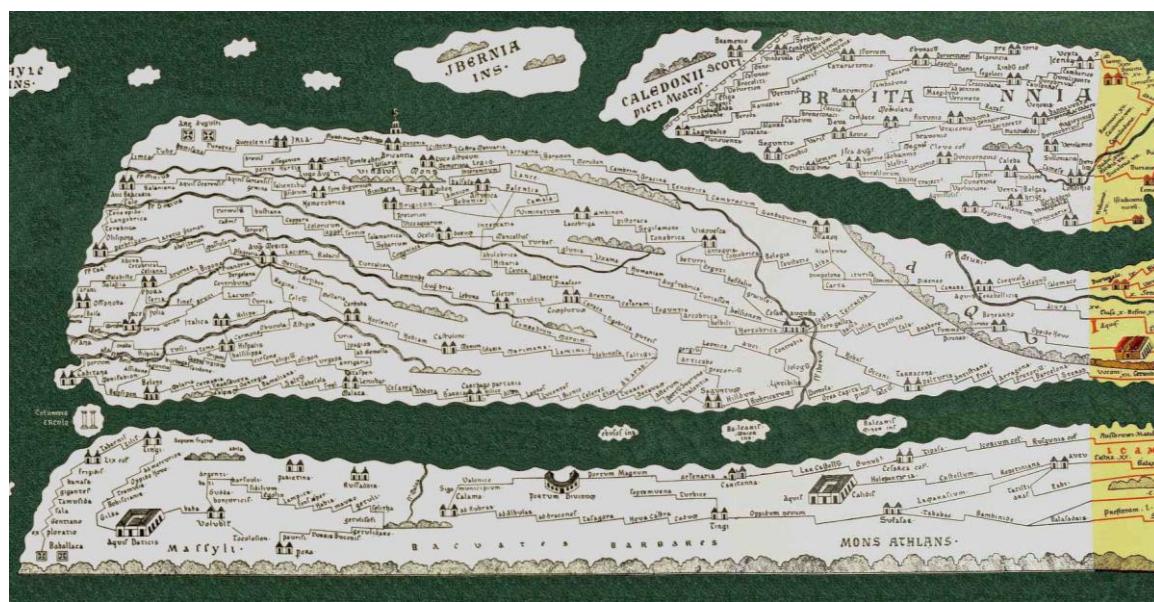


Figura 3. Tabula Peutingeriana (Detalle de la península ibérica) (Fuente: geographos.com)



Figura 4. Principales ejes viarios en Hispania (Fuente: Wikipedia)

Es lógico pensar que, al atravesar una orografía tan amplia, las calzadas se encontraban con obstáculos tales como ríos, desfiladeros o montañas que debían ser salvadas de algún modo. Los ingenieros romanos resolvieron notablemente este problema mediante la construcción de túneles, puentes y acueductos.

En lo referente a salvar los obstáculos fluviales los romanos construyeron las siguientes tipologías:

- Vados: zonas simplemente empedradas con apoyo de vigas de madera que cruzaban zonas de bajo calado.
- Puentes de madera
- Puentes de piedra
- Puentes mixtos: los pilares se realizaban en piedra pero la cubierta era de madera.
- Puentes de barcos: los cruces se realizaban con barcas de orilla a orilla.
- Barcas: sistema de barcas de pago para transportar mercancías y pasajeros entre orillas.

2.2.2. La ciudad de “Caesaraugusta”

La ciudad romana de Caesaraugusta, hoy Zaragoza, fue fundada en el siglo I a.C., en el asentamiento íbero de Saldue como parte de una reorganización provincial del Imperio Romano en Hispania.

Recibió el nombre de Caesar Augusta en honor a la victoria en las Guerras Cántabras por parte de César Augusto. En la fundación de la ciudad participaron los soldados veteranos que habían sido licenciados tras las guerras con un doble propósito: asegurar una posición defensiva

y fijar la presencia de Roma, siendo la colonia, como se observa en la Figura 4, un importante punto comunicativo y defensivo dentro de la península ibérica.

La colonia se organizó en torno a dos ejes axiales, cardo y decúmano máximo, con cuatro entradas (en los extremos del cardo y decúmano) y una muralla perimetral de protección (Figura 5). Su nombramiento de colonia inmune le permitió acuñar monedas.



Figura 5. Plano de distribución de la ciudad romana de Caesaraugusta (Adaptada de Wikipedia según Ayuntamiento de Zaragoza)

Durante la época de mayor esplendor se construyeron grandes obras públicas como el Foro, el Puerto fluvial (que potenció la distribución de mercancías por el Ebro), las Termas, el Teatro o el primer Puente de la ciudad construido, con toda probabilidad, como una obra mixta de piedra y madera. El puente está documentado por la presencia de tuberías de plomo que traían agua potable desde el Río Gállego. Así mismo la ciudad también destacó en la construcción de infraestructuras urbanas como aljibes, fuentes, grandes cloacas de saneamiento y diversos tramos de tuberías de plomo y saneamiento.

2.2.3. Importancia de la existencia de un puente

Según lo analizado durante los apartados 2.2.1 y 2.2.2 se llega a la conclusión de que el Imperio Romano basaba toda su potencia en su carácter militar y comercial. Gracias a las calzadas romanas se conectó todo el territorio desde la península itálica hasta Hispania siendo Caesaraugusta, dentro de nuestro territorio, un importante punto logístico para el comercio y la defensa como se puede observar en la Figura 4.

Debido a esta potencialidad comunicativa y de la proximidad del río, el cual se utilizó para potenciar el comercio dualmente: tierra y agua, nace la necesidad de construir un puente que, aunque no fuera de piedra como el que actualmente conocemos, conectase ambas riberas permitiendo el flujo de mercancías y de tropas.

Así pues el nacimiento del puente de piedra era cuestión de tiempo, de recursos y nace de una necesidad de comunicación e intercambio, para conseguir pasar más allá de las aguas, como el Imperio pasó más allá de la frontera de Roma, y ello se hace con el “Puente”, el símbolo romano por excelencia, símbolo de avance y conquista de la otra orilla (mediante la Ingeniería técnica o la Ingeniería Militar). Símbolo que los romanos plasmarían en los “Arcos de Triunfo” erigidos en las nuevas ciudades y en las ciudades conquistadas.

Así, a la larga, el Puente haría que Zaragoza contase entre los hitos de referencia clave para el transporte de mercancía y las comunicaciones.

3. Evolución Histórica y Constructiva del puente de Piedra de Zaragoza

3.1. Historia

La historia de Zaragoza es vasta y se extiende a lo largo de los siglos por lo que, para hacernos una idea principal acerca de la evolución de los puentes en la ciudad, se presenta a continuación una somera reseña cronológica basada en los estudios de Teresa Iranzu de la Universidad de Zaragoza (Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza).

La colonia de Caesaraugusta, como se expone en 2.2.2, fue fundada a finales del siglo I a.C. para realizar una función de control viario y defensiva puesto que, como se ha discutido durante 2.2, eran las funciones primordiales de las colonias romanas. De las distintas referencias a los puentes de Caesaraugusta sólo se tiene existencia documental en el siglo XV siendo conocido el Puente de Piedra como el Puente Mayor o de Piedras y, como de Alcántara, al puente de madera. De las referencias cronológicas se conocen algunas de las siguientes:

- 827 (Lacarra, 1976): debido a las fuertes inundaciones que destruyeron los muros de Zaragoza se derribaron los machones del puente.
- 1118, mayo: durante el asedio a Zaragoza los musulmanes huyen hacia el Arrabal. Se prendió fuego al puente “que por ser de madera ardió en su totalidad”.
- 1188: el Rey Alfonso II cedió la Alcántara a los canónigos de San Salvador de Zaragoza para que edificasen, en término de 20 años, un puente de piedra. El documento especifica el peligro que supone la fragilidad del puente. A cambio podían percibir los derechos de tránsito (aranceles) y, además, podían utilizar las piedras y la madera de los bosques de las tierras del rey.
- 1401-1408: Los jurados aprobaron el proyecto de la obra: constaría de cuatro arcadas y tres pies (de treinta palmos de ancho cada uno) y otro más hacia la Puerta (de veinte palmos); las arcadas consecutivas a la Puerta debían tener noventa palmos cada uno y ochenta las otras dos. En el pie de la puerta se podrían adosar dos torretas. La piedra provino de las canteras de El Castellar y Mallén y, especialmente, de Fréscano (Burrén); la madera, de Leciñena. El material se transportaría por el río, construyéndose dos grúas, así como hornos de cal para el cemento.
- 1435, agosto, 5: A punto de finalizar la obra y, a pesar de tener “muy bastantemente reforzados los bastimentos de las cimbrias”

según Zurita, se derrumbó la arcada principal, ocasionando 5 muertos y varios heridos.

- 1440, marzo, 5. Se notifica la finalización del puente.
- Hacia 1461: Descripción de Zaragoza por Al-Himyari: “Zaragoza posee un puente de notables dimensiones, que hay que cruzar para ir a la ciudad; ésta está provista de sólidas murallas y construcciones elevadas” “Zaragoza...corre junto a ella un gran río llamado el Ebro, que cuando se desborda causa daños en la ciudad y en algunas leguas alrededor, y tiene un largo puente de piedra...”
- 1563. El flamenco Anton van der Wyngaerde dibujó a plumilla y coloreó con acuarela una hermosa perspectiva caballera de la ciudad; desde el Arrabal, se ve el puente con sus siete arcos enteros y dos casetas colgadas, una entre los arcos primero y segundo desde la ribera Norte, y otra entre el tercero y cuarto, quizá destinada al cobro de impuestos.



Figura 6. Dibujo a plumilla de Zaragoza. Anton van der Wyngaerde (2)

- 1610-1611: el geógrafo portugués J.B. Labaña cita “pero no es el que hay hoy, pues no parece resto de antigüedad romano” y, más adelante, “Ebro... atraviésanlo dos puentes, uno de piedra, del que los antiguos hicieron mención pero no tiene nada de aquella antigüedad, y otro de madera sobre pilastras de piedra”.

- 1801. Una avenida del río se lleva el puente de tablas, al parecer, definitivamente.

De toda esta cronología se deduce que coexistieron dos puentes a la vez durante casi cuatro siglos (Figura 7), que el Puente de Piedra de Zaragoza no era, como se suele pensar, romano, que hubo diversas reconstrucciones por caídas de las arcadas y avenidas del río y cobros de peaje para la entrada de la ciudad (de los cuales se tienen constancia en las láminas del Anexo I. *Planos y Láminas del Ayuntamiento de Zaragoza*).

Se refuerza así la idea expuesta en 2.2.3 de que el puente de Zaragoza nació de la necesidad de unir ambas riberas y, a su vez, permitir un acceso de provisiones, comerciantes, trabajadores y visitantes a la ciudad con cierto control de los impuestos que eran cobrados, a priori, en las torres construidas en los tambores aguas debajo y, de los cuales, apenas queda vestigio.

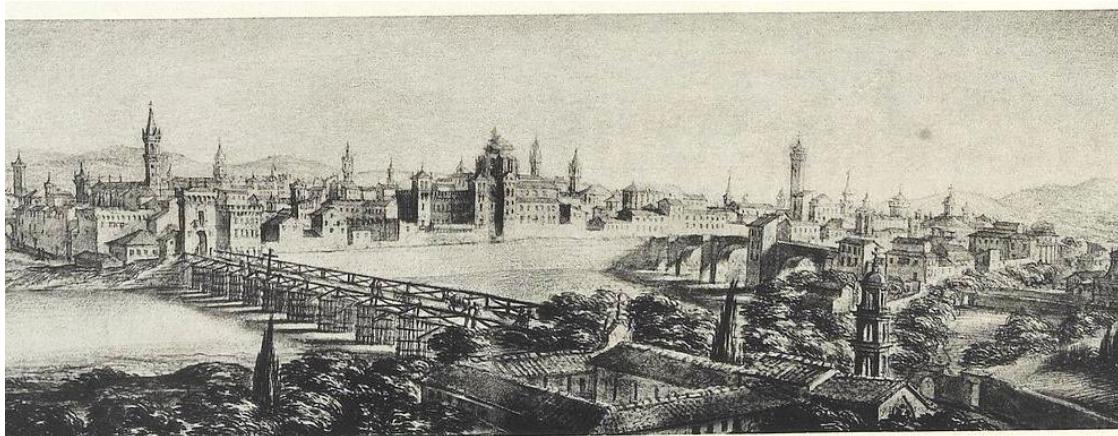


Figura 7. Parte de un grabado de Pier Maria de Baldi. 1668. (2)

3.2. Partes y funcionamiento estructural de los puentes de piedra

En este apartado se pretende dar unas pautas generales en cuanto a las partes principales que componen un puente de piedra tradicional y su comportamiento estructural a nivel cualitativo.

Aunque cada puente de piedra pueda presentar diferencias ornamentales debido a la zona en la que se construyó, el constructor que lo realizó o simplemente debido a exigencias por parte de los peticionarios, todos disponen de los mismos elementos básicos que se observan en la Figura 8.

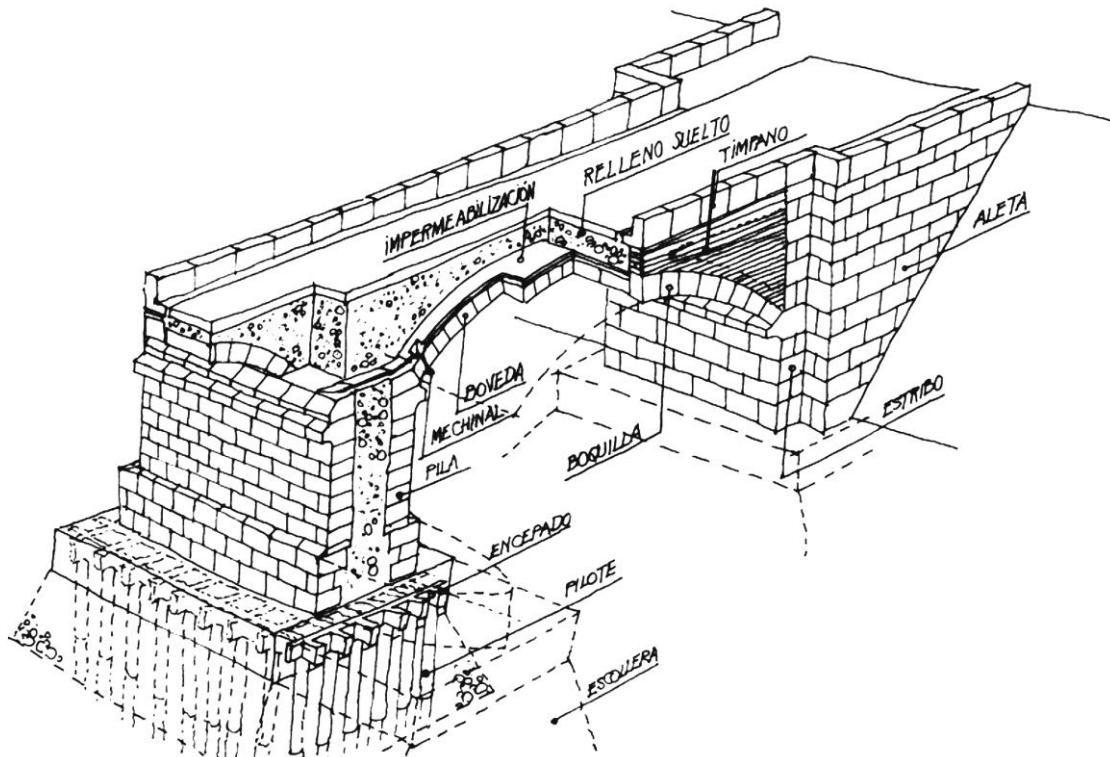


Figura 8. Partes de un puente de piedra (3)

- **BÓVEDA**

Es el principal elemento resistente de un puente de fábrica presentando dos propiedades:

1. Estar confeccionado por materiales que no soportan tensiones de tracción.
2. Trabajar “por forma”, es decir, mediante una disposición constructiva y física de sus piezas (dovelas), tal que conduzca los esfuerzos a los estribos pieza a pieza por compresión y sin apenas tracciones.

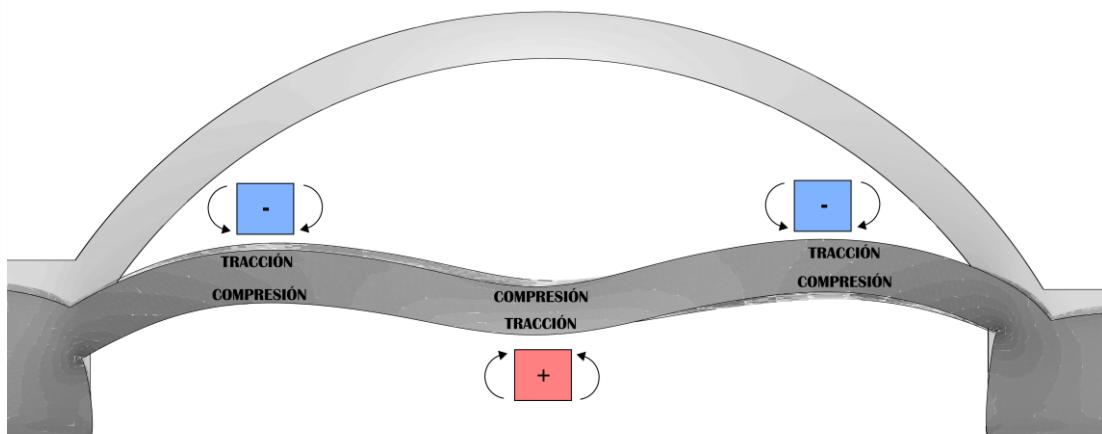


Figura 9. Funcionamiento estructural del arco

La Figura 9 muestra el mecanismo de deformación típico del arco. En las zonas en las que aparezca tracción es susceptible de aparecer una fisura.

- **RELLENO**

Es el material que se encuentra situado tras la bóveda, pudiendo estar también colocado entre dos hojas de fábrica de piedra para abaratar la construcción de los estribos, y la superficie de rodadura. Engloba una gran diversidad de materiales en composición variable por lo que es importante conocer el tipo de materiales y el estado en el que se encuentra. Estructuralmente su misión es:

1. Repartir las cargas.
2. Redistribuir el empuje del relleno sobre el trasdós de la bóveda debido a la deformación de la misma (equilibra).
3. Desarrollo de tensiones tangenciales en el trasdós, de modo que la estructura esté activa confiriendo presión y rozamiento entre sus partes (dovelas).

- **RIÑONES O TÍMPANOS**

Son los elementos que se disponen lateralmente apoyados sobre las bóvedas. Son llenos o macizos y su función principal es la de contener y confinar lateralmente el relleno. Además de la contención del relleno provee de una rigidización longitudinal al poderlos considerar como una "viga de gran canto" y, aunque la fábrica no absorbe tracciones, dependiendo del aparejo, es capaz de ofrecer cierta resistencia a flexotracción. Estructuralmente, junto con el estribo, también hace la vez de contrafuerte, que con su volumen, absorbe las tensiones transmitidas por la bóveda o el arco.

- **PILAS**

Conducen las cargas transmitidas por las bóvedas hasta los cimientos. Para ello deben de ser capaces de soportar también otras acciones que inciden sobre ellas (viento, riadas, impactos...). Son los que han presentado más cambios de dimensiones a lo largo de la historia.

- **CIMENTACIÓN**

La cimentación es el elemento resistente peor conocido y más débil de los mencionados porque no había apenas conocimiento de las propiedades geotécnicas del terreno sobre el que apoyaba. Esto ha originado cimentaciones poco adecuadas que han terminado por provocar daños e incluso la ruina de la estructura. Hay varios tipos:

1. Cimentación superficial: transmite directamente la carga al estrato mediante una zapata rígida de sillería.
2. Cimentación profunda (Figura 10): cimentación mediante pilotes de madera de unos 10 metros (algunas fuentes citan un cuarto de la altura del puente) coronados por un encepado de

emparrillado de madera, con relleno de áridos ligeramente cementados. Muchas veces disponía de una escollera como protección contra la socavación.

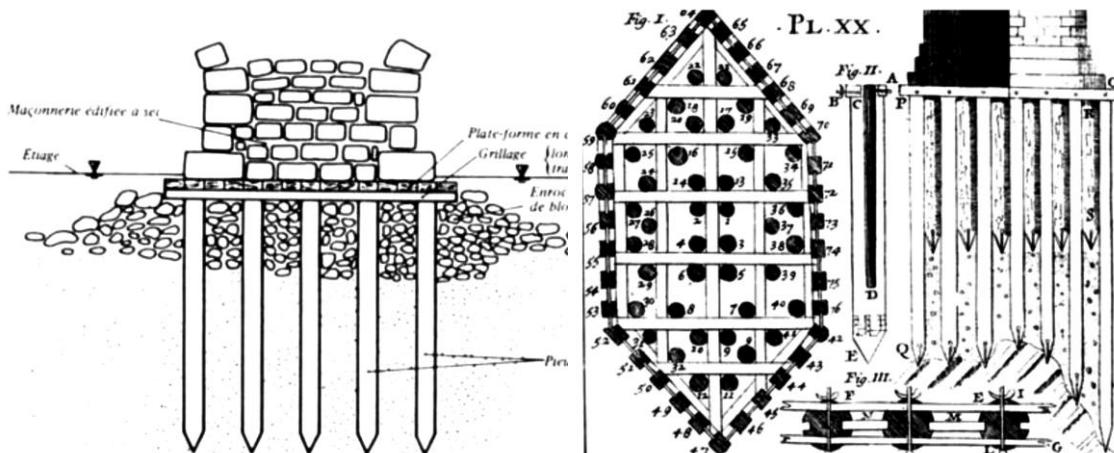


Figura 10. Cimentación profunda (3)

El proceso de transmisión de cargas (Figura 11), a grosso modo, es el siguiente:

1. Ante una carga puntual aplicada sobre la superficie de rodadura,
2. debido a su comportamiento como suelo, se produce un reparto de cargas de forma trapezoidal en el relleno granular y, los esfuerzos, se transmiten por rozamiento y compresión, dispersándose ligeramente y amortiguándose, hasta la bóveda de piedra,
3. la distribución de cargas transmitida por el relleno es asumida por el arco que se encarga de transmitirla por compresión y rozamiento entre sus piedras (dovelas) hasta los extremos, en los que se produce un empuje horizontal, por la apertura del arco, y otro vertical, debido al peso, sobre los estribos en los que apoyan las bóvedas de piedra,
4. los estribos, o pilas, por su tamaño y masa, se encargan de absorber el empuje horizontal generado por los arcos evitando el vuelco y, además, transmiten el empuje vertical de las bóvedas y el peso de los materiales que orbitan sobre ellos hacia las cimentaciones,
5. finalmente debido a las bajas propiedades resistentes de los suelos ($1-4 \text{ kp/cm}^2$), las cimentaciones utilizan una gran superficie para disminuir enormemente la presión aplicada, facilitando su asimilación por el terreno y evitando que se produzcan asientos diferenciales o el colapso de la estructura por fallo del estrato. De esta forma la carga se transmite al terreno por dos mecanismos: por presión bajo la losa de cimentación y las cabezas de los pilotes y por rozamiento con el terreno en el fuste de los pilotes.

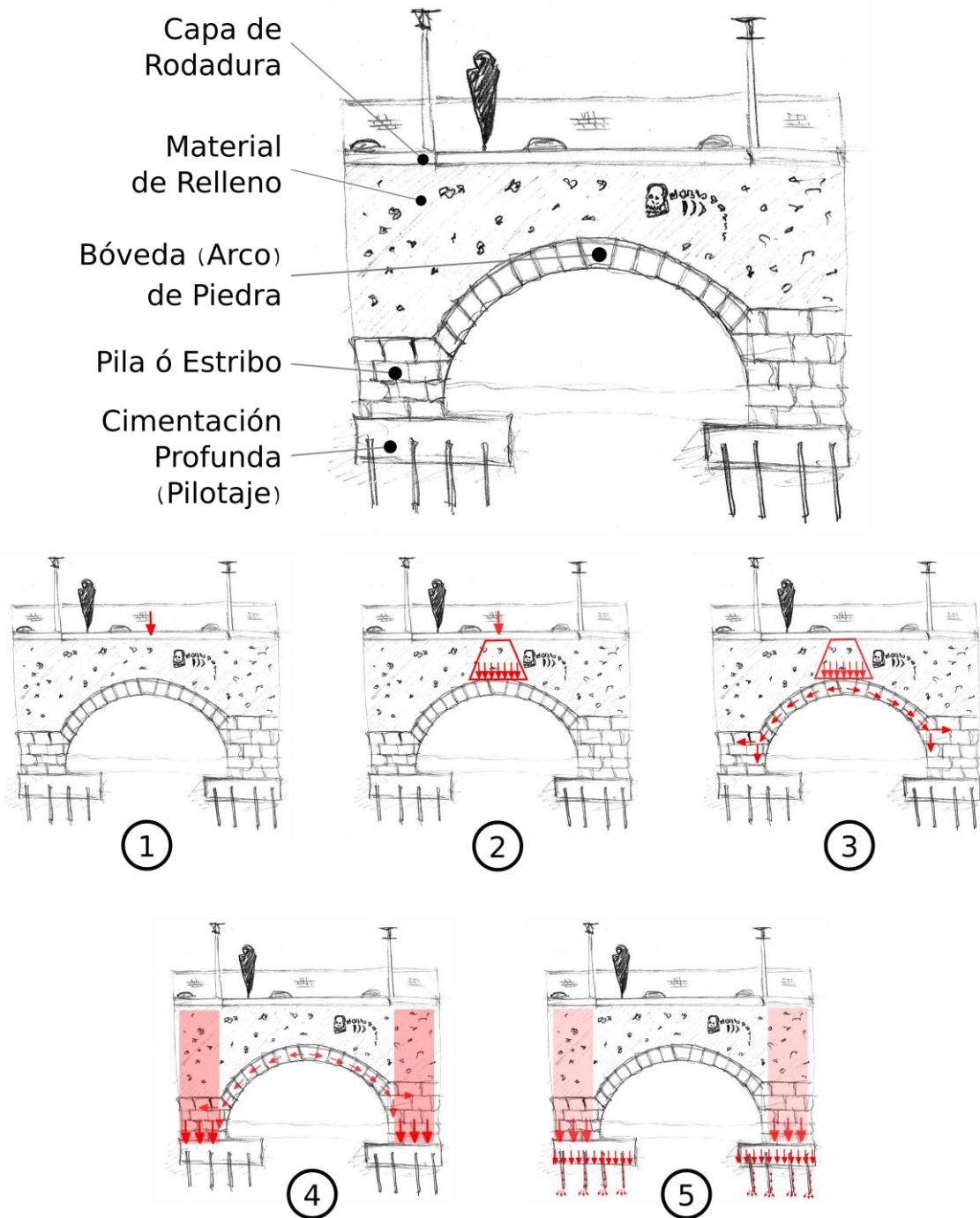


Figura 11. Distribución de cargas en un puente (M.A. Ariza)

3.3. Proceso constructivo de los puentes de piedra

En este apartado se pretende abordar una breve descripción sobre los procesos constructivos que se utilizaron durante siglos, sin apenas variación, para la construcción de puentes de piedra.

1. EMPLAZAMIENTO

Antes de iniciar la construcción se realizaba una reflexión profunda en relación al emplazamiento teniendo en cuenta factores estratégicos como son:

- Trazado de la vía a la que se iba a dar servicio
- Posible aprovechamiento de un camino o puente anterior
- Existencia de una población ribereña, o amplios campos de cultivo
- Morfología del cauce, caudal, profundidad, anchura, isletas existentes, etc.
- Características geotécnicas de la zona elegida
- Materiales cercanos a la obra, si es posible de canteras cercanas (El Castellar en Zaragoza) y de la propia ribera (áridos/agua)

2. ATAGUÍAS O TABLESTACAS

Las ataguías son empalizadas de madera de doble capa con forma prismática o cilíndrica impermeabilizadas con pez (brea) y arcilla clavados en el terreno. Actualmente se conoce como tablestacado.

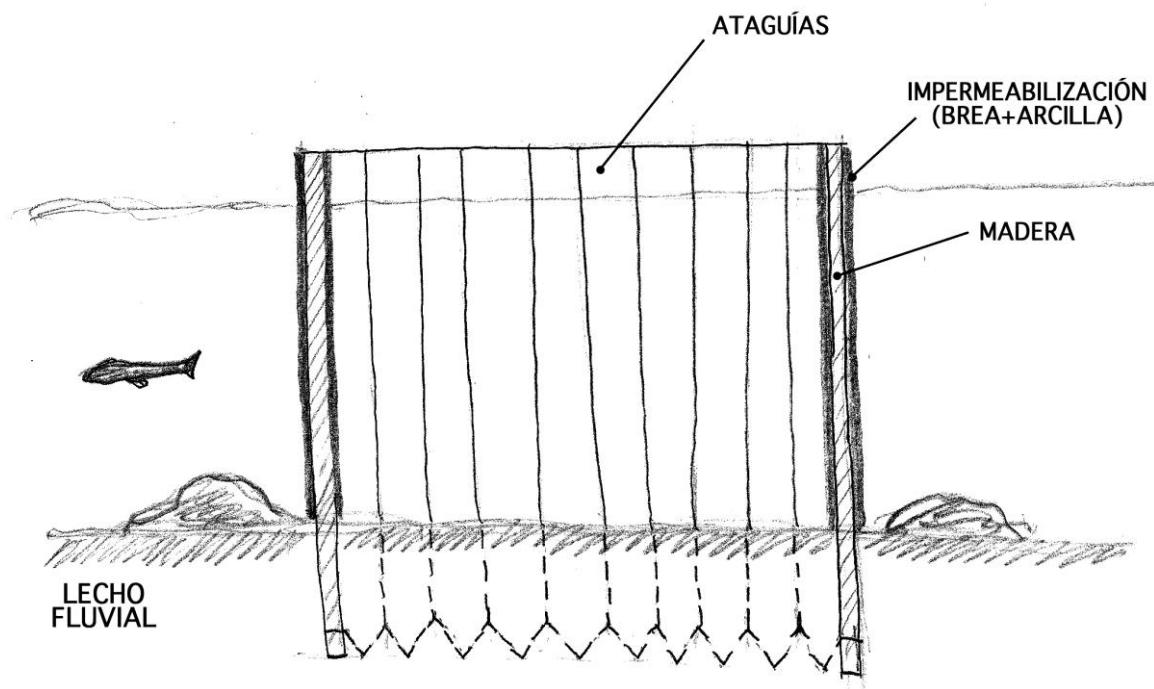


Figura 12. Ataguías o Tablestacas (M.A. Ariza)

3. EXTRACCIÓN DE AGUA

Se procede a extraer el agua del recinto formado por las ataguías mediante un tornillo de Arquímedes. De esta forma se crea un recinto sin agua en el que se pueda trabajar para realizar las cimentaciones y los estribos.

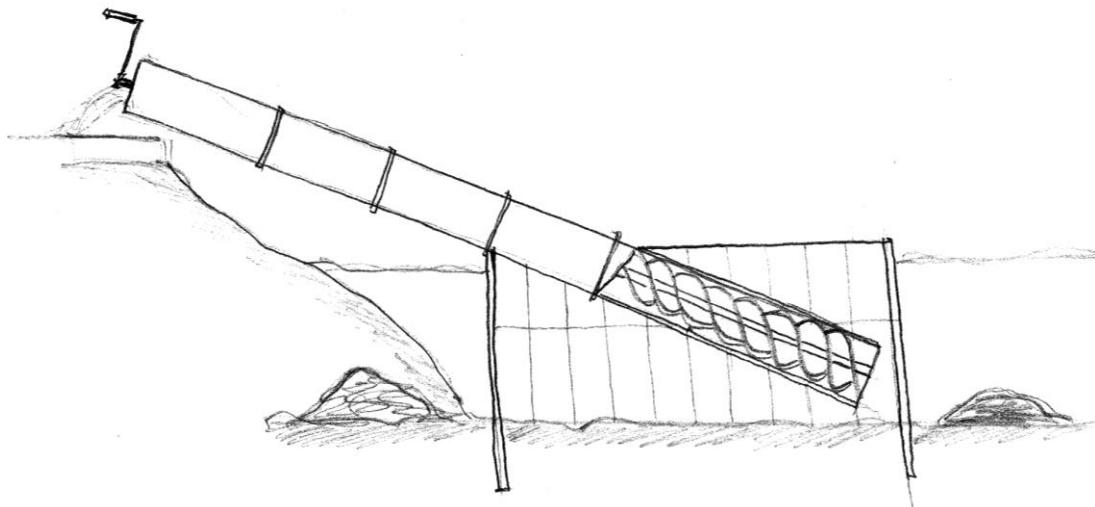


Figura 13. Extracción de agua mediante tornillo de Arquímedes (M.A. Ariza)

4. CIMENTACIÓN Y ESTRIBOS

Se procede a hincar estacas de madera (pilotes), generalmente de abedul, chopo, olivo o roble, chamuscadas, de unos diez metros de profundidad para realizar el pilotaje. Para atar la cabeza de los pilotes se conforma una especie de “encepado” mediante una rejilla de madera que se rellenará de gravas y zahorras para dar consistencia y crear una escollera que evite la erosión de la tierra de cimentación y, consecuentemente, la inutilidad del pilotaje.

Sobre el encepado se realizará una “losa de cimentación” con zampeado de piedras sobre el que se erigirá el estribo y, si fuera necesario, los tajamares que protejan frente a avenidas. Las hiladas de sillares se dispondrán a soga y tizón (Figura 14); soga se denomina cuando es la parte más larga de la pieza la que queda vista (longitud), mientras que tizón se usa cuando lo que queda a la vista es la parte más corta (anchura); de esta manera se ven alternadas las sogas y los tizones, y se desplaza cada hilada respecto a la anterior de modo que bajo una pieza dispuesta en soga haya una dispuesta a tizón. Las uniones entre los sillares de piedra (aparejos) se realizaban mediante labras en piedra o grapas metálicas (Figura 15).

Finalmente, a modo de arranque para la cimbra que soportará la bóveda de piedra, se pueden dejar dovelas en ménsula o impostas, a modo de saliente en el estribo que permita el arranque de la cimbra.

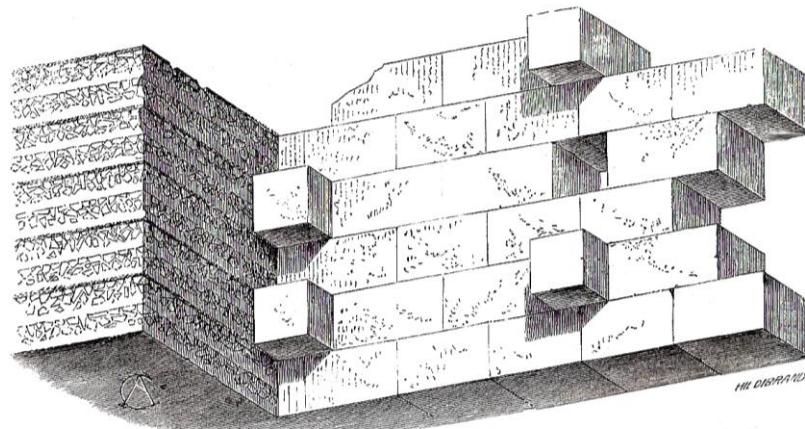


Figura 14. Aparejo de hiladas a soga alternadas con hiladas mixtas a soga y tizón (4)

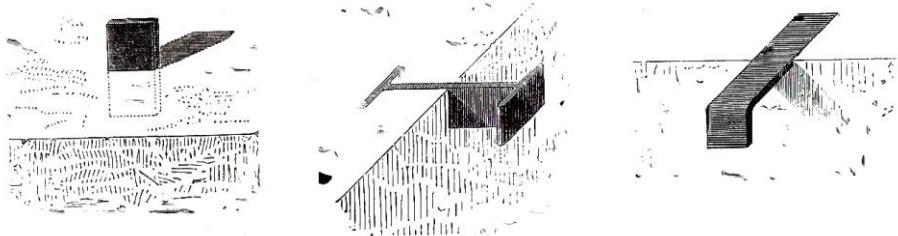


Figura 15. Tipos de grapas entre sillares, empleadas por los romanos (4)

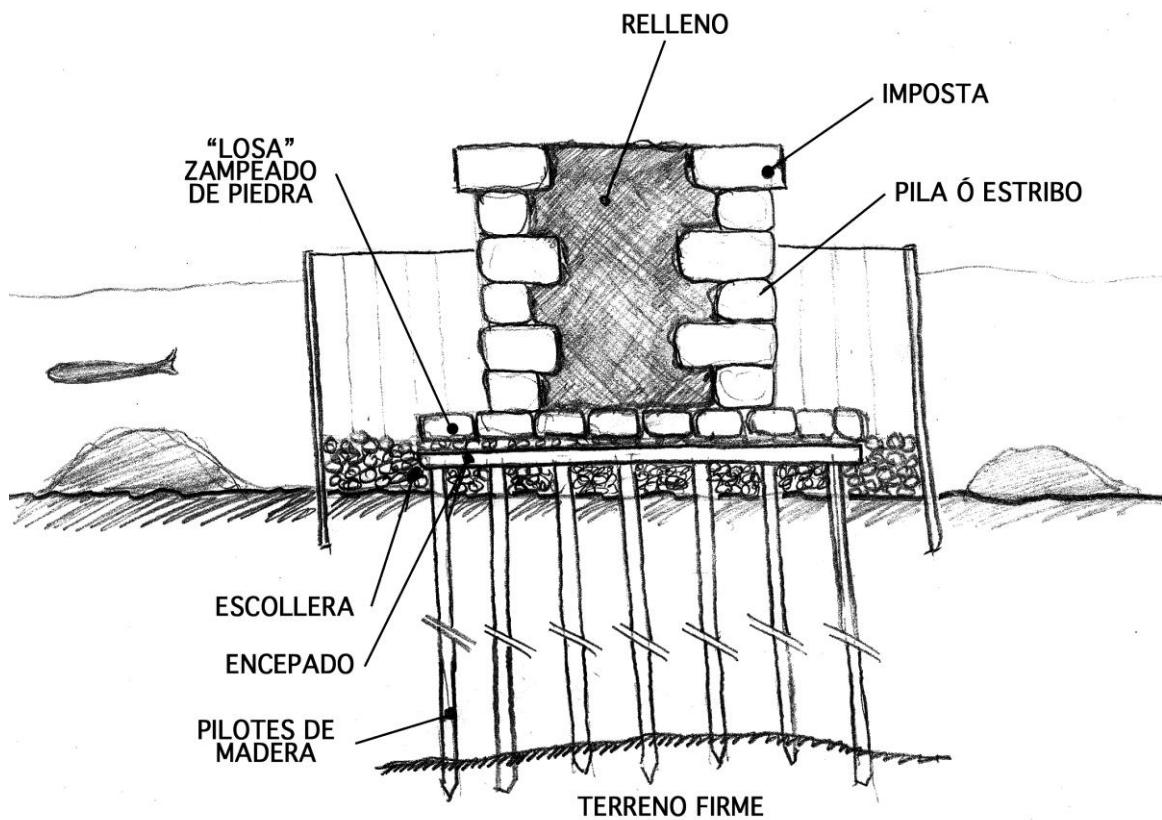


Figura 16. Cimentación (M.A. Ariza)

5. CIMBRADO Y BÓVEDA DE PIEDRA

Los carpinteros construían la cimbra entre las impostas generando un soporte de madera sobre el que colocar las piedras que, posteriormente, al ser desplazadas mediante grúas, conformarán la bóveda de piedra.

El punto fundamental de los arcos reside en la dovela central, o clave, colocada en el centro del arco y que consigue, mediante rozamiento, mantener el arco en equilibrio evitando que las piedras deslicen y transmitiendo los esfuerzos hasta los estribos.

En este paso se disponen también los paramentos de piedra exteriores, tímpanos, que posteriormente contendrán el relleno.

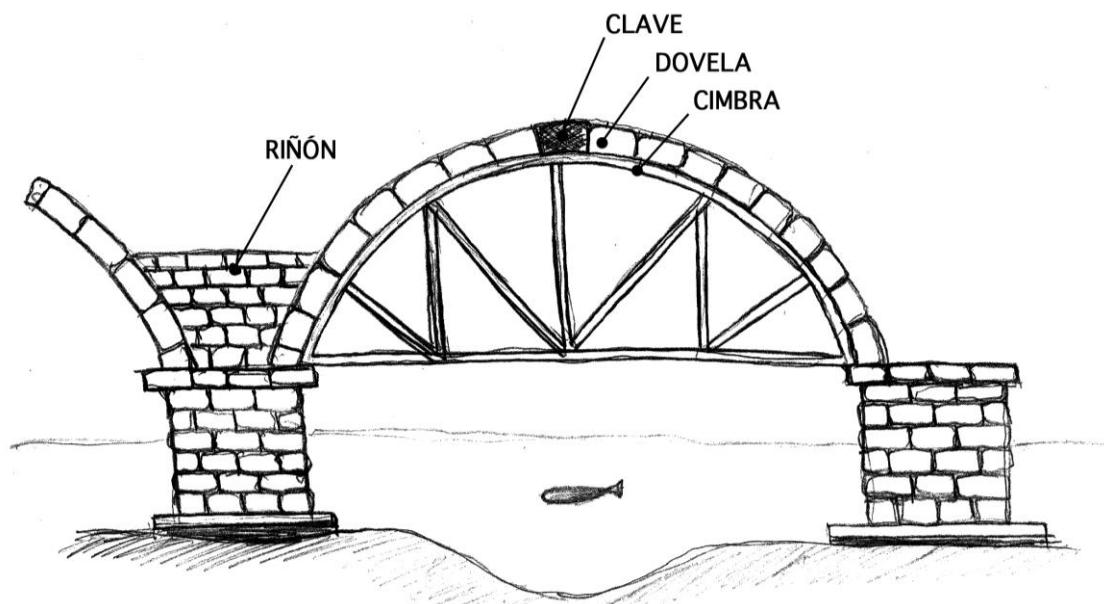


Figura 17. Construcción de bóveda de piedra sobre cimbra (M.A. Ariza)

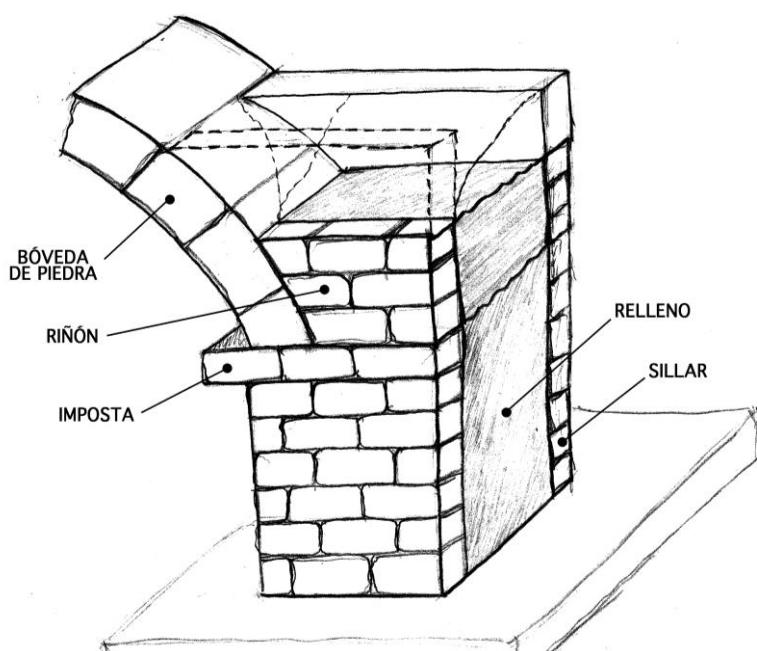


Figura 18. Detalle de relleno de la pila y los riñones (M.A. Ariza)

- RELLENO DEL TRASDÓS

Cuando las bóvedas de piedra y los paramentos verticales están preparados se rellenan el trasdós y los estribos de una mezcla de gravas y mortero de cal o puzolánico.

Después del fraguado del relleno, dando tiempo a la adaptación de la estructura, se producirá el descimbrado que hará que se asienten las bóvedas y el relleno.

Posteriormente se cierra superiormente mediante la realización del enlosado de la calzada y los pretils para la seguridad de los viandantes. Este paso ha de ser posterior al descimbrado puesto que, al entrar en carga el puente, se producen ligeros desplazamientos por la acomodación de la estructura que pueden generar fisuración o problemas en el enlosado y los pretils de seguridad.

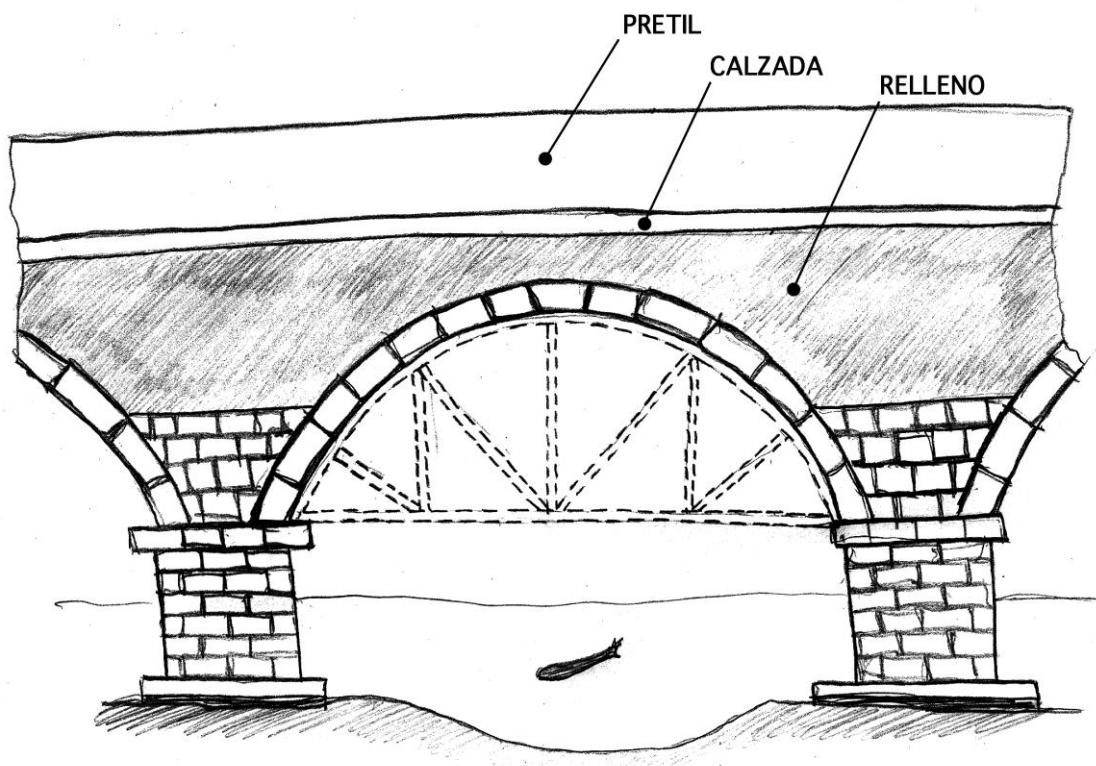


Figura 19. Relleno, descimbrado y finalización del puente (M.A. Ariza)

3.4. Cálculo tradicional y científico

Durante la Edad Media se produce un resurgimiento en la construcción de puente de fábrica que había quedado parada tras la caída del Imperio Romano. Como se ha visto en el apartado 3.2 los puentes, en general, suelen constar de: cimentación, pilas, bóvedas y estribos. Además hay otros secundarios como: riñones y trasdos y, de terminación, la calzada.

Los únicos documentos que datan de esa época, *Dipositio fabricae de pontibus*, hablan de reglas para calcular la anchura de las pilas en función de la luz del arco (Anexo C. Construcción). Los estribos tenían que:

1. Resistir el empuje de los arcos adyacentes comprendidos en los tramos intermedios y absorberlo en los tramos finales
2. Permitir desagüe suficiente para el río incluso en grandes crecidas

La forma de la pila influye en el segundo requisito y presentan, casi siempre, tajamares aguas arriba y, a veces, aguas abajo.

Generalmente la norma que había para construir implicaba que la pila fuese una fracción simple de la luz del arco (Figura 20). En el Puente de Piedra de Zaragoza se establece una clara norma para las pilas: la anchura de las mismas debía ser un tercio la luz del vano.

Posteriormente, durante el renacimiento, Alberti realizó más tratados acerca de construcciones de fábrica, aumentando los conocimientos empíricos sobre su construcción.

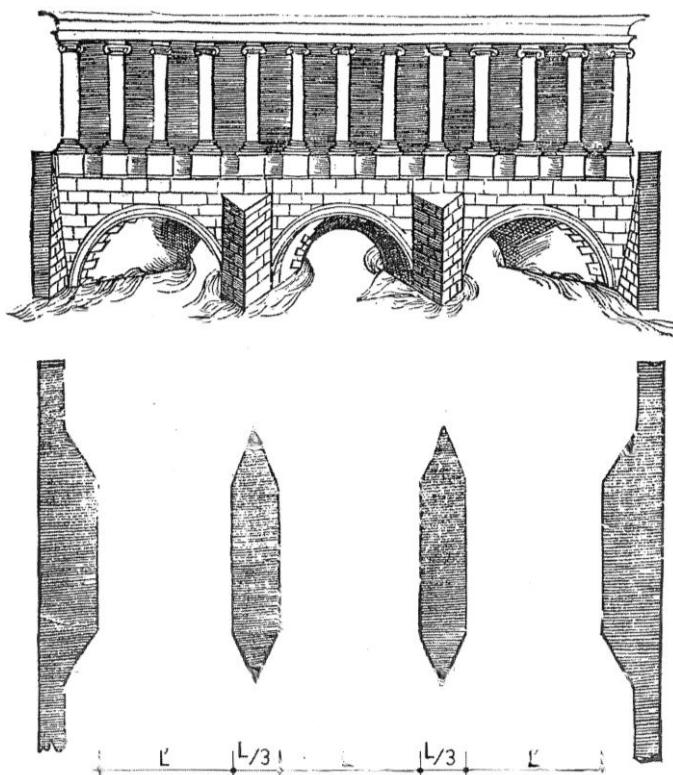


Figura 20. Regla de Alberti para dimensionado de pilas (5)

Con el desarrollo de las teorías de resistencias de materiales y cálculo de estructuras, durante los siglos XVII y XVIII, se cambió la forma de proyectar los puentes, y empezó a aplicarse un cálculo riguroso y matemático. A través de diversos ensayos sobre los materiales de fábrica se llegó a desarrollar los Principios de Análisis Límite para el material de fábrica de los que se deduce:

- Las estructuras de fábrica resisten muy mal las tracciones.
- Las tensiones de trabajo son bajas y suelen adoptar un orden de magnitud o dos por debajo de las resistencias de rotura a compresión. Los fallos de resistencia son muy aislados.
- Las estructuras de fábrica resisten bien los esfuerzos de compresión
- El fallo por deslizamiento está impedido por los altos coeficientes de rozamiento entre las piedras, determinados por las disposiciones constructivas habituales. Los casos observados de fallo por deslizamiento son muy raros.

El profesor Heyman (6) (1966-1999) fue el que enunció las primeras hipótesis para el análisis límite de fábricas:

- La fábrica tiene una resistencia a compresión infinita
- La fábrica no tiene resistencia a tracción
- El fallo por deslizamiento es imposible (salvo en los casos de mala construcción)

Así pues, además de comprobar la resistencia estructural del puente, habría que realizar un análisis de equilibrio a través de las líneas de empujes definidas como el lugar geométrico del punto de paso de los esfuerzos por un sistema de planos de corte dados (Formulación Moseley & Méry 1830-1840).

Finalmente, también es de interés incidir en el hecho de que, los estribos, a veces considerados un elemento secundario, deberían ser sometidos a una revisión estructural cuidadosa, ya que si los empujes transmitidos por los arcos son muy elevados y el diseño del estribo no es cuidadoso, podría inducirse un fallo por tracción en la base del mismo, al generarse un momento de vuelco importante (Figura 21).

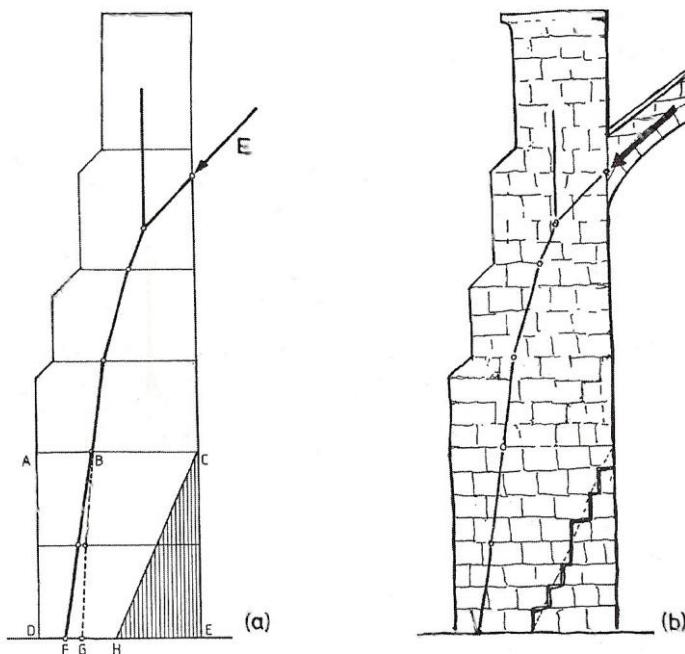


Figura 21. Mecanismo de fractura en un estribo (5)

3.5. Estado actual y remodelaciones del puente de piedra de Zaragoza

3.5.1. Remodelaciones y actuaciones previas

Durante el siglo XX se realizaron dos grandes reformas de las que se tiene constancia:

- 1906-1910: pretendió ganar anchura realizándose un voladizo de hormigón con ménsulas metálicas a cada lado del tablero. Posteriormente fueron retiradas
- 1988-1989: Proyecto de “Restauración y Recalce del Puente de Piedra en Zaragoza” (7). Se pretendía volver a los orígenes del puente y reforzar la cimentación.

Además hay que tener en cuenta que, previo a la realización de la galería de servicios, se vacío el interior del trasdós y el relleno de los estribos, se recubrieron las bóvedas con una losa de hormigón ligeramente armado y se volvió a llenar con grava-cemento para conseguir un reparto de esfuerzos homogéneo y una mayor estabilidad de la plataforma superior. Finalmente se sustituyeron los sillares en mal estado y se limpiaron los que estaban impregnados de suciedad.

Sin embargo el gran trabajo de remodelación se realizó en las cimentaciones del puente de piedra, ancestralmente realizadas con pilotes de madera de abedul, y que recibieron un refuerzo mediante el proceso conocido como *jet-grouting*: inyecciones de lechada de mortero lanzados a alta presión que rompen el terreno, con el cual se mezclan, dando lugar a una especie de hormigón. Este proceso consigue un terreno muy mejorado en su resistencia (la de un hormigón

pobre) y compacidad (al llenar huecos y poros de material injectado).

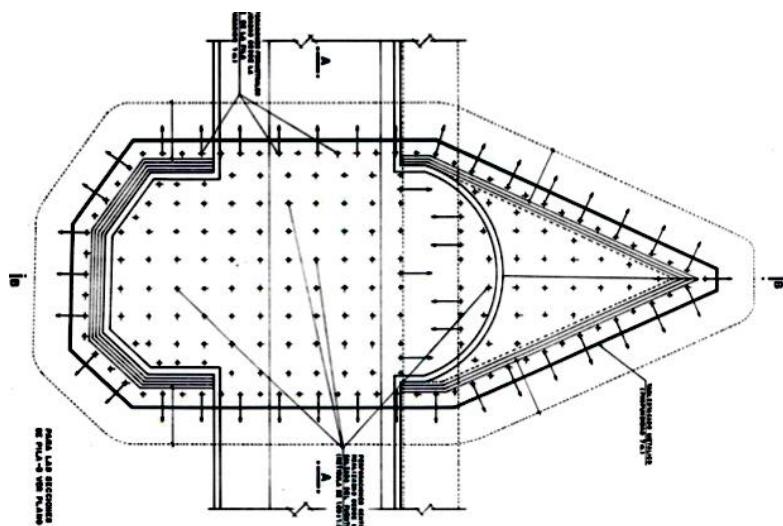


Figura 22. Plano de inyecciones de jet-grouting en pila 3

3.5.2. Dimensiones

El puente de piedra consta de ocho vanos, ordenados numéricamente desde la margen derecha (Números 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 definidos en la Figura 23), estando el primero de ellos (Número 1) totalmente oculto tras el muro de contención del Paseo Echegaray y Caballero; las luces son muy variables, como puede observarse en los planos geométricos en el Anexo I. Planos y Láminas del Ayuntamiento de Zaragoza y en el Anexo E. Modelado por Elementos Finitos, comprendidas entre los 19-33 metros dotando al puente de una longitud total de unos 240 m.

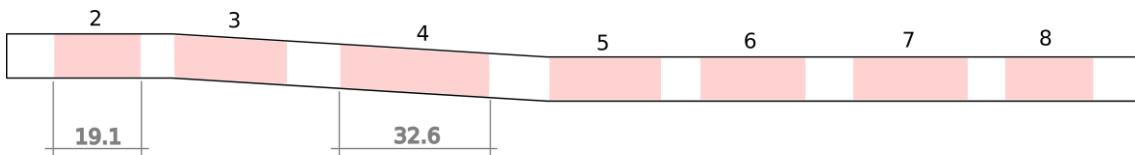


Figura 23. Distribución de vanos en el Puente de Piedra

Todos los arcos presentan un carácter rebajado, con diferentes espesores de canto y diferentes radios, siendo el mayor el arco 4. La planta no es recta sino que presenta una leve inclinación (del orden de 3-4°) en dirección de la corriente impidiendo, por esto, la visión de la salida del puente desde el extremo por el que se entre y siendo de una anchura de 9.5 m.

Las pilas o estribos son de fábrica de sillería de espesores y alturas muy variables y, debido a su posterior ejecución, ningún Tajamar se encuentra engarzada a las pilas, por lo que se aprecian grietas entre ambos elementos. Las tajamares 4 y 6 aguas abajo (Tambores) fueron torres-vivienda de las que actualmente solo se aprecian las secciones cuadradas de su planta.

3.5.3. Patologías

TABLERO

- Alteración superficial

Afecta a la piedra en el timpano, en las bóvedas (2, 3) y en los estribos (2, 7). Se producen por la erosión debido a acciones climáticas y la humedad siendo la gravedad de la patología media-alta.

- Pérdida de piezas

Se produce en el vano 2 y la pila 4 con pérdida parcial o total de la pieza afectada.

- Grietas

Se localizan en los vanos 2 y 3 y en las pilas 2, 3 y 7. Las grietas en los vanos se deben probablemente a una distribución asimétrica de las cargas en superficie. Se supone que están en punto muerto debido a que se estabilizaron en la restauración y que ya no soporta tráfico rodado intenso. Las grietas en las pilas se asocian a un fallo de la cimentación por desgaste del paso del tiempo y por asientos diferenciales (no es presumible la evolución tras el recalce). Su gravedad patológica es calificada como media.

ESTRIBOS

- Vegetación

Presencia de vegetación herbácea y arbustiva en la cimentación de todos los tajamares aguas abajo (tambores) debido a la acumulación de sedimentos orgánicos. Se califica de gravedad media-baja.

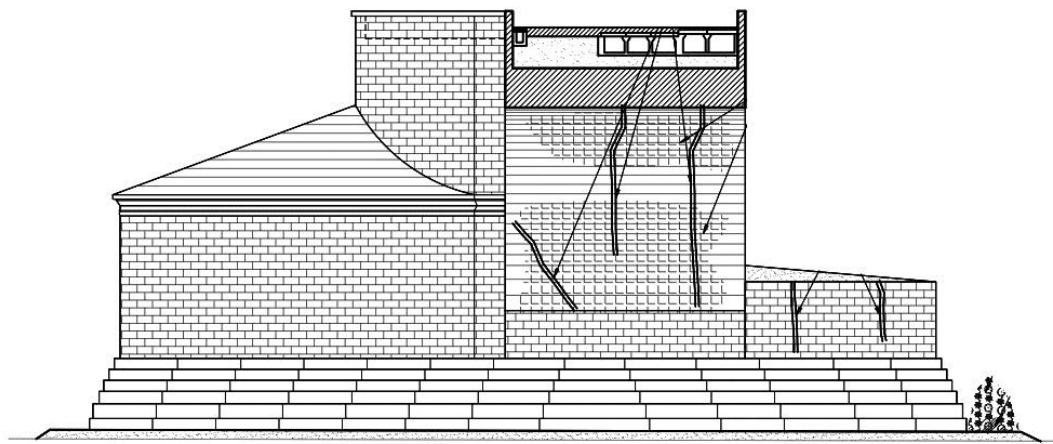


Figura 24. Patologías: grietas y vegetación. Extracto del Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza

4. Estudio Estructural: Modelado por Elementos Finitos

El modelado por elementos finitos es una técnica relativamente moderna que se ha extendido con fuerza en el ámbito de la ingeniería debido a su gran campo de aplicación, versatilidad y potencia, permitiendo resolver problemas de complejidad elevada que, de otra forma, no habría sido posible resolver.

En la actualidad existe una amplia gama de software destinada al cálculo por elementos finitos tanto a nivel comercial como de carácter libre. Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado el software de cálculo “Abaqus CAE” (8) que permite el cálculo de una amplia gama de problemas de ingeniería, tanto lineal como no lineal.

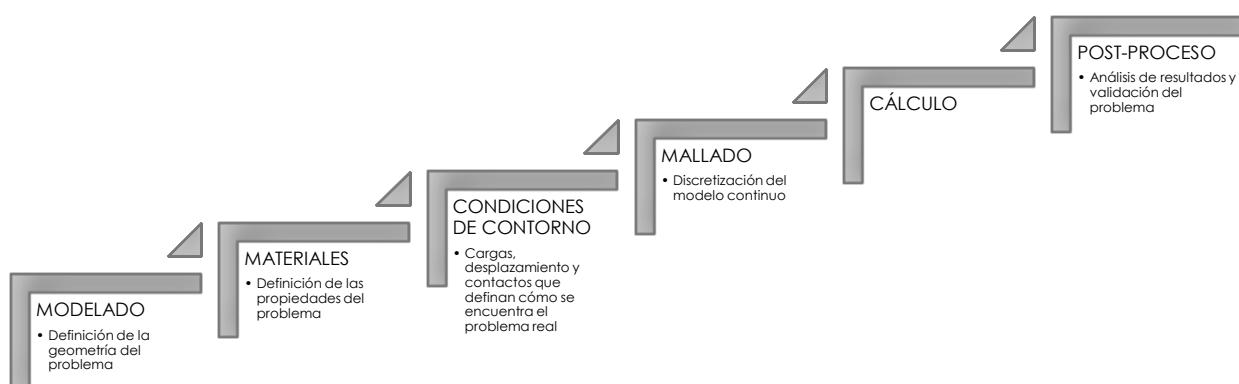


Figura 25. Proceso de cálculo por elementos finitos genérico

4.1. Hipótesis y restricciones

Como ya se ha visto durante el apartado 3.4 el cálculo de arcos se basa en un cálculo estructural y en un cálculo de equilibrio mediante el método de líneas de empuje.

Para una primera aproximación del cálculo resistente del puente se ha considerado el modelado continuo por elementos finitos por ser el más simple de todos dentro del grupo de mayor complejidad (problemas tridimensionales). Es decir, que se está analizando un modelo tridimensional, y no bidimensional o de barras, con las dificultades que esto entraña; se ha escogido el modelo continuo y no el método de elementos discretos, que implicaría mayor dificultad de cálculo y,

además, un mayor número necesario de datos a analizar acerca del problema para su completa definición.

Hay que tener en cuenta, por tanto, que al utilizar este modelo no discreto se está realizando una aproximación del comportamiento real del puente para simplificar su cálculo, de forma que permite confirmar pre-diagnósticos, diagnósticos y la pautas a seguir, como se confirma más adelante en el informe. Esta simplificación viene determinada por el hecho de que un arco de sillares no es un elemento estructural estrictamente continuo: se comporta macroscópicamente y resistentemente como tal estando compuesto, sin embargo, por elementos discretos (dovelas o piedras). Si no existiesen juntas entre estas piedras, y el arco de piedra fuese un único macizo de roca, la aproximación del modelo continuo sería totalmente correcta. Así pues, ha de analizarse con sumo cuidado el comportamiento estructural en determinados puntos, como pueden ser las zonas de tracción y los empotramientos en las pilas.

- Los puntos de tracción en la realidad, una vez fisurados, no transmitirían carga a tracción puesto que pierden su capacidad resistente al perder la roca su cohesión. Esto en el modelo de cálculo contemplado no ocurre puesto que sigue existiendo un material que “trabaja”, impidiendo la separación de los elementos. Teniendo esto en cuenta, podrán determinarse los puntos en los que presumiblemente, pueden aparecer fisuras en el puente debido a su servicio.
- Los puntos de empotramiento de los arcos en los extremos producirán un momento que se transmitirá de forma irreal a la pila, generando unas tensiones en la parte superior de la misma que inducen, a su vez, una tracción irreal que no existiría en un modelado de elementos discretos.

Otras restricciones de modelado son las relativas al material de relleno del puente, que está encargado del reparto de los pesos y de establecer empujes que den equilibrio a las bóvedas, ya que se modela como un continuo y es un material granular. No obstante, a efectos de cálculo, se considera irrelevante para el caso que se observa por ser un material con baja capacidad resistente.

Además de las restricciones materiales, se han realizado unas simplificaciones geométricas, respetándose, sin embargo, las dimensiones importantes como las luces de los vanos de los arcos, su radio de curvatura o su canto.

La primera simplificación está relacionada con el hecho de que la trazada del puente es variable tanto en el plano XY (plano horizontal), como en el plano XZ (plano vertical). La variabilidad en el plano XZ es la lógica del puente y es la que permite salvar la distancia entre las dos riberas, pudiendo observarse en una pendiente creciente desde la ribera sur que alcanza su culmen sobre el Arco 4, el de mayor luz, para,

finalmente, descender hasta la ribera norte. Es el cambio de trazada en el plano horizontal, el mismo que graciosamente impide ver la salida del puente cuando entras por uno de los extremos, el que precisa de una simplificación. Así pues se simplifica la trazada en dos tramos horizontales conectados por un tramo inclinado aproximadamente $3'5^\circ$.

Por tanto, será labor del calculista localizar estos comportamientos desajustados respecto a los reales y determinar su influencia, o no, en los resultados obtenidos.

4.2. Modelado

El modelado tridimensional del puente de piedra, cuyos detalles se encuentran en el Anexo E. *Modelado por Elementos Finitos*, se ha realizado íntegramente en el software Abaqus CAE.

Para realizar el modelado se partió de los planos bidimensionales, en alzado y en planta del puente, aplicándose diversas técnicas, como la extrusión (Extrude) o el barrido (Sweep), que resultaron infructuosas al producir huecos en la geometría relacionados con la inclinación de $3'5^\circ$ de la planta del puente en el tramo central. Gracias a una de las herramientas más potentes de modelado por secciones o costillas (Loft), se consiguió realizar el modelo tridimensional macizo del puente del que, posteriormente, se podrían realizar operaciones booleanas de resta y suma para obtener el interior de la geometría. Durante el proceso de creación de una geometría compleja se crean puntos, segmentos o caras que no son válidos para el modelado, por lo que se tuvo que tener especial cuidado al repasar la geometría y solventar los problemas mediante la sustitución de caras inconexas o mediante la aplicación de una topología virtual (Virtual Topology), que permite ignorar parte de la geometría más complicada para conseguir un mallado correcto de la pieza.

Tras el modelado individual de cada pieza se obtuvieron 2 grupos bien diferenciados: 1) el core, o núcleo, estructural del puente; 2) los tambores y tajamares que caracterizan el puente.

El core estructural del puente consta de 5 partes bien diferenciadas:

1. **Interior de piedra:** formado por los arcos y los estribos compuestos de sillería regulares en tamaño y juntas de piedra caliza
2. **Hormigón:** comprende una capa de hormigón armado de una antigua remodelación de unos 20 cm de espesor que pretendía, a todas luces, suponer un refuerzo estructural de los arcos de piedra.
3. **Relleno de Grava Cemento:** está compuesto en realidad por dos partes de modelado. La primera es la capa que se encuentra llenando el trasdós de las bóvedas y los riñones o tímpanos. La segunda es una capa de relleno inmediatamente superior a esta

y que linda con las canalizaciones que circulan por el interior del puente.

4. **Canalizaciones:** a priori se intentó modelar las canalizaciones que circulan por el interior del puente y que alojan las instalaciones que cruzan de una ribera a otra. Debido a su complejidad y su alto coste computacional añadido se sustituyó por un bloque del mismo material que componen las canalizaciones: el hormigón.
5. **Losa de piedra:** finalmente la losa de pavimentación sobre la que discurre el tráfico rodado y los peatones.

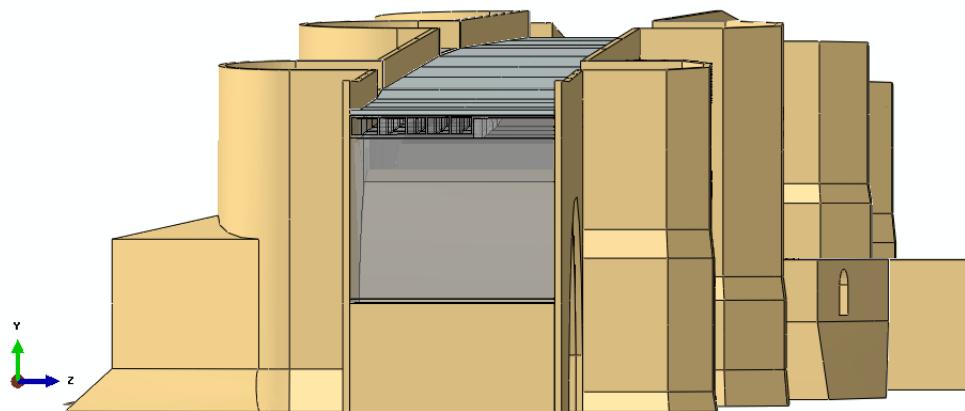


Figura 26. Modelado de la sección transversal

La segunda parte se compone de los tambores y tajamares que se han reproducido gracias a la información obtenida en los Archivos Municipales (Anexo I. Planos y Láminas del Ayuntamiento de Zaragoza), pero teniendo en cuenta que, estructuralmente, la parte más importante es el core y, por tanto, es a la que más atención se ha dedicado. Además, estos componentes del puente no van unidos al núcleo estructural si no que van simplemente apoyados en él, de ahí las fisuras que se aprecian en la junta de apoyo pila-puente.

Finalmente mediante el módulo de ensamblaje de Abaqus (Assembly) se preparó el conjunto del núcleo estructural para realizar los cálculos estructurales.

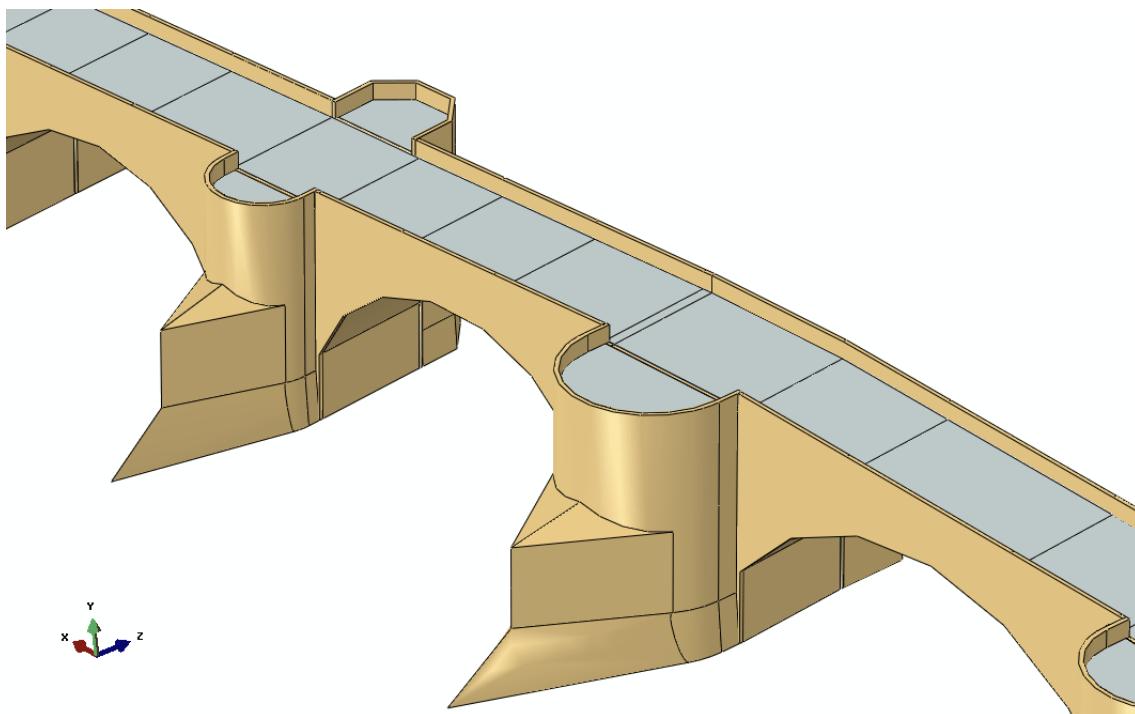


Figura 27. Modelado de las tajamares

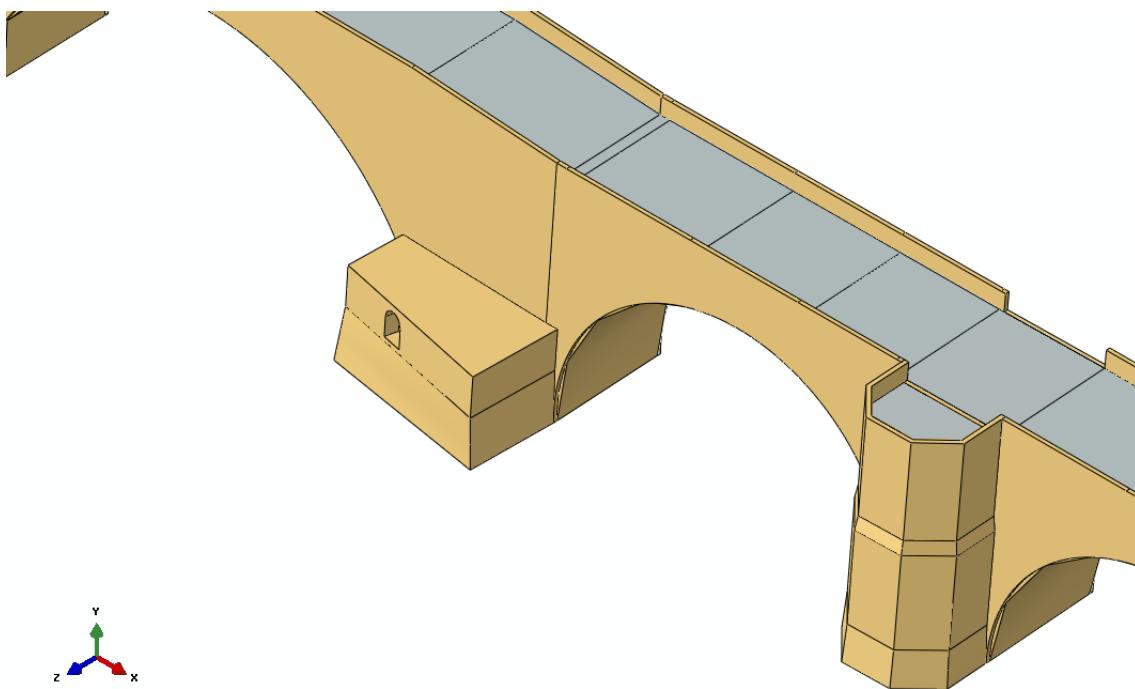


Figura 28. Modelado de los tambores

Gracias a la colaboración con el Área de Fabricación de la Universidad de Zaragoza, se realizó un modelo tridimensional en plástico del puente de piedra con una impresora 3D (Figura 29) partiendo del modelo a ordenador realizado para el proyecto (Anexo D. Fabricación Aditiva) demostrando, de esta forma, la potencia de estos métodos de fabricación y la posibilidad de aplicación a un amplio campo de trabajo (9).

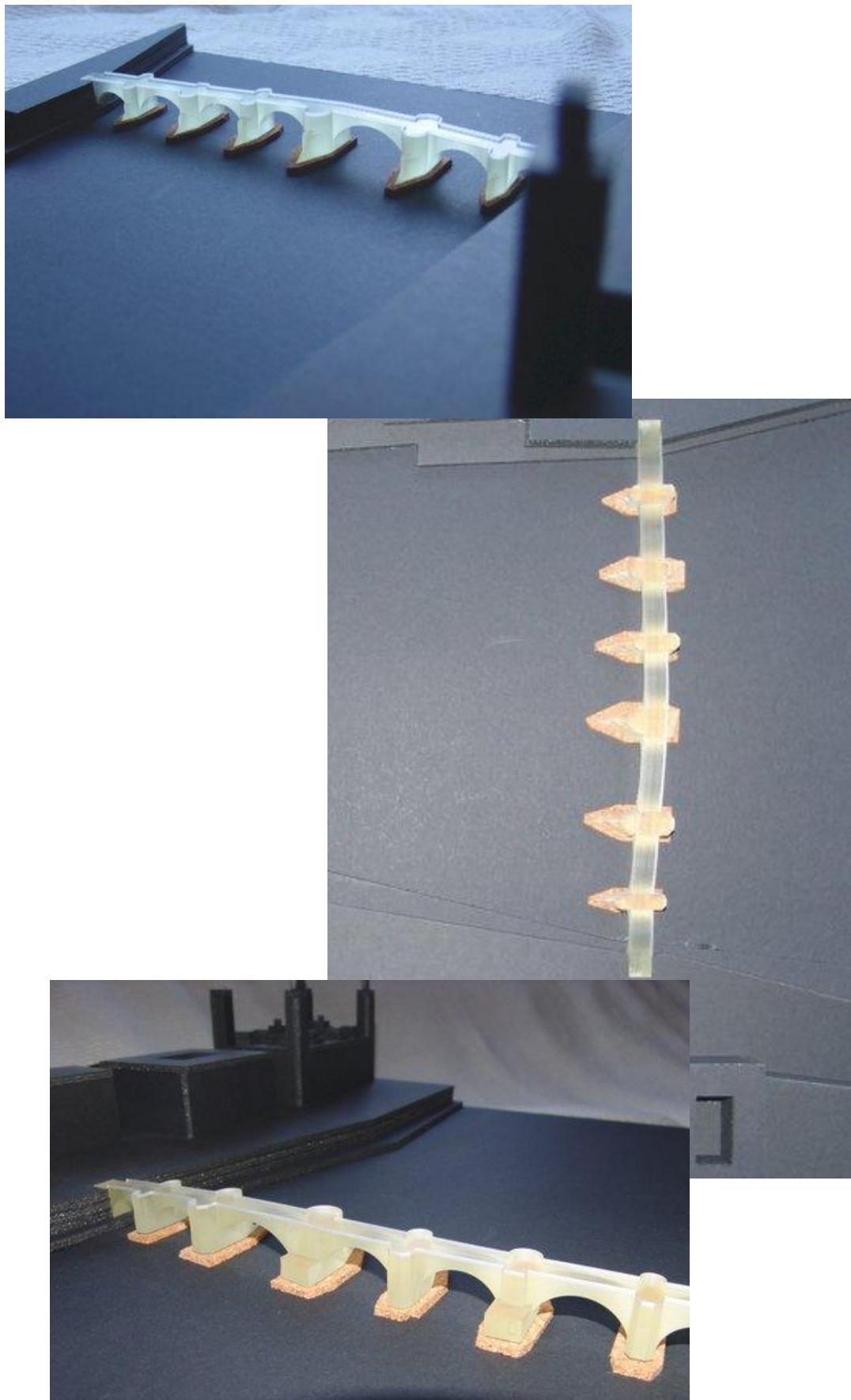


Figura 29. Fotos del modelo plástico integrado en su entorno (M.A. Ariza Barra)

4.3. Materiales

Una parte básica de cualquier cálculo por elementos finitos es identificar de manera clara y básica cuales son los materiales que se van a aplicar, dónde, qué características resistentes tienen, cuál es su módulo elástico y coeficiente de Poisson.

Para este estudio se va a trabajar con material elástico, lineal e isótropo para todos los materiales, definiéndose en Abaqus a través de tres pasos:

- Propiedades del material (Material Properties): se precisa de la densidad, módulo elástico y coeficiente de Poisson.
- Tipo de Sección (Section Type): se asigna una sólida y homogénea para geometría 3D.
- Asignación de la sección y la propiedad a la parte deseada.

En el Puente de Piedra era necesario conocer las propiedades de tres materiales básicos: piedra caliza, hormigón y grava-cemento.

4.3.1. Piedra Caliza

Es la piedra angular sobre la que se erige el puente dando integridad estructural y conformando el esqueleto resistente. Sin embargo es un material problemático ya que puede haber una gran variabilidad de comportamiento según la zona geográfica de la cantera, la profundidad del estrato o la forma de extracción.

Gracias al acceso otorgado por el Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza a los Archivos Municipales se pudieron encontrar referencias a ensayos realizados sobre la piedra (Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza). Desgraciadamente la información necesaria para el modelado era incompleta, por no disponer de módulos elásticos o coeficientes de Poisson, y para completarla tuvo que recurrirse a distintas fuentes bibliográficas genéricas, (10) y (11), pudiendo definirse los siguientes valores indicados en la Tabla 4-1 para los materiales (Anexo A. Materiales).

Tabla 4-1. Propiedades de la caliza (Anexo A. Materiales)

R (kp/cm ²)	E(N/m ²) · 10 ⁶	Poisson	Peso (kg/m ³)
120	29.565'4	0'3	3.061'22

4.3.2. Relleno de Grava-Cemento

Normalmente estaba compuesto de materiales que se encontraban en la zona de construcción como pudiera ser canto rodado del lecho del río, tierras o zahorras de la ribera. Podía ser un relleno granular o podía estar cementado con mortero de cal o mortero de cemento puzolánico.

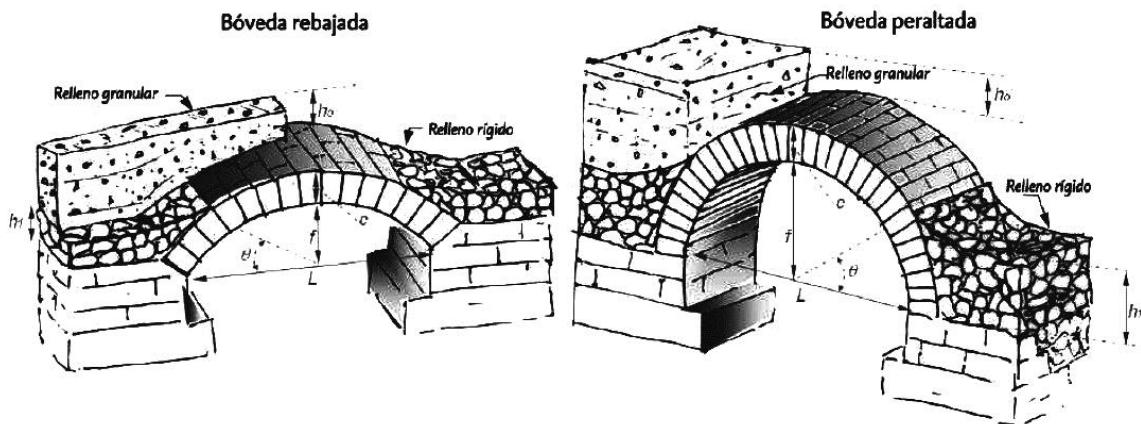


Figura 30. Distribución de capas de relleno (12)

Resultó ser el material más difícil del cual encontrar información, ya que no existía ningún dato acerca de él, excepto su localización física en la sección transversal (Anexo I. Planos y Láminas del Ayuntamiento de Zaragoza), en los proyectos de remodelación. Finalmente, recurriendo a tesis doctorales de ingeniería de caminos, (3), (12) y (13), se obtuvieron los siguientes valores genéricos indicados en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Propiedades de la grava-cemento (Anexo A. Materiales)

$E(N/m^2) \cdot 10^6$	Poisson	Peso (kg/m^3)
4.000	0'3	2.040'82

4.3.3. Hormigón Armado

El hormigón armado (14) es un material altamente tecnológico y novedoso, aunque existían determinados hormigones naturales (puzolánicos) que no tenían las mismas propiedades mecánicas.

No es un elemento utilizado en la antigüedad, pero fue incorporado en épocas posteriores con objeto de restaurar los monumentos, aportando rigidez estructural e impermeabilización. Un claro ejemplo es el puente de Piedra de Zaragoza, que incorpora una capa de 20 cm de hormigón ligeramente armado en el intradós de sus bóvedas de piedra.

Se encontraron referencias de que el hormigón utilizado en los proyectos de remodelación (Anexo I. Planos y Láminas del Ayuntamiento de Zaragoza) tenía una resistencia característica de 20 kp/cm²:

$$E_{0j} \left(\frac{N}{mm^2} \right) = 8.500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}}$$

$$E_c = 8.500 \cdot \sqrt[3]{20 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \cdot \frac{9'8 \left(\frac{m}{s^2} \right)}{\frac{1}{100} \left(\frac{cm^2}{mm^2} \right)}} = 18.312'7 \frac{N}{mm^2}$$

Finalmente los valores utilizados para el cálculo son:

Tabla 4-3. Propiedades del hormigón armado (Anexo A. Materiales)

E(N/m²) ·10⁶	Poisson	Peso (kg/m³)
18.312'7	0'2	2.551'02

4.4. Condiciones de Contorno y Variables de Salida

Las condiciones de contorno se definen, en el módulo Boundary Conditions de Abaqus, de forma lo más aproximada posible a la realidad; cómo se encuentra situado físicamente el puente, qué tipo de desplazamientos existen, cómo se encuentra unido al terreno o si hay cargas externas que puedan afectarle de algún modo. De la correcta definición de las condiciones que rodean al puente dependerá, posteriormente, la fidelidad del comportamiento del modelo respecto del real.

Existen dos condiciones de contorno básicas en este estudio: las cargas (Boundary Conditions – Loads) a las que se somete el puente y la unión del puente al terreno (Boundary Conditions - Displacements). Mientras que las cargas se definen cada una en un paso de cálculo (step), diferente para poder combinar los tensores de tensión y los vectores de desplazamiento en el post-proceso, los desplazamientos se definen únicamente en el step inicial de cálculo y se mantienen a lo largo del resto.

4.4.1. Cargas

La definición de cargas del puente viene dada por la *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11)* del Gobierno de España (14), desarrollada y calculada en el Anexo B. Cargas.

A través del método de los Estados Límite, tanto últimos como de servicio, se comprobarán diversas hipótesis de cálculo resistente y de condiciones de servicio del puente para verificar su buen comportamiento.

Dentro de éste cálculo estructural se han comprobado los siguientes estados límite: Estado Límite Último (Resistente), Estado Límite de Servicio Característico (Irreversible), Estado Límite de Servicio Frecuente (Reversible) y una Hipótesis Lógica de Servicio que contempla el paso de autobuses por el puente de Zaragoza y, al no estar definida en la normativa, fue definida por mí mismo.

Acciones Permanentes

Consideran los pesos de los distintos elementos que componen la construcción: peso propio de elementos resistentes y cargas muertas que orbitan sobre ellos.

Se realizó una combinación de pesos según fueran más restrictivos los de la normativa o los de la bibliografía

Tabla 4-4. Pesos de la bibliografía

Material	Peso (kg/m ³)
Caliza	3.061'22
Relleno Grava-Cemento	2.244'89
Hormigón	2.551'02

Acciones Permanentes Constantes (G)

- Peso Propio
- Cargas Muertas
- Pavimentos
- Elementos de Contención
- Dotaciones y Servicios

Acciones Permanentes No Constantes (G*)

- Presolicitaciones: no se considera pretensado por no existir en estructuras históricas ni ser incluido por remodelaciones.
- Acciones Reológicas: no se considera por ser mayoritariamente mampostería.
- Empuje del Terreno: no se considera por estar contenidos los taludes por muros.
- Asientos del Terreno en la Cimentación: no se consideran puesto que existe un cosido con jet-grouting de la última remodelación del puente de piedra (Anexo H. Documentación del Ayuntamiento).
- Rozamiento en Apoyos Deslizantes: no existen apoyos deslizantes.

Acciones Variables (Q)

- **División de la Plataforma**

Se divide en unos carriles virtuales para el análisis en función de su anchura real. En el puente de Piedra de Zaragoza se tendrán dos carriles peatonales de 2'25 m, un único carril virtual de 3 m y un área remanente de 2 m (Figura 31).

- **Cargas Verticales**

- Tráfico de Vehículos

Se considera un vehículo de 2 ejes situado en el centro del carril de 300 kN puntuales de peso en cada eje y unas sobrecargas por carril (ver Tabla 4-5).

Tabla 4-5. Cargas en el tráfico de vehículos (TABLA 4.1-b IAP-11)

Zona	$2 \cdot Q_{ik}$ (kN)	q_{ik} (kN/m ²)
Carril 1	2·300	9
Área remanente	0	2'5

- Tráfico Peatonal

Se considera una sobrecarga uniforme de 5 kN/m² en zonas peatonales.

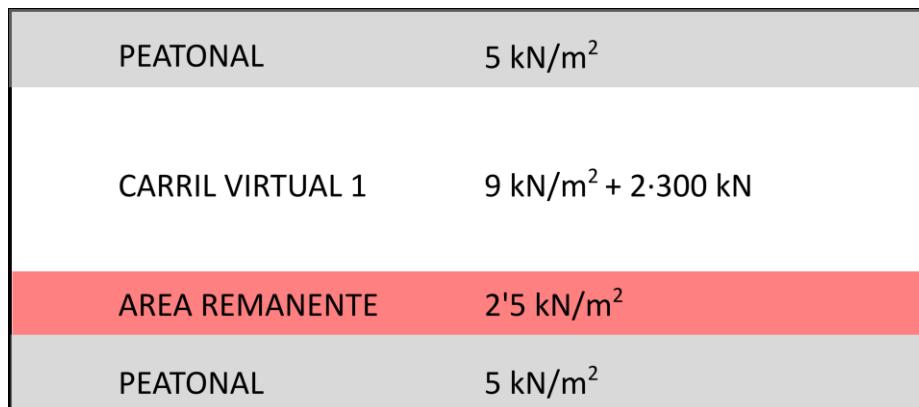


Figura 31. Distribución de sobrecargas uniformes en cada carril

- **Fuerzas Horizontales**

Son despreciables frente a la magnitud de las cargas restantes (Frenado y Arranque, Fuerza Centrífuga y otras transversales).

- **Grupos de Cargas de Tráfico**

La concomitancia de las posibles sobrecargas se tiene en cuenta mediante la consideración de los grupos de cargas, excluyentes entre sí, que se contemplan en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Grupos de cargas (TABLA 4.1-c IAP-11)

Grupo	Vehículo Pesado	PLATAFORMA			ACERA	
		Sobrecarga de uso	Aglomeración de personas	Horizontal	Vertical	
1	2·300	9 2'5	-	-	-	2'5
2	0'75·2·300	0'4·9 0'4·2'5	-	360+2'7·L	-	-
3	-	-	-	-	-	5
4	-	-	5	-	-	5

▪ Viento

Primero se determina la velocidad básica del viento en función de la situación geográfica de Zaragoza (zona B del mapa de isotacas) y un periodo de retorno de 100 años, obteniéndose 28'08 m/s.

Se observa que este valor de velocidad es de aproximadamente 100 km/h un valor que en absoluto corresponde con la experiencia local, la cual situaría la velocidad básica en 140 km/h. Se vio la necesidad de añadir un coeficiente de experiencia local ($K_{exp}=1'385$) que corrigiese este hecho.

La velocidad media del viento depende de la altura a la que se encuentre el punto de análisis, la rugosidad del terreno, la topografía y la velocidad básica del viento.

$$V_m(z) = c_r(z) C_0 v_b(T)$$

Considerando que el puente está en una zona urbana con al menos un 15% de la superficie edificada y una altura media que excede los 15 m (entorno IV) y que, además, existirá encauzamiento del aire, la velocidad media será:

$$\begin{aligned} z < 10 \rightarrow v_m &= 16'71 \frac{m}{s} \\ z \geq 10 \rightarrow v_m &= 7'259 \cdot \ln(z) \frac{m}{s} \end{aligned}$$

Para determinar el empuje del viento:

$$P_w = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(T) \right] \cdot c_e(z) \cdot c_f \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

Que se verá mayorado o minorado según la forma geométrica que tenga el objeto sobre el que incide.

Finalmente se habrá de considerar, además, la succión generada aguas abajo debido a las turbulencias y las zonas de vacío que se generen (Figura 32). Según el Código Técnico para la Edificación estos valores pueden ir de 0'8 a 1'2 veces el empuje del viento dependiendo de la forma del objeto. Para el puente de Piedra se ha estimado el más desfavorable.

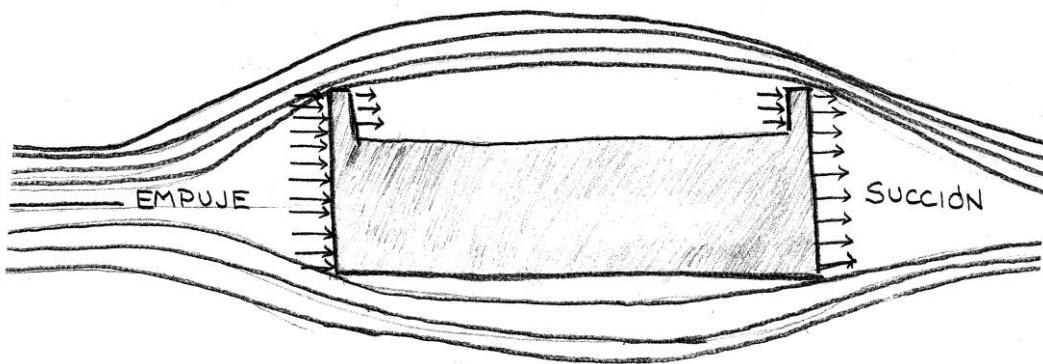


Figura 32. Succión producida a sotavento debido al paso de aire

Tabla 4-7. Presiones y Succiones del viento

Z (m)	Pw tablero (N/m ²)	Pw Tajamar1 (N/m ²)	Pw Tajamar 2 (N/m ²)	S tablero (N/m ²)	S tambor (N/m ²)
0					
2		37632			45158.4
4		75264			90316.8
6		112896			135475.2
8			112896		135475.2
10			141120		169344
12			169344		203212.8
14	246960		197568	296352	237081.6
16	282240		225792	338688	270950.4
18	317520		254016	381024	304819.2
20	352800		282240	423360	338688

Dos observaciones son necesarias:

- La tajamar aguas arriba se divide en dos zonas puesto que el coeficiente de fuerza debido a la geometría es diferente en un triángulo (parte inferior) y en un cilindro (parte superior)
- Los perfiles de presión que se desarrollan son parabólicos y, para incorporarlos en el cálculo se ha hecho una aproximación. Se han tomado tres franjas de altura: 0-10 m, 10-15 m y 15-20 m; y, para cada una de ellas, se han estimado unos valores promedio de presión que, posteriormente, han sido los utilizados en el cálculo:

- Viento Presión 0-10 m: 21.500 N/m²
- Viento Presión 10-15 m: 23.500 N/m²
- Viento Presión 15-20 m: 25.500 N/m²
- Viento Succión 0-10 m: -25.600 N/m²
- Viento Succión 10-15 m: -28.000 N/m²
- Viento Succión 15-20 m: -30.200 N/m²

▪ Acción Térmica

No se consideran acciones térmicas como determinantes en el puente puesto que “el puente es hijo de las estaciones” y, por tanto, al ser construido en un largo periodo de tiempo, se desconoce que parte fue construida dilatada (verano) y cual comprimida (invierno).

▪ Nieve

Solo es necesario considerarla en alta montaña o en proceso de construcción (según normativa IAP-11).

▪ Empuje Hidrodinámico del Agua

Debido a corrientes de agua y arrastres

$$E = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2(T) \right] \cdot c_f \cdot A(T) \quad (N)$$

Hasta la fecha la mayor avenida registrada se produjo en 1961 con un caudal de 5.000 m³/s. Sin embargo, este evento no podría volver a suceder debido a las regulaciones del río mediante las presas. Así pues se estima una velocidad media adecuada de unos 5 m/s para los valores de una riada.

Tabla 4-8. Cálculo del empuje hidrodinámico sobre las pilas

Densidad (kg/m ³)	1000
Velocidad media (m/s)	5
Cf tajamar	1.6
Empuje (N/m²)	20000

▪ Autobús Urbano de Zaragoza

Datos técnicos de un autobús genérico IVECO Cityclas:

- Peso: 18.812 kg
- Distancia entre ejes: 6.120 mm
- Anchura: 2.550 mm
- Capacidad: 90 personas.
- Autobús cargado (75 kg de media): 25.562 kg

Criterios Funcionales Relativos a Flecha

La flecha vertical máxima correspondiente al valor frecuente de la sobrecarga de uso no supera los valores siguientes:

Luz/1200

Estado Límite de Vibraciones en Pasarelas Peatonales

En general se considera verificado si las frecuencias naturales se sitúan fuera de los siguientes rangos:

- Rango crítico para vibraciones verticales y longitudinales: 1'25 a 4'6 Hz
- Rango crítico para vibraciones laterales: de 0'5 a 1'2 Hz

Combinaciones de Acciones

Las combinaciones de acciones están compuestas de unos sumatorios de acciones (G , G^* y Q) escaladas por unos factores, mayorantes o minorantes, y de simultaneidad de ocurrencia (γ y ψ).

De estas combinaciones nacen las hipótesis de carga que deben comprobarse para un correcto funcionamiento de la estructura (Tabla 4-9)

- COMBINACIÓN ELU

- En situación persistente o transitoria

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

- COMBINACIÓN ELS

- Combinación característica

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Combinación frecuente

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Combinación casi-permanente

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Tabla 4-9. Hipótesis de Cargas Definitivas

ESTADOS LIMITES ULTIMOS. Persistente o transitoria (Resistente)						
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)	Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)
1	1'35	1'35	0	0	0	0'9
2	1'35	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	1'35	0	0	1'5
3	1'35	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	1'35	0	0'9
4	1'35	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	1'35	0'9
5	1'35	0	0	0	0	1'5
6	1'35	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	0	0'9
ESTADOS LIMITES DE SERVICIO Característica (Irreversible)						
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)	Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)
7	1	1	0	0	0	0'6
8	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	1	0	0	0'6
9	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	1	0	0'6
10	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	1	0'6
11	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	0	1
12	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	0	0'6

ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO Frecuente (Reversible)						
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)	Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)
13	1 (0'75·v/pesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	1
15	1	0	0	0	0'2	1
HIPÓTESIS LÓGICA DE SERVICIO						
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1) - Vehículo Pesado Delante	Gr1 (Q1) - Vehículo Pesado Detrás	Gr1 (Q1) - Dist	Viento (Q5)	Aqua (Q6)
17 (Arco 2)	1	0	0	0.4	0.6	1
18 (Arco 3)	1	0.75 (Arco 4)	0.75 (Arco 2)	0.4	0.6	1
19 (Arco 4)	1	0.75 (Arco 5)	0.75 (Arco 3)	0.4	0.6	1
20 (Arco 5)	1	0.75 (Arco 6)	0.75 (Arco 4)	0.4	0.6	1
21 (Arco 6)	1	0.75 (Arco 7)	0.75 (Arco 5)	0.4	0.6	1
22 (Arco 7)	1	0.75 (Arco 8)	0.75 (Arco 6)	0.4	0.6	1
23 (Arco 8)	1	0	0	0.4	0.6	1
24 (Atasco)	1	0	0	0.4	0.6	1

4.4.2. Desplazamientos

Las hipótesis de desplazamientos que se han considerado son las siguientes:

- Empotramientos en las uniones con las riberas puesto que van embebidas en ambas orillas y, a su vez, estas están confinadas por muros de hormigón. Por tanto se supone que no habrá desplazamientos en ninguna de las direcciones ($U_1=U_2=U_3=0$).
- Empotramientos en las pilas puesto que, tras el último recalce del Ebro discutido en 3.5.1, las bases fueron cosidas al terreno mediante inyección de lechada de mortero por jet-grouting (Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza). Así pues se considera que no se producirán asientos considerándose nulos los desplazamientos.

4.4.3. Variables de salida

En el estudio del puente se han seleccionado como parámetros importante de estudio los siguientes:

- Desplazamientos: los desplazamientos de la estructura permitirán calcular si la flecha máxima del puente se encuentra dentro de los límites permitidos por la normativa (Anexo B. Cargas).
- Tensiones: para el estudio de resistencia estructural se ha decidido utilizar el modelo de Rankine de tensiones máximas y mínimas principales (15) para el modelado del material y serán éstas, por tanto, las más importantes.
- Frecuencias: se analiza un estudio de frecuencias propias para observar si se cumple el confort marcado por la normativa (Anexo B. Cargas).

4.5. Mallado

En este paso se transforma un elemento continuo, como pueda ser un bloque de piedra, en un elemento discreto mediante la división en elementos y nodos.

Antes de mallar en Abaqus es importante que los objetos puedan ser mallados: si está en color naranja no se podrá mallar. Para poder conseguir que sean simplificados y puedan mallarse existen dos herramientas básicas:

- Virtual Topology: estrategia que simplifica el objeto para poder mallarlo
- Cell Partition: estrategia de corte de la geometría del objeto de forma que se pueda mallar estructuradamente y no haya problemas en las uniones de las mallas.

Una vez que puedan mallarse todas las piezas involucradas en el ensamblaje de cálculo se precisa el tamaño de la malla (0.3) y se asignan los tipos de elementos finitos con los que se quieren calcular; en el mallado del modelo se han combinado los dos tipos de mallado básico: estructurado (structured) y barrido (sweep) con hexaedros y tetraedros.

Los hexaedros se han utilizado tanto para las pilas como para el núcleo del puente. Los tetraedros se han utilizado para los tajamares ya que presentaban una geometría mucho más complicada de adaptar a los tetraedros.

Los hexaedros son elementos del tipo C3D8 cuyas características son:

- C3D8: elemento cubico de aplicación general con integración completa (8 puntos de integración, Figura 33) que no es adecuado para comportamientos plásticos del material, coeficientes de Poisson elevados o flexión en placas finas.

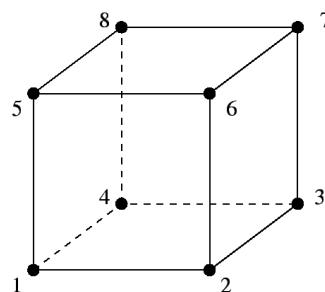


Figura 33. Elemento C3D8 (16)

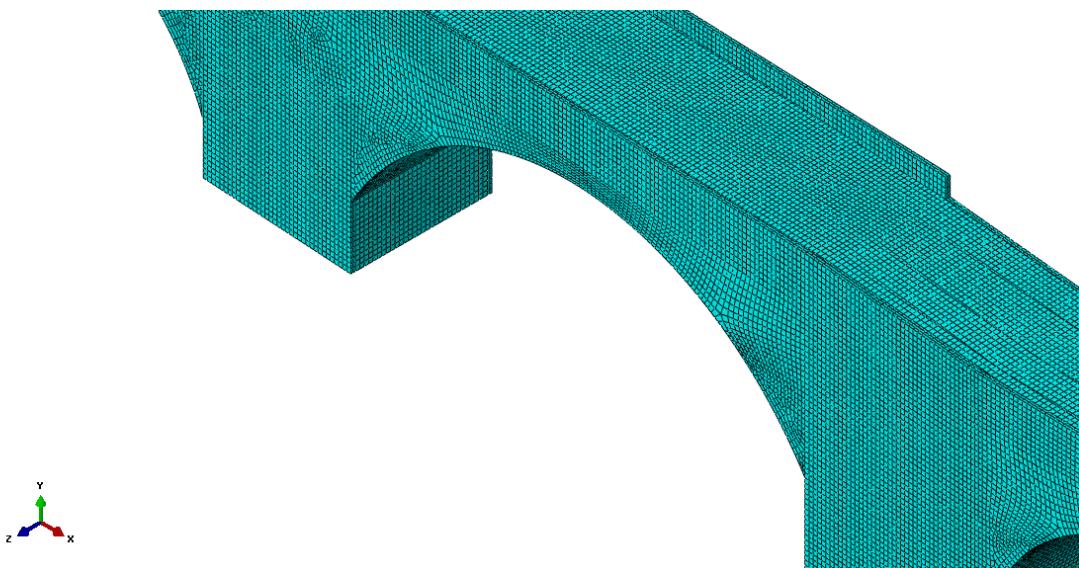


Figura 34. Mallado del core estructural del puente

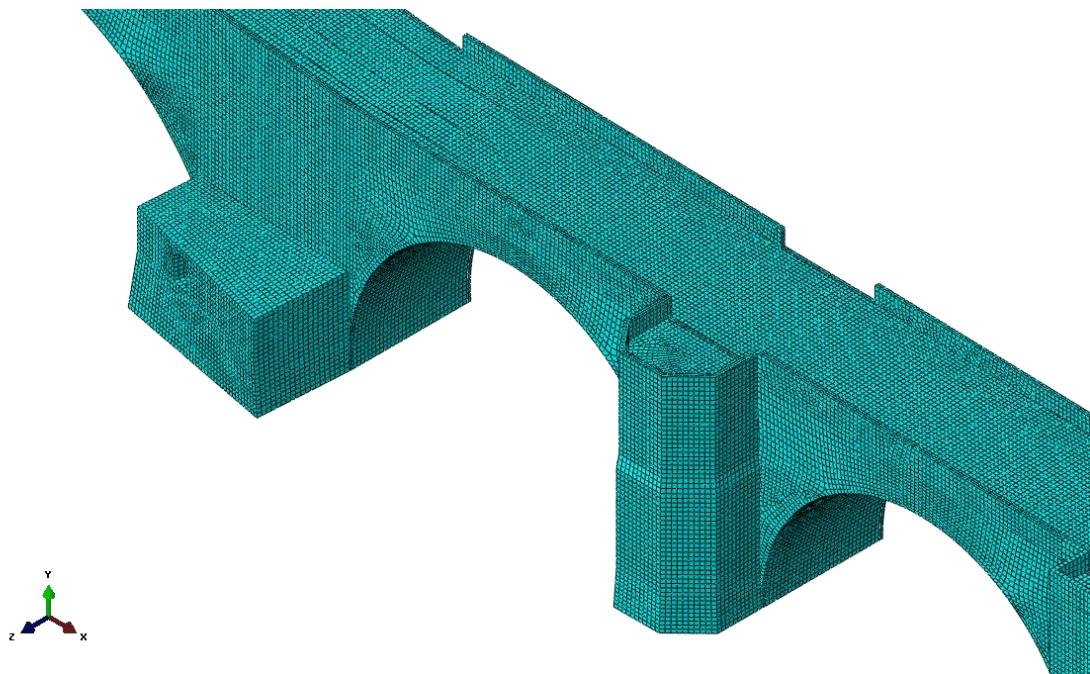


Figura 35. Mallado de los tajamares

Los tetraedros son elementos del tipo C3D10 cuyas características son:

- C3D10: es un elemento tetraédrico cuadrático lineal con integración completa (10 puntos de integración, Figura 36) que se comporta bastante bien para propósitos generales con la ventaja añadida de tener un mallado total de los elementos.

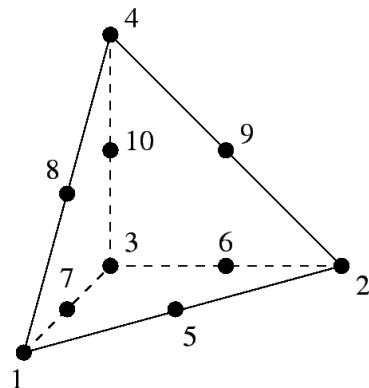


Figura 36. Elemento C3D10 (16)

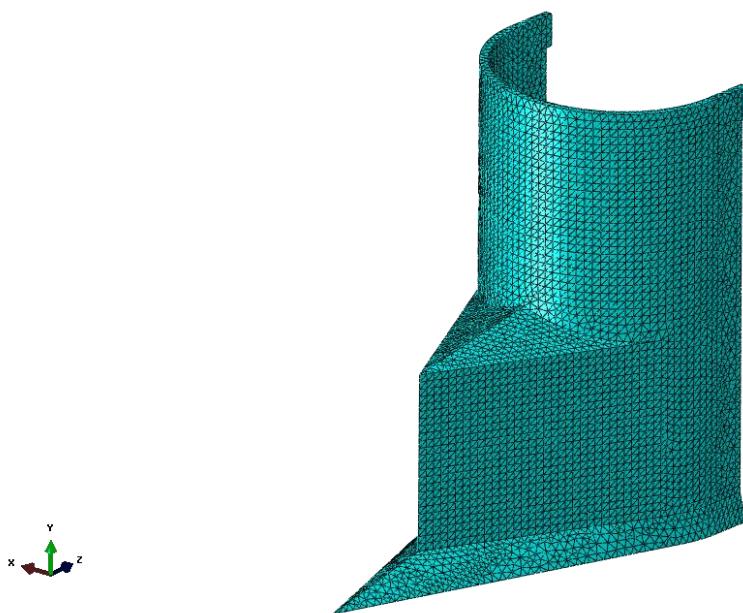


Figura 37. Mallado con tetraedros de tajamares

4.6. Costes computacionales

Finalmente el modelo queda definido por una serie de elementos y nodos que se calcularán a través de un trabajo (*job*) que proporciona el módulo de cálculo de Abaqus AE. Para ello se especificará un porcentaje de memoria física del programa así como si se precisa paralelización de cpus para el cálculo.

- Mallado sin pilas
 - Número de nodos: 1.172.112
 - Número de elementos: 938.982
- Mallado con pilas
 - Número de nodos: 1.363.738
 - Número de elementos: 1.100.118

Estos cálculos son de difícil consecución en un equipo convencional pero gracias al acceso proporcionado al clúster de cálculo HERMES del I3A de la Universidad de Zaragoza se han podido evaluar.

Los requisitos físicos solicitados fueron los siguientes:

- Cálculo estático
 - 32 CPUS
 - 60.000 GB de RAM
 - Horas de cálculo:
 - Inicio: Día 25 de Julio a las 4:11:40 PM
 - Fin: Día 26 de Julio a las 11:34:58 PM
 - Tiempo transcurrido: 31 h 23 min 18 s
 - Tamaño de datos:
 - Archivo CAE 70.168 KB
 - Archivo INP 128.912 KB
 - Archivo ODB 10.434.893 KB

- Cálculo de frecuencias naturales
 - 8 CPUS
 - 30.000 GB de RAM
 - Horas de cálculo (sin pilas):
 - Inicio: Día 25 de Julio a las 8:11:00 AM
 - Fin: Día 26 de Julio a las 12:27:09 AM
 - Tiempo transcurrido: 28 h 16 min 9 s
 - Tamaño de la base de datos (sin pilas):
 - Archivo CAE 71.956 KB
 - Archivo INP 126.832 KB
 - Archivo ODB 6.337.567 KB
 - Horas de cálculo (con pilas):
 - Inicio: Día 29 de Julio a las 5:01:01 PM
 - Fin: Día 29 de Julio a las 9:38:50 PM
 - Tiempo transcurrido: 4 h 37 min 49 s
 - Tamaño de la base de datos (con pilas):
 - Archivo CAE 68.676 KB
 - Archivo INP 146.154 KB
 - Archivo ODB 1.986.164 KB

5. Estudio Estructural: Análisis de Resultados

El análisis tensional de la estructura se realiza según las hipótesis de carga definidas en la normativa desarrollada en el Anexo B. Cargas optándose por buscar los puntos de máxima tensión principal y los de mínima tensión principal para comprobar, a posteriori, según el Criterio de Rankine o de las Tensiones Máximas Principales, y el posible fallo del material.

Esta elección de criterio se debe a las propiedades físicas de la piedra: es un material que presenta unas tensiones de rotura muy diferentes a tracción y a compresión, pudiendo ser analizado de forma óptima por este criterio que analiza dos posibilidades:

- Comprueba si la tensión máxima principal es inferior a la tensión obtenida en el ensayo de tracción
- Comprueba si la tensión principal mínima es mayor que la obtenida del ensayo de compresión

$$\begin{aligned}\sigma_1 &< S_{adm_tracción} \\ \sigma_3 &> -S_{adm_compresión}\end{aligned}$$

- σ_1 es la tensión principal máxima
- σ_3 es la tensión principal mínima
- $S_{adm_tracción}$ es la tensión de tracción admisible del material obtenida del ensayo de tracción
- $S_{adm_compresión}$ es la tensión de compresión admisible del material obtenida del ensayo de compresión

Si se cumplen ambas condiciones el material se encuentra en un estado tensional resistente (área roja de la Figura 38) y no se producirá fallo.

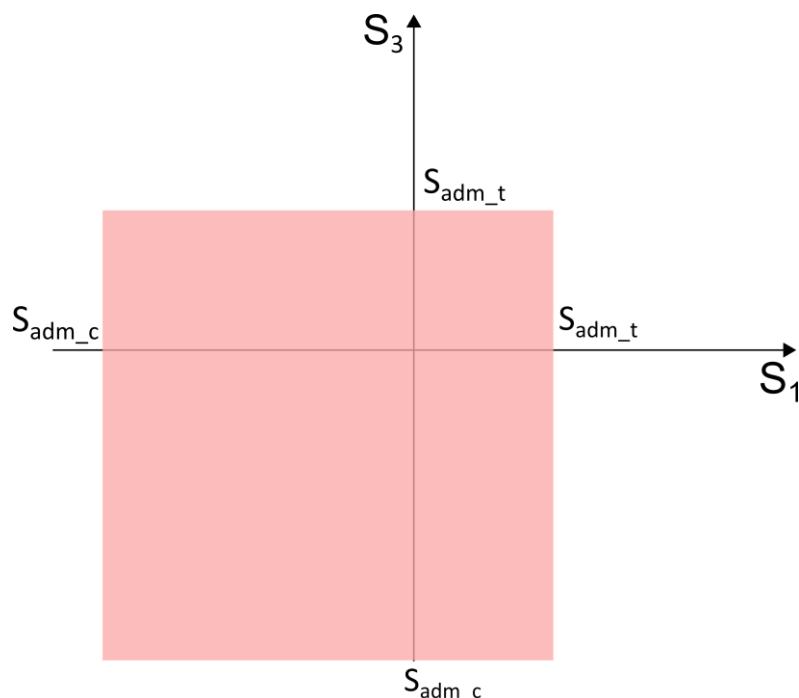


Figura 38. Criterio gráfico de Rankine o de tensiones máximas principales

Tras encontrar para cada hipótesis los valores máximos de tensión máxima principal y tensión mínima principal se buscan sus correspondientes concomitantes para analizar el estado tensional de cada punto.

Las hipótesis de cargas se han combinado y escalado con su correspondiente coeficiente mayorador o minorador directamente en el post-proceso de Abaqus CAE, mediante la suma del tensor de tensión y el vector de desplazamiento de cada combinación de cargas localizada en su correspondiente step de cálculo.

5.1. Comprobación de resistencia estructural

Se analiza estructuralmente la piedra puesto que el esqueleto resistente del puente, que es el objeto de estudio del proyecto, está formado únicamente por ella y, se entiende que, el fallo del hormigón, harto improbable puesto que fue diseñado hace apenas 20 años, o de la grava cemento no supone perjuicio para el estado resistente del puente.

En la Tabla 5-1 se presentan los límites de resistencia del material.

Tabla 5-1. Propiedades resistentes de la piedra

PIEDRA			
	kp/cm ²	N/m ²	MPa
Resistencia Compresión	120.000	11772000.000	11.772
Resistencia Tracción (Huerta)	50.968	5000000.000	5.000
Resistencia Tracción (Huerta)	5.097	500000.000	0.500

En la Tabla 5-2 se muestra para el Interior de Piedra las parejas tensionales que se analizan:

- Tensión máxima principal (máxima) – Tensión mínima principal concomitante
- Tensión máxima principal (mínima) – Tensión mínima principal concomitante
- Tensión mínima principal (máxima) – Tensión máxima principal concomitante
- Tensión mínima principal (mínima) – Tensión máxima principal concomitante

Así se comprueba estructuralmente, para todas las hipótesis de carga, el rango comprendido entre la máxima y la mínima tensión máxima principal y sus tensiones mínimas concomitantes y viceversa. Las cuatro primeras hipótesis de la tabla corresponden a las tensiones máximas del

punte completo y las cuatro siguientes corresponden a las hipótesis realizadas para los autobuses que, aunque no son las máximas, son objeto del estudio realizado.

Tabla 5-2. Parejas de tensiones principales máximas. Interior de piedra

INTERIOR PIEDRA		
HIPÓTESIS	Max Ppal (MPa)	Min Ppal (MPa)
H-5 (Nodo 21)	1.327	0.025
H-5 (Nodo 68978)	-1.210	-4.500
H-5 (Nodo 15)	0.223	-7.325
Arco 8 Hipótesis 2 - arc4 (Nodo 75103)	0.061	-0.019
H-21 (Nodo 24138)	0.461	-0.460
H-21 (Nodo 68978)	-0.700	-2.550
H-18 (Nodo 83025)	0.115	-0.005
H-18 (Nodo 15)	0.115	-4.194

Las hipótesis involucradas corresponden a:

- Hipótesis 5 del ELU Resistente con comprobación única de viento máximo, avenida máxima y peso propio.
- Hipótesis Arco 8 Hipótesis 2 – arc 4 del ELU Resistente con carro de cargas del grupo de tráfico 1 en el arco 8 y carro de cargas del grupo 2 en el arco 4.
- Hipótesis 18 de las Hipótesis Lógicas de Servicio con autobús cargado en el arco 3 y vehículo pesado de dos ejes según normativa en arcos anterior y posterior.
- Hipótesis 21 de las Hipótesis Lógicas de Servicio con autobús cargado en el arco 6 y vehículo pesado de dos ejes según normativa en arcos anterior y posterior.

En las figuras Figura 39 y Figura 40 se pueden observar las distribuciones de tensiones máximas principales y mínimas principales, respectivamente, de la hipótesis de carga 1. Como todas las hipótesis presentan unas distribuciones de tensiones similares, y cambian únicamente en los valores numéricos de tensión, se considerarán como representativas de las zonas de tensión positiva y tensión negativa evitando de ese modo un flujo excesivo de información que no aportaría un conocimiento concreto.

Estudio Del Estado Actual del Puente de Piedra de Zaragoza: Simulación por Elementos Finitos

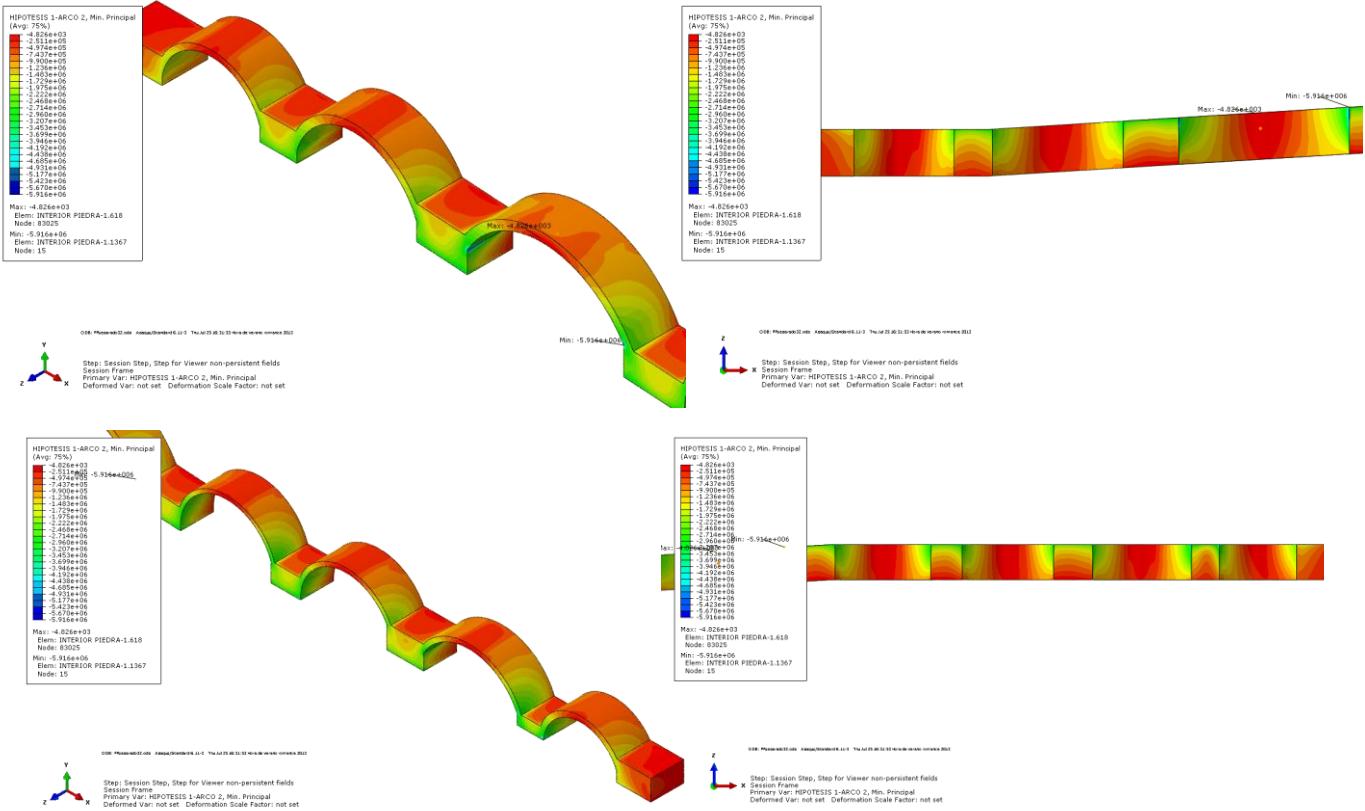


Figura 39. Tensiones mínimas principales Hipótesis 1. Interior Piedra. (Superior: Arcos 2,3 y 4; Inferior: Arcos 5, 6, 7 y 8) (Anexo F. Análisis de Resultados)

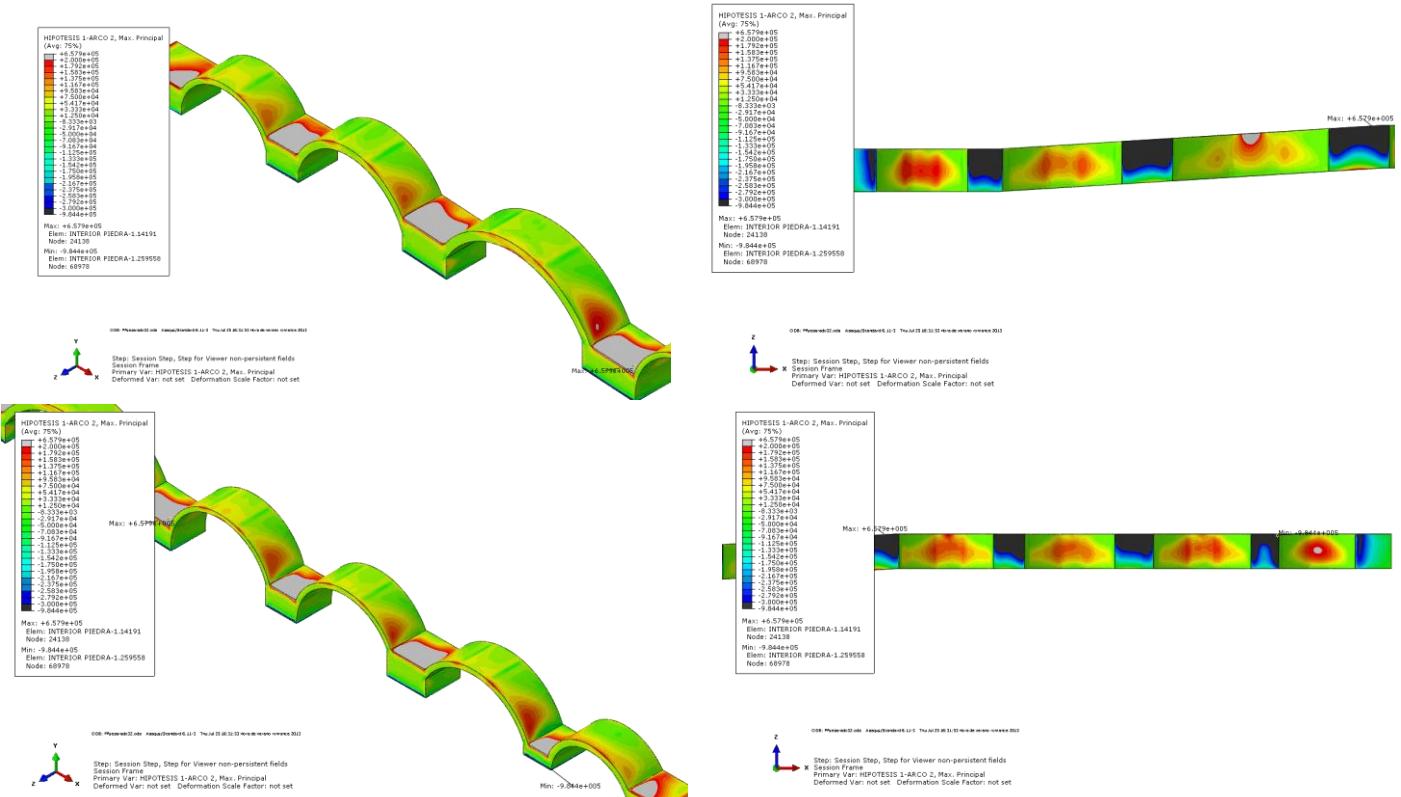


Figura 40. Tensiones máximas principales Hipótesis 1. Interior Piedra. (Superior: Arcos 2,3 y 4; Inferior: Arcos 5, 6, 7 y 8) (Anexo F. Análisis de Resultados)

En la Tabla 5-3 se analizan las mismas parejas de puntos para la parte correspondiente a la Pared de Piedra.

Tabla 5-3. Parejas de tensiones principales máximas. Paredes de piedra

PAREDES DE PIEDRA

HIPÓTESIS	Max Ppal (MPa)	Min Ppal (MPa)
H-5 (Nodo 497)	4.113	0.191
H-5 (Nodo 229)	-0.946	-6.300
H-5 (Nodo 105532)	1.141	0.312
H-5 (Nodo 226)	-0.838	-7.523
H-22 (Nodo 497)	2.411	0.129
H-22 (Nodo 229)	-0.535	-3.600
H-22 (Nodo 10324)	1.298	0.137
H-22 (Nodo 226)	-0.440	-4.231

Las hipótesis involucradas corresponden a:

- Hipótesis 5 del ELU Resistente con comprobación única de viento máximo, avenida máxima y peso propio.
- Hipótesis 22 de las Hipótesis Lógicas de Servicio con autobús cargado en el arco 7 y vehículo pesado de dos ejes según normativa en arcos anterior y posterior.

En las figuras Figura 41 y en la Figura 42 se observan las tensiones máximas principales y mínimas principales representativas de las paredes de piedra para la hipótesis 1 (el razonamiento es análogo al de las tensiones del interior de piedra).

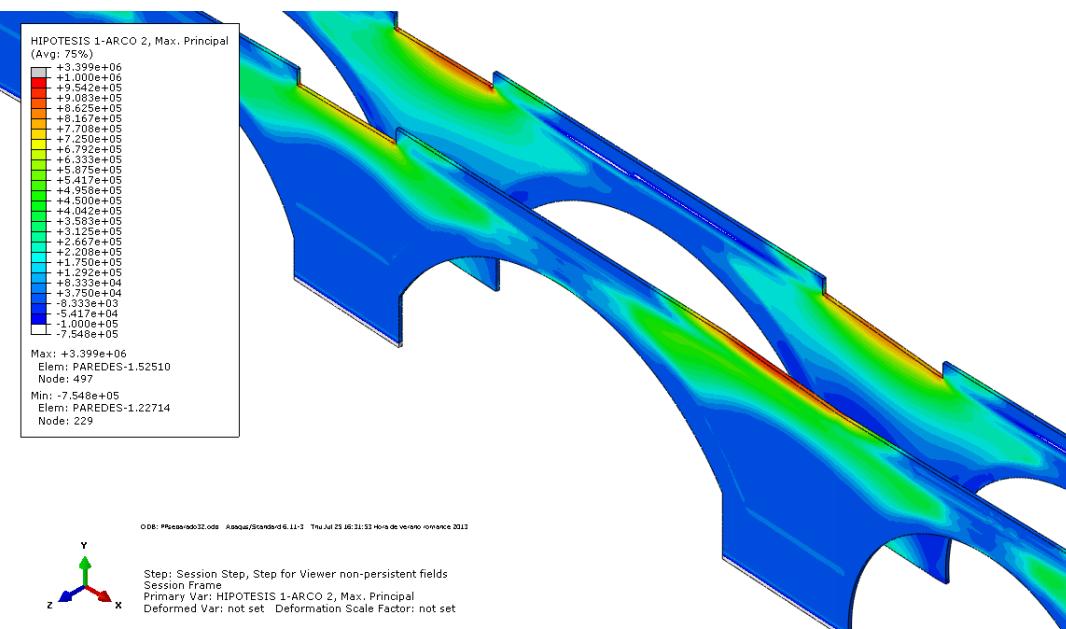


Figura 41. Hipótesis 1. Tensiones máximas principales. Paredes de piedra.

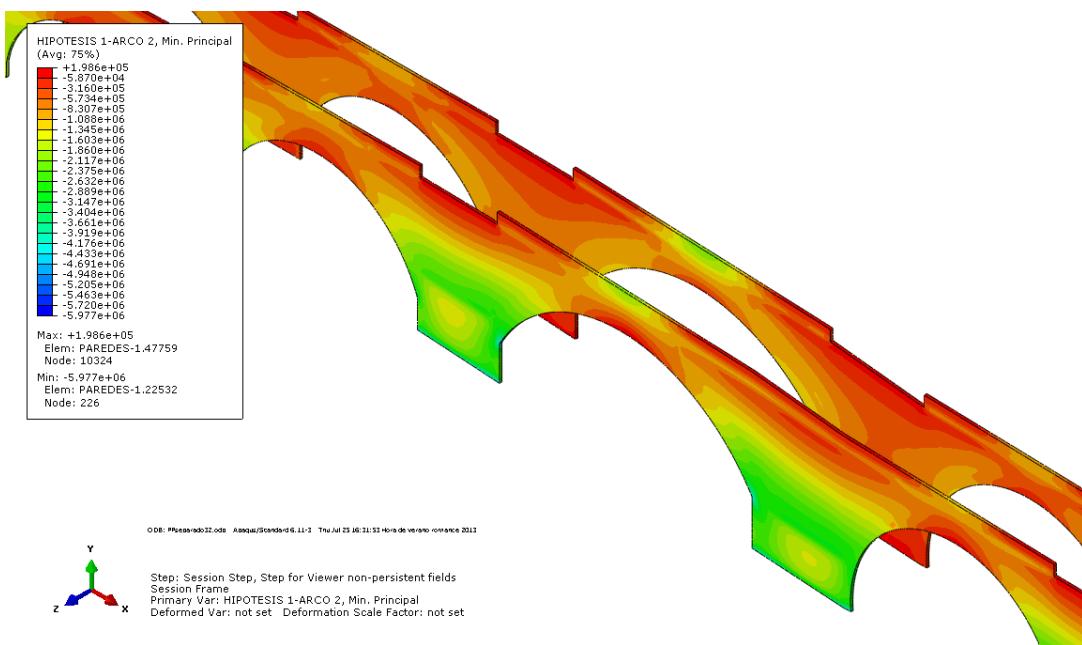


Figura 42. Hipótesis 1. Tensiones Mínimas Principales. Paredes de piedra

Aplicando el criterio de Rankine, según las propiedades definidas en la Tabla 5-1, para comprobar las parejas de tensiones definidas anteriormente en el Interior de Piedra y en la Pared de Piedra se obtienen los resultados reflejados en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4. Criterio de Rankine. Interior Piedra

INTERIOR PIEDRA				
HIPÓTESIS	Rankine (Tracción)	CS	Rankine (Compresión)	CS
H-5 (Nodo 21)	Fallo	0.887	Resiste	Positiva
H-5 (Nodo 68978)	Resiste	Negativa	Resiste	2.616
H-5 (Nodo 15)	Resiste	5.274	Resiste	1.607
Arco 8 Hipótesis 2 - arc4 (Nodo 75103)	Resiste	19.226	Resiste	611.532
H-21 (Nodo 24138)	Resiste	2.556	Resiste	25.619
H-21 (Nodo 68978)	Resiste	Negativa	Resiste	4.616
H-18 (Nodo 83025)	Resiste	10.237	Resiste	2495.125
H-18 (Nodo 15)	Resiste	10.228	Resiste	2.807

Es interesante conocer dónde se sitúan los puntos de tensión máxima analizados. En la Figura 43 se pueden observar marcados los puntos de máxima tensión que se han analizado para el interior de piedra:

- Pila 4 base (Nodo 21)
- Pila 7 base (Nodo 68978)
- Pila 4 cabeza (Nodo 24138)
- Arco 4 Arranque (Nodo 15)

- Arco 4 Clave (Nodo 83025)
- Arco 5 Clave (Nodo 75103)

Como comentario adicional, aunque los puntos de mayor tensión del puente coinciden con las bases de las pilas, se observa que el arco que está sometido a mayor tensión no es el de mayor luz (arco 4), con una tensión media de 2.4 MPa según criterio de Von Mises, si no el contiguo (arco 5), con una tensión media de 4.5 MPa según criterio de Von Mises (para la hipótesis 1).

Tabla 5-5. Criterio de Rankine. Paredes de piedra

PAREDES DE PIEDRA				
HIPÓTESIS	Rankine (Tracción)	CS	Rankine (Compresión)	CS
H-5 (Nodo 497)	Fallo	0.286	Resiste	(Positiva)
H-5 (Nodo 229)	Resiste	(Negativa)	Resiste	1.869
H-5 (Nodo 105532)	Resiste	1.032	Resiste	(Positiva)
H-5 (Nodo 226)	Resiste	(Negativa)	Resiste	1.565
H-22 (Nodo 497)	Fallo	0.488	Resiste	(Positiva)
H-22 (Nodo 229)	Resiste	(Negativa)	Resiste	3.270
H-22 (Nodo 10324)	Fallo	0.907	Resiste	(Positiva)
H-22 (Nodo 226)	Resiste	(Negativa)	Resiste	2.782

Es interesante conocer dónde se sitúan los puntos de tensión máxima analizados para las paredes (azul en la Figura 43):

- Empotramiento Norte (Nodos 497,10324)
- Pila 7 base (Nodos 229,226)
- Pared superior pila 6 (Nodos 105532)

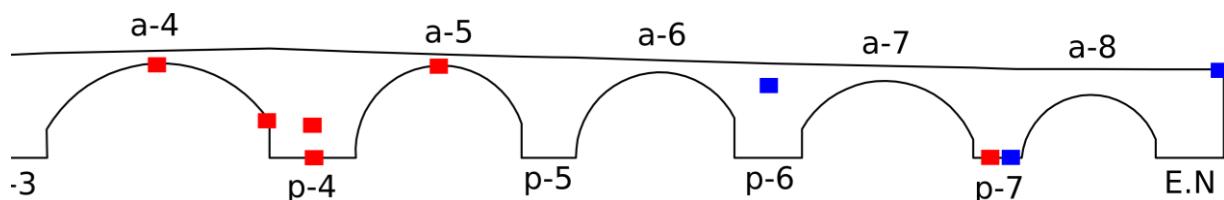


Figura 43. Localización de los puntos analizados para las máximas tensiones

En la Figura 43 únicamente se localizan los nodos en los que la tensión es máxima para cada hipótesis (rojo para el interior de piedra y azul para las paredes de piedra), y para los que se ha realizado un análisis cuantitativo por el Criterio de Rankine. Sin embargo, para poder analizar correctamente si se produce fallo por tracción o, por el contrario, es un efecto local hay que analizar a nivel de elemento qué zonas superarán la tensión límite de tracción del material. Si la zona de tracción copa únicamente parte de un elemento será un efecto local y, por tanto, no

será susceptible de producirse fallo y si la zona de tracción se extiende a varios elementos el fallo será a nivel de material.

Así pues, para las hipótesis en las que se produce fallo por tracción (Hipótesis 5 e Hipótesis 22), se analizan las zonas de tensión máxima principal positiva en las que se supera el límite de tracción de la piedra (1'172 MPa).

- Interior de piedra – Hipótesis 5

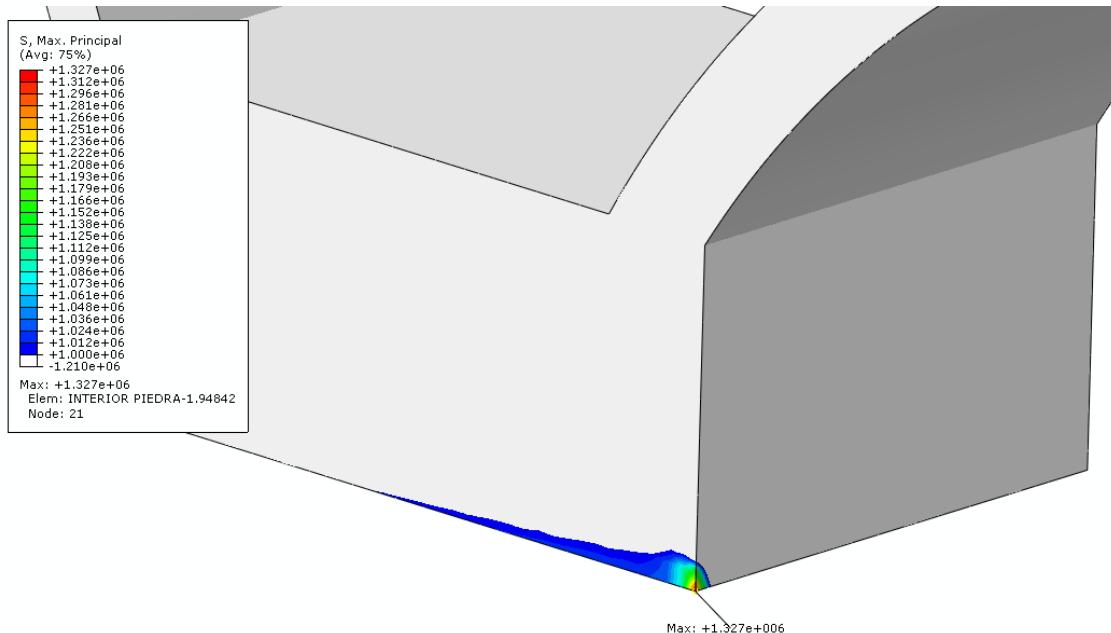


Figura 44. Distribución de tensiones máximas principales positivas mayores que 1 MPa para H5

En la Figura 44 se observan las distribuciones de tensiones máximas principales máximas que afectan a la pila 4 (correspondiente al arco de mayor luz) para un rango de tensiones comprendido entre el límite máximo del modelo y el mínimo establecido por nosotros de 1 MPa. Analizando para un límite mínimo de 1'172 MPa se obtiene que únicamente se producen tensiones positivas en el elemento al que pertenece el nodo 21 (el punto de máxima tensión para la comprobación estructural).

En la Figura 45 se aprecia que las tensiones máximas principales positivas no llegan a “cubrir” el elemento entero lo que significa que estamos ante un efecto local de tracción y no se podrá hablar de un fallo por tracción en el Interior de Piedra.

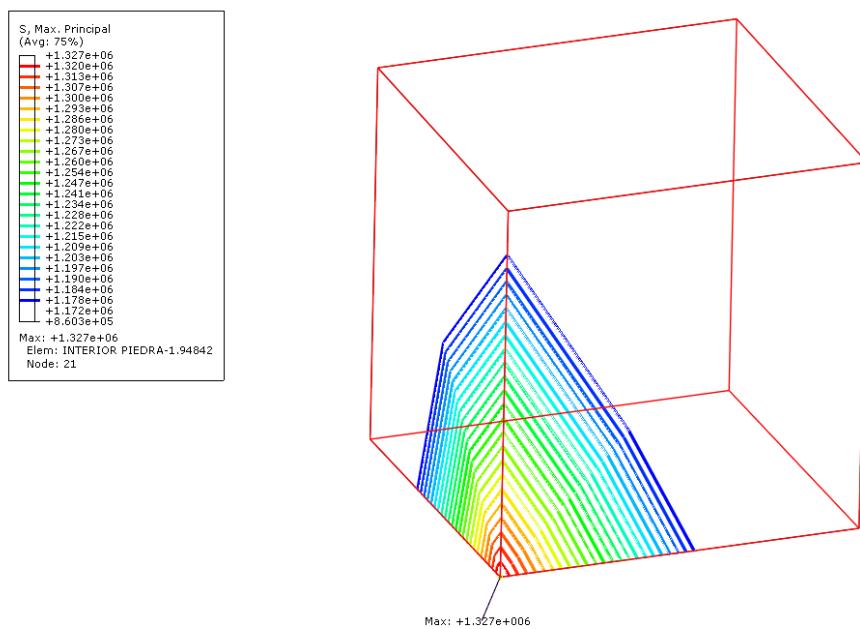


Figura 45. Distribución de tensiones máximas principales positivas para el nodo 21 (Elemento 94842)

- Paredes de Piedra – Hipótesis 5

Analizando el elemento al que corresponde el nodo de mayor tensión máxima principal (497) se observa que está completamente cargado con tensión de tracción (Figura 46) y, por tanto, no se estará hablando de un efecto a nivel local. Así pues se realiza un filtrado de las tensiones de tracción que superen del valor mínimo de 1'172 MPa para la hipótesis de carga 5, observándose que, en efecto, hay zonas completas sometidas a tracción. Es decir, no será un efecto localizado pudiéndose hablar de fallo del material por tracción (Figura 47).

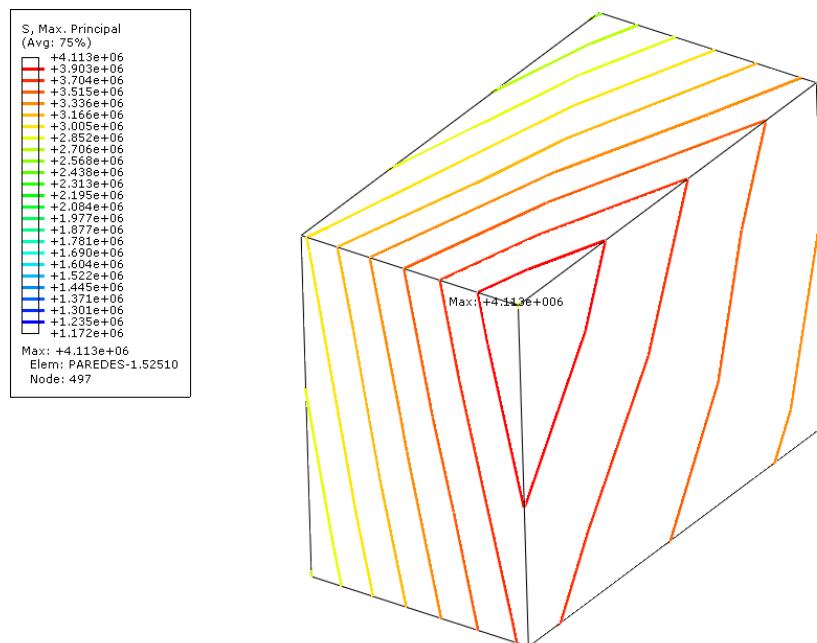


Figura 46. Distribución de tensión máxima principal positiva en el nodo 497 (Elemento 52510) para H5

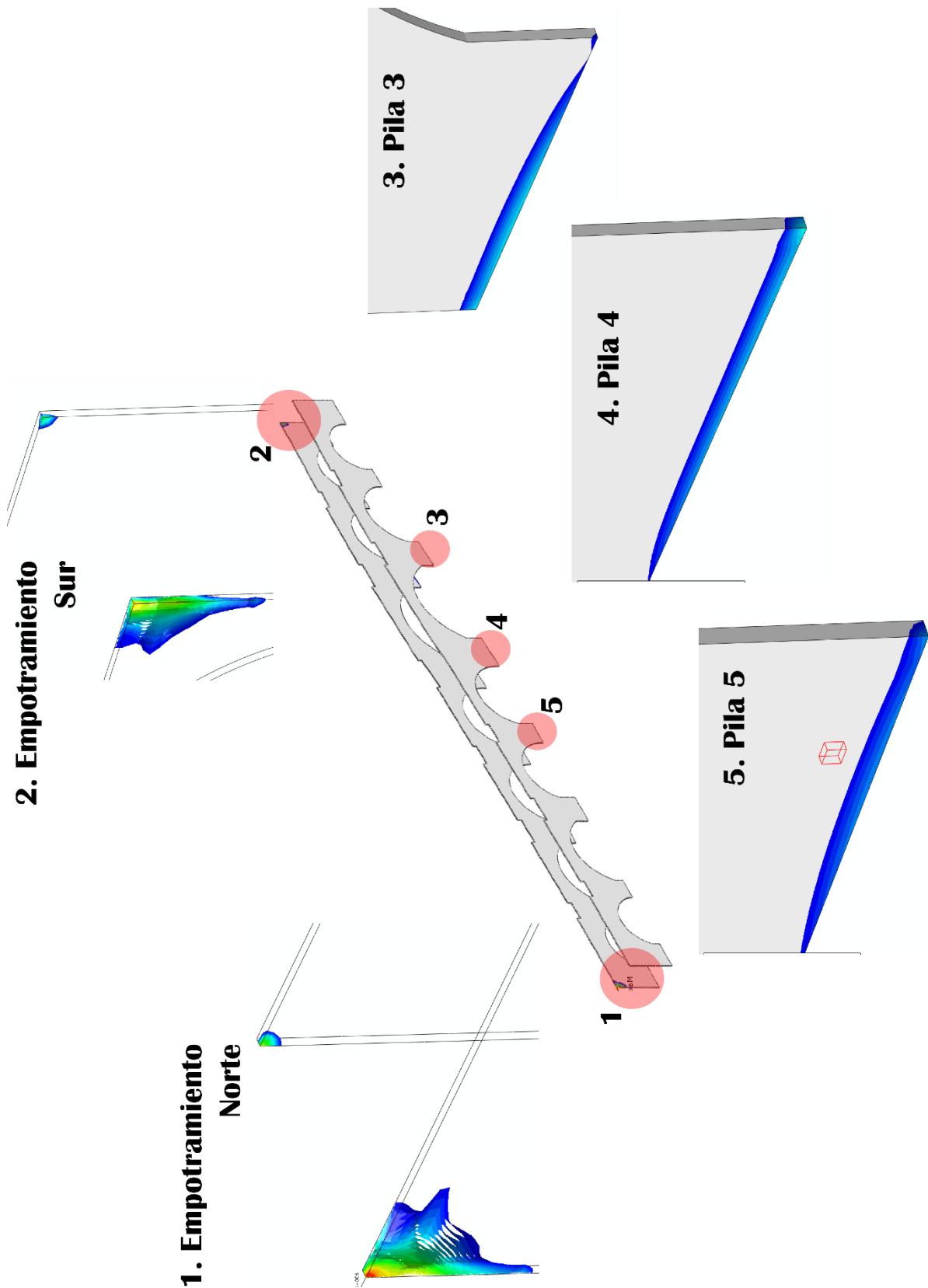


Figura 47. Localización de zonas de tensión máxima principal mayores que 1'172 MPa en las Paredes de Piedra

- Paredes de Piedra – Hipótesis 22

La hipótesis 22 tiene un comportamiento semejante a la hipótesis 5: tiene un comportamiento menos agresivo de las inclemencias climáticas (Viento y Agua) pero incluye el paso de autobuses.

Se analizan los elementos a los que pertenecen los nodos de mayor tensión en los que se realizaban las comprobaciones estructurales en 5.1 para discernir si es un efecto local. (Figura 48 y Figura 49)

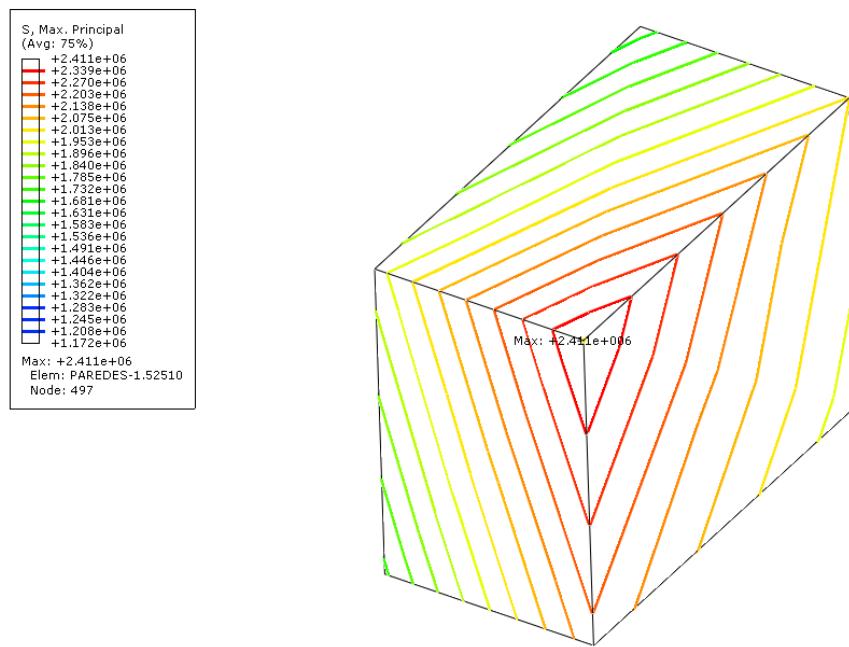


Figura 48. Distribución de tensiones máximas principales para el nodo 497 (Elemento 52510) para H22

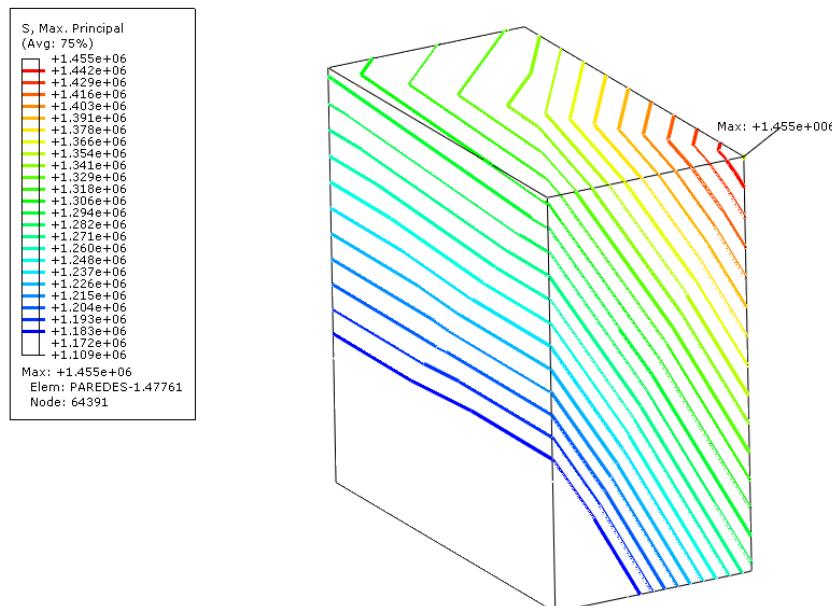


Figura 49. Distribución de tensiones máximas principales para el nodo 10324 (Elemento 47761) para H22

Esta comprobación para cada elemento sumada al filtrado de tensiones superiores a 1'172 MPa en el modelo (Figura 50 y Figura 51) arroja la conclusión de que no estamos ante un efecto localizado, si no ante una zona con tensiones máximas principales positivas y, por tanto, se considera fallo del material.

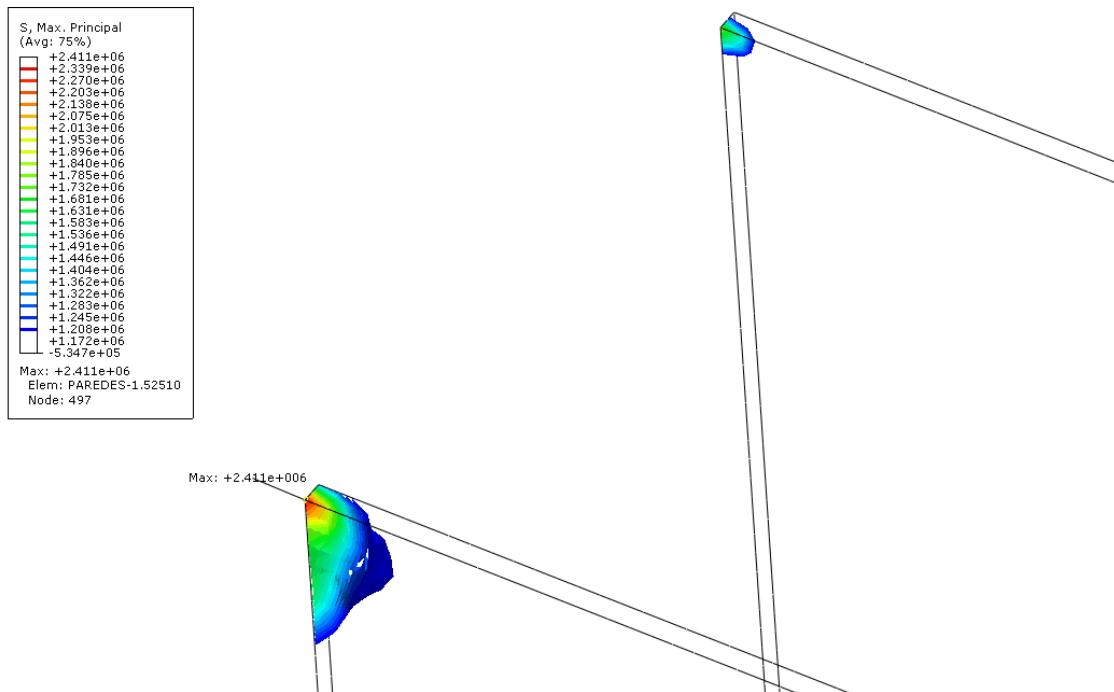


Figura 50. Distribución de tensiones máximas principales positivas en empotramiento norte para la H22 (Paredes de Piedra)

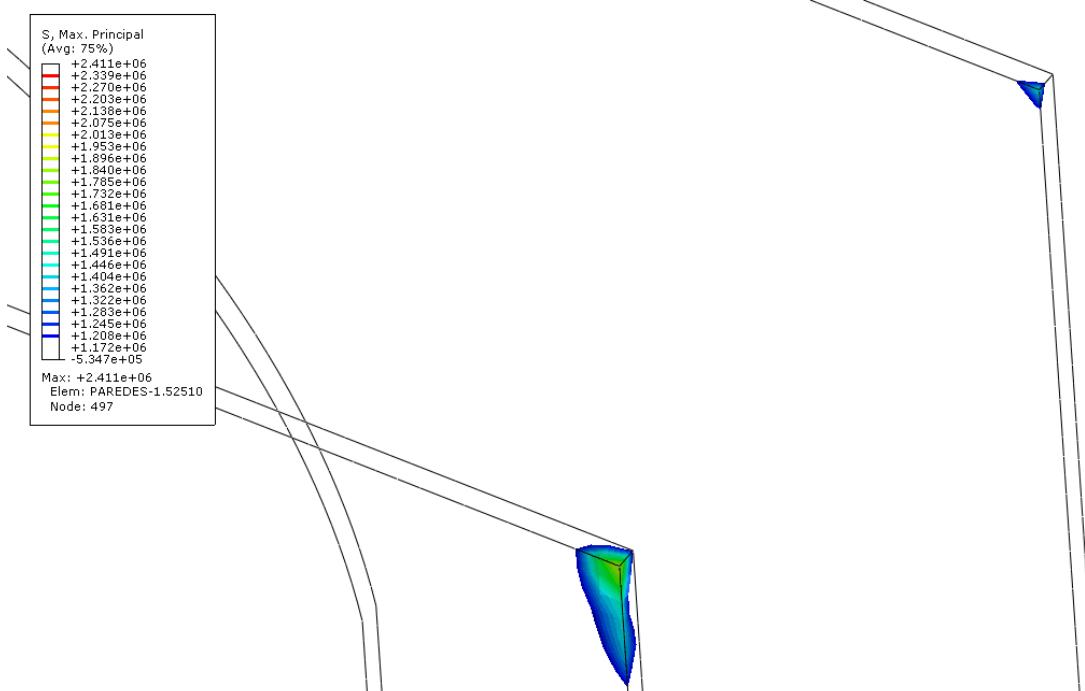


Figura 51. Distribución de tensiones máximas principales positivas en empotramiento sur para la H22 (Paredes de Piedra)

La comprobación estructural de la piedra se puede realizar de manera más directa, y clara, gracias al análisis gráfico del criterio de Rankine (Figura 52).

La resistencia a compresión se mantiene siempre fija en 11'72 MPa (Anexo A. Materiales). Sin embargo se observan tres áreas rectangulares punteadas que corresponden a unas resistencias de tracción variables de: 0'5 MPa, 1'172 MPa y 5 MPa respectivamente; esta variabilidad en el análisis existe debido a que no se conoce la resistencia a tracción de la piedra empleada en el puente. Así pues se emplean dos criterios:

- La resistencia a tracción es el 10% de la resistencia a compresión (1'172 MPa)
- La resistencia a tracción se obtiene de valores bibliográficos (5).

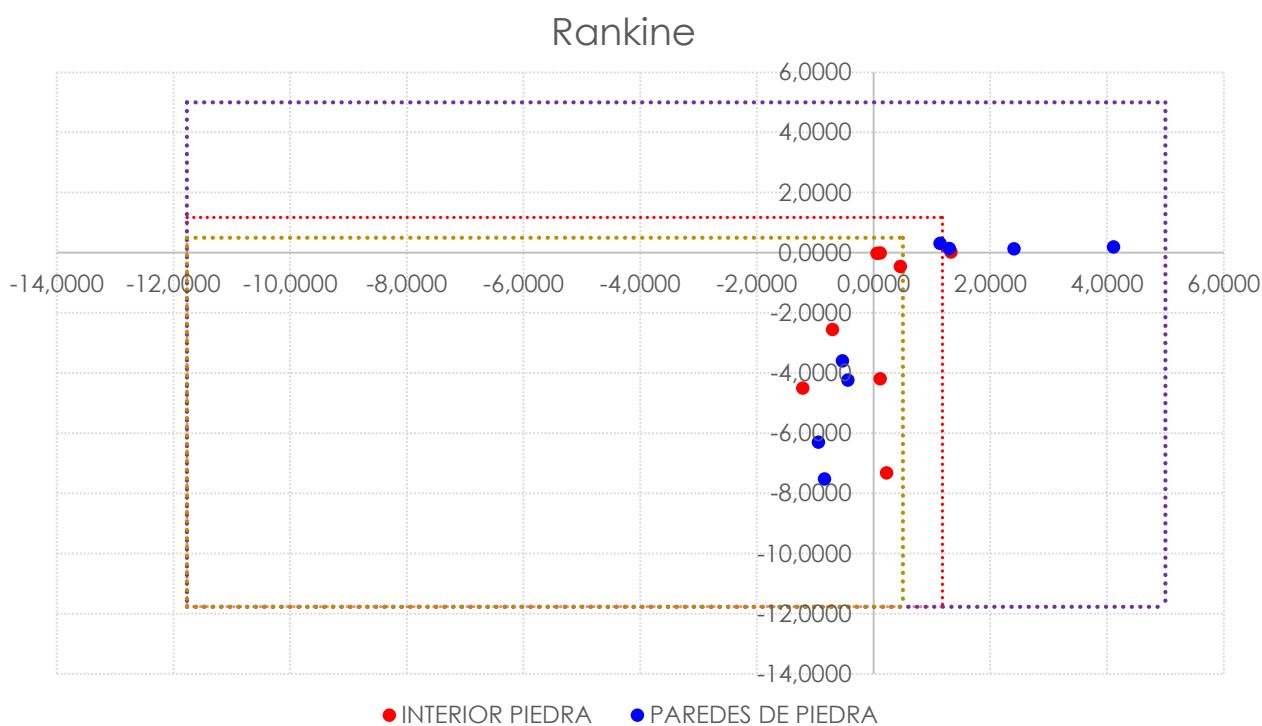


Figura 52. Análisis gráfico de tensiones mediante el Criterio de Rankine

Respecto al cálculo numérico realizado, se confirma que en el Interior de Piedra sólo se produce fallo por tracción en la base de la pila 4. En las Paredes de Piedra se producen fallos por tracción en el empotramiento norte, sur y estribos aguas arriba.

Como conclusión se puede decir, efectivamente, que el Puente de Piedra resiste a compresión hasta con un coeficiente de seguridad de 1'5 para cualquier hipótesis y la zona de fallo por tracción que aparece es un fallo local, que no repercutirá en el fallo del material. Sin embargo, sí que tiene zonas de fallo por tracción del material en las Paredes de Piedra: en los empotramientos y en las bases de las pilas que se sitúan a

favor de la corriente; aunque, como se comentará más adelante, se producirá antes un fallo por tracción en la junta que un fallo de la cohesión de la piedra por tracción.

Para completar el análisis estructural se realiza un cálculo del peso del puente a través de las reacciones verticales en las pilas, en el step de gravedad (peso propio), obteniéndose los valores de la Tabla 5-6.

Tabla 5-6. Pesos bajo cada pila

	RF2 (N)	RF2(kg)
Empotramiento Sur	3.61E+07	3,674,821.61
Pila 2	5.71E+07	5,818,144.75
Pila 3	8.52E+07	8,684,434.25
Pila 4	9.16E+07	9,332,313.97
Pila 5	6.22E+07	6,336,493.37
Pila 6	6.64E+07	6,764,322.12
Pila 7	5.91E+07	6,021,100.92
Empotramiento Norte	3.59E+07	3,664,424.06

Por lo que el peso total del puente será de aproximadamente 50.296.055'05 kg.

Por último es interesante señalar que, respecto a las mediciones de tensión realizadas en otros monumentos históricos Tabla 5-7, el rango de las tensiones obtenidas en el puente de piedra son del mismo orden de magnitud.

Tabla 5-7. Rango de tensiones de monumentos conocidos

RANGOS CONOCIDOS	MPa (N/mm ²)
Pilares de la cúpula de S. Genoveva en París	2.9
Pilares de la iglesia de Santa Sofía de Constantinopla	2.2
Pilares de la Catedral de Palma de Mallorca	2.2
Pilares de la cúpula de San Pedro en Roma	1.7
Puente de Morbegno (L=70 m)	7
Puente de Plauen (L=90 m)	6.9
Puente de Villeneuve (L=96 m)	5.7
Viaducto de Salcano en Göritz (L=85 m)	5.1
Puente sobre el Rocky River (L=85 m)	4.4
Puente de Luxemburgo (L=85 m)	4.8

Nota: en el Anexo F. Análisis de Resultados se realizan comprobaciones resistentes basadas en criterios antiguos.

5.2. Fisuración

También debe ser analizada la posibilidad de fisuración del modelo, ya que al ser continuo se obtienen tensiones positivas que, en el modelo discreto, se traducirían en grietas.

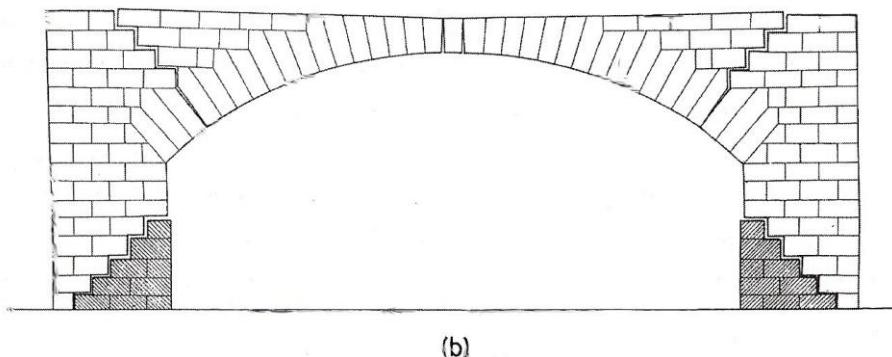


Figura 53. Zonas de fisuración más comunes en puentes de fábrica (5)

Todas las estructuras de fábrica, por sus características, son susceptibles de agrietarse casi inevitablemente. Los modos más clásicos de aparición de fisuras son los que se observan en la Figura 53, como ya conocían los maestros antiguos, fisuración bajo la clave y fisuración cerca de los riñones debido a la deformada del arco (Figura 9) y una fisuración en las bases de los estribos debido al momento de vuelco que induce el empuje horizontal del arco en su intento de apertura.

Si se atiende a las hipótesis de cálculo (6), la resistencia a tracción de las juntas de la piedra es prácticamente nula y, por tanto, cualquier esfuerzo de tracción en dirección perpendicular al plano de la junta entre dovelas generará una fisura.

Sin embargo, algunos autores (5) sostienen que, dependiendo del tipo de aparejo con el que se unan los sillares y la calidad del mortero aplicado, se pueden obtener unas resistencias a tracción de hasta 2 MPa (Guastavino, 1893 (5)). Por último, también se conoce que la resistencia típica de tracción de un mortero de cal usado habitualmente en los monumentos históricos está localizada entre 0.1 MPa y 1 MPa.

Para conocer la posibilidad de fisuración del modelo continuo calculado, se analizan, para cada combinación de cargas, las localizaciones de tensión positiva pudiéndose observar muy poca variabilidad entre las zonas de tracción de cada hipótesis. Esta es la razón por la que se puede ilustrar, aproximadamente, mediante las figuras Figura 54, Figura 55 y Figura 56, dónde podrían aparecer las grietas y fisuras.

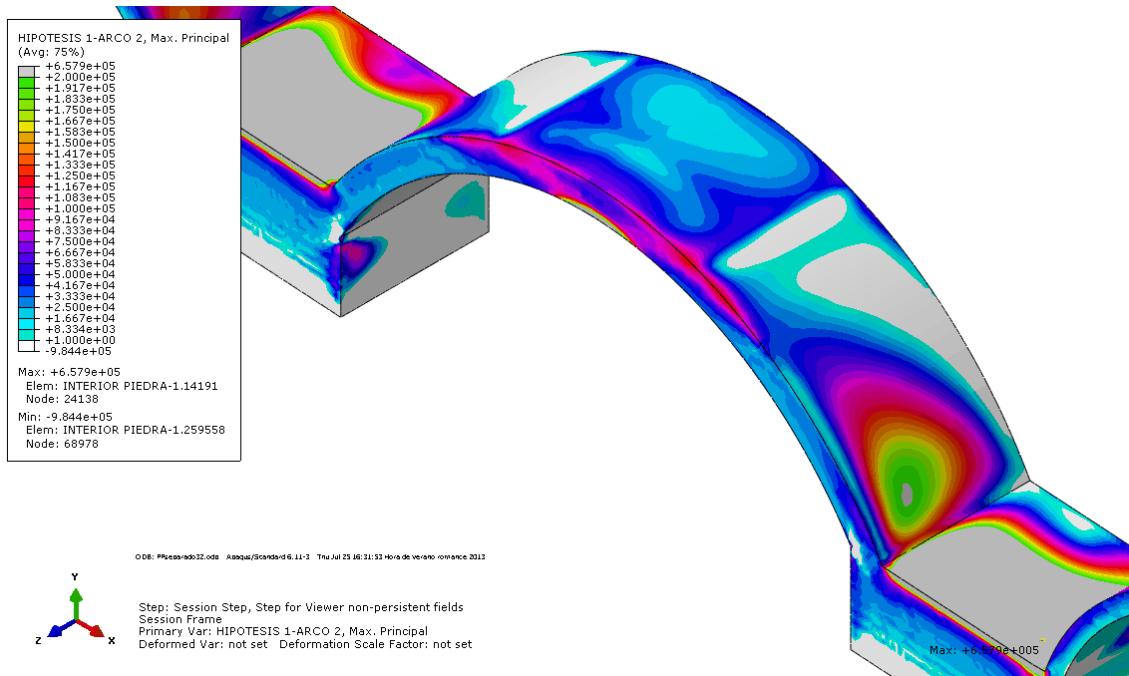


Figura 54. Zonas de posible fisuración del modelo (frontal). Hipótesis 1

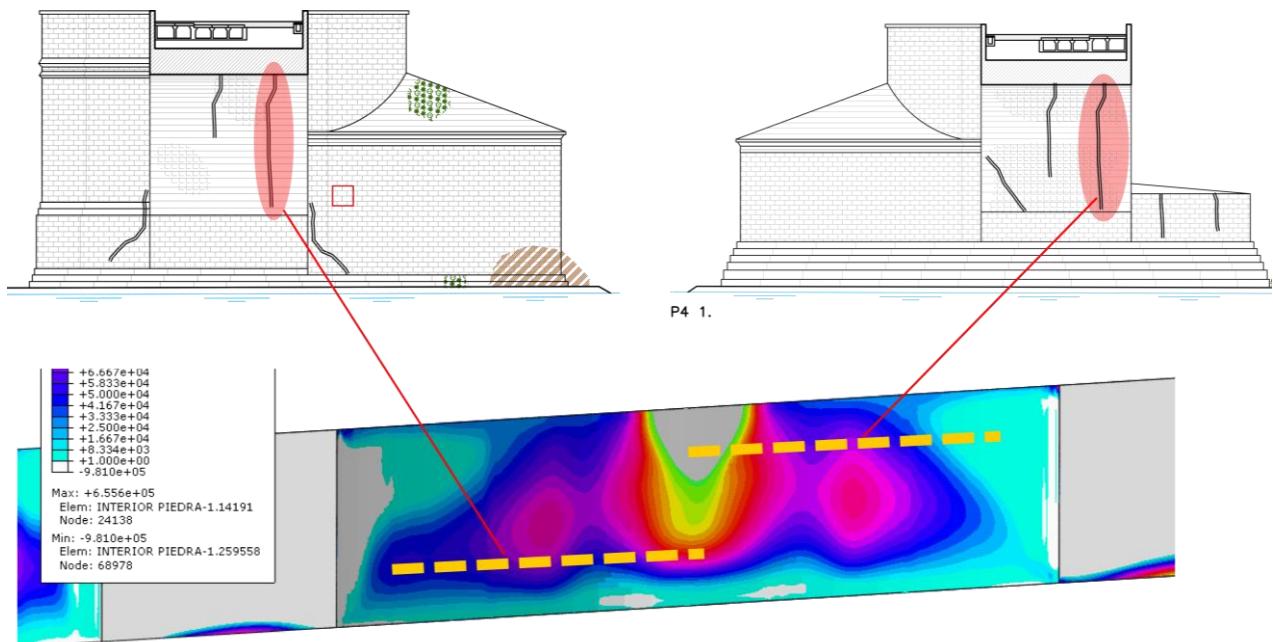


Figura 55. Comparativa de fisuración del modelo con la realidad. Arco 4 (inferior). Hipótesis 2-arc 4

En las figuras Figura 54 y Figura 55 se representan únicamente las zonas de tensiones máximas principales positivas, gama del verde al azul, del arco de mayor luz. Se observa que bajo la clave se generan las mayores tensiones de tracción que podrían generar grietas y fisuras en las juntas de los sillares.

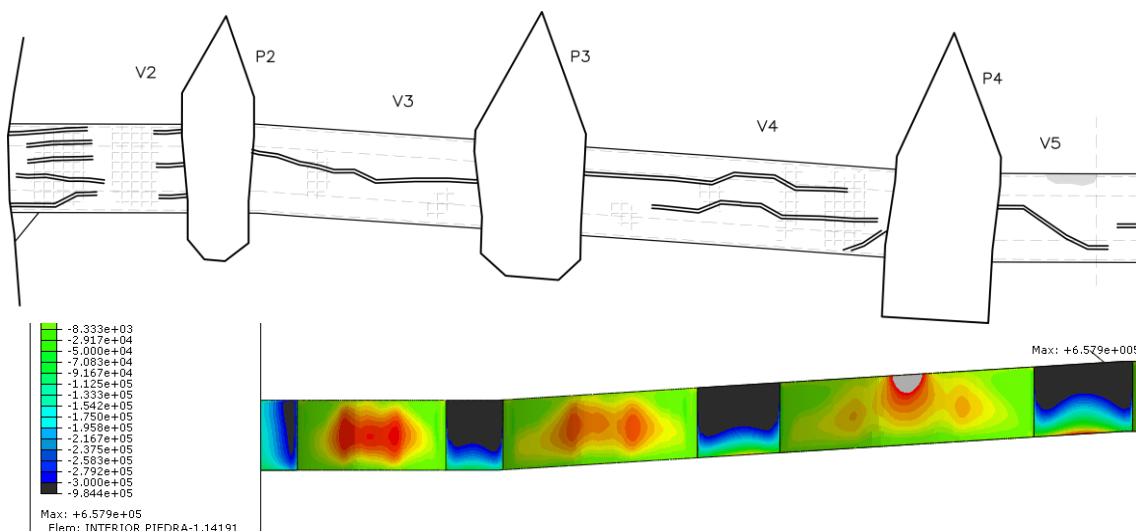


Figura 56. Localización de zonas de fisuración (rojo y amarillo) en la bóveda de piedra de los arcos 2, 3 y 4 (planta inferior)

En la Figura 56 se realiza una asociación entre las zonas de tensiones de tracción que aparecen en el modelo de elementos finitos (gama de rojo a amarillo) y las grietas que realmente existen recogidas en el informe de infraestructuras del Ayuntamiento de Zaragoza (18), apreciándose una clara correlación.

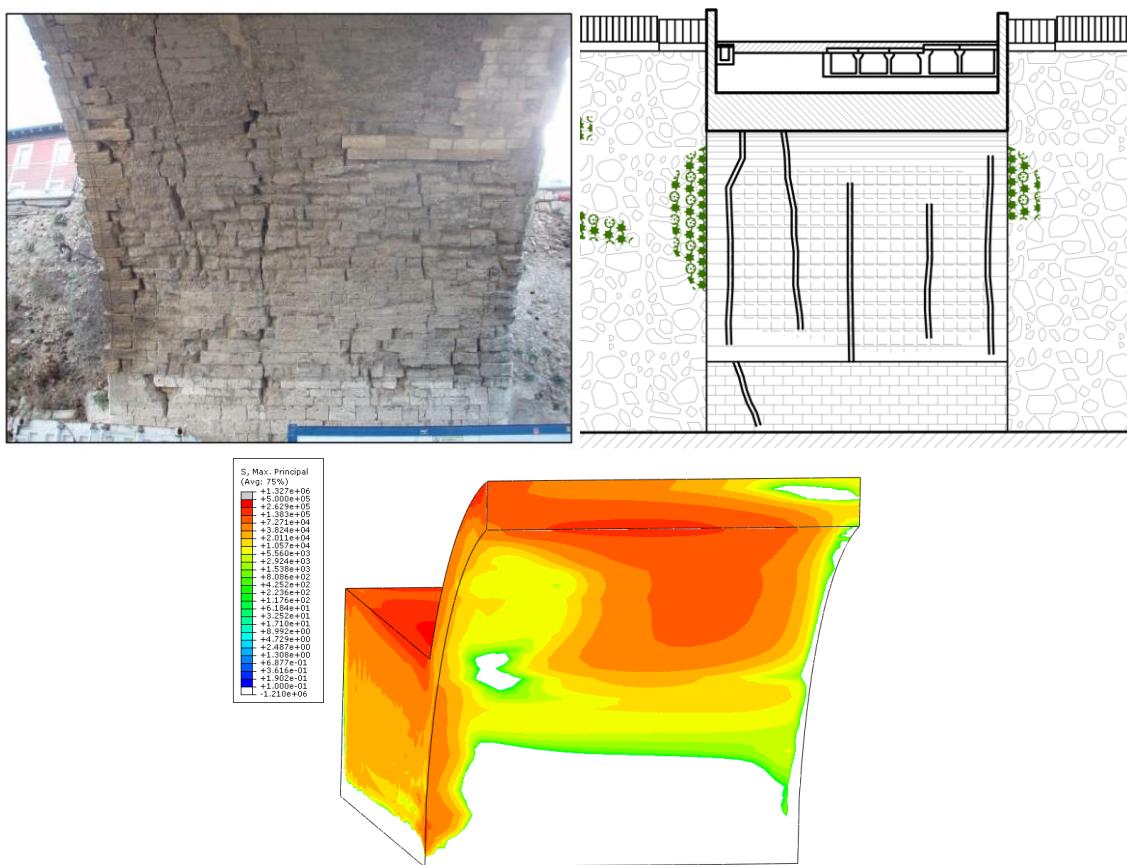


Figura 57. Comparativa de zonas de fisuración reales, correspondientes al informe de infraestructuras y modelo de elementos finitos del arco 2. (18)

En la Figura 57 se realiza una comparativa entre la distribución de tensiones máximas principales positivas calculada en el modelo de elementos finitos y el registro del estado actual de las grietas del arco 2 (18), apreciándose, en efecto, la presencia de grietas en las zonas esperadas según el modelo.

Se puede deducir que, cualitativamente, las zonas de fisuración y grietas reales de las que se tiene constancia hoy en día, coinciden de forma aproximada con las zonas de tensión máxima principal positiva calculadas en el modelo numérico.

Sin embargo, como se ha comentado al principio, las direcciones de las tensiones de tracción deben de ser normales al plano de la junta entre sillares o, por el contrario, no se producirá separación. Por ello se realiza un estudio de las direcciones de tracción que se producen en la sección media longitudinal de los arcos 2, 3 y 4 (Figura 58, Figura 59 y Figura 60).

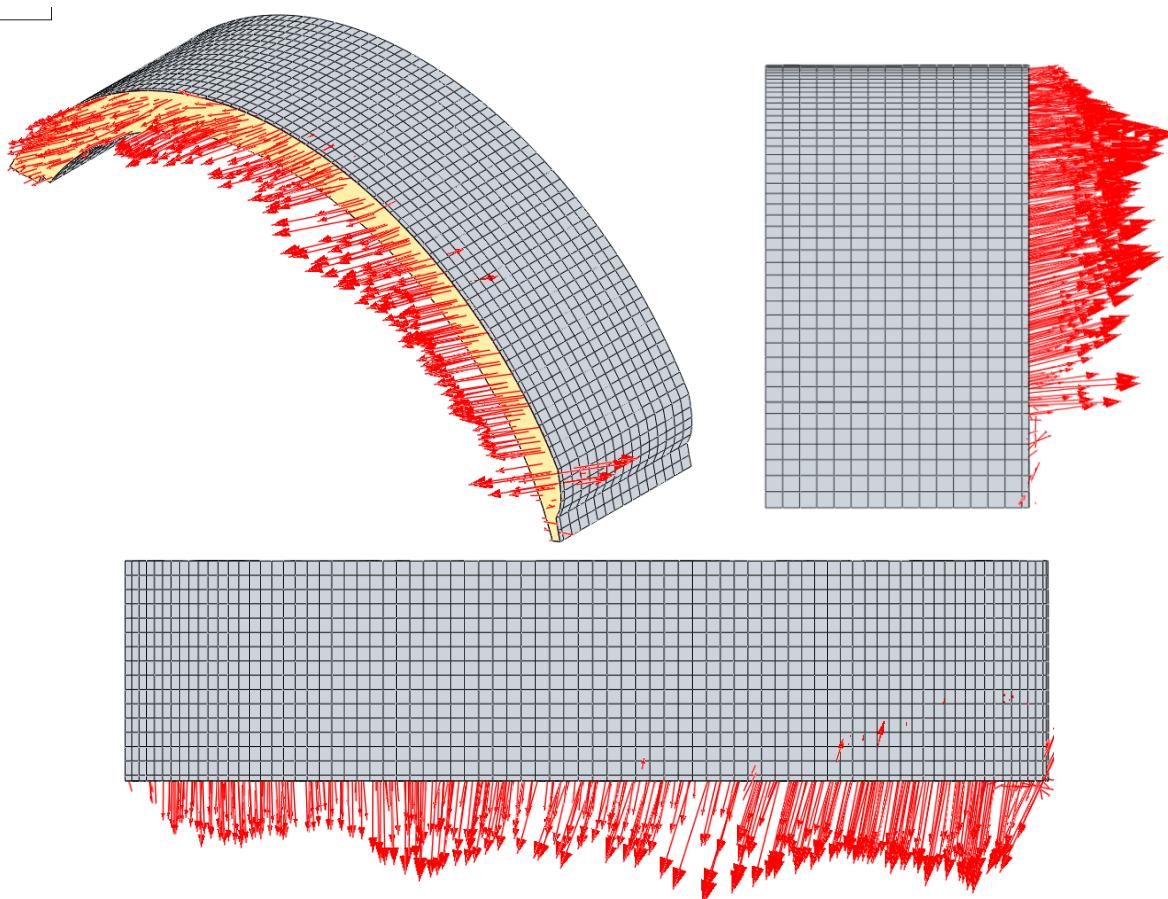


Figura 58. Dirección de tensiones principales máximas positivas en la sección longitudinal del arco 2.

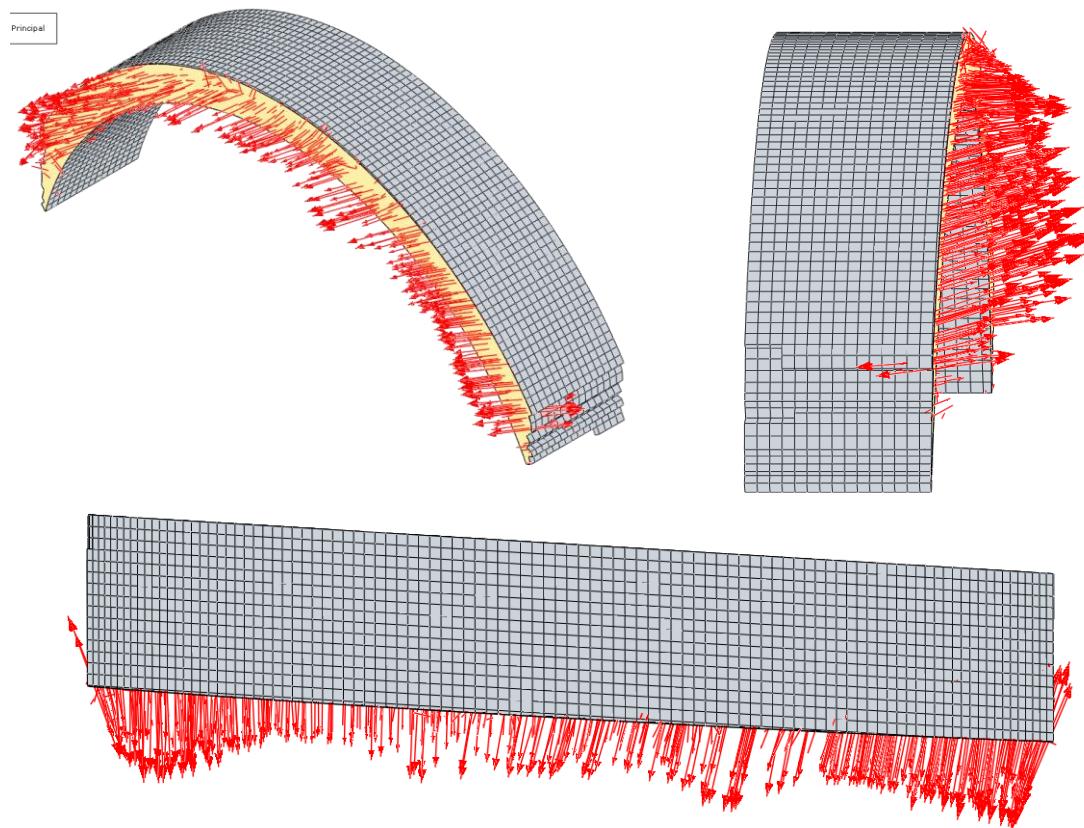


Figura 59. Dirección de tensiones principales máximas positivas en la sección longitudinal del arco 3.

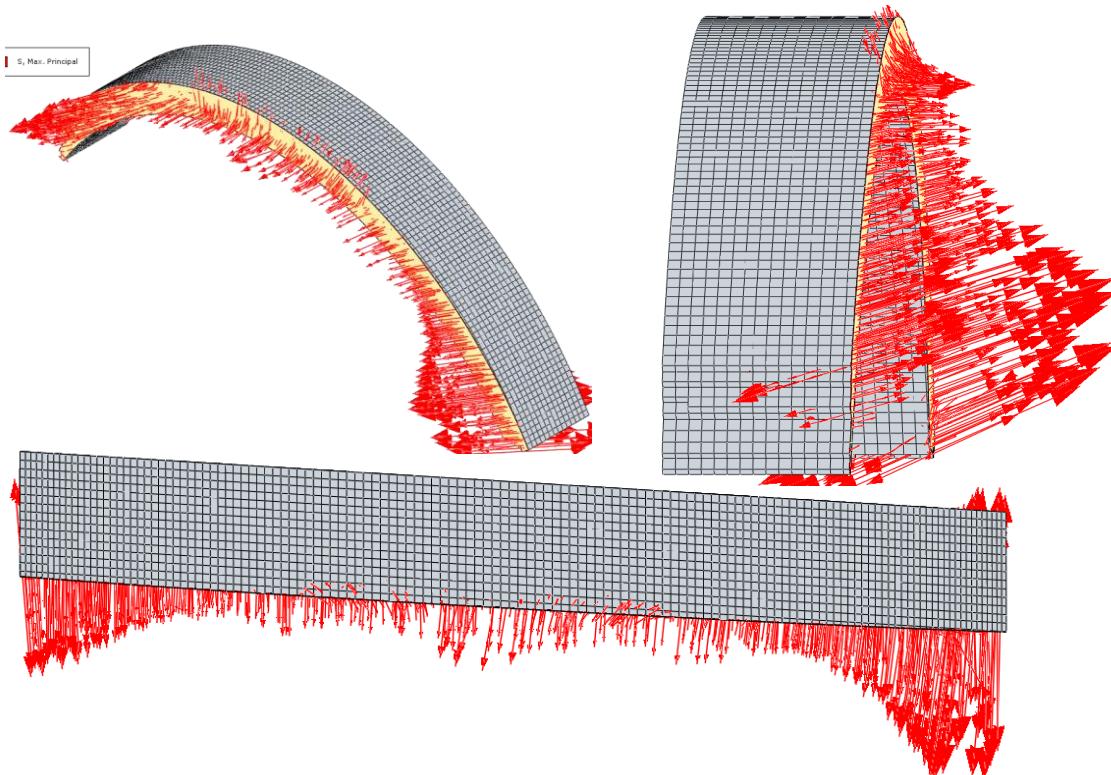


Figura 60. Dirección de tensiones principales máximas positivas en la sección longitudinal del arco 4.

Se observa que la dirección de las tensiones de tracción es perpendicular al plano de las juntas de las piedras y, por tanto, si consideramos la hipótesis de resistencia de la junta nula frente a esfuerzos de tracción, (5) y (6), se producirá fisura.

Sin embargo, éste es un comportamiento ideal y, como se ha comentado anteriormente, dependiendo del tipo de unión en la junta podría existir cierta resistencia a la separación. Así pues debe realizarse una reflexión cuantitativa de las tensiones máximas principales de tracción.

- Tensiones del modelo completo (interior y paredes de piedra)

Como se ha desarrollado en el apartado de cálculo 5.1, las máximas tensiones de tracción se localizan en el empotramiento norte (margen izquierda) y en las bases de las pilas 3, 4 y 5 aguas arriba, oscilando entre 1.3 MPa y 4 MPa. Para todas ellas se produce grieta en la junta si la capacidad para absorber tracciones es nula, o si el mortero de la junta tiene una resistencia entre 0.1 MPa y 1 MPa. Sin embargo, podría resistir en las bases de los estribos si el aparejo fuese lo suficientemente bueno como para asegurar 2 MPa de resistencia a tracción.

- Tensiones en las bóvedas de piedra por el paso de autobuses

Debido a que las bóvedas de piedra son los elementos estructurales que más polémica han suscitado por la supuesta, y reciente, aparición de grietas por el paso secundario de tráfico rodado, se han analizado los valores de tensiones máximas principales positivas bajo los arcos para las mismas hipótesis que se evalúan en la comprobación estructural, 5.1, obteniéndose los valores de la Tabla 5-8.

Tabla 5-8. Tensión máxima principal de tracción (máxima) bajo las bóvedas de piedra

	Arco 2 (MPa)	Arco 3 (MPa)	Arco 4 (MPa)	Arco 5 (MPa)	Arco 6 (MPa)	Arco 7 (MPa)	Arco 8 (MPa)
ARCO 8 - H2-arc4	0.183	0.160	0.205	0.171	0.154	0.179	0.213
H5	0.205	0.160	0.540	0.300	0.180	0.270	0.225
H18	0.180	0.160	0.230	0.155	0.145	0.165	0.195
H21	0.170	0.145	0.205	0.165	0.148	0.175	0.195
H22	0.175	0.150	0.210	0.158	0.166	0.175	0.220

Se observa que son valores muy bajos y para nada comparables a los obtenidos en los empotramientos y las bases de los estribos a favor de agua.

Por supuesto, si se sigue manteniendo el criterio de resistencia nula de la junta ante tracción, inevitablemente se producirán grietas y fisuras en las bóvedas de piedra por lo que, para realizar un análisis más detallado, se observa en la Tabla 5-9 que, para el mortero de cal de menor resistencia posible, se producirían fisuras en todas las bóvedas y, para el mortero de cal de mayor resistencia, no se producirían fisuras.

Tabla 5-9. Comprobación de resistencia a tracción

Máximo (MPa)	0.205	0.160	0.540	0.300	0.180	0.270	0.225
Mortero de cal (0.1 MPa)	Fallo						
C.S.	0.488	0.625	0.185	0.333	0.556	0.370	0.444
Mortero de cal (1 MPa)	Resiste						
C.S.	4.878	6.250	1.852	3.333	5.556	3.704	4.444

Será casi imposible, e inevitable, que no aparezcan grietas y fisuras y, además, sería un error asociar todas las grietas a un posible colapso de la estructura. Únicamente se puede asegurar que la tensión promedio bajo los arcos debido al paso de autobuses es de 0.154 MPa y que su tensión promedio máxima es de 0.218 MPa, los cuales son valores muy próximos a la resistencia mínima a tracción del mortero de cal y, por tanto, no deberían ser susceptibles de generar una grieta, su posterior propagación y por último el colapso de la estructura.

Se deduce, por tanto, que es muy difícil evaluar si se producirán o no grietas, ya que influyen muchos factores que no se pueden controlar y, además, se desconocen las resistencias a tracción reales de estos elementos (no existen ensayos que daten de la época). Lo que sí es un hecho inapelable es que las juntas, por ser el eslabón de menor resistencia de la cadena, fallarán a tracción antes que las piedras generándose las grietas en la interfaz de los sillares. Hay que matizar, no obstante, que la resistencia del mortero en el conjunto de la fábrica será mayor que el material en solitario y, cuanto más gruesa es la junta, más débil es la fábrica (5).

5.3. Comprobaciones de flecha máxima

La luz máxima admisible en pasarelas transitables por peatones, según normativa, se calcula como la longitud del vano dividido entre 1.200. En el Puente de Piedra el vano máximo de cálculo es de 32.6 m, siendo la limitación de flecha la determinada en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10. Comprobación de luces máximas

Comprobación de Luces Máximas		
Luz Máxima (m)	32.6	
Límite (m)	L/1200	2.717E-02
Desplazamientos Máximos		
U2 máx. (m)	Límite	CS
-2.656E-03	OK	10.228

Se observa que el desplazamiento máximo, que se da en la hipótesis 5, es del orden de milímetros, figuras Figura 61 y Figura 62, siendo admisibles hasta 2'7 centímetros según la normativa, por tanto se sitúa dentro del rango de confort.

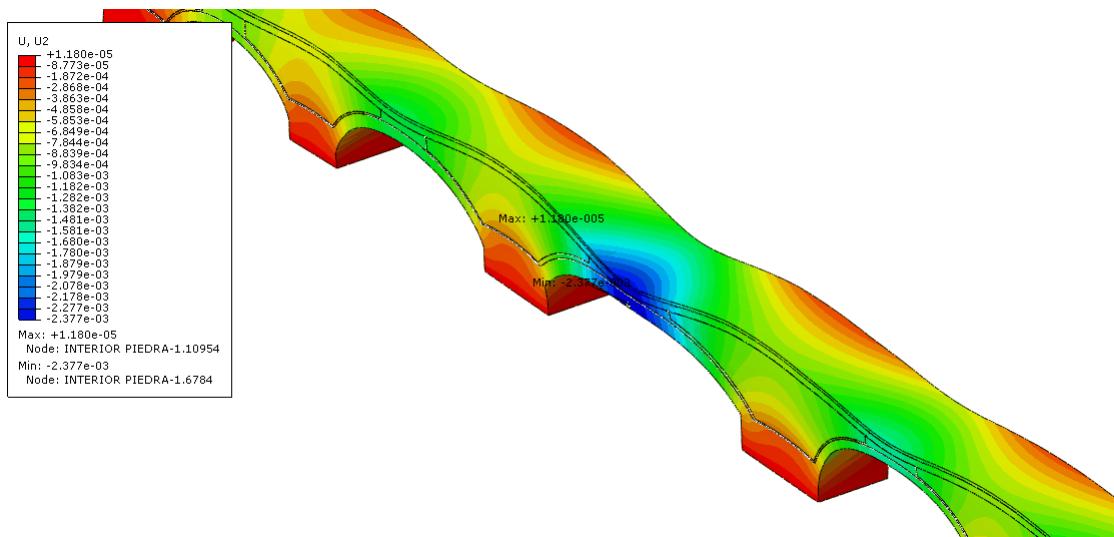


Figura 61. Desplazamiento Arco 4. Hipótesis 1.

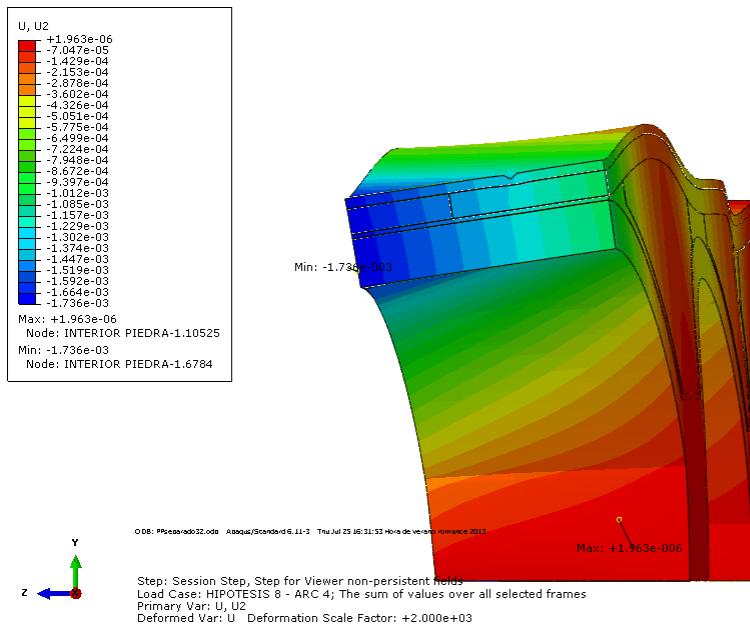


Figura 62. Desplazamiento transversal arco 4. Hipótesis 1.

5.4. Comprobación de frecuencias naturales

Las frecuencias admisibles en pasarelas con tránsito de peatones se sitúan fuera del rango de 1.2 – 4.6 Hz por lo que se realiza un análisis de frecuencias naturales obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 5-11.

Tabla 5-11. Comprobación de frecuencias naturales

Comprobación de Frecuencias

Límite inf (Hz)	1.200		
Límite sup (Hz)	4.600		
		Límite	CS
Primera Frecuencia Sin Pilas (Hz)	7.4601	Confort	1.622
Primera Frecuencia Con Pilas (Hz)	6.4135	Confort	1.394

Se observa que la primera frecuencia natural del puente se encuentra situada en torno a los 7'5 Hz (Figura 63) por lo que se encontraría dentro del rango de confort para los peatones. Además, como los estribos no están unidos al núcleo estructural, se produce una frecuencia natural de 6'4 Hz (Figura 64) que no se toma en cuenta.

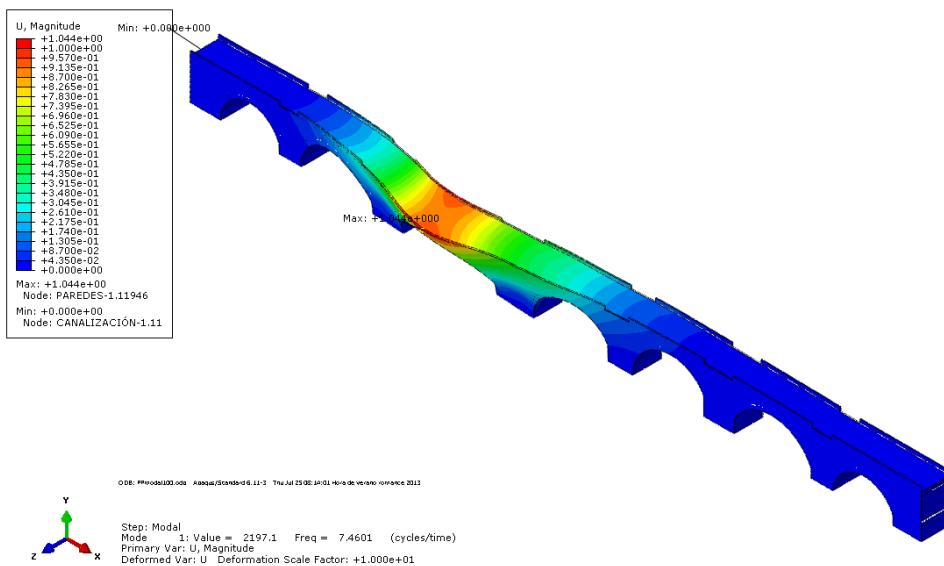


Figura 63. Frecuencia natural de resonancia sin pilas (Primer modo).

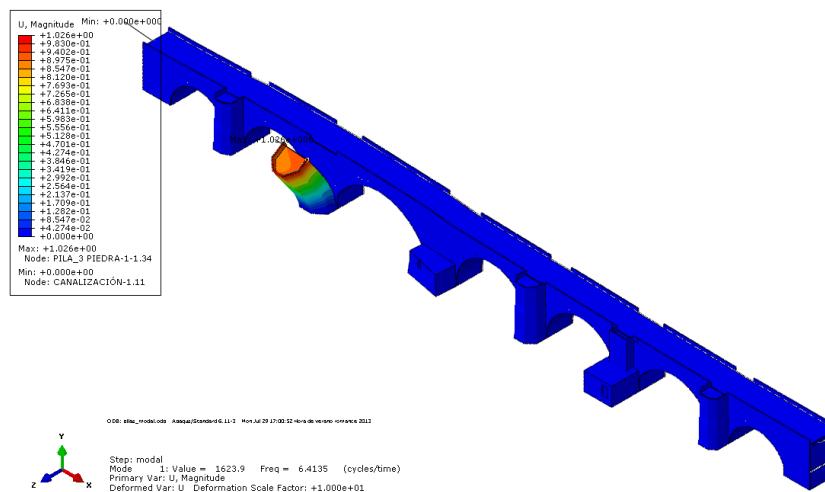


Figura 64. Frecuencia natural de resonancia con pilas (Primer modo).

6. Propuesta de Restauración

La restauración es parte clave de cualquier actuación sobre un monumento histórico, ya que una mala praxis podría resultar perniciosa para su conservación, para su resistencia estructural y para su aspecto visual. Por lo tanto es un aspecto que debe manejarse con mucho cuidado, debiendo ser, siempre que se pueda, respetuoso con las técnicas antiguas que fueron utilizadas para su construcción y sin producir una acción o intervención irreversible sobre el mismo. El concepto rehabilitador de Fernández Ordóñez se basa en lo siguiente:

- *Solo se conserva lo que se usa.* “El valor de uso” es una de las cinco categorías establecidas para la valoración de patrimonio. Las decisiones de intervenciones son difíciles debido, entre otras cosas, al valor arqueológico.
- *La rehabilitación como intervención creativa.* En la valoración del patrimonio suele ser necesaria la intervención interdisciplinar de arquitectos, ingenieros, arqueólogos, historiadores, etc. Pero hay que tener cuidado con que la obra no pierda autenticidad cuando se manipula.
- *Promover una “conservación activa”.* Se debe asegurar la continuidad del patrimonio, vigilar su mantenimiento y contribuir a su adaptación a las nuevas necesidades de la sociedad ya que, una intervención en patrimonio, es intervenir en el fluir del tiempo. Se debe conservar el equilibrio entre tradición y modernidad.
- *El paisaje como categoría patrimonial.* Las obras están ligadas a un emplazamiento que aporta significado.
- “La elección entre la conservación, la rehabilitación o la obra nueva es una cuestión ética, pero también de sensibilidad y talento [...]. No es posible dar reglas ni principios, solo se puede aspirar a ir aprendiendo de ejemplos”

La Carta de Atenas (1931), que es el origen de la normativa internacional sobre la protección y conservación de los bienes culturales, considera legítima la recomposición de los elementos originales encontrados (*anastilosis*) y se muestra partidaria del uso de nuevos materiales (hormigón armado) siempre y cuando no se altere el aspecto. En la Carta de Venecia (1964) se matizó el criterio limitando el uso de nuevos materiales y técnicas a aquellos que hubiesen demostrado su eficacia y siempre y cuando las técnicas tradicionales fueran inadecuadas. Sin embargo, la Carta de 1987 revalorizó las técnicas tradicionales frente a las modernas, justificándolo mediante la constatación del deterioro que habían producido algunas intervenciones en diversos monumentos.

Es cierto que siempre que sea posible se deben utilizar técnicas tradicionales, pero si éstas no son capaces de obtener el grado de seguridad exigido en algunas zonas de los puentes (cimentaciones); se

puede, y se debe, usar técnicas modernas, siempre y cuando se hayan demostrado su idoneidad, en experiencias semejantes y se haya realizado un estudio exhaustivo de su aplicación y de los posibles perjuicios que podrían ocasionar al elemento aplicado.

Las intervenciones de restauración atendiendo a las patologías analizadas pueden agruparse en:

- Limpieza (costras, pátinas, suciedad...)
- Estucado y reintegración de faltas y piedras fuertemente dañadas, con piezas similares a las existentes y con morteros específicos de restauración
- Protección superficial (aplicación de productos hidrófugos que impidan o dificulten el paso de la humedad al interior de la piedra, pero que permiten la transpiración hacia el exterior)
- Sustitución de piezas irreparables por otras de características similares (a ser posible de la cantera original)
- Plan de mantenimiento y conservación (acciones a tomar y etapas)
- Pre-consolidación y consolidación de la piedra

Si se trata de reconstruir, en principio, debe hacerse con los mismos sistemas, materiales y técnicas con las que se construyó el monumento y siempre constatando su compatibilidad con las originales.

Dejar pátina, paso o huella del tiempo, no la enfermedad o la suciedad.

En las nuevas aportaciones la verdad histórica nos aconsejará grabar unas "R" en los nuevos sillares, o rehundir ligeramente la fábrica, o darle una textura algo diferente sin destacar la intervención, pero realizada de tal modo que, acercándonos, podamos fácilmente distinguir los materiales aportados de los originales.

Integrar pero no engañar

En cuando a la reversibilidad estricta de la actuación no existe, pero sí los grados mayores o menores. Debe de procurarse que la intervención en el momento pueda enmendarse si más adelante se comprueba que no fue correcta, efectiva o si fuese mejorable, y, todo ello, de la forma más fácil posible: mínima intervención y mínimo coste.

Para más información sobre las Intervenciones de restauración en los puentes de piedra en el Anexo G. Restauración.

6.1. Principales afecciones sobre monumentos históricos

Este apartado engloba de manera somera las principales afecciones que pueden encontrarse en los monumentos históricos, para más información consultar Anexo G. Restauración.

6.1.1. Meteorización y clima

El deterioro de materiales en medio ambientes atmosféricos es un proceso de equilibrio físico-químico que opera a mayor o menor velocidad. Esto se debe a las diferencias entre el ambiente de servicio del material y el ambiente de formación del mismo (temperatura, presión, acidez...). El resultado es que la piedra pierde sus características originales (cohesión, porosidad, microfracturación, color...).

El agua es clave en los procesos de meteorización, así como la contaminación por la cual se puede incrementar enormemente la velocidad de erosión.

Factores Ambientales

- Temperatura y agua
- Días de sol
- Viento
- Procesos biológicos (bacterias, líquenes, musgo, hongos, plantas, excrementos...)

6.1.2. Alteración mecánica

Suponen la modificación de las propiedades mecánicas sin producir cambios en la composición.

Temperatura

Los cambios globales de temperatura tienen un efecto doble:

- Expansiones y contracciones que producen la fatiga del material y su consecuente fracturación.
- Las condiciones de confinamiento del material ofrecen resistencia a las dilataciones generando unas tensiones que puedan llegar a causar fallo del material.

Humedecimiento

El efecto del agua localizada infiltrada en las piedras es triple:

- Pueden producir cambios de volumen que generen tensiones internas
- La presencia de “agua ordenada” en los sistemas porosos puede producir esfuerzos durante los procesos de secado y mojado.
- La congelación genera microfisuras internas por tensión.

6.1.3. Alteración en ambientes contaminados

Los materiales más susceptibles a alterarse por la acción de los agentes contaminantes son los carbonatados (calizas, mármoles, morteros de cal...).

Existe otro tipo de deterioro que afecta por deposición de materia en suspensión sobre los monumentos. La formación de costras negras es un deterioro estético.

Ataque Ácido

Proviene de la presencia en cantidades importantes de gases contaminantes en la atmósfera que, al combinarse con el agua atmosférica, forman ácidos que se encuentran dispersos en aerosoles.

Los más importantes a considerar son: el ácido carbónico (H_2CO_3), el ácido sulfuroso (H_2SO_3), el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3). A estos hay que sumar los efectos de los metales pesados, hidrocarburos, óxidos de Hierro... cuyo efecto es la formación de costras negras.

- Dióxido de Carbono

La combustión de gasolina produce el 60% total del CO_2 de origen industrial durante su quemado se genera dióxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y, si la combustión no es buena, monóxido de carbono e hidrocarburos no descompuestos. Esta mala combustión sumada a la actividad fotoquímica del sol puede generar lo que se denomina “niebla fotoquímica” en la que los hidrocarburos se oxidan generando óxidos de carbono y nitrógeno que, a su vez, derivan en ácido carbónico y ácido nítrico (altamente corrosivos).

- Costra Negra

Los depósitos pueden presentar diferentes morfologías y asociarse a diferentes procesos de deterioro del material pétreo (exfoliaciones, desconchamientos, pérdidas de cohesión...). Con el tiempo estas deposiciones consolidan y endurecen, cambiando el comportamiento de los materiales pudiendo inducir el fallo del material original.

La composición puede ser muy variada: compuestos de carbono procedentes de las combustiones de los vehículos y con una coloración negra, cantidades variables de metales pesados y compuestos orgánicos de origen dudoso.

Por último, en zonas con actividad de aves, por ejemplo palomas con sus excrementos (palomina), pueden encontrarse también fosfatos hidratados de calcio y potasio.

6.2. Propuestas de restauración

Se va a tratar de dar una propuesta de restauración, o una línea general que se podría seguir, para abordar las afecciones que sufre el puente de Piedra de Zaragoza (Apartado 3.5.3), los tratamientos superficiales más adecuados, la reparación de grietas y fisuras y una breve propuesta de intervención en la iluminación del puente (Anexo G. Restauración).

6.2.1. Tratamientos superficiales

Sustitución de sillería

Los sillares de piedra en muy mal estado de conservación deberán de sustituirse por otros nuevos. Esta sustitución debe ser posterior a un estudio exhaustivo de las características de la piedra en mal estado: tipo de piedra, resistencia, textura, color... Siempre que sea posible el sillar sustituto debería ser de la misma cantera de la que se extrajo el original, pues ofrecerá total compatibilidad física y estructural con los originales.

Si se precisa la utilización de un mortero, para la sustitución del sillar o para el rejuntado, se utilizarán aquellos compatibles con las propiedades de la piedra o del mortero ya existente; para ello se obtendrían datos de los morteros de cal utilizados en el monumento, adoptando un mortero bastardo de cal hidráulica y cemento que muy bien podría contener piedra de la misma cantera que la original molida como árido, realizando pruebas hasta adoptar un color y tono adecuados proponiendo como huella de la intervención actual un rehundido respecto al sillar original. Se debe tender a morteros de cal, los cuales conviven muy bien con elementos de piedra caliza y con morteros puzolánicos, y no recurrir a los morteros de cemento, que evitan la transpiración de la piedra y no tienen buena compatibilidad con los morteros de cal de los antiguos monumentos.

Por último, y con afán de preservar el carácter propio de la obra, las reparaciones y sus materiales deben ser distinguibles, a corta distancia, mediante una textura en la talla o, incluso, una letra "R" de restaurado.

Limpieza

Esta estrategia persigue la retirada de todo aquel material extraño adherido al material original, pero sin eliminar completamente la pátina. Es una operación delicada e importante, dado que puede ser irreversible, y debe ser llevada a cabo por personal experto, puesto que se utilizan productos que podrían llegar a ser nocivos, deben de poseer los conocimientos adecuados y no deben producir daños en el material original.

Generalmente no se llega a limpiar totalmente la superficie, para conservar la pátina y conservar, a su vez, las características históricas, artísticas y arqueológicas del monumento original.

Para seleccionar el método de limpieza adecuado se deben tener en cuenta las siguientes particularidades:

- Tipo de piedra
- Grado de alteración
- Tallado liso o rugoso
- Origen de las suciedades, páginas, costras...

Además, antes de que se aplique un tratamiento concreto, se recomienda realizar unos ensayos en pequeñas áreas del edificio para ver posibles afecciones negativas y observar la correcta respuesta del mismo.

Existen diversas técnicas que pueden ser aplicadas perfiladas en el Anexo G. Restauración.

6.2.2. Tratamientos de grietas y fisuras

Generalmente para el tratamiento de las grietas y fisuras, se actuará por consolidación de la piedra mediante lechada consolidante inyectada profundamente, mejorando así su cohesión interna. Sus principales cometidos son recuperar o aumentar las características mecánicas del material reduciendo la porosidad.

Dependiendo de la profundidad de penetración se obtiene mayor o menor éxito y ésta, a su vez, depende de la porosidad, características del material inyectado y del método de aplicación.

Para la aplicación "in situ" hay diversos métodos como la aplicación a brocha o a chorro (superficial), soluciones vaporizadas o en forma de spray (capilaridad), la aplicación de tampones cubiertos con material plástico para evitar la evaporación (capilaridad) o practicar orificios en el material para inyectar el consolidante a presión.

Existen dos tipos de consolidantes: orgánicos e inorgánicos.

- Inorgánicos: son más duraderos, frágiles y con mayor afinidad química y física pero no pueden llenar grandes fisuras. Los más adecuados para la piedra caliza son el Hidróxido de Calcio y el Hidróxido de Bario (Anexo G. Restauración)
- Orgánicos: tienen mejores propiedades elásticas que aumentan la resistencia del material pétreo, pueden sellar grandes espacios. Por el contrario, presentan dificultades de penetración, tienen propiedades muy diferentes a las del material original, pudiendo ocasionar diferencias de comportamiento (térmico, degradación ultravioleta, por agua, oxígeno o biogénica...) y envejecen más rápido que los inorgánicos. Todos están constituidos a base de polímeros sintéticos compuestos por un único monómero (homopolímero) o por dos o tres monómeros distintos (copolímeros). Los polímeros de cadenas lineales (termoplásticos) presentan un deslizamiento viscoso ante esfuerzos elevados que

hacen que no puedan ser empleados como consolidantes estructurales siendo, además, teóricamente reversibles. Los polímeros de estructura reticular (termoestables) son muy rígidos y frágiles por lo que son aplicables como "adhesivos estructurales" capaces de soportar cargas sin deformarse, aunque son considerados irreversibles.

Como alternativa a las varillas de acero inoxidable se han empezado a utilizar varillas de fibra de vidrio (Puentes de Serranos y Trinidad en Valencia, puente Romano en Córdoba), o varillas de fibra carbono, como armaduras fijadas con resinas epoxi para realizar cosidos en los



Figura 65. Proceso de cosido con varillas de vidrio (43)

puentes de fábrica con la intención de fijar los sillares. Las varillas están hechas de hilos de fibra de vidrio puestos a tensión e impregnados con una resina de forma que trabajen en conjunto. Se fabrican mediante

pultrusión (proceso de conformado de material plástico para obtener perfiles de plástico reforzado de forma continua y ya curados) y se encuentran disponibles en diferentes rangos de diámetros (6 a 32 mm) pudiendo ser utilizadas en alternativa a las barras de acero inoxidable.

Entre otras ventajas cuentan con:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a tracción superior a la del acero (entre 1'5 y 2 veces) pero un cuarto de su peso
- Aislantes térmicos y eléctricos
- Buena resistencia a choques y a cargas puntuales y violentas
- Excelente resistencia a fatiga
- Dimensionalmente estables ante solicitudes térmicas con poca variabilidad en su dilatación.
- Son inertes

Las propiedades mecánicas (19):

- Resistencia de adhesión máxima: 11'6 MPa
- Resistencia a tracción: 655 MPa (Barra de 16 mm)
- Resistencia a corte: 140 MPa (barra de 16 MPa)
- Módulo elástico: 40.800 MPa (aproximadamente el 20% del módulo del acero)
- Coeficiente de dilatación térmica
- Transversal: $2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- Longitudinal: $6-10 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- Peso específico: 1'9 g/cm³

Otra aplicación de las fibras de vidrio o de carbono, consiste en la aplicación mediante capas de mallas de fibra resistente en el intradós de las bóvedas, como armado de colaboración con un mortero cementoso bicomponente con reactividad puzolánica (20) (específico para piedras), colaborando estructuralmente por aumento del espesor de la bóveda y absorción de los esfuerzos de tracción y, siempre que, permitiese la transpiración de la humedad.

Hay que evitar rigidizar una estructura que no lo es, ya que podríamos cambiar el comportamiento estructural de la misma con dramáticas consecuencias. Por eso estos sistemas resultan adecuados en los puentes puesto que aportan colaboración a tracción, poco peso y respetan al máximo la forma de trabajo del puente. Antiguamente se realizaban enlosados de hormigón armado que, con el paso del tiempo, se han demostrado claramente perjudiciales por rigidizar la estructura, evitar la transpiración de la estructura, y por no ser compatibles con los materiales originales.

El Ayuntamiento de Zaragoza, a través de su arquitecta Úrsula Heredia (Jefa del Servicio de Patrimonio Cultural de Gerencia de Urbanismo), ya ha realizado intervenciones de restauración en la rehabilitación del palacio de Santa Clara armando la madera existente con varillas fibra

de vidrio. Es decir, mantener el material original pero reforzándolo con materiales que aportan nuevas prestaciones.

6.2.3. Iluminación

Además de las luminarias que alumbran el tablero del puente, la instalación del puente de piedra consta de 28 proyectores de 250 W de potencia, colocados debajo de las arcadas, y dos columnas metálicas de 12 metros de altura con 10 proyectores de 250 W para iluminar los paramentos verticales del puente aguas arriba y aguas abajo.

Siempre ha existido cierta controversia con las luminarias del puente de Piedra por considerarse que no sintonizaban con el carácter del puente y por carecer, en general, de atractivo. Las propuestas de intervención para la sustitución de la actual iluminación del puente son:

- **Sustitución por nuevas columnas y luminarias:** se propondrá un modelo moderno y un modelo clásico.
- **Sustitución por proyectores compactos** se propondrá una integración discreta en el pavimento o en el pretil de piedra.



Figura 66. Iluminación Actual del puente de Piedra de Zaragoza



Figura 67. Modelo de columna
Bailen II. Luminaria Clásica
Neofernandina. (48)

Columna y luminaria clásica

Se propone un modelo de corte clásico, con doble luminaria en brazo a 90°, que permitiría la integración de pendones o carteles con promociones relativas a eventos que tuvieran lugar en la ciudad o, incluso, para engalanar el puente durante fechas señaladas.

El modelo está fabricado en dos piezas de fundición con imprimación antioxidante y acabado en color negro; la altura es de 4.2 metros aunque admite una altura de 6.1 metros.

La luminaria puede adquirirse en LED con 37 W (2700 lumens) o 57 W (4660 lumens).



Figura 68. Modelo de columna
TER. Luminaria DUNA JUNIOR. (48)

Columna y luminaria moderna

Se propone un modelo de diseño actual, con curvatura del fuste y que proporciona una sensación envolvente gracias a su perspectiva (Figura 69).

El modelo está fabricado en columna troncocónica de gran radio fabricada en una sola pieza que puede ser, opcionalmente, pintada de negro en la base; la altura es de 5 metros aunque admite alturas de 7-9-11 metros.

Las luminarias serán de tecnología LED por sus ventajas ecológicas, tener un menor consumo energético y una duración muy superior



Figura 69. Envolvente formada
por las columnas TER (48)

Balizas

- Noctis

Elemento urbano de balizaje y señalización de caminos, zonas peatonales y monumentos; de acero inoxidable o aluminio con cuerpo protector curvo o plano de vidrio transparente o mate que puede soportar cargas estáticas de 1.000 kg.

Los LED de alta potencia permiten resaltar los detalles arquitectónicos de forma directa, semi-directa o indirecta dando, además, la posibilidad de variar el color y la intensidad de la luz producida mediante control por ordenador.

Al proponerse empotrados en el pavimento no suponen una molestia para los peatones alcanzando unas dimensiones máximas de 200 mm x 200 mm en los cuadrados y de hasta 2000 mm x 105 mm en los rectangulares.



Figura 70. Baliza Noctis. Tipo Led. (47)

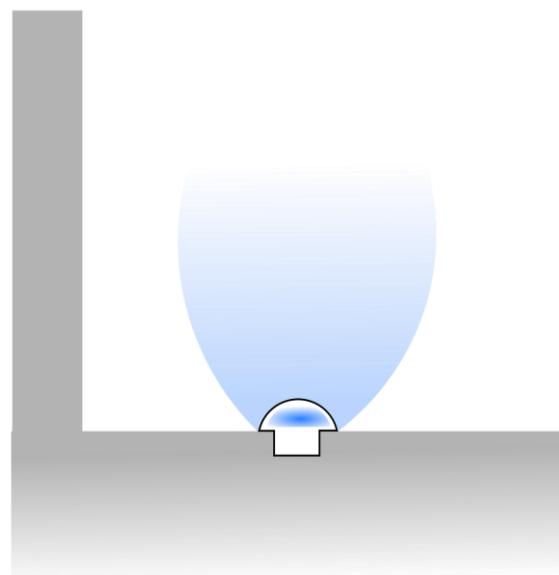


Figura 71. Propuesta de iluminación. Balizado.

- Baroled

Elemento urbano de balizaje para iluminación de fachadas y monumentos, así como carriles bici o puentes. Tiene tres sistemas de fijación para superficie y ajustable para orientar la luz permitiendo la instalación en línea continua. Los LED de 60 W (2.956 – 4.000 lumens) obtienen la fotometría de alto rendimiento necesario para la iluminación arquitectónica que pueden ser controlados y cambiados de color mediante control por ordenador.

Pueden ir anclados en el pavimento, en la pared o en un pasamanos llegando a cubrir una longitud máxima de 1.200 mm.



Figura 72. Baliza Baroled. Tipo Led. (47)

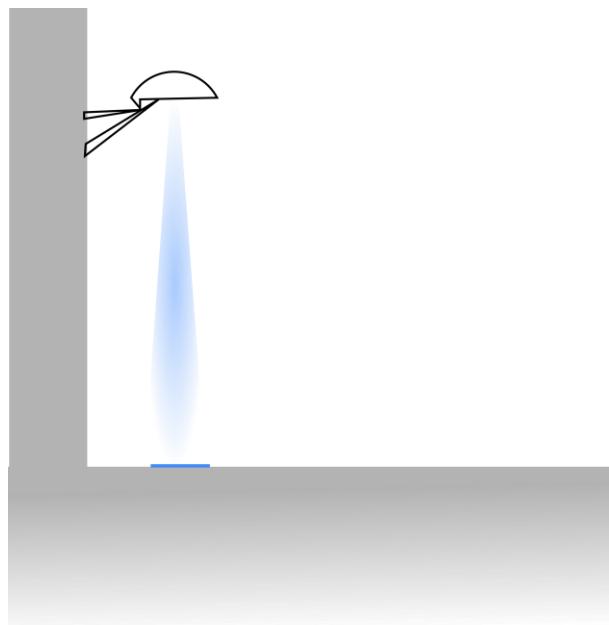


Figura 73. Propuesta de iluminación. Pasamanos.

7. Conclusiones

El Puente de Piedra de Zaragoza es una pieza excepcional de los monumentos que componen el patrimonio histórico arquitectónico aragonés. Existe el deber moral y ético, por parte de la ciudad y sus ciudadanos, de cuidarlo y preservarlo para su disfrute durante generaciones venideras.

Estructuralmente el análisis determina que el puente es perfectamente capaz de resistir los esfuerzos de compresión y que, excepto unos puntos localizados de tracción, es apto para el servicio de vehículos rodados. Se ha demostrado, asimismo, que el paso de autobuses, no contemplado por la normativa, no genera unas tensiones excesivas en las bóvedas de piedra como para justificar el crecimiento y aparición de nuevas grietas, ya que es la naturaleza inherente de la arquitectura de fábrica, diseñada para trabajar a compresión y rozamiento, la que hace que, generalmente, se produzcan. Además debería tenerse en cuenta que, en las juntas entre los sillares, no se absorben tracciones no previstas.

Gracias al Proyecto de Recalce de la cimentación del Puente de Piedra, se atajó la posibilidad de nucleación de nuevas grietas y fisuras por asientos diferenciales del terreno en las bases y, muy probablemente, se disminuyó la propagación de las ya existentes.

En cuanto al tráfico de autobuses, aceptable en nuestro cálculo estructural estimado, podría ser una fuente de tensiones anómala, ya que, lógicamente, no estaba previsto su uso para este cometido en su diseño primigenio, pudiendo ser una fuente de patologías. Se debería, por tanto, realizar un análisis detallado de la propagación de grietas ante ciclos de carga de paso de autobuses para confirmar si, efectivamente, no existe propagación de las mismas.

Así pues, de los análisis realizados en este trabajo, se concluye con rotundidad que el Puente es apto para el servicio, cumpliendo toda la normativa vigente para el proyecto de puentes de carretera, sin verse afectado, de manera que colapse, por el tráfico secundario ocasional, y, a pesar de la existencia muy localizada de grietas, los resultados revelan que las tracciones que se generan no son perniciosas, alarmantes o que sean el origen de las grietas, puesto que, con toda probabilidad, estás ya existían o se generaron por concurrencia de asientos diferenciales previo al proyecto de recalce; los desplazamientos (flechas) que se generan son muy inferiores a los permitidos en la normativa para un puente con tránsito de peatones, y los modos propios de resonancia se encuentran suficientemente alejados de los valores inaceptables para el confort.

Este resultado estructural no es óbice para que el paso de vehículos sea censurable atendiendo a otras razones:

- Podría ocasionar el levantamiento del adoquinado del pavimento si no ha sido bien realizado o podría inducir la rotura de sillares que poseen microfisuras o daños internos inducidos por heladas o dilataciones térmicas.
- Debido a los gases de escape procedentes de la combustión en motores diésel o gasolina se producen monóxidos y óxidos de nitrógeno y de carbono que, al reaccionar con la mayor humedad del ambiente existente por la proximidad del río, reaccionan para dar lugar a ácidos que afectan gravemente a la piedra caliza del puente.
- Se genera la denominada “costra negra”, que estéticamente es perjudicial y, como efecto añadido, podría llegar a generar problemas de fisuración en la sillería al inducir un estado tensional inesperado puesto que, al tener propiedades mecánicas diferentes a las de la piedra, se generaría un concentrador de esfuerzos.
- Tampoco hay que olvidar que el puente es un monumento visitado y transitado por una gran afluencia de público, para el que podría llegar a resultar peligroso e irritante el paso de vehículos.

Por último, es interesante concluir que, en adelante, las técnicas de restauración del puente deberían cambiar respecto a las últimas adoptadas y sufridas en 1985, ya que en aquel entonces estaba convenido y aceptado intervenir y restaurar monumentos con nuevos materiales. Actualmente está demostrado que estas actuaciones que rigidizan la estructura de fábrica, por aplicar materiales con distintas propiedades físicas a los primitivos, y que no permitan la transpiración de los elementos originales, podrían llegar a tener dramáticas consecuencias; se deberían incorporar los nuevos materiales siempre que fueran compatibles estructuralmente y siempre los menos perniciosos.

Por tanto, como opinión personal del proyectista, debido a la existencia de otros puentes modernos adaptados al tráfico rodado intenso, muy próximos al Puente de Piedra, y debido a las razones anteriormente expuestas, el Puente debería ser destinado únicamente al tránsito peatonal. También se podría sustituir la iluminación presente por una con mayor integración, más discreta, que no afecte a su estética y a su carácter propio y, asimismo, que permita una visión diáfana de la panorámica ofrecida de la ciudad, siendo de interés, en esta misma línea, la retirada de los “asientos” de hormigón octogonales existentes actualmente. No se debe olvidar que, aunque los puentes surgieron como una necesidad para el cruce de personas y mercancía, actualmente es un monumento histórico que debería ser conservado como tal.

Índice de Figuras

Figura 1. Antiguo arco de piedra	15
Figura 2. Calzada romana en Mérida (España)	17
Figura 3. Tabula Peutingeriana (Detalle de la península ibérica)	17
Figura 4. Principales ejes viarios en Hispania	18
Figura 5. Plano de distribución de la ciudad romana de Caesaraugusta	19
Figura 6. Dibujo a plumilla de Zaragoza. Anton van der Wyngaerde (2)	22
Figura 7. Parte de un grabado de Pier Maria de Baldi. 1668. (2)	23
Figura 8. Partes de un puente de piedra (3)	24
Figura 9. Funcionamiento estructural del arco	24
Figura 10. Cimentación profunda (3)	26
Figura 11. Distribución de cargas en un puente (M.A. Ariza)	27
Figura 12. Ataguías o Tablestacas (M.A. Ariza)	28
Figura 13. Extracción de agua mediante tornillo de Arquímedes (M.A. Ariza)	29
Figura 14. Aparejo de hiladas a soga alternadas con hiladas mixtas a soga y tizón (4)	30
Figura 15. Tipos de grapas entre sillares, empleadas por los romanos (4)	30
Figura 16. Cimentación (M.A. Ariza)	30
Figura 17. Construcción de bóveda de piedra sobre cimbra (M.A. Ariza)	31
Figura 18. Detalle de relleno de la pila y los riñones (M.A. Ariza)	31
Figura 19. Relleno, descimbrado y finalización del puente (M.A. Ariza)	32
Figura 20. Regla de Alberti para dimensionado de pilas (5)	33
Figura 21. Mecanismo de fractura en un estribo (5)	35
Figura 22. Plano de inyecciones de jet-grouting en pila 3	36
Figura 23. Distribución de vanos en el Puente de Piedra	36
Figura 24. Patologías: grietas y vegetación. Extracto del Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza	37
Figura 25. Proceso de cálculo por elementos finitos genérico	39
Figura 26. Modelado de la sección transversal	42
Figura 27. Modelado de las tajamares	43
Figura 28. Modelado de los tambores	43
Figura 29. Fotos del modelo plástico integrado en su entorno (M.A. Ariza Barra)	44
Figura 30. Distribución de capas de relleno (12)	46
Figura 31. Distribución de sobrecargas uniformes en cada carril	49
Figura 32. Succión producida a sotavento debido al paso de aire	51
Figura 33. Elemento C3D8 (16)	57
Figura 34. Mallado del core estructural del puente	57
Figura 35. Mallado de los tajamares	58

Figura 36. Elemento C3D10 (16) _____	58
Figura 37. Mallado con tetraedros de tajamares _____	59
Figura 38. Criterio gráfico de Rankine o de tensiones máximas principales _____	61
Figura 39. Tensiones mínimas principales Hipótesis 1. Interior Piedra. (Superior: Arcos 2,3 y 4; Inferior: Arcos 5, 6, 7 y 8) (Anexo F. Análisis de Resultados) _____	64
Figura 40. Tensiones máximas principales Hipótesis 1. Interior Piedra. (Superior: Arcos 2,3 y 4; Inferior: Arcos 5, 6, 7 y 8) (Anexo F. Análisis de Resultados) _____	64
Figura 41. Hipótesis 1. Tensiones máximas principales. Paredes de piedra. _____	65
Figura 42. Hipótesis 1. Tensiones Mínimas Principales. Paredes de piedra _____	66
Figura 43. Localización de los puntos analizados para las máximas tensiones _____	67
Figura 44. Distribución de tensiones máximas principales positivas mayores que 1 MPa para H5 _____	68
Figura 45. Distribución de tensiones máximas principales positivas para el nodo 21 (Elemento 94842) _____	69
Figura 46. Distribución de tensión máxima principal positiva en el nodo 497 (Elemento 52510) para H5 _____	69
Figura 47. Localización de zonas de tensión máxima principal mayores que 1'172 MPa en las Paredes de Piedra _____	70
Figura 48. Distribución de tensiones máximas principales para el nodo 497 (Elemento 52510) para H22 _____	71
Figura 49. Distribución de tensiones máximas principales para el nodo 10324 (Elemento 47761) para H22 _____	71
Figura 50. Distribución de tensiones máximas principales positivas en empotramiento norte para la H22 (Paredes de Piedra) _____	72
Figura 51. Distribución de tensiones máximas principales positivas en empotramiento sur para la H22 (Paredes de Piedra) _____	72
Figura 52. Análisis gráfico de tensiones mediante el Criterio de Rankine _____	73
Figura 53. Zonas de fisuración más comunes en puentes de fábrica (5) _____	75
Figura 54. Zonas de posible fisuración del modelo (frontal). Hipótesis 1 _____	76
Figura 55. Comparativa de fisuración del modelo con la realidad. Arco 4 (inferior). Hipótesis 2-arc 4 _____	76
Figura 56. Localización de zonas de fisuración (rojo y amarillo) en la bóveda de piedra de los arcos 2, 3 y 4 (planta inferior) _____	77
Figura 57. Comparativa de zonas de fisuración reales, correspondientes al informe de infraestructuras y modelo de elementos finitos del arco 2. (18) _____	77
Figura 58. Dirección de tensiones principales máximas positivas en la sección longitudinal del arco 2._____	78
Figura 59. Dirección de tensiones principales máximas positivas en la sección longitudinal del arco 3._____	79
Figura 60. Dirección de tensiones principales máximas positivas en la sección longitudinal del arco 4._____	79
Figura 61. Desplazamiento Arco 4. Hipótesis 1. _____	82
Figura 62. Desplazamiento transversal arco 4. Hipótesis 1. _____	82

Figura 63. Frecuencia natural de resonancia sin pilas (Primer modo)._____	83
Figura 64. Frecuencia natural de resonancia con pilas (Primer modo)._____	83
Figura 65. Proceso de cosido con varillas de vidrio (43) _____	91
Figura 66. Iluminación Actual del puente de Piedra de Zaragoza _____	93
Figura 67. Modelo de columna Bailen II. Luminaria Clásica Neofernandina. (48) _____	94
Figura 68. Modelo de columna TER. Luminaria DUNA JUNIOR. (48) _____	94
Figura 69. Envolvente formada por las columnas TER (48) _____	94
Figura 70. Baliza Noctis. Tipo Led. (47) _____	95
Figura 71. Propuesta de iluminación. Balizado._____	95
Figura 72. Baliza Baroled. Tipo Led. (47) _____	96
Figura 73. Propuesta de iluminación. Pasamanos._____	96

Índice de tablas

Tabla 4-1. Propiedades de la caliza (Anexo A. Materiales)	45
Tabla 4-2. Propiedades de la grava-cemento (Anexo A. Materiales)	46
Tabla 4-3. Propiedades del hormigón armado (Anexo A. Materiales)	47
Tabla 4-4. Pesos de la bibliografía	48
Tabla 4-5. Cargas en el tráfico de vehículos (TABLA 4.1-b IAP-11)	49
Tabla 4-6. Grupos de cargas (TABLA 4.1-c IAP-11)	49
Tabla 4-7. Presiones y Succiones del viento	51
Tabla 4-8. Cálculo del empuje hidrodinámico sobre las pilas	52
Tabla 4-9. Hipótesis de Cargas Definitivas	54
Tabla 5-1. Propiedades resistentes de la piedra	62
Tabla 5-2. Parejas de tensiones principales máximas. Interior de piedra	63
Tabla 5-3. Parejas de tensiones principales máximas. Paredes de piedra	65
Tabla 5-4. Criterio de Rankine. Interior Piedra	66
Tabla 5-5. Criterio de Rankine. Paredes de piedra	67
Tabla 5-6. Pesos bajo cada pila	74
Tabla 5-7. Rango de tensiones de monumentos conocidos	74
Tabla 5-8. Tensión máxima principal de tracción bajo las bóvedas de piedra	80
Tabla 5-9. Comprobación de resistencia a tracción	81
Tabla 5-10. Comprobación de luces máximas	81
Tabla 5-11. Comprobación de frecuencias naturales	83

ANEXO A. MATERIALES

En toda estructura los materiales juegan un papel determinante ya que son las que van a condicionar, junto con la geometría, el carácter resistente de la misma. A lo largo de la historia se han utilizado diversos materiales en el ámbito de la ingeniería civil desde las cavernas de sólida roca en las que moraban nuestros antepasados hasta nuestros días, en los que nos refugiamos en esqueletos de hormigón, metal y vidrio.

Los materiales han evolucionado junto con la técnica viéndose una clara progresión desde la prehistoria, en la que se usaban materiales no elaborados como madera, roca y barro, hasta la revolución industrial, en la que se incluyó el acero, el vidrio y el hormigón.

Dependiendo del uso para el que nace la estructura se entiende que debe utilizarse un material u otro, según el efecto que quiera conseguirse, no sólo por su capacidad de absorber esfuerzos si no, también, por la textura, color y sensaciones que evocan: la madera flexible, suave y de bello color natural; el acero frío, fuerte y flexible; la piedra dura, resistente y segura.

En el ámbito los monumentos históricos, es la piedra la que juega un papel fundamental ya que es el material que durante la época presentaba mayor durabilidad y, además, con el que estaban habituados a trabajar los maestros canteros.

Particularizando en el objeto de este estudio, el puente de piedra de Zaragoza, son tres los materiales que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar un análisis estructural: piedra, hormigón armado y el relleno de grava cemento.

A.I. PIEDRA

La piedra es la piedra angular sobre la que se erige un puente: es la que da la integridad estructural, conformando el esqueleto resistente a través de los arcos y los pilares.

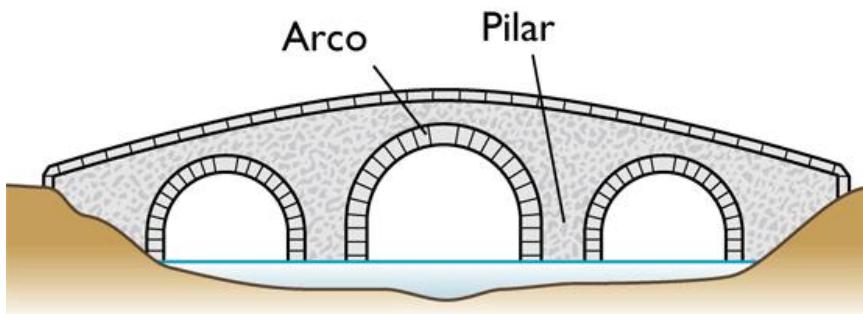


Figura 1. Esqueleto estructural de un puente. (Fuente: Estructuras en puentes y edificios www.kalipedia.com)

Son materiales problemáticos ya que puede existir una amplia variabilidad de comportamiento según la piedra, pudiendo moverse en un determinado rango que puede variar según la zona geográfica en la que se encuentre, la profundidad de su estrato o, incluso, de la forma en la que se produjo la extracción y transporte.

Para evitar esta incertidumbre derivada de la estocástica del problema, se realizan ensayos de compresión uniaxial sobre diferentes probetas extraídas de las sillerías del puente, cuyos resultados han sido recogidos en un informe encargado a la empresa RODIO durante el proyecto de recalce del puente de piedra Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza, gracias al cual se pueden determinar los distintos parámetros básicos de la piedra a saber: resistencia a compresión simple y deformabilidad (módulo de Young y coeficiente de Poisson).

En el presente objeto de estudio, el puente de piedra de Zaragoza, hay dos tipos de piedras principalmente: la caliza y la arenisca.

La piedra caliza es una roca sedimentaria formada por conchas calcáreas de organismos que viven en mares y lagos. Estos depósitos de concha, complementados por carbonatos de calcio y magnesio precipitados químicamente y, en algunas regiones mezclados o entreverados con arena, arcilla, óxido de hierro y otros detritos, forman eventualmente las diversas clases de piedras calizas. No ha de olvidarse pues, que el valle del Ebro se encuentra en una zona geográfica en la que existió el océano de Tetis durante la era Mesozoica y, por tanto, es una tierra susceptible de depósitos marinos.

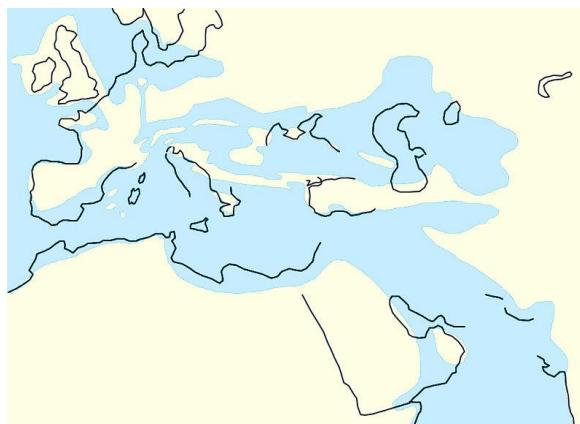


Figura 2. Situación del océano de Tetis en la península (Fuente: Wikipedia)

Las gamas de colores van del crema claro y opaco al castaño opaco y café oscuro, del gris plateado al ligeramente azulado, y mezclas jaspeadas de otros colores. En algunas piedras calizas, la estructura de conchas permanece intacta y es predominantemente de una clase, por ejemplo caliza coral, crinoidea, coquina y greda.

La piedra caliza compacta común es un agregado de grano fino, denso y homogéneo, de color gris claro.



Figura 3. Piedra caliza

La arenisca es una roca sedimentaria de tipo detritico, de color variable, que contiene clastos de tamaño de arena. Tras las lutitas son las rocas sedimentarias más comunes en la corteza terrestre. Contienen espacios intersticiales entre sus granos pudiendo estar llenas de sílice o carbonato de calcio. Si no están llenas son rocas porosas que pueden estar llenas de agua o de petróleo. En cuanto a los granos se componen de cuarzo, feldespato o fragmentos de roca siendo ampliamente utilizada en construcción y como piedra de amolar.



Figura 4. Arenisca

En el informe anteriormente comentado se obtuvieron 4 tipos de muestras para realizar los ensayos pertinentes y obtener la siguiente información: descripción visual, peso específico aparente seco, peso específico de las partículas, índice de huecos, resistencia a la compresión simple, contenido de carbonatos, reactividad frente al cemento y restauración de la superficie.

De todos ellos los que se han considerado determinantes para el estudio son:

- Caliza 1
 - Peso específico aparente seco (γ_d)
 - Medida 1: 2'16 kg/dm³
 - Medida 2: 2'08 kg/dm³
 - Medida 3: 2'28 kg/dm³
 - Media: 2'173 kg/dm³
 - Peso específico de las partículas (γ_s)
 - Medida 1: 2'641 kg/dm³
 - Medida 2: 2'647 kg/dm³
 - Media: 2,644 kg/dm³
 - Índice de huecos (e)
 - Medida 1: 0'22
 - Medida 2: 0'27
 - Medida 3: 0'16
 - Media: 0'216
 - Resistencia a compresión simple
 - Medida 1: 96 kg/cm²
 - Medida 2: 92 kg/cm²
 - Media: 94 kg/cm²
- Caliza 2 (similar a Caliza 1, se supone la misma)
 - Peso específico aparente seco (γ_d)
 - Medida 1: 2'11 kg/dm³
 - Medida 2: 2'14 kg/dm³
 - Medida 3: 1'97 kg/dm³
 - Medida 4: 2'07 kg/dm³

- Media: 2'073 kg/dm³
- Peso específico de las partículas (γ_s)
 - Medida 1: 2'645 kg/dm³
 - Medida 2: 2'646 kg/dm³
 - Media: 2,6455 kg/dm³
- Índice de huecos (e)
 - Medida 1: 0'25
 - Medida 2: 0'24
 - Medida 3: 0'34
 - Medida 4: 0'28
 - Media: 0'2775
- Resistencia a compresión simple
 - Medida 1: 97 kg/cm²
 - Medida 2: 141 kg/cm²
 - Media: 119 kg/cm²
- Caliza Conchífera (aparentemente de la tajamar)
 - Peso específico aparente seco (γ_d)
 - Medida 1: 1'71 kg/dm³
 - Medida 2: 1'65 kg/dm³
 - Medida 3: 1'64 kg/dm³
 - Medida 4: 1'67 kg/dm³
 - Medida 5: 1'64 kg/dm³
 - Media: 1'662 kg/dm³
 - Peso específico de las partículas (γ_s)
 - Medida 1: 2'634 kg/dm³
 - Medida 2: 2'637 kg/dm³
 - Media: 2,635 kg/dm³
 - Índice de huecos (e)
 - Medida 1: 0'54
 - Medida 2: 0'60
 - Medida 3: 0'61
 - Medida 4: 0'58
 - Medida 5: 0'61
 - Media: 0'588
 - Resistencia a compresión simple
 - Medida 1: 68 kg/cm²
 - Medida 2: 56 kg/cm²
 - Media: 62 kg/cm²
- Arenisca
 - Peso específico aparente seco (γ_d)
 - Medida 1: 1'84 kg/dm³
 - Medida 2: 1'81 kg/dm³
 - Media: 1'825 kg/dm³
 - Peso específico de las partículas (γ_s)
 - Medida 1: 2'718 kg/dm³
 - Medida 2: 2'716 kg/dm³
 - Media: 2,717 kg/dm³

- Índice de huecos (e)
 - Medida 1: 0'48
 - Medida 2: 0'50
 - Media: 0'49
- Resistencia a compresión simple
 - Medida 1: 63 kg/cm²
 - Medida 2: 42 kg/cm²
 - Media: 52'5 kg/cm²

Con el objetivo de acotar este rango de variabilidad de parámetros se establecen unos valores generales para la piedra caliza la cual representa la mayor parte en el puente de piedra.

Según González de Vallejo (22):

El estudio de la mecánica de sólidos asume generalmente un comportamiento homogéneo, continuo, isótropo, elástico y lineal que los materiales rocosos no presentan. La gran variabilidad de características y propiedades físicas y mecánicas se refleja tanto a escala de la matriz rocosa como de macizo rocos fracturado.

La diferente composición química de los agregados heterogéneos de cristales y partículas amorfas que forman las rocas representa la escala más pequeña en el estudio de la variabilidad de las propiedades; así, una arenisca puede estar cementada por sílice o por calcita, un granito puede contener cantidades variables de cuarzo, etc. Las rocas presentan direcciones preferenciales de anisotropía por orientación de cristales y granos, poros, microfisuras... imprimen un carácter discontinuo y no lineal, y la desigual distribución de los minerales y componentes rocosos configura un medio heterogéneo. También la alteración y meteorización por procesos físicos y químicos modifica la composición de las rocas presentando propiedades diferentes.

Aunque por lo general a escala de macizo la matriz suele considerarse como un material isótropo y continuo, los aspectos anteriores son importantes en el estudio de determinados tipos de materiales rocosos, como son las rocas que presentan laminación o equistosidad. A la hora de evaluar la influencia de estos defectos ha de tenerse en cuenta la escala o el ámbito del trabajo.

Generalmente, existen una serie de parámetros que se emplean para la identificación y descripción cuantitativa de las propiedades básicas de las rocas. Las propiedades físicas o propiedades índice se determinan en laboratorio; las más importantes en el comportamiento mecánico son: la porosidad (índice de huecos), peso específico, permeabilidad, alterabilidad, resistencia y velocidad de propagación de las ondas sónicas.

La porosidad es la relación entre el volumen ocupado por los huecos o poros en la roca y el volumen total. Afecta a las características resistentes y mecánicas, siendo inversamente proporcional a la

resistencia y a la densidad, y directamente proporcional a la deformabilidad, ya que las zonas de huecos son débiles.

El peso específico o peso unitario de la roca depende de sus componentes y se define como el peso por unidad de volumen.

Tabla I-1. Valores típicos del peso específico y porosidad de rocas (22)

Roca	Peso Específico (g/cm ³)	Porosidad
Arenisca	2'3-2'6	0'05-0'25 (0'16)
Caliza	2'3-2'6	0'05-0'2 (0'11)

La resistencia a compresión simple o resistencia uniaxial es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confiar en laboratorio.

Tabla I-2. Valores de resistencia de la matriz rocosa sana (22)

Roca	Resistencia a compresión simple (kp/cm ²)	Resistencia a tracción (kp/cm ²)
	Valor Medio	Rango
Arenisca	550-1.400	300-2.350
Caliza	800-1.400	600-2.000

Las rocas rompen a favor de superficies de fractura que se generan al superarse su resistencia pico. Así, de forma indirecta, en los ensayos de compresión se mide la resistencia al corte de las rocas.

La resistencia es función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material. La cohesión, c , es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca. El ángulo de fricción interna, ϕ , es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca; para la mayoría de las rocas éste ángulo varía entre 25° y 45°. La fuerza friccional depende del ángulo de fricción y del esfuerzo normal, σ_n , actuando sobre el plano considerado.

Sin embargo, la resistencia de la roca no es un valor único ya que además de los valores de c y de ϕ , depende de otras condiciones, como la magnitud de los esfuerzos confinantes, la presencia de agua en los poros o la velocidad de aplicación de la carga. A partir de un ensayo de compresión triaxial se obtienen:

Tabla I-3. Valores típicos de c y ϕ para roca intacta (22)

Roca	c (kp/cm ²)	ϕ (grados)
Arenisca	80-350	30-50
Caliza	50-400	35-50

Estos valores serán necesarios para definir el criterio de rotura de Mohr-Coulomb

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan\phi$$

Por último, en cuanto a la deformabilidad, es la propiedad que tiene la roca para alterar su forma como respuesta a la actuación de fuerzas. El módulo de Young, E, define la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo, y el coeficiente de Poisson, v, define la relación entre la deformación transversal y axial. Ambas se obtienen del ensayo de compresión simple.

Tabla I-4. Constantes elásticas de las rocas (22)

Roca	E estático (kp · 10 ⁵ /cm ²)	E dinámico (kp · 10 ⁵ /cm ²)	v
Arenisca	0'3-6'1	0'5-5'6	0'1-0'4
Caliza	1'5-9'0 (2'9-6'0)	0'8-9'9	0'12-0'33 (0,25-0'3)

Según Jiménez Salas (23):

Tabla I-5. Propiedades elementales de las rocas (23)

Roca	Porosidad	Peso seco (t/m ³)
Arenisca	0'08-0'42	1'6-2'9
Caliza	0'008-0'3	1'55-2'85

Tabla I-6. Valores típicos de la resistencia a la compresión simple (23)

Roca	Resistencia a compresión (kp/cm ²)
Arenisca calcárea arcillosa (Tajo-Segura)	2'6-43
Arenisca de grano muy fino (siltstone)	280-3.200
Arenisca no arcillosa	200-2.400
Caliza	40-3.300

Tabla I-7. Valores E/q_u (23)

Roca	Relación E/q _u
Arenisca	100-500
Caliza	95-1.400

Tabla I-8. Valores de módulo de deformación lineal (23)

Roca	E (kp/cm ²)	ν
Arenisca	25.000-610.000	0'05-0'38
Arenisca de grano muy fino (siltstone)	77.000-760.000	0'05-0'38
Caliza	28.000-1.300.000	0'08-0'31
Caliza margosa	50.000-130.000	-

Tabla I-9. Valores de cohesión de las piedras (23)

Roca	c'(kp/cm ²)	ϕ (°)
Arenisca	42-420	48-50
Arenisca de grano muy fino (siltstone)	50	-
Caliza de Solenhofen	780	24
Caliza	35-350	37-58
	140-350	58-35
Caliza margosa	10-60	30-40

Considerando todos los valores de carácter generalista anteriormente expuestos, se ha establecido una comparación con los valores obtenidos de las probetas porque, al no ofrecer valores de módulo elástico, se aproxima por interpolación lineal simple entre los valores de resistencia a compresión simple del autor (23) y los obtenidos del informe de RODIO (9) para, finalmente, relacionarlos con el módulo de Young.

Tabla I-10. Propiedades de cálculo de la Piedra Caliza

R (kp/cm ²)	E(N/m ²) ·10 ⁶	Poisson	Peso (kg/m ³)
90	28.641'6	-	2.000
120	29.565'4	0'3	2.350
140	30.181'27	-	2.700

Nota: según la normativa de carreteras (32) para el peso específico en el cálculo de acciones de los elementos de caliza y granito, según la tabla 3.1-a, se tomará el valor de 30 kN/m³ (**3.061'22 kg/m³**)

A.II. RELLENO

Debido a la diversidad de materiales, estados y geometrías no hay una acepción que claramente defina el relleno, sin embargo, es ampliamente aceptado que es todo aquello que está comprendido entre la bóveda de fábrica, tímpanos, estribo y superficie de rodadura.

Aunque en la antigüedad fueran denostadas y no se consideraran importantes, estructuralmente hablando, su misión consiste en transmitir las cargas puntuales desde la superficie hasta el terreno y aportar rigidez estructural al conjunto.

Normalmente estaba compuesto por materiales que se encontraban en la zona en el momento de la construcción y no eran traídos ex profeso para la construcción (como pudiera ser con las piezas de la sillería). La constitución puede considerarse como una de las primeras clasificaciones:

- Relleno rígido o cementado: está formado por materiales de una amplia granulometría (media o gruesa) unidos con un material ligante (cemento puzolánico, cal y canto...) o por un trasdosado de sillares o mampuestos.
- Relleno granular firme: es una transición entre el relleno rígido y el granular. Compuesto por un material granular con tamaños grandes pero sin ligante.
- Relleno suelto o granular. Hasta las capas superiores.
- Rellenos aligerados: formado por vasijas de barro cocidas huecas y tapadas en las que se materializa un relleno con cal y canto formado por arena, cal y trozos de materiales cerámicos.
- Rellenos de escombros de la propia construcción.

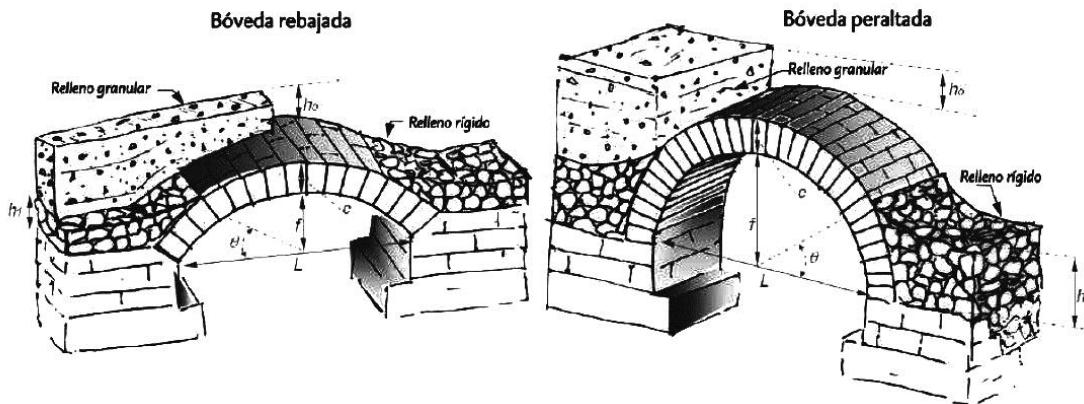


Figura 5. Distribución de capas de relleno (26)

A.II.I. Caracterización de los rellenos

A.II.I.I. Relleno granular

Se acepta que tienen un comportamiento no lineal según el criterio de Mohr-Coulomb:

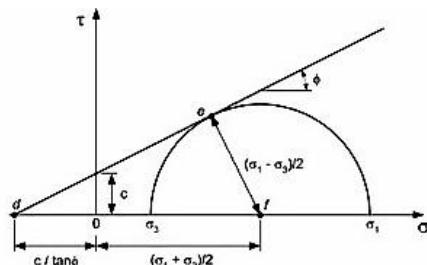


Figura 6. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan\phi$$

La interacción entre los rellenos granulares y la estructura se puede calcular de diversas formas:

- Métodos clásicos basados en la teoría del estado límite (empujes activos y pasivos).
- Métodos tradicionales con modificaciones empíricas o semi-empíricas, son los métodos de equilibrio límite con consideraciones experimentales.
- Métodos basados en modelos elásticos entre los que cabría incluir el modelo de Winckler o del coeficiente de balasto.
- Modelo con muelles que simulan el comportamiento elasto-plástico del terreno.
- Cálculo mediante el MEF. Se define el comportamiento elasto-plástico del terreno mediante los parámetros de deformación elásticos (E y v) y con los parámetros resistentes de Mohr-Coulomb (ϕ y c) que no están influenciados por la geometría del problema.

A.II.I.II. Relleno rígido

Las propiedades mecánicas de este tipo de rellenos hacen que su consideración pueda ser “cuasi-estructural”. Al menos así está demostrado para el caso de puentes en el que la presencia de estos rellenos rígidos ayuda de forma estructural.

Esto se debe a que presenta un módulo de deformación elástica similar al de la piedra.

Los rellenos rígidos pueden considerarse de tres clases:

- Rellenos granulares cementados, granulometrías más o menos pequeñas con un ligante que puede caracterizarse como mortero de cal aérea o puzolana..
- Relleno compuesto por la propia piedra

- Rellenos granulares firmes, compuestos por granulometrías grandes y con una compactación que los hace similares a una escollera.

A.II.II. Evaluación estructural de los rellenos

En un puente de arco de piedra la misión del relleno granular consiste en transmitir y repartir las cargas aplicadas sobre la superficie de rodadura hasta el trasdós de la bóveda atenuando, a la vez, el efecto local de las cargas y, además, desarrollando empujes de estabilización sobre la bóveda (al avanzar un peso por encima creará un empuje activo que se compensará por el empuje pasivo del material situado en el lado contrario de la bóveda al que avance el vehículo). Esta acción se produce a través de las siguientes interacciones entre la bóveda y el relleno:

- Reparto de cargas
- Redistribución del empuje del relleno sobre el trasdós de la bóveda al deformarse esta
- Desarrollo de tensiones tangenciales entre la bóveda y el relleno adyacente a ella (rozamiento)

El reparto de cargas, al atenuar su acción, hace menor la deformación del conjunto de la estructura. Éste reparto de cargas, generalmente, se asume en una transformación de la carga puntual aplicada en la superficie de rodadura a una carga trapezoidal aplicada en el trasdós de la bóveda.

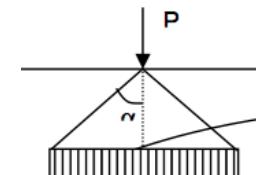


Figura 7. Reparto de cargas trapezoidal (24)

Tabla II-1. Parámetros de la grava cemento (24)

Parámetro	Máx.	Med.	Mín.
Peso Específico (kN/m³)	22	18'75	13
E (N/mm²)	4000	1095	1
Poisson	0'3	0'25	0'05
ϕ (º)	37'5	30'8	17'5
C (N/mm²)	0'5	0'13	0'01

Tabla II-2. Parámetros de cálculo de la grava-cemento

	E(N/m ²) ·10 ⁶	Poisson	Peso (kg/m ³)
Max	4.000	0'3	2.244'89
Med	1.095	0'25	1.913'27
Min	1	0'05	1.326'53

Nota: según la normativa de carreteras (32) para el peso específico en el cálculo de acciones de los materiales granulares y rellenos, según la tabla 3.1-a, se tomará el valor de 20 kN/m³ (**2.040'82 kg/m³**). Sin embargo, como existe la justificación expresa de que el valor más restrictivo es el aportado por la bibliografía (24, 26), se tomará el que mayor perjuicio suponga.

A.III. HORMIGÓN ARMADO

El hormigón (27) es un material altamente tecnológico y novedoso que no se utilizaba en la antigüedad. Si bien es cierto que existían determinados hormigones naturales que eran utilizados en las construcciones históricas, no tenían unas propiedades mecánicas ni por asomo similares a las de los actuales.

Es un material de composición diversa compuesto por conglomerantes hidráulicos que, amasados con agua, fraguan y endurecen tanto expuestos al aire como sumergidos en agua. Estos conglomerantes, comúnmente conocidos como cementos, están compuestos de clínker portland (resultante de la calcinación hasta la fusión de mezclas de calizas y arcillas), escorias siderúrgicas (provenientes del enfriado brusco de la ganga procedente de los altos hornos), puzolanas naturales (rocas tobáceas o volcánicas finamente divididas), cenizas volantes (residuos sólidos obtenidos por precipitación electro estática de las cenizas en centrales de carbón), humo de sílice (resultado de la reducción de sílice de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico), filleres calizos (carbonato cálcico y calizas en porcentajes superiores al 85%) y reguladores de fraguado como el sulfato cálcico.

Un ejemplo clásico de cemento portland sería CaO (62'5), SiO_2 (21), Al_2O_3 (6'5), Fe_2O_3 (2'5), SO_3 (2), MgO (2).

El segundo componente fundamental es el agua, tanto para el amasado como para el curado, siendo muy importante para el control de sus propiedades.

El tercer componente lo forman los áridos: desde gravas (> 5 mm) hasta finos (< 0'08 mm). Los mejores son los áridos silíceos o provenientes de rocas volcánicas, debiendo tenerse cuidado con las calizas y rocas blandas, en los que la granulometría juega un papel muy importante en la resistencia del hormigón.

El cuarto grupo de componentes serían todos aquellos tales como aceleradores, retardadores, plastificantes, aireadores, impermeabilizantes...

El último grupo, únicamente presente en hormigones armados, son las barras de acero corrugado. Son muy importantes ya que el hormigón es un material que no trabaja óptimamente a tracción y su modo de comportamiento adecuado es la compresión. Al incluir al hormigón de barras corrugadas de acero se le dota de resistencia a tracción y a compresión, siendo esto posible gracias a que los coeficientes de dilatación de ambos materiales son parejos.

Como se ha mencionado anteriormente, el hormigón no es un material tradicional y, por tanto, no está presente de forma original en las edificaciones antiguas. No obstante, cuando son objeto de intervenciones o restauraciones, pueden ser añadidos para aportar

rigidez estructural o protección a determinados elementos. En el puente de piedra de Zaragoza se incorporó una capa de 20 cm. de hormigón (resistencia de 20 kg/cm²) armado con objeto de proteger y dar rigidez a las bóvedas de fábrica que conforman los arcos del puente.

Por tanto este material es también objeto del presente estudio y deben incluirse sus propiedades elásticas (E y v).

A.III.I. Comportamiento del hormigón

Las deformaciones, en el hormigón, pueden dividirse en reversibles e irreversibles siendo el diagrama de tensión-deformación, además, dependiente de varias variables: edad del hormigón, duración de la carga, forma y tipo de la sección, naturaleza de la solicitud, tipo de árido, estado de humedad, etc.

Así pues habrá que distinguir entre los módulos de deformación tangente, secante (o módulo de deformación) y el módulo inicial (o módulo instantáneo). Para cargas instantáneas o rápidamente variables, se utiliza el módulo elástico de deformación instantáneo (pendiente del origen de la curva tensión-deformación) que depende de la edad del hormigón en el instante de puesta en carga y que puede aproximarse por

$$E_{0j} \left(\frac{N}{mm^2} \right) = 10.000 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}}$$

Con $f_{cm,j}$ la resistencia media a compresión a j días en N/mm².

El módulo secante, siempre que las tensiones de la sección no sobrepasen el 45% de la resistencia característica a los j días (f_{cj}) se approxima mediante

$$E_{0j} \left(\frac{N}{mm^2} \right) = 8.500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}}$$

Otra expresión válida sería:

$$E_c \left(\frac{kp}{cm^2} \right) = 15.100 \sqrt{f'_c \left(\frac{kp}{cm^2} \right)}$$

Y, también, se suele asumir como:

$$2.1 \cdot 10^5 \left(\frac{kp}{cm^2} \right) = 20.594'7 \frac{N}{mm^2}$$

Y su rango de variación es usualmente:

$$1.4 \cdot 10^5 \left(\frac{kp}{cm^2} \right) - 2.1 \cdot 10^5 \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Sin embargo, los valores anteriores son expresiones promedio que dependen de la resistencia media, por lo que siempre que se conozca

ésta por ensayos deberá utilizarse. En caso contrario puede utilizarse la expresión promedio para 28 días

$$f_{cm} = f_{ck} + 8\left(\frac{N}{mm^2}\right)$$

Además, el valor para otra edad puede obtenerse mediante la tabla de correlación de resistencias para distintas edades.

Otros valores de interés lo conforman el coeficiente de Poisson con un valor de 0'20.

Para el puente de piedra se podrán asumir los siguientes valores, teniendo en cuenta que su resistencia característica es de 20 kg/cm².

$$E_c = 8.500 \cdot \sqrt[3]{20 \left(\frac{kp}{cm^2} \right) \cdot \frac{9'8 \left(\frac{m}{s^2} \right)}{\frac{1}{100} \left(\frac{cm^2}{mm^2} \right)}} = 18.312'7 \frac{N}{mm^2}$$

$\nu = 0'2$

Para el valor exacto del peso, por desconocimiento exacto de las dosificaciones del hormigón y pesos de las armaduras, no hay una cifra. Por tanto, según la normativa de carreteras (32) para el peso específico en el cálculo de acciones de Hormigón Armado, según la tabla 3.1-a, se tomará el valor de 25 kN/m³ (**2.551'02 kg/m³**).

Índice de Figuras. Anexo A

Figura 1. Esqueleto estructural de un puente.	v
Figura 2. Situación del océano de Tetis en la península	vi
Figura 3. Piedra caliza	vi
Figura 4. Arenisca	vii
Figura 5. Distribución de capas de relleno	xiii
Figura 6. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb	xiv
Figura 4. Reparto de cargas trapezoidal	xv

Índice de Tablas. Anexo A

Tabla I-1. Valores típicos del peso específico y porosidad de rocas (22)	x
Tabla I-2. Valores de resistencia de la matriz rocosa sana (22)	x
Tabla I-3. Valores típicos de c y ϕ para roca intacta (22)	x
Tabla I-4. Constantes elásticas de las rocas (22)	xi
Tabla I-5. Propiedades elementales de las rocas (23)	xi
Tabla I-6. Valores típicos de la resistencia a la compresión simple (23)	xi
Tabla I-7. Valores E/q_u (23)	xi
Tabla I-8. Valores de módulo de deformación lineal (23)	xii
Tabla I-9. Valores de cohesión de las piedras (23)	xii
Tabla I-10. Propiedades de cálculo de la Piedra Caliza	xii
Tabla II-1. Parámetros de la grava cemento (JLeon2000)	xv
Tabla II-2. Parámetros de cálculo de la grava-cemento	xv

ANEXO B. CARGAS

B.I. IAP-11: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera

Esta instrucción técnica de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (Gobierno de España) (32) marca las pautas necesarias para determinar las acciones que afectan al cálculo de puentes, sus valores de combinación y sus límites de servicio. A través del concepto de estados límite (enfoque de seguridad en el cálculo estructural basado en normativas técnicas que consiste en considerar unas situaciones de riesgo cuantificables y asegurar, con un margen de seguridad razonable, la respuesta máxima de la estructura de cálculo respecto a la real), tanto últimos como de servicio, se probarán diversas hipótesis basadas en la posibilidad de que las diferentes acciones sean concomitantes y, por tanto, ocurran al mismo tiempo afectando de una manera mucho más perniciosa a la estructura que si actuasen y fuesen consideradas como únicas.

Los Estados Límite Últimos tendrán en cuenta todas aquellas hipótesis que puedan afectar a la construcción de forma que esta no sea hábil para realizar la tarea para la que fue proyectada. Los Estados Límites de Servicio, aunque no afectan a la integridad estructural, afectan al confort y la estética del edificio (excesivas flechas o vibraciones) por lo que también se analizan para su posible detección y corrección.

Además, a través de unos coeficientes de mayoración y minoración, se tendrá en cuenta el efecto de acciones favorables y desfavorables, minorando o mayorando respectivamente.

B.II. ESTADOS LÍMITE

B.II.I. TIPOLOGÍAS

Dentro de los dos tipos de estados anteriormente descritos encontramos las siguientes subcategorías:

- Estado Límite Último (ELU)
 - De equilibrio
 - De rotura
 - De fatiga
- Estado Límite de Servicio (ELS)
 - Fisuración
 - Deformación
 - Vibración
 - Plastificación
 - Deslizamiento

B.II.II. VERIFICACIÓN

- ELU
 - Equilibrio: comprobar que las acciones desestabilizadoras no son superiores a las estabilizadoras.
 - Rotura: comprobar que las acciones que actúan sobre la estructura no son superiores a la resistencia de la misma.
 - Fatiga: no se trata en esta norma. Se remite a normativa específica de cada material.
- ELS
 - Remite a que las acciones, descritas posteriormente, no sean superiores que un valor límite.

B.III. ACCIONES PERMANENTES

Entre las acciones permanentes han de considerarse los pesos de los distintos elementos que componen la construcción, tanto el peso propio de los elementos resistentes estructurales como las cargas muertas que orbitan sobre los elementos resistentes.

La Tabla III-1 es la encargada de definir una serie de pesos para cada posible material constructivo.

Tabla III-1. Pesos Específicos de diversos materiales (TABLA 3.1-a IAP-11)

Material	Peso (kN/m ³)
Hormigón Armado	25
Elementos de Granito o Caliza	30
Materiales granulares y de relleno	20

Sin embargo, como se observa en el Anexo A. Materiales, de la bibliografía (22, 23) se extraen unos pesos que pueden ser superiores en algunos materiales por los que se considerarán los más perjudiciales para los cálculos (la normativa permite cambiar los pesos tras justificación).

Tabla III-2. Pesos de la bibliografía (22, 23)

Material	Peso (kg/m ³)
Caliza	2.350
Relleno Grava-Cemento	2.244'89
Hormigón	2.551'02

B.V. ACCIONES PERMANENTES CONSTANTES (G)

B.V.I. PESO PROPIO

Peso de los elementos estructurales Tabla III-1.

B.V.II. CARGAS MUERTAS

Elementos no estructurales que gravitan sobre los estructurales:

- Pavimentos: calzada y aceras.
- Elementos de contención
- Dotaciones
- Servicios: tanto cargados como descargados.

El pavimento tiene un límite inferior $G_{k,inf}$ y un límite superior $G_{k,sup}=1'5 \cdot G_{k,inf}$. Las dotaciones y los servicios también tienen unos límites inferiores $0'8 \cdot G_{k,med}$ y superiores $1'2 \cdot G_{k,med}$.

B.VI. ACCIONES PERMANENTES NO CONSTANTES (G*)

B.VI.I. PRESOLICITACIONES

No se consideran presolicitaciones de Pretensado ni de otro tipo al ser una estructura histórica que no incorporaba esta clase de elementos resistentes y, además, no fueron incluidos en ninguna remodelación.

B.VI.II. ACCIONES REOLÓGICAS

Tras el estudio del puente de piedra se observa que, al ser mayoritariamente de mampostería, no es necesario tener en cuenta acciones reológicas del hormigón (que forma una parte mínima de una remodelación que sufrió el puente).

B.VI.III. EMPUJE DEL TERRENO

No se considera ya que los taludes de los extremos forman parte de las riveras y están contenidos por pantallas de hormigón.

B.VI.IV. ASIENTOS DEL TERRENO EN LA CIMENTACIÓN

Antiguamente se habría considerado este problema ya que la cimentación consistía básicamente en losas con estacas de madera directamente sobre el terreno. Este hecho hacía que se produjesen asientos del terreno con sus consecuentes grietas sobre el puente. Sin embargo, tras la última obra de recalce del puente de (9), en la que se hicieron inyecciones en el terreno de mortero a través del método de jet-grouting (Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza).

B.VI.V. ROZAMIENTO EN APOYOS DESLIZANTES

No se consideran al no existir apoyos deslizantes

B.VII. ACCIONES VARIABLES (Q)

B.VII.I. SOBRECARGA DE USO

B.VII.I.I. División de la plataforma

Según la Tabla VII-1 hay que considerar un número determinado de carriles virtuales en función de evaluar las cargas de tráfico que soporta el puente. El puente de piedra dispone de unos 5 metros efectivos para el carril por lo que se considera que existe un único carril virtual de 3 metros y el resto es un área remanente de 2 metros de anchura.

Tabla VII-1. Definición de carriles virtuales (TABLA 4.1-a IAP-11)

Ancho real (w)	Carriles Virtuales	Anchura virtual	Área remanente
w < 5'4	1	3	w-3

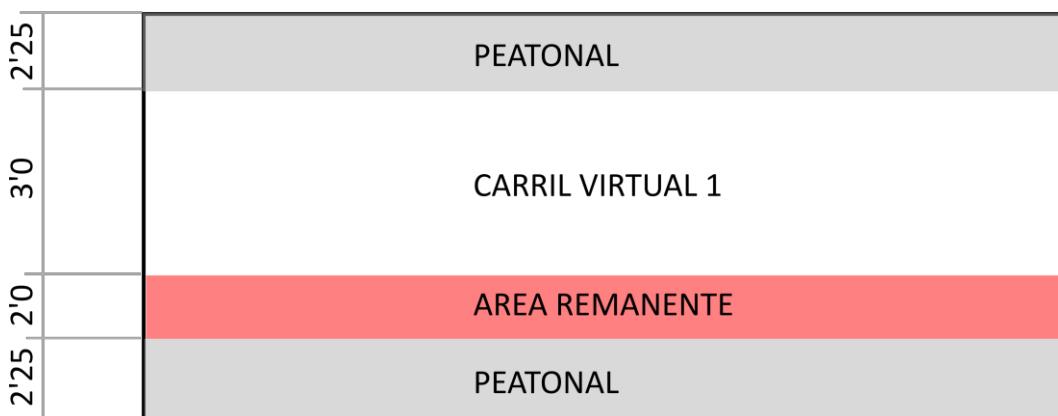


Figura 1. Diagrama de los carriles virtuales en el puente de piedra

B.VII.I.II. Cargas Verticales

Tráfico de vehículos

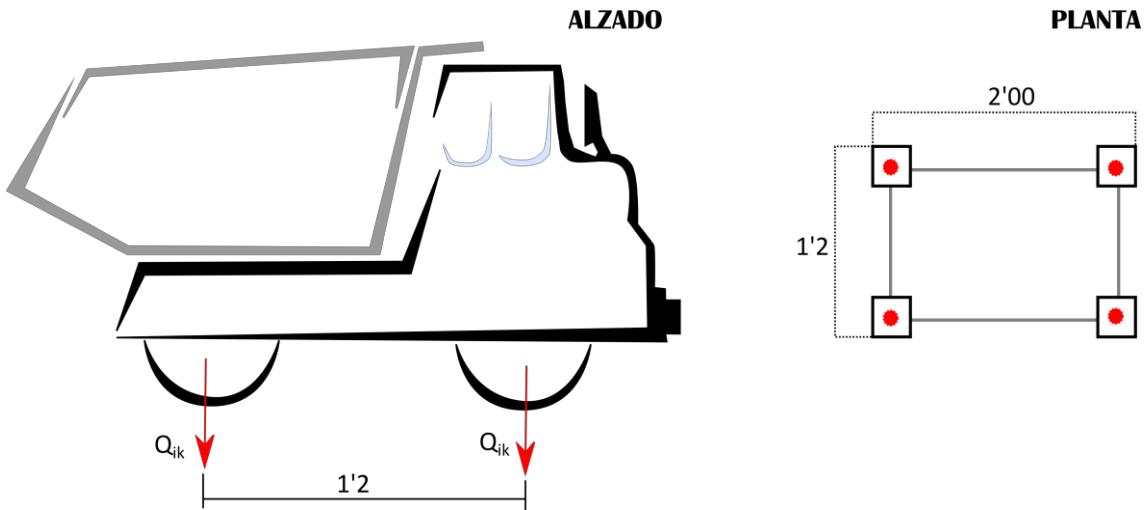


Figura 2. Diagrama de cargas para tráfico de vehículos

Se considerará un vehículo de 2 ejes separados transversalmente y centrado en el carril con una carga por eje de Q_{ik} . Para comprobaciones locales se colocará el vehículo en la posición más desfavorable y se considerará una carga de $Q_{ik}/2$ distribuida en cuadrados de 0'4 metros de lado.

Por último se considerará una sobrecarga sobre el área remanente y el carril virtual según la Tabla VII-2.

Tabla VII-2. Cargas en el tráfico de vehículos (TABLA 4.1-b IAP-11)

Zona	$2 \cdot Q_{ik} (\text{kN})$	$q_{ik} (\text{kN/m}^2)$
Carril 1	2·300	9
Área remanente	0	2'5

Tránsito peatonal

Se considera una sobrecarga uniforme de 5 kN/m² en las zonas de tránsito peatonal.

Por lo que finalmente la distribución de cargas queda como sigue en la Figura 3.

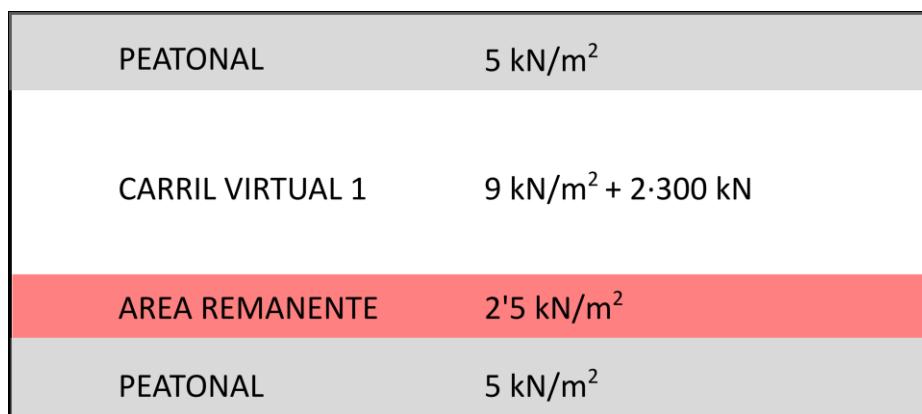


Figura 3. Distribución de sobrecargas uniformes en cada carril

B.VII.II. FUERZAS HORIZONTALES

Frenado y arranque

Se consideran despreciables frente a la magnitud de las cargas restantes.

Fuerza centrífuga y otras fuerzas transversales

Se consideran despreciables debido a la trazada recta del puente y a la baja velocidad de circulación.

B.VII.III. GRUPOS DE CARGAS DE TRÁFICO

La concomitancia de las distintas componentes de la sobrecarga de uso se tendrá en cuenta mediante la consideración de los grupos de cargas de tráfico de la Tabla VII-3.

Tabla VII-3. Grupos de cargas (TABLA 4.1-c IAP-11)

Grupo	Vehículo Pesado	PLATAFORMA		ACERA	
		Sobrecarga de uso	Aglomeración de personas	Horizontal	Vertical
1	2·300	9 2'5	-	-	2'5
2	0'75·2·300	0'4·9 0'4·2'5	-	360+2'7·L	-
3	-	-	-	-	5
4	-	-	5	-	5

Se considera que estos grupos, excluyentes entre sí, definen el valor característico de la sobrecarga de uso cuando se combina con el resto de las acciones.

B.VII.IV. TREN DE CARGAS PARA COMPROBACIÓN DE FATIGA

Para la comprobación del estado límite último de fatiga se considerarán las acciones variables repetidas producidas por la acción del tráfico que se prevé que actúen a lo largo de la vida útil del puente. El modelo de cargas para fatiga consiste en un vehículo de cuatro ejes, de dos ruedas cada eje. La carga en cada eje será de 120 kN y la superficie de contacto de cada rueda se tomará igual a un cuadrado de 0'4 x 0'4 m. La separación entre ejes y entre las ruedas de un mismo eje será de 1'2 metros entre ejes del mismo tren y 6 metros entre trenes. Alternativamente se podrán emplear datos reales de tráfico, ajustados o extrapolados, en su caso, por métodos estadísticos apropiados.

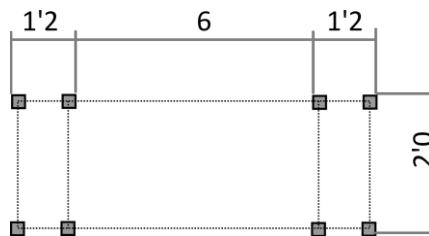


Figura 4. Geometría del tren de cargas para fatiga

B.VII.V. EMPUJE SOBRE BARANDILLA

Se adoptará una clase de carga tal que la fuerza horizontal perpendicular al elemento superior de la barandilla sea como mínimo 1'5 kN/m. Además se considerará simultánea con la sobrecarga uniforme de uso peatonal.

B.VII.VI. VIENTO

En general, la acción del viento se asimilará a una carga estática equivalente, salvo que, sea necesario además considerar los efectos aeroelásticos.

B.VII.VI.I. Velocidad Básica del viento

La velocidad básica fundamental del viento es la velocidad media a lo largo de un periodo de 10 minutos, con un periodo de retorno de 50 años, con independencia de la dirección del viento y la época del año a una altura de 10 m sobre el suelo.

Se obtiene de la expresión:

$$V_b = C_{dir} C_{season} V_{b,0}$$

Donde tomaremos los coeficientes como 1 y la velocidad básica fundamental según el mapa de isotacas de la normativa.

Para un periodo de retorno diferente de 50 años la velocidad básica del viento será:

$$V_b(T) = v_b C_{prob}$$

Para un periodo de retorno de 100 años el coeficiente será de 1'04.

Así pues, Zaragoza se sitúa en la zona B del mapa de isotacas, por lo que la velocidad básica fundamental del viento es de 27 m/s. Aplicándole el coeficiente de 1'04 se obtiene que la velocidad básica del viento es de **28'08 m/s.**

B.VII.VI.II. Velocidad media del viento

La velocidad media del viento a una altura z sobre el terreno dependerá de la rugosidad del terreno, de la topografía y de la velocidad básica del viento, y se determinará según:

$$V_m(z) = c_r(z) C_0 V_b(T)$$

De la tabla 4.2-b de la normativa para coeficientes según el entorno se deduce que el puente se sitúa en una zona urbana en la que al menos el 15% de la superficie está edificada y la altura media de los edificios excede los 15 m (entorno IV), por lo que sus coeficientes serán los indicados en la Tabla VII-4.

Tabla VII-4. Coeficientes según el tipo de entorno (TABLA 4.2-b IAP-11)

Entorno	K_r	$Z_0(m)$	$Z_{min}(m)$
IV	0'235	1	10

Considerando además que Zaragoza está situada en un valle y, más allá, el río está situado en el cauce del río, parece claro suponer que se producirá un encauzamiento del viento por lo que se tomará el coeficiente c_0 igual a 1'1.

Aplicando los coeficientes de la Tabla VII-4 el factor de rugosidad queda de la siguiente forma:

$$c_r = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{Z_0}\right) \text{ si } z \geq z_{min}$$

$$c_r = c_r(z_{min}) \text{ si } z \leq z_{min}$$

$$c_r = 0'235 \cdot \ln(z) \text{ si } z \geq 10 \text{ m}$$

$$c_r = 0'541 \text{ si } z < 10 \text{ m}$$

Así pues las funciones de la velocidad media dependientes de la altura (z) quedan como siguen:

$$z < 10 \rightarrow v_m = 16'71 \frac{m}{s}$$

$$z \geq 10 \rightarrow v_m = 7'259 \cdot \ln(z) \frac{m}{s}$$

B.VII.VI.III. Empuje del viento

Se calculará por separado para cada elemento del puente

$$F_w = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(T) \right] \cdot c_e(z) \cdot c_f \cdot A_{ef} (N)$$

$$P_w = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(T) \right] \cdot c_e(z) \cdot c_f \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

El coeficiente de exposición en función de la altura tiene la siguiente forma:

$$c_e = k_r^2 \cdot \left[c_0^2 \cdot \ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot k_l \cdot c_0 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \quad z \geq z_{min}$$

$$c_e = c_e(z_{min}) \quad z < z_{min}$$

Teniendo en cuenta los coeficientes anteriormente determinados y, el factor de turbulencia, k_l que se tomará igual a 1'0, las funciones de los coeficientes quedan:

$$c_e = 0'0552 \cdot [1'21 \cdot \ln^2(z) + 7'7 \cdot \ln(z)] \quad z \geq 10$$

$$c_e = 1'3334 \quad z < 10$$

Para los coeficientes de fuerza se referencia a la Tabla 4.2-b de la IAP-11 para secciones habituales.

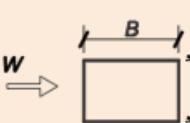
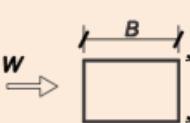
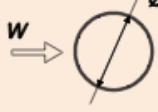
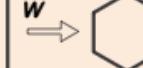
	$\frac{B}{h}$	$\leq 0,2$	$0,4$	$0,6$	$0,7$	$1,0$	$2,0$	$5,0$	$\geq 10,0$
	c_f	2,0	2,2	2,35	2,4	2,1	1,65	1,0	0,9
 $c_f = 1,4$	 $c_f = 0,7$	sección circular con superficie lisa y tal que:		sección circular con superficie rugosa ^(*) , o lisa tal que:		$\emptyset v_b(T) \sqrt{c_e(z)} > 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $c_f = 1,2$			
 $c_f = 1,8$	 $c_f = 1,6$	 $c_f = 1,45$	 $c_f = 1,3$						
 $c_f = 1,6$	 $c_f = 2,2$	 $c_f = 2,0$							

Figura 5. Tabla 4.2-b de la IAP-11 (32)

B.VII.VI.IV. Empuje del viento

Efectos provocados por el viento transversal. Empuje horizontal.

Existen tableros de alma llena de tipo cajón (sencillo o múltiple), las losas o los tableros de vigas. A falta de datos experimentales, el coeficiente de fuerza en la dirección X se determinará en la expresión:

$$c_{f,x} = 2'5 - 0'3(B/h_{eq})$$

La altura equivalente incluye la de cualquier elemento no estructural completamente opaco al paso del viento. Sin embargo este coeficiente está limitado inferior y superiormente (1'3 ; 2'4).

Efectos provocados por el viento transversal. Empuje vertical.

$$F_{w,z} = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(T) \right] \cdot c_e(z) \cdot c_{f,z} \cdot A_{ref,z}$$

Con el coeficiente de exposición como el detallado anteriormente y el coeficiente de fuerza en dirección z igual a $\pm 0'9$.

Nota: en puentes de menos de 40 m de luz y de menos de 20 metros de altura máxima de pila, podrá considerarse únicamente el viento transversal.

B.VII.VI.V. Succión

Debido a que el aire que atraviesa el puente se abre pueden generarse zonas de vacío en la parte posterior del puente que, a su vez, generan una tracción debido a la succión que puede ser muy importante.

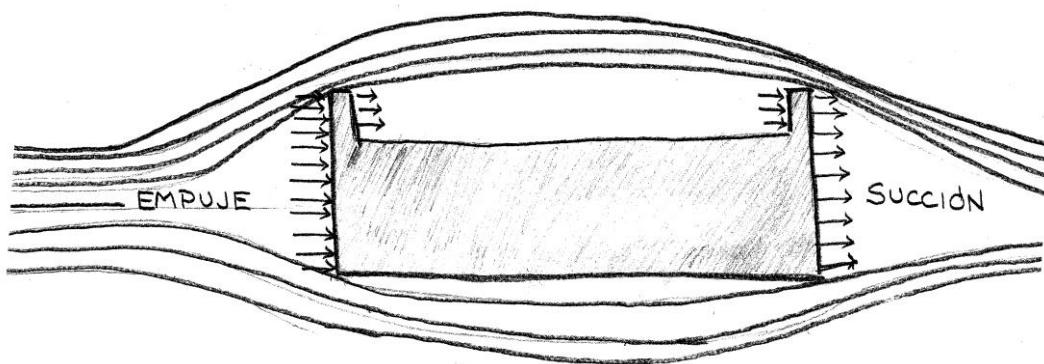


Figura 6. Succión producida a sotavento debido al paso de aire

En el código técnico se dan unos coeficientes de succión dependiendo de las formas geométricas de las cubiertas y del edificio. Para ajustarlo al caso de estudio del puente se considerará que se encuentra entre 0'8 y 1'2 veces el empuje que genera el mismo viento sobre la cara de barlovento.

B.VII.VI.VI. Efectos aeroelásticos

A efectos de esta instrucción, no será necesario comprobar los efectos aeroelásticos en puentes y pasarelas que cumplan las tres condiciones siguientes:

- Luz inferior a 200 m en puentes y a 100 m en pasarelas.
- Luz efectiva (máxima distancia entre puntos de momento flector nulo bajo la acción del peso propio) menor que 30 veces el canto.
- Anchura del tablero superior a 1/10 de la distancia entre puntos de momento transversal nulo bajo la acción del viento transversal.

Debido a la gran masa del puente y su gran canto de elementos se considera que los efectos aeroelásticos no son de importancia en el puente de piedra.

B.VII.VII. ACCIÓN TÉRMICA

No se consideran acciones térmicas como determinantes en el puente.

B.VII.VIII. NIEVE

Solo es necesario considerarla en alta montaña o durante el proceso de construcción. Se considera que Zaragoza está en la Zona 2 a 210 m de altura por lo que la sobrecarga de nieve a considerar sería de 0'5 kN/m².

B.VII.IX. ACCIÓN DEL AGUA

B.VII.IX.I. Empuje Hidrostático

No se considera determinante para el estudio del puente debido al poco calado y que actuará directamente sobre las bases de las pilas y las cimentaciones.

B.VII.IX.II. Empuje Hidrodinámico

Debido a corrientes de agua y arrastres

$$E = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2(T) \right] \cdot c_f \cdot A(T) \quad (N)$$

Hasta la fecha la mayor avenida registrada se produjo en 1961 con un caudal de 5.000 m³/s. Sin embargo, este evento no podría volver a suceder debido a las regulaciones del río mediante las presas. Así pues se estima una velocidad media adecuada de unos 5 m/s para los valores de una riada.

B.IX. BASES PARA COMBINACIÓN DE ACCIONES

B.IX.I. VALORES REPRESENTATIVOS

Permanentes

- G_k
- $G_{k,sup}$
- $G_{k,inf}$

Variables

- Combinación $\Psi_0 \cdot Q_k$
- Frecuente $\Psi_1 \cdot Q_k$
- Casi permanente $\Psi_2 \cdot Q_k$

		ACCIÓN	ψ_0	ψ_1	ψ_2	
Sobrecarga de uso	gr 1, Cargas verticales	Vehículos pesados	0,75	0,75	0	
		Sobrecarga uniforme	0,4	0,4	0 / 0,2 ⁽¹⁾	
		Carga en aceras	0,4	0,4	0	
	gr 2, Fuerzas horizontales		0	0	0	
		gr 3, Peatones	0	0	0	
	gr 4, Aglomeraciones		0	0	0	
		Sobrecarga de uso en pasarelas	0,4	0,4	0	
Viento	F_{wk}	En situación persistente	0,6	0,2	0	
		En construcción	0,8	0	0	
		En pasarelas	0,3	0,2	0	
Acción térmica		T_k	0,6	0,6	0,5	
Nieve		$Q_{Sn,k}$	En construcción	0,8	0	0
Acción del agua	W_k	Empuje hidrostático	1,0	1,0	1,0	
		Empuje hidrodinámico	1,0	1,0	1,0	
Sobrecargas de construcción		Q_c		1,0	0	1,0

(1) El factor de simultaneidad ψ_2 correspondiente a la sobrecarga uniforme se tomará igual a 0, salvo en el caso de la combinación de acciones en situación sísmica (apartado 6.3.1.3), para la cual se tomará igual a 0,2.

Figura 7. Factores de simultaneidad (TABLA 6.1-a IAP-11) (32)

ACCIÓN	EFFECTO	
	ESTABILIZADOR	DESESTABILIZADOR
Peso propio	0,9 ⁽¹⁾	1,1 ⁽¹⁾
Permanente (G y G^*)	Carga muerta	0,9 ⁽¹⁾
	Empuje del terreno	1,0
	Sobrecarga de uso	0
Variable (Q)	Sobrecarga de uso en terraplenes	0
	Acciones climáticas ⁽²⁾	0
	Empuje hidrostático	0
	Empuje hidrodinámico	0
	Sobrecargas de construcción	0

(1) Los valores de 0,9 y 1,1 podrán sustituirse por 0,95 y 1,05 respectivamente, si se prevé la colocación de sistemas de control que permitan conocer, durante la ejecución de la obra, el valor de las fuerzas de desequilibrio y si se pueden adoptar las medidas correctoras necesarias para mantener este valor dentro de los límites que garanticen la seguridad de todos los elementos de la estructura afectados por esta acción. Los equipos y sistemas de control deberán ser definidos y valorados en los diferentes documentos del proyecto, de forma que sea preceptiva su instalación en la obra, incluyéndose una descripción detallada de las medidas correctoras que deberán adoptarse caso de ser necesarias.

(2) Por acciones climáticas se entiende la acción térmica, el viento y la nieve.

Figura 8. Coeficientes parciales ELU equilibrio (TABLA 6.2-a IAP-11) (32)

ACCIÓN	EFECTO	
	FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)		
Peso propio	1,0	1,35
Carga muerta	1,0	1,35
Pretensado P_1	1,0	1,0 / 1,2 ⁽¹⁾ / 1,3 ⁽²⁾
Pretensado P_2	1,0	1,35
Otras presolicitaciones	1,0	1,0
Permanente de valor no constante (G^*)		
Reológicas	1,0	1,35
Empuje del terreno	1,0	1,5
Asientos	0	1,2 / 1,35 ⁽³⁾
Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,35
Variable (Q)		
Sobrecarga de uso	0	1,35
Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,5
Acciones climáticas	0	1,5
Empuje hidrostático	0	1,5
Empuje hidrodinámico	0	1,5
Sobrecargas de construcción	0	1,35

- (1) El coeficiente $\gamma_{G^*} = 1,2$ será de aplicación al pretensado P_1 en el caso de verificaciones locales tales como la transmisión de la fuerza de pretensado al hormigón en zonas de anclajes, cuando se toma como valor de la acción el que corresponde a la carga máxima (tensión de rotura) del elemento a tesar.
- (2) El coeficiente $\gamma_{G^*} = 1,3$ se aplicará al pretensado P_1 en casos de inestabilidad (pandeo) cuando ésta pueda ser inducida por el axil debido a un pretensado exterior.
- (3) El coeficiente $\gamma_{G^*} = 1,35$ corresponde a una evaluación de los efectos de los asientos mediante un cálculo elasto-plástico, mientras que el valor $\gamma_{G^*} = 1,2$ corresponde a un cálculo elástico de esfuerzos.

Figura 9. Coeficientes parciales ELU resistente (TABLA 6.2-b IAP-11) (32)

ACCIÓN	EFFECTO	
	FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)		
Peso propio	1,0	1,0
Carga muerta	1,0	1,0
Pretensado P_1	0,9 ⁽¹⁾	1,1 ⁽¹⁾
Pretensado P_2	1,0	1,0
Otras presolicitaciones	1,0	1,0
Permanente de valor no constante (G')		
Reológicas	1,0	1,0
Empuje del terreno	1,0	1,0
Asientos	0	1,0
Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,0
Variable (Q)		
Sobrecarga de uso	0	1,0
Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,0
Acciones climáticas	0	1,0
Empuje hidrostático	0	1,0
Empuje hidrodinámico	0	1,0
Sobrecargas de construcción	0	1,0

(1) Para la acción del pretensado se tomarán los coeficientes que indique la EHE-08 o normativa que la sustituya. En la tabla figuran los valores que la EHE-08 recoge para el caso de estructuras postesas. En el caso de estructuras pretesas, los coeficientes parciales son 0,95 y 1,05 para efecto favorable y desfavorable, respectivamente.

Figura 10. Coeficientes parciales ELS. (TABLA 6.2-c IAP-11) (32)

B.IX.II. COMBINACIÓN DE ACCIONES

B.IX.II.I. COMBINACIÓN ELU

En situación persistente o transitoria

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Notas:

- Cuando se considere la acción del viento como predominante no se tendrá en cuenta la actuación de la sobrecarga de uso.
- Cuando se considere la sobrecarga de uso como predominante, se considerará el viento concomitante correspondiente.

- Cuando se considere el grupo de cargas de tráfico gr 2 (fuerzas horizontales con su valor característico), no se considerará la actuación del viento ni de la nieve.

En situación accidental

$$\sum G_{k,j} + \sum G_{k,m}^* + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + A_d$$

B.IX.II.II. COMBINACIÓN ELS

Combinación característica

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Combinación frecuente

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Combinación casi-permanente

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Teniendo en cuenta los siguientes grupos de cargas,

- Permanente (G)
 - Pesos
- Variables (Q)
 - Sobrecarga de uso gr 1
 - Sobrecarga de uso gr 2
 - Sobrecarga de uso gr 3
 - Sobrecarga de uso gr 4
 - Viento
 - Agua
- Accidentales
 - Impacto de vehículo 1
 - Impacto de vehículo 2

ESTADOS LÍMITES ULTIMOS. Persistente o transitoria (Equilibrio)											
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)				Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Agua (Q6)	A1 A2
1 (Grupo1)	0'9 (estab)		1'35			1'35.0	1'35.0	1'35.0	0'6·1'5	1·1'5	0 0
2 (Grupo2)	0'9 (estab)	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1'35		1'35.0	1'35.0	1'35.0	0	1·1'5	0 0
3 (Grupo3)	0'9 (estab)	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1'35.0	1'35	1'35.0	1'35.0	1'35.0	0'6·1'5	1·1'5	0 0
4(Grupo4)	0'9 (estab)	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1'35.0	1'35.0	1'35	1'35	1'35	0'6·1'5	1·1'5	0 0
5(Viento)	0'9 (estab)		0		0	0	0	0	1'5	1·1'5	0 0
6(Agua)	0'9 (estab)	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1'35.0	1'35.0	1'35.0	1'35.0	1'35.0	0'6·1'5	1'5	0 0
ESTADOS LÍMITES ULTIMOS. Persistente o transitoria (Resistente)											
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)				Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Agua (Q6)	A1 A2
7 (Grupo1)	1'35 (Desfav)		1'35			1'35.0	1'35.0	1'35.0	0'6·1'5	1·1'5	0 0
8 (Grupo2)	1'35 (Desfav)	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1'35		1'35.0	1'35.0	1'35.0	0	1·1'5	0 0
9 (Grupo3)	1'35 (Desfav)	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1'35.0	1'35	1'35.0	1'35.0	1'35.0	0'6·1'5	1·1'5	0 0
10 (Grupo4)	1'35 (Desfav)	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1'35.0	1'35.0	1'35	1'35	1'35	0'6·1'5	1·1'5	0 0
11 (Viento)	1'35 (Desfav)		0		0	0	0	0	1'5	1·1'5	0 0
12 (Agua)	1'35 (Desfav)	1'35·(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1'35.0	1'35.0	1'35.0	1'35.0	1'35.0	0'6·1'5	1'5	0 0

ESTADOS LIMITES DE SERVICIO Característica (Irreversible)									
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)		Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Aqua (Q6)	A1 A2
31 (Grupo1)	1		1	0	0	0	0'6	1	0 0
32 (Grupo2)	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		1	0	0	0'6	1	0 0
33 (Grupo3)	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		0	1	0	0'6	1	0 0
34 (Grupo4)	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		0	0	1	0'6	1	0 0
35 (Viento)	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		0	0	0	1	1	0 0
36 (Agua)	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		0	0	0	0'6	1	0 0
ESTADOS LIMITES DE SERVICIO Frecuente (Reversible)									
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)		Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Aqua (Q6)	A1 A2
37 (Grupo1)	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)		0	0	0	0	1	0 0
38 (Grupo2)	1		0	0	0	0	0	1	0 0
39 (Grupo3)	1	0		0	0	0	0	1	0 0
40 (Grupo4)	1	0		0	0	0	0	1	0 0
41 (Viento)	1	0		0	0	0	0'2	1	0 0
42 (Agua)	1	0		0	0	0	0	1	0 0
ESTADOS LIMITES DE SERVICIO Frecuente (Reversible)									
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)		Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Aqua (Q6)	A1 A2
43 (Agua)	1		0	0	0	0	0	1	0 0

B.X. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

B.X.I. CRITERIOS FUNCIONALES RELATIVOS A FLECHAS

La flecha vertical máxima correspondiente al valor frecuente de la sobrecarga de uso no supera los valores siguientes:

$L/1200$ en puentes con zonas peatonales

L: luz del vano.

B.X.II. ESTADO LÍMITE DE VIBRACIONES EN PUENTES CON ZONAS PEATONALES

En general, se considerará verificado el estado límite de servicio de vibraciones si se cumple el criterio de limitación de las flechas verticales establecidas anteriormente.

Aunque se cumplan las flechas, será necesario realizar un análisis dinámico en puentes con tipologías estructurales singulares o nuevos materiales.

La aceleración vertical máxima bajo el paso de un camión de 400 kN de peso sobre la plataforma, a distintas velocidades: de 20 a 80 km/h con incrementos de 10 en 10 km/h, no supere los valores límite, función del nivel de confort exigido, que se establecen para el caso de pasarelas.

B.X.III. ESTADO LÍMITE DE VIBRACIONES EN PASARELAS PEATONALES

En general se considera verificado si las frecuencias naturales se sitúan fuera de los siguientes rangos:

- Rango crítico para vibraciones verticales y longitudinales: 1'25 a 4'6 Hz
- Rango crítico para vibraciones laterales: de 0'5 a 1'2 Hz

Los rangos de aceleraciones aceptados son:

GRADO DE CONFORT	RANGOS DE ACCELERACIONES	
	VERTICALES	LATERALES
Máximo	< 0,50 m/s ²	< 0,10 m/s ²
Medio	0,50 a 1,00 m/s ²	0,10 a 0,30 m/s ²
Mínimo	1,00 a 2,50 m/s ²	0,30 a 0,80 m/s ²
No aceptable	> 2,50 m/s ²	> 0,80 m/s ²

Figura 11. Aceleraciones para el confort de peatones (TABLA 7.2-a IAP-11) (32)

B.XI. ACCIONES APlicadas al CÁLCULO

Así pues, tras recorrer la normativa, se van a establecer los criterios de carga para el cálculo: pesos, diferentes cargas variables y sus combinaciones.

B.XI.I. ACCIONES PERMANENTES

B.XI.I.I. Pesos

- Hormigón armado: 2.551'02 kg/m³
- Elementos de caliza: 3.061'22 kg/m³
- Rellenos granulares: 2.244'89 kg/m³

B.XI.II. ACCIONES VARIABLES

B.XI.II.I. Sobrecarga de uso

Grupo 1

Vehículo: 600 kN

Sobrecarga en calzada: 9 kN/m²

Sobrecarga en área remanente: 2'5 kN/m²

Sobrecarga en acera: 2'5 kN/m²

Grupo 2

Vehículo: 450 kN

Sobrecarga en calzada: 3'6 kN/m²

Sobrecarga en área remanente: 1 kN/m²

Grupo 3

Sobrecarga en acera: 5 kN/m²

Grupo 4

Sobrecarga por aglomeración de peatones: 5 kN/m²

Sobrecarga en acera: 5 kN/m²

B.XI.II.II. Comprobación de fatiga

Tren de cargas de 4 ejes de 120 kN cada eje distribuidos según el apartado de “Tren de Cargas para Comprobación de Fatiga”.

B.XI.II.III. Viento

Los valores para la velocidad básica son:

Tabla XI-1. Valores de velocidad básica del viento

Velocidad Basica (m/s)	27.000
Velocidad Basica (km/h)	97.200
Coef. Periodo retorno	1.040
Velocidad Básica (m/s)	28.080
Velocidad Básica (km/h)	101.088
Coef. Experiencia Local	1.385
Velocidad Básica (m/s)	38.889
Velocidad Básica (km/h)	140.000

Si se observa detenidamente el Código Técnico de la Edificación (33) los valores que se obtienen para viento en Zaragoza no ajustan a la realidad que se experimenta. Es decir, que la velocidad básica del viento en un periodo de retorno de 100 años no corresponde a un valor de 100 km/h en absoluto siendo, de hecho, bastante superior y, situándose en torno a 140 km/h.

Por lo tanto se vio la necesidad de añadir un coeficiente de experiencia local que corrigiese éste hecho. Por tanto se establece una velocidad básica del viento de 140 km/h corregido con un coeficiente de 1'385.

En cuanto a las velocidades medias quedarían de la forma que siguen:

Tabla XI-2. Velocidad media del aire

Velocidad media			
Kr	0.235		
Z_o (m)	1		
Z_{min} (m)	10		
Encauzamiento	1.1		
Z	Cr	V_m (m/s)	V_m (km/h)
0	0.541	16.714	60.169
2	0.541	16.714	60.169
4	0.541	16.714	60.169
6	0.541	16.714	60.169
8	0.541	16.714	60.169
10	0.541	16.714	60.169

12	0.584	18.037	64.934
14	0.620	19.156	68.962
16	0.652	20.125	72.451
18	0.679	20.980	75.529
20	0.704	21.745	78.282

Por último, a partir de los coeficientes y valores de velocidad y, en función de las alturas, se calculan los empujes del viento y, además, una aproximación de las succiones que sufriría considerando un factor de ampliación de un 20% sobre los empujes. Además, se han tenido en cuenta unas alturas estándar de actuación de las pilas y los tableros así, por ejemplo, la influencia del tablero en el empuje solo se calcula a partir de los 14 m de altura que es donde empieza a existir.

Tabla XI-3. Cálculos de la presión del viento

Empuje del viento						
Z	Ce	P _w tablero	P _w Tajamar1	P _w Tajamar 2	S tablero	S tambor
0	1.133		21318.489			25582.187
2	1.133		21318.489			25582.187
4	1.133		21318.489			25582.187
6	1.133		21318.489			25582.187
8	1.133			15988.867		19186.640
10	1.133			15988.867		19186.640
12	1.223			17254.885		20705.862
14	1.299	22906.611		18325.289	27487.933	21990.346
16	1.364	24065.643		19252.514	28878.771	23103.017
18	1.422	25087.981		20070.385	30105.577	24084.462
20	1.474	26002.494		20801.995	31202.993	24962.394

Nota: los valores de presión y succión se determinan en N/m².

B.XI.II.IV. Acción del agua. Empuje hidrodinámico

Tabla XI-4. Cálculo del empuje hidrodinámico sobre las pilas

Empuje hidrodinámico	
Densidad (kg/m ³)	1000
Velocidad media (m/s)	5
Cf tajamar	1.6
Empuje (N/m ²)	20000

B.XI.III. COMBINACIONES DE ACCIONES

Por último se incorporan las hipótesis finales que se van a implementar en el cálculo obviando aquellas irrelevantes.

ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS. Persistente o transitoria (Resistente)

Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)				Viento (Q5)	Agua (Q6)	A1 A2
1	1'35	1'35				0'9	1'5	0 0
2	1'35	1'35.(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	1'35	0	0	0	1'5	0 0
3	1'35	1'35.(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	0	1'35	0	0'9	1'5	0 0
4	1'35	1'35.(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	0	0	1'35	0'9	1'5	0 0
5	1'35	0	0	0	0	1'5	1'5	0 0
6	1'35	1'35.(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	0	0	0	0'9	1'5	0 0

ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO Característica (Irreversible)

Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)				Viento (Q5)	Agua (Q6)	A1 A2
7	1	1				0'6	1	0 0
8	1	(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	1	0	0	0'6	1	0 0
9	1	(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	0	1	0	0'6	1	0 0
10	1	(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	0	0	1	0'6	1	0 0
11	1	(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	0	0	0	1	1	0 0
12	1	(0'75.Vpesado+0'4.S uniforme + 0'4.Aceras)	0	0	0	0'6	1	0 0

ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO Frecuente (Reversible)										
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)			Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Aqua (Q6)	A1 A2
13	1	(0'75 Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)			0	0	0	0	1	0 0
14	1	0			0	0	0	0	1	0 0
15	1	0			0	0	0	0	1	0 0
16	1	0			0	0	0	0	1	0 0
17	1	0			0	0	0	0'2	1	0 0
18	1	0			0	0	0	0	1	0 0
ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO Frecuente (Reversible)										
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)			Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Aqua (Q6)	A1 A2
19	1	0			0	0	0	0	1	0 0

B.XI.IV. HIPÓTESIS DE SERVICIO LÓGICA

Por último sería necesario añadir una hipótesis de servicio que no contempla la normativa, puesto que es genérica, y que, sin embargo, sería interesante aplicar al puente de piedra de Zaragoza puesto que es el objeto de estudio de este proyecto: la afeción del paso de autobuses.

Para evaluar la hipótesis se realizarán las siguientes comprobaciones:

- Paso de un autobús por las siete claves de los arcos: autobús con carga de pasajeros máxima.
- Concentración de Urbanos de Zaragoza (antiguo TUZSA) en la que se llenase el puente de autobuses sin carga.

Estas dos hipótesis se comprobarán además en combinación con las situaciones de pesos, viento y agua de las hipótesis de Estado Límite de Servicio.

Datos técnicos de un autobús genérico IVECO Cityclas:

- Peso: 18.812 kg
- Distancia entre ejes: 6.120 mm
- Anchura: 2.550 mm
- Capacidad: 90 personas.
- Autobús cargado (75 kg de media): 25.562 kg

Por tanto, tras considerar todas las cargas y las hipótesis, las combinaciones quedan como siguen:

COMBINACIONES (DEFINITIVAS)

ESTADOS LÍMITES ULTIMOS. Persistente o transitoria (Resistente)							
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)	Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Aqua (Q6)
1	1'35	1'35	0	0	0	0'9	1'5
2	1'35	1'35.(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	1'35	0	0	0	1'5
3	1'35	1'35.(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	1'35	0	0'9	1'5
4	1'35	1'35.(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	1'35	0'9	1'5
5	1'35	0	0	0	0	1'5	1'5
6	1'35	1'35.(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	0	0'9	1'5
ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO Característica (Irreversible)							
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)	Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Aqua (Q6)
7	1	1	0	0	0	0'6	1
8	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	1	0	0	0'6	1
9	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	1	0	0'6	1
10	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	1	0'6	1
11	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	0	1	1
12	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	0	0'6	1
ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO Frecuente (Reversible)							
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1)	Gr2(Q2)	Gr3(Q3)	Gr4(Q4)	Viento (Q5)	Aqua (Q6)
13	1	(0'75·Vpesado+0'4·S uniforme + 0'4·Aceras)	0	0	0	0	1
14	1	0	0	0	0	0	1
15	1	0	0	0	0	0'2	1

HIPÓTESIS LÓGICA DE SERVICIO						
Hipótesis	Pesos (G)	Gr1 (Q1) - Vehículo Pesado Delante	Gr1 (Q1) - Vehículo Pesado Detrás	Gr1 (Q1) - Dist	Viento (Q5)	Agua (Q6)
17 (Arco 2)	1	0	0	0.4	0.6	1
18 (Arco 3)	1	0.75 (Arco 4)	0.75 (Arco 2)	0.4	0.6	1
19 (Arco 4)	1	0.75 (Arco 5)	0.75 (Arco 3)	0.4	0.6	1
20 (Arco 5)	1	0.75 (Arco 6)	0.75 (Arco 4)	0.4	0.6	1
21 (Arco 6)	1	0.75 (Arco 7)	0.75 (Arco 5)	0.4	0.6	1
22 (Arco 7)	1	0.75 (Arco 8)	0.75 (Arco 6)	0.4	0.6	1
23 (Arco 8)	1	0	0	0.4	0.6	1
24 (Atasco)	1	0	0	0.4	0.6	1

Índice de Figuras. Anexo B

Figura 1. Diagrama de los carriles virtuales en el puente de piedra	vii
Figura 2. Diagrama de cargas para tráfico de vehículos	viii
Figura 3. Distribución de sobrecargas uniformes en cada carril	ix
Figura 4. Geometría del tren de cargas para fatiga	x
Figura 5. Tabla 4.2-b de la IAP-11 (32)	xii
Figura 6. Succión producida a sotavento debido al paso de aire	xiii
Figura 7. Factores de simultaneidad (TABLA 6.1-a IAP-11) (32)	xv
Figura 8. Coeficientes parciales ELU equilibrio (TABLA 6.2-a IAP-11) (32)	xvi
Figura 9. Coeficientes parciales ELU resistente (TABLA 6.2-b IAP-11) (32)	xvii
Figura 10. Coeficientes parciales ELS. (TABLA 6.2-c IAP-11) (32)	xviii
Figura 11. Aceleraciones para el confort de peatones (TABLA 7.2-a IAP-11) (32)	xxii

Índice de Tablas. Anexo B

Tabla III-1. Pesos Específicos de diversos materiales (TABLA 3.1-a IAP-11)	v
Tabla III-2. Pesos de la bibliografía (22, 23)	v
Tabla VII-1. Definición de carriles virtuales (TABLA 4.1-a IAP-11)	vii
Tabla VII-2. Cargas en el tráfico de vehículos (TABLA 4.1-b IAP-11)	viii
Tabla VII-3. Grupos de cargas (TABLA 4.1-c IAP-11)	ix
Tabla VII-4. Coeficientes según el tipo de entorno (TABLA 4.2-b IAP-11)	xi
Tabla XI-1. Valores de velocidad básica del viento	xxiv
Tabla XI-2. Velocidad media del aire	xxiv
Tabla XI-3. Cálculos de la presión del viento	xxv
Tabla XI-4. Cálculo del empuje hidrodinámico sobre las pilas	xxvi

ANEXO C. CONSTRUCCIÓN

Arcos, bóvedas y cúpulas

Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras

Este apartado está compuesto de extractos y síntesis de la bibliografía (18)

C.I. EL CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA (1)

La construcción de fábrica (piedra, ladrillo o adobe) surge con los primeros asentamientos permanentes, con la agricultura y las primeras ciudades. Las primeras construcciones tenían muros de fábrica sobre los que se apoyaban troncos de árbol para formar suelos o techumbres.

El siguiente paso consistió en cubrir el espacio también con fábrica. La manera natural de salvar un vano a base de pequeñas piedras o ladrillos es formar un arco, y el arco se inventa en Mesopotamia o Egipto hace unos 6.000 años. No se sabe cómo se llegó a esta idea pero que no es algo evidente lo demuestra que otras culturas, mayas o incas, construyeron fábrica durante siglos sin jamás llegar a la idea de arco.

Un arco típico se construye apilando piedras unas a lado de otras sobre una estructura auxiliar de madera o cimbra. La cimbra da la forma al arco; se empiezan a colorar las piedras a partir de los arranques y colocada la última piedra en el centro, la clave, el arco queda terminado. Al bajar la cimbra las piedras tienden a caer. Así, una dovela que intenta caer empuja a las dos dovelas colindantes que contrarrestan ese empuje, y los empujes se transmiten, incrementados por los pesos. Si la forma del arco es correcta, y su espesor suficiente, estos empujes y contraempujes se anularán entre sí y el arco permanecerá en equilibrio. No obstante, las últimas piedras de los arranques del arco transmiten un empuje que debe ser contrarrestado. El arco debe estar apoyado firmemente contra algo que resista su empuje: unos machones o estribos de fábrica.

El arco empuja de forma permanente contra los estribos: "el arco nunca duerme" dice un antiguo proverbio árabe. Los estribos, las construcciones más o menos complicadas que resisten el empuje de los arcos y de las bóvedas lo transmiten hasta el terreno, son los que dan firmeza a los edificios. Conocer el empuje de los arcos para poder dimensionar adecuadamente sus estribos ha sido el problema central de la construcción en fábrica desde sus orígenes hasta la actualidad.

Hoy día asociamos empuje al concepto de fuerza, pero los antiguos constructores no distinguían claramente entre el empuje y su consecuencia, el estribo. Medían el empuje de los arcos por su efecto:

un arco empuja mucho si requiere grandes estribos, y poco si éstos son pequeños.

Actualmente calculamos el empuje de los arcos basándonos en la teoría de las estructuras: aplicando las leyes de la mecánica y de la resistencia de materiales. Este cálculo científico es relativamente reciente ya que nace a finales del siglo XVII, se desarrolla durante el siglo XVIII y se empleó a lo largo del siglo XIX. Sin embargo, antes del cálculo científico hubo otro cálculo, un cálculo tradicional fruto de otra teoría de las estructuras de fábrica.

La naturaleza de este cálculo tradicional es muy diferente de la del científico, pero su objetivo principal es idéntico: construir estructuras suficientemente seguras. El maestro medieval, o el moderno arquitecto o ingeniero, quieren lo mismo: disponer de un conjunto de procedimientos que les permita proyectar con seguridad sus estructuras. El cómo se llega a estos procedimientos concretos es un aspecto en cierto modo secundario; el constructor quiere por encima de todo levantar un edificio y que éste no se derrumbe en un plazo razonable.

El cálculo tradicional de bóvedas y estribos estaba basado en la experiencia, era un cálculo empírico fruto de la observación atenta de ejemplos construidos y en construcción, y también de algunos hundimientos. Estas observaciones cristalizaron en una serie de preceptos aplicables a los tipos estructurales más usuales en cada momento histórico; así, los arquitectos romanos daban casi siempre al espesor del tambor que soporta una cúpula de hormigón $1/7$ de la luz y esta proporción se verifica en numerosos edificios de tamaños muy diferentes. Los maestros góticos solían dar a sus estribos alrededor de $1/4$ de la luz de la nave central y, en el Renacimiento y Barroco los arquitectos daban a los estribos de sus bóvedas de cañón algo más de $1/3$.

El empleo de este tipo de reglas geométricas se puede rastrear desde la antigüedad clásica hasta nuestros días. Las reglas sólo recogen una pequeña parte del conjunto muy amplio de conocimientos que es preciso tener para construir un edificio abovedado. La estructura debe ser estable cuando está terminada y en cada proceso de construcción.

Por otro lado, la fábrica debe adquirir resistencia con la suficiente rapidez y para ello se emplea en cada caso el aparejo adecuado o, si es necesario, se colocan dispositivos auxiliares (p.e. zunchos). Además, el proceso de descimbrado puede ser crítico en algunos casos: ¿qué se descimbra antes, el arbotante o la bóveda? ¿cuánto tiempo hay que esperar antes de proseguir la construcción de una bóveda romana de hormigón?

Las reglas tradicionales de cálculo se refieren a la geometría de tipos estructurales concretos. Son una codificación de las proporciones de

estructuras estables. Sólo un maestro con experiencia podía enunciarlas y aplicarlas, o apartarse de ellas si lo consideraba conveniente.

Con frecuencia se ha considerado que estas reglas son acientíficas, por ser meramente empíricas. Pero si el método científico consiste en el enunciado de leyes – esto es, en el descubrimiento de la regularidad de ciertos fenómenos – a partir de la observación y la experimentación, los antiguos constructores siguieron un método rigurosamente científico. Cada edificio construido fue un experimento con éxito y ese experimento quedaba en pie para las sucesivas generaciones de constructores; cada ruina también era una fuente valiosa de información. Por otra parte, durante la construcción la estructura se mueve, se agrieta, y esta respuesta del edificio en construcción puede ser interpretada y, a menudo, sugiere medidas correctoras para aumentar la estabilidad de la obra.

El cálculo tradicional busca una teoría para ciertas bóvedas. El cálculo científico busca una teoría de bóvedas que se pueda aplicar a cualquier bóveda y esa teoría debe ser una parte de otra teoría general que engloba a todas las estructuras, sean de fábrica o no. Ambos tienen el mismo objetivo final: deducir un procedimiento seguro de cálculo. Pero el camino que se sigue es muy diferente, y su elección depende de una cierta visión del mundo, del ambiente social e intelectual en que trabaja el constructor.

Para un arquitecto romano o gótico al manejar una serie de “recetas” que conducían a buenos resultados era un procedimiento no sólo correcto sino habitual. A partir de la Revolución Científica este enfoque se vuelve inaceptable para cualquier persona culta. La “irracionalidad” de las reglas tradicionales, su falta aparente de fundamento, hace que los científicos, arquitectos e ingenieros ya a principios del siglo XVIII las rechacen con vehemencia o las ignoren por completo.

El profesor Heyman desde el marco de la moderna teoría de estructuras apunta a una solución: las reglas estructurales, la teoría tradicional de las estructuras, en definitiva, el énfasis en la geometría, es esencialmente correcto. En efecto, como se demuestra rigurosamente dentro del marco del moderno análisis límite de estructuras de fábrica, la seguridad de una estructura de fábrica depende de su forma geométrica independientemente de su tamaño y, en ese sentido, las reglas que han llegado hasta nosotros son del tipo correcto. Esto no significa que lo sean sino que su énfasis en aspectos geométricos es acertado y refleja un conocimiento de los parámetros esenciales de proyecto.

C.II. EL CÁLCULO CIENTÍFICO (1)

C.II.I. EL MATERIAL: LA FÁBRICA

Una “fábrica” es cualquier construcción o parte de ella hecha con piedra, ladrillo y argamasa. El material fábrica es, en sí mismo, una estructura y este término se deriva del latín *struere* que significa amontonar, apilar. Se construye apilando o amontonando piedras de forma ordenada, disponiendo en general piedras más pequeñas y argamasa o mortero para llenar las juntas. Además un edificio puede estar compuesto de una combinación de diversas fábricas.

La fábrica es, pues, un material esencialmente discontinuo y anisótropo. No parece que se pueda caracterizar de la misma forma que los materiales habituales hoy en día (acero, madera y hormigón armado) como un material homogéneo e isótropo con ciertas constantes elásticas (módulo de Young y de Poisson). Además, el enfoque elástico es un enfoque de resistencia, esto es, considera que de los tres requisitos estructurales de resistencia, rigidez y estabilidad es el primero el que rige el proyecto de una estructura.

Cualquier análisis estructural elástico (MEF) trata de conocer la tensión en dado punto de la estructura y compararla con las admisibles obtenidas en ensayos de laboratorio. En el caso de las estructuras de fábrica el requisito de la resistencia juega un papel secundario y no considera las deformaciones elásticas.

C.II.I.I. Los elementos de fábrica

Piedra

La elección de la piedra depende de muchos factores: resistencia, durabilidad, facilidad de labra, etc. La cercanía de la cantera era asimismo importante. Si la piedra va al exterior debe ser capaz de resistir las inclemencias del tiempo: lluvia, heladas, cambios de temperatura. Vitruvio (II, 7) recomendaba para verificar la calidad de una cantera nueva dejar unas piedras expuestas al aire libre durante dos años.

Las propiedades mecánicas de las piedras sólo se empezaron a estudiar de forma científica a partir de mediados del siglo XVIII. Hasta entonces se había recurrido a la observación de ejemplos construidos. En 1774 se publicó la primera tabla de propiedades mecánicas de piedras por Gauthey (*Traité des ponts*) en el que se acumulan extensas tablas de ensayos realizados sobre probetas de forma cúbica. No obstante, la forma y el tamaño de la probeta influyen en la carga de rotura como también lo hace la forma de asiento de la probeta en la máquina de ensayo. Finalmente, el contenido de humedad de la piedra puede producir variaciones sustanciales.

La característica más relevante de la piedra es su elevada resistencia a compresión (σ_c) y la baja resistencia a tracción (σ_t) entre 1/10 y 1/20 de la resistencia a compresión. No hay que olvidar, además, que la piedra es de carácter frágil; un material es frágil cuando la energía de fractura es baja: hace falta poca energía para formar una superficie de rotura.

A finales del siglo XIX se consideró incluir el análisis elástico de las construcciones de fábrica y, por tanto, se añadió el módulo elástico de Young que es orientativo puesto que varía con la tensión de trabajo e , incluso, es distinto para distintas piedras de la misma cantera.

Tabla II-1. Propiedades mecánicas de las piedras (18)

	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (kN/mm ²)	γ (kN/m ³)
Tiza	2-12	0.1-1.5	2-10	14.0
Caliza	7-40	0.5-5	5-30	21.0
Caliza compacta	40-100	4-15	30-60	23.6
Esquistos	15-70	1-10	7-50	22.2
Granito	60-180	6-15	15-70	28.5
Cuarcita	80-300	7-20	25-80	30.6

Una última propiedad fundamental de las piedras es su elevado coeficiente de rozamiento siendo fundamental para dar cohesión a las fábricas.

Tabla II-2. Coeficientes y ángulo de rozamiento entre piedras (18)

Fuente	Piedra	ϕ (°)	$\mu (= \tan \phi)$
Rondelet	Piedra caliza grano fino	30	0.58
Boistard	Piedra caliza sup. picada	38	0.78
Regnier	Madera sobre piedra	30	0.58
Perronet	Piedra (sin especificar)	39	0.81
Rennie	Granito	33	0.65

Para los puentes de fábrica se suele tomar en casi todos los manuales $\mu=0.5$ ($\phi = 27$), valor que incluye un cierto coeficiente de seguridad.

Mortero

Se llama mortero o argamasa al elemento que se dispone entre las piedras o ladrillos, tratando de proporcionar un mejor asiento y dar

cohesión a la fábrica. La naturaleza de los morteros es muy variable. En un principio la propia tierra arcillosa se empleó como mortero, pero, en general, los morteros tradicionales son los morteros de cal, hechos mezclando cal apagada, arena y agua. Los romanos llegaron a fabricar morteros de gran calidad e inventaron el mortero hidráulico (añadiendo polvo de puzolana o cerámica machacada) que fragua en ausencia de aire. La calidad de los morteros romanos solo fue igualada en el siglo XIX. También se han empleado tradicionalmente morteros de yeso, principalmente en la construcción tabicada. A veces se mezclaba el yeso con la cal para acelerar el fraguado.

La resistencia a compresión está comprendida entre 2 y 15 MPa y, por el contrario, la resistencia a tracción está comprendida entre 0.1 y 1 MPa. El módulo de Young es muy variable. Una propiedad significativa es la adherencia.

La adherencia debe ser suficiente para que no se desprenda la piedra o el ladrillo. La adherencia del mortero de cal y piedra oscila entre 0.07 y 0.2 MPa y en los de yeso y ladrillo puede alcanzar 1 Mpa.

C.II.I.II. Las fábricas: propiedades mecánicas

Cómo podemos caracterizar desde un punto de vista mecánico el material fábrica, de manera que las propiedades que le atribuyamos sean comunes a todas las fábricas, paso previo a la elaboración de una teoría de las estructuras de fábrica. Como se ha dicho, la tendencia actual es a caracterizar un material en primer lugar por su resistencia (compresión, tracción y cortadura) atribuyéndole, además, unas propiedades constitutivas (constantes elásticas) que permitan su análisis estructural.

Resistencia a compresión de las fábricas de piedra

Se realizaron distintos ensayos sobre piedra: primero en un cubo; luego dos cubos uno encima de otro y, finalmente, tres cubos superpuestos. La probeta de dos cubos resistía menos que la simple, y la de tres menos que la de dos. La conclusión era evidente: las juntas introducían una debilidad en la fábrica que disminuía la resistencia.

Posteriormente Tourtay (1885) llegó, tras diversos ensayos, a las siguientes conclusiones:

- El agotamiento del mortero en las juntas de las fábricas se produce a tensiones muy superiores a la resistencia intrínseca del mortero, pero muy inferiores a las de la fábrica.
- La tensión que produce la disagregación del mortero está en razón inversa al espesor de la junta, manteniendo constantes los otros factores.
- Las fábricas formadas por piedras colocadas sin juntas de mortero (a hueso) dan resistencias inferiores a las de la piedra, pero superiores a las de la fábrica con juntas de mortero.

- Las piedras unidas por una simple lechada de cemento parecen funcionar monolíticamente y dan resistencias semejantes a las de las piedras, y muy superiores a las de las fábricas con juntas de mortero.

Así pues **el aumento del espesor de las juntas disminuye la resistencia de la fábrica**.

Esto es debido a que el módulo elástico del hormigón es mucho menor que el de la piedra por lo que se expande lateralmente induciendo en la piedra un estado de tracción lateral de donde resulta que la piedra rompe por tracción en los bordes (Delbecq, 1983).

La construcción a hueso, estilo romano, permite aproximarse a la resistencia de la piedra.

El resultado más interesante es el hecho de **que el mortero puede trabajar en una fábrica a tensiones superiores a las de rotura y que la resistencia de la fábrica no viene determinada por la del más débil de sus elementos**.

Tensiones admisibles de compresión

Los ingenieros del siglo XIX emplearon una regla simple: *la resistencia de la fábrica es 1/10 de la resistencia de rotura a compresión de la piedra que la compone*.

El coeficiente tiene en cuenta la considerable reducción de resistencia que producen las juntas de mortero y la heterogeneidad del aparejo. Así, por ejemplo, una piedra caliza con una resistencia de 30 MPa podría trabajar hasta una tensión de 3 MPa.

En construcciones de gran tamaño, como por ejemplo los grandes viaductos de piedra de más de 50 m de luz, no se aplicaba la regla del décimo. Se propusieron fórmulas como la de Engesser (1907):

$$\sigma_f = \frac{1}{3}\sigma_p + \frac{2}{3}\sigma_m$$

Donde σ_f es la resistencia de rotura a compresión de la fábrica, siendo σ_p y σ_m las resistencias de rotura a compresión de la piedra y el mortero.

Finalmente en 1980 el CIB publicó una tabla de resistencia de piedra y mortero en la que se observaba que las resistencias de rotura de la fábrica estaban por encima de 1/3 de la resistencia de rotura de la piedra.

Resistencia a tracción y cortadura

La resistencia a tracción de las fábricas depende, principalmente, de la adherencia entre el mortero y la piedra. En general se ha considerado que la resistencia a tracción es nula. La formación de grietas en las estructuras de fábrica es casi inevitable.

La resistencia a esfuerzos de cortadura de una junta de mortero depende del esfuerzo de compresión, de la resistencia a cortante del mortero y del ángulo de rozamiento de la piedra o ladrillo. La relación entre la resistencia a cortante y la tensión de compresión simple puede expresarse por la fórmula:

$$\tau = \tau_0 + \tan\phi$$

Donde τ_0 es la resistencia a cortante con tensión normal nula (cohesión) y ϕ es el ángulo de rozamiento interno. Se denomina criterio de rozamiento seco de Coulomb.

Lo que evita el fallo por cortante o deslizamiento en la junta es el rozamiento entre los elementos. Los elevados coeficientes de rozamiento de las piedras hacen que este fallo sea muy improbable en las construcciones de fábrica.

Módulo de Young

El concepto de módulo de Young lleva implícito un material homogéneo e isótropo. No tiene sentido alguno hablar de módulo de Young, pues en cada punto y dirección tendría un valor distinto, si es que fuera viable medirlo. No obstante, cuando se ensayan estructuras es posible medir las deformaciones y relacionarlas con las cargas. De esta manera puede obtenerse un "módulo de Young" para la estructura cargada de una cierta manera.

Tensiones en fábricas existentes

Se ha visto que los datos de los elementos de la fábrica no son demasiado útiles a la hora de determinar la resistencia o módulo de Young de la combinación de elementos que forma un cierto macizo de fábrica. La irregularidad de incluso las fábricas más cuidadas pone en cuestión cualquier coeficiente de resistencia o elasticidad, excepto los más conservadores.

El problema se puede enfocar de otra manera: estudiar las tensiones de trabajo de ciertas fábricas y concluir que estos valores de tensión de trabajo son valores admisibles.

Tabla II-3. Tensión de trabajo en estructuras de fábrica (18)

Tensión de trabajo. PUENTES	MPa
Puente de Morbegno (L=70 m)	7.0
Puente de Plauen (L=90 m)	6.9
Puente de Villeneuve (L=96 m)	5.7
Viaducto de Salcano en Göritz (L=85 m)	5.1
Puente sobre el Rocky River (L=85 m)	4.4
Puente de Luxemburgo (L=85 m)	4.8

Este hecho, el bajo nivel tensional existente en las construcciones de fábrica resuelve el problema de encontrar la resistencia de las fábricas: la resistencia no es una característica estructural relevante en el análisis estructural de las fábricas. Se podría argüir que, por seguir el criterio resistente, los edificios se han regresado innecesariamente pero, de hecho, atiende a criterios de equilibrio.

C.II.I.III. El material fábrica: Principios de análisis límite

Qué afirmaciones se pueden hacer que caractericen el comportamiento mecánico del material de fábrica:

- Las estructuras de fábrica resisten bien los esfuerzos de compresión.
- Las tensiones de trabajo de las fábricas son bajas y suelen estar un orden de magnitud o dos por debajo de las resistencias de rotura a compresión. Los fallos de resistencia observados son muy raros.
- Las estructuras de fábrica resisten muy mal las tracciones. Los constructores nunca han contado con esta débil resistencia a tracción.
- El fallo por deslizamiento está impedido por los altos coeficientes de rozamiento entre las piedras, y por las disposiciones constructivas habituales. Los casos observados de fallo por deslizamiento son muy raros.

Principios del análisis límite de estructuras de fábrica

Las siguientes afirmaciones forman los principios del análisis límite de las fábricas (Heyman 1966-1999):

- La fábrica tiene una resistencia a compresión infinita
- La fábrica no tiene resistencia a tracción
- El fallo por deslizamiento es imposible

La primera afirmación tiene en cuenta que las tensiones son bajas en las fábricas. La segunda afirmación va a favor de seguridad, pues siempre existe una cierta adherencia entre los elementos. La tercera afirmación presupone un coeficiente de rozamiento infinito (no es cierto pero los valores son tan altos que los fallos por deslizamiento son raros).

Fallo de una sección: superficie de cedencia

Con las anteriores hipótesis cabe preguntarse ¿cómo falla un macizo de fábrica?. La clave reside en la incapacidad de resistir tracciones.

Dado que el deslizamiento es imposible solo nos interesa la normal a la junta y su excentricidad respecto al eje neutro. Esta excentricidad producirá un momento respecto al eje neutro de la sillería que, a su vez,

se traduce en zonas de compresión y de tracción. Es esta tracción la que produce una grieta en el macizo de fábrica.

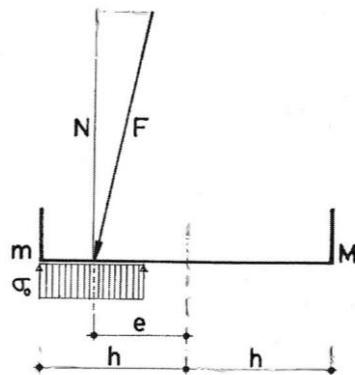


Figura 1. Excentricidad del axil en las piedras (18)

Si el material tiene una resistencia a compresión limitada σ_0 se debe verificar que:

$$N = 2(h - e)\sigma_0$$

$$M = Ne$$

Esto genera una superficie de cedencia: si los pares de valores (N, M) se encuentran dentro de la superficie se cumple la condición de cedencia del material.

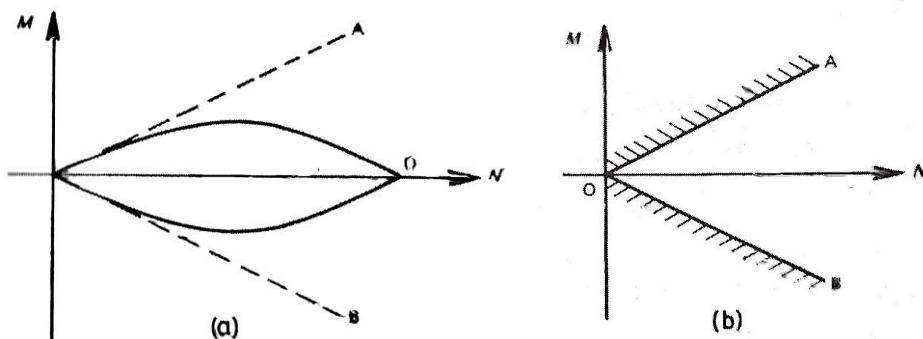


Figura 2. Superficie de cedencia de un material sin resistencia a tracción y con resistencia a compresión limitada (18)

Por tanto la consideración de un material infinitamente resistente a compresión, sin resistencia a tracción, y sin posibilidad de fallo por deslizamiento, lleva a una superficie de cedencia formada por dos rectas. Para cumplir la condición basta con que los esfuerzos no se salgan de los límites de fábrica.

C.III. EQUILIBRIO: LÍNEAS DE EMPUJES (1)

A continuación se estudia el equilibrio de arcos y estribos cumpliendo la condición de cedencia. Este análisis de equilibrio se cimenta en la teoría científica de los arcos y en el concepto de “línea de empujes”.

C.III.I.I. Definición de línea de empuje

Es el lugar geométrico del punto de paso de los esfuerzos por un sistema de planos de corte dados. Fue intuida por Hooke en su analogía con los cables (1670) pero su formulación se produce en 1830-1840 (Moseley & Méry).

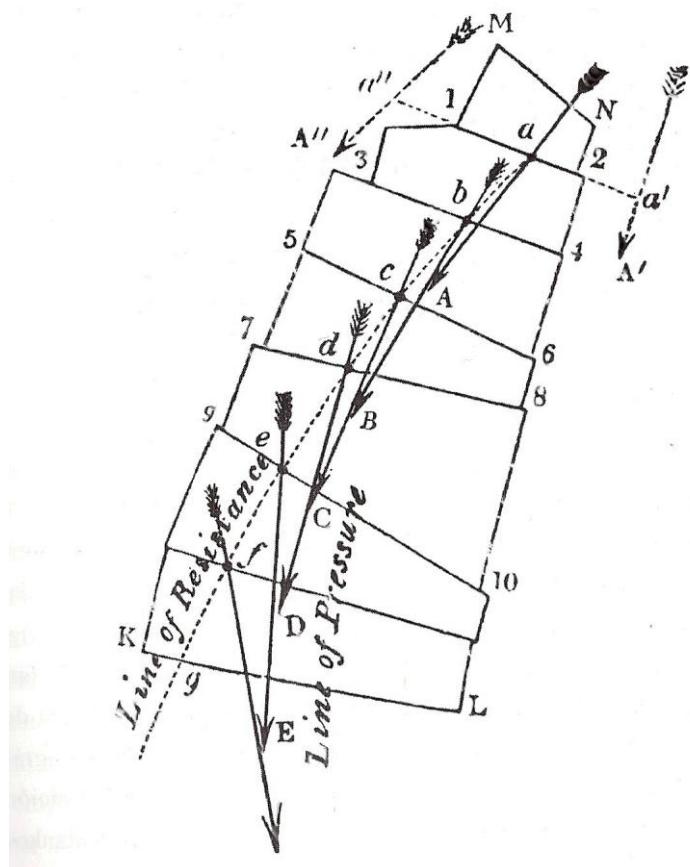


Figura 3. Líneas de empuje de un macizo de fábrica (18)

Las resultantes de fuerzas en cada plano de corte (1a2, 3b4...) determinan una serie de puntos denominados centros de empuje (a,b,c...) y cuyo lugar geométrico de los puntos delimita la línea de empujes (*line of resistance*). Estos esfuerzos no tienen por qué ser tangentes a la curva. Se deduce que la línea de empujes depende de la forma y sistema de cargas de la estructura y, también, de la familia de planos de sección elegidos.

En la figura aparece otra segunda línea: la envolvente de las direcciones de los empujes *línea de inclinaciones* (*line of pressure*).

C.IV. ANÁLISIS LÍMITE DE ARCOS Y ESTRIBOS (1)

C.IV.I. PERTURBACIONES EN LOS ARCOS

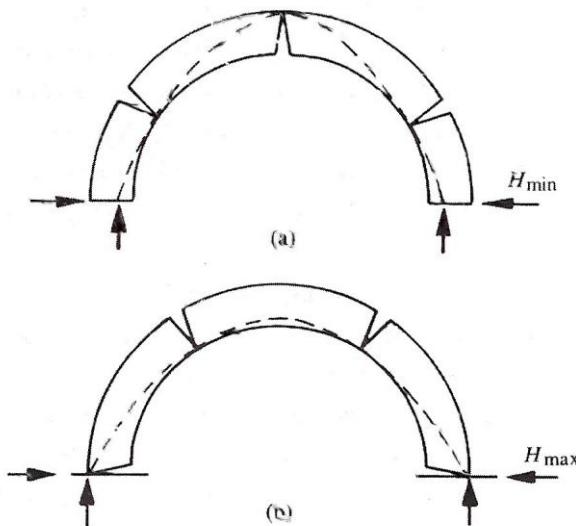


Figura 4. a) Pequeña separación de los apoyos; b) Pequeño acercamiento de los apoyos (18)

C.IV.II. COLAPSO DE ARCOS

Los agrietamientos o articulaciones se forman cuando la línea de empujes toca el borde la fábrica. Cuando el número de articulaciones, y su sentido, es suficiente para formar un mecanismo de colapso cinemáticamente admisible la estructura se hunde. Este hecho se conoce desde el siglo XVIII durante el cual Danyzy realizó una serie de ensayos con modelos de dovelas de yeso comprobando que el colapso se producía por la formación de articulaciones entre las dovelas, no por deslizamiento como se creía hasta entonces.

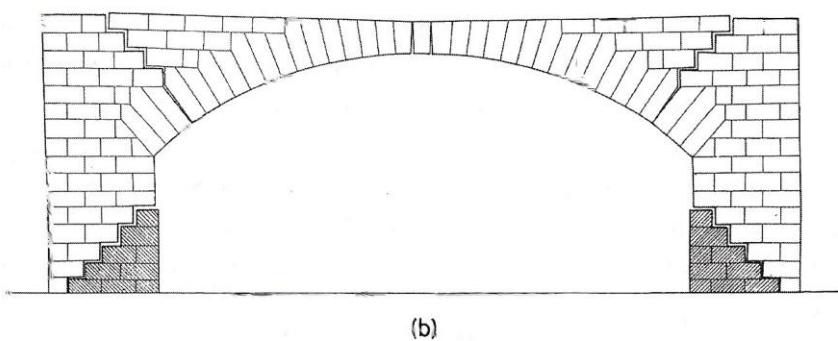


Figura 5. Zonas de fisuración más comunes en un puente de fábrica (18)

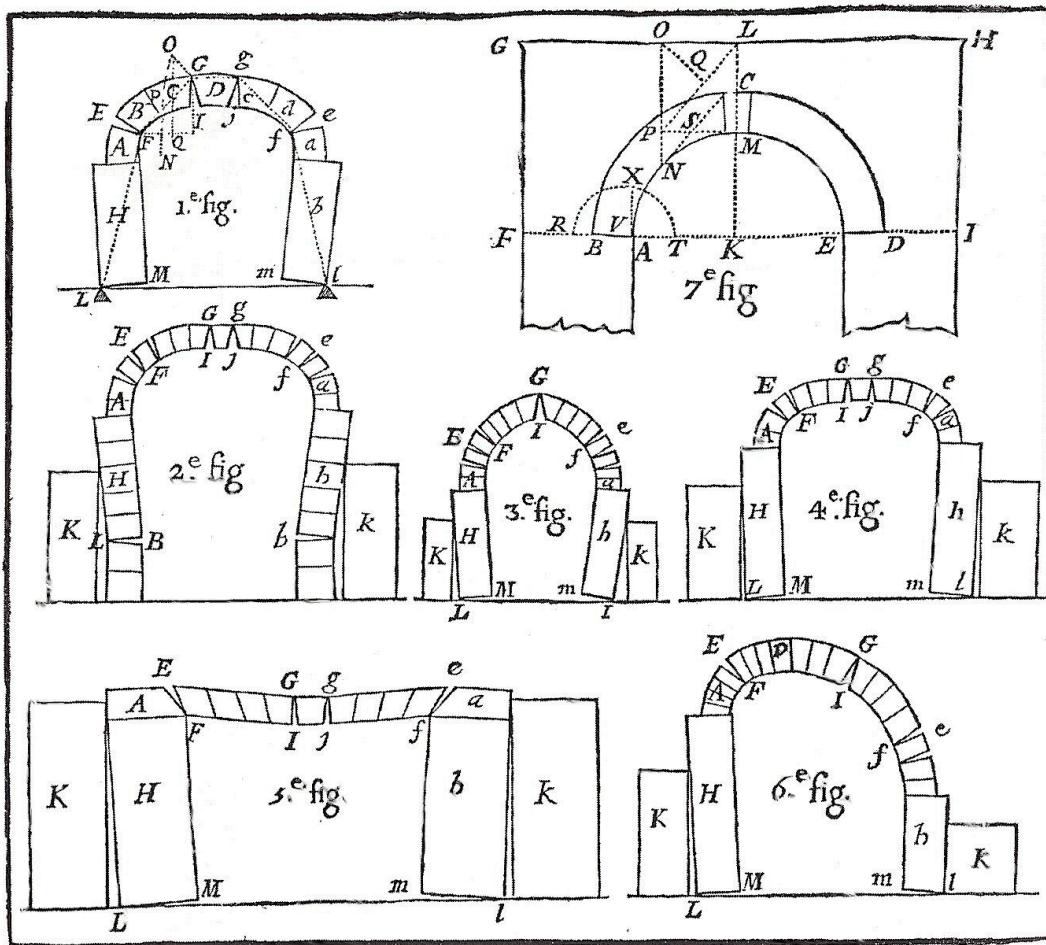


Figura 6. Ensayos de colapso de arcos de Danyzy (1732) (18)

C.IV.III. LA SEGURIDAD EN LOS ESTRIBOS

Siempre se ha considerado de interés secundario siendo el problema principal obtener el empuje de la bóveda o arco. Una vez determinado el empuje el estribo se consideraba rígido y monolítico siendo un sencillo problema de estática ver si se produciría, o no, el vuelco.

El cálculo del estribo rígido solo garantiza que la resultante pase por dentro de la base de apoyo; para verificar la condición de cedencia en cada junta es preciso dibujar la línea de empujes y comprobar que está dentro en cada una de las juntas.

C.IV.III.I. Fractura de un estribo de fábrica

Normalmente se ha considerado que cuando un estribo falla lo hace girando como un sólido rígido alrededor de la arista exterior. Esto supone que una parte de la fábrica estaría trabajando a tracción. De hecho, cuando un estribo de fábrica colapsa por vuelco se forma una superficie de fractura, quedando un trozo sobre el suelo.

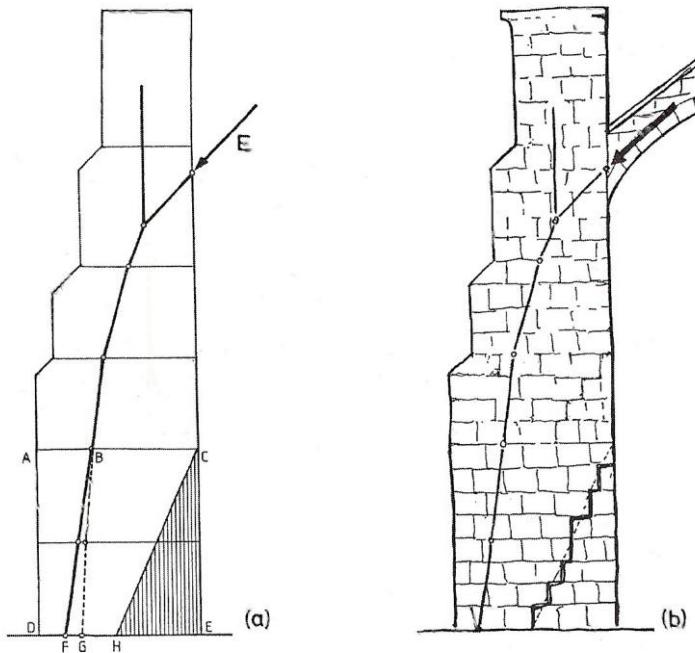


Figura 7. Mecanismo de fractura más común en un estribo (18)

C.V. EDAD MEDIA (5)

C.V.I. PROYECTO DE PUENTES MEDIEVALES

En la Edad Media se produce un renacimiento en la construcción de puentes de fábrica, que tras la caída del Imperio Romano había quedado estancada. El desarrollo de puentes es avanzado y culmina con el puente sobre el río Adda en Trezzo (1400) con 72 m de luz. Esta luz sólo fue superada a comienzos del siglo XX.

La estructura de un puente de fábrica consta de: cimentación, pilas, bóvedas y cepas o estribos (en los extremos del puente). Hay otros elementos que podríamos considerar secundarios: los tímpanos, el relleno y la calzada. El puente debe disponer, además, de pretiles y sistemas de desagüe. Finalmente, puede ir adornado con motivos compositivos o escultóricos.

El aspecto fundamental era, una vez elegido el emplazamiento, el decidir el número y tamaño de las pilas y cepas que han de sostener las bóvedas del puente. El espesor de la pila debe cumplir dos requisitos: 1) debe resistir el empuje de las bóvedas adyacentes, cuando el puente se construye por tramos, como era lo habitual; 2) debe permitir un desagüe suficiente para el río, no solo para su caudal normal, sino en caso de grandes crecidas. La forma de la pila también influye en este segundo requisito y por eso, casi siempre, las pilas presentan tajamares aguas arriba y, a veces, también aguas abajo.

En el caso general de un puente de varios arcos, el constructor debe realizar un ajuste con arcos de varias luces. Así, se solía disponer del arco mayor salvando el cauce del río, cuando esto era posible. Para proyectar el puente, suponiendo los arcos de la misma forma, el constructor debe realizar un ajuste con arcos de varias luces. El constructor debía manejar una regla simple que relacionara el espesor de la pila con la luz de las bóvedas que descargan sobre ella: por ejemplo, que la pila sea una fracción simple de la luz. Como veremos, es precisamente este tipo de reglas el que se encuentra en todos los tratados sobre puentes a partir del Renacimiento. Con toda probabilidad, las reglas de puentes renacentistas tienen un origen medieval. Sin embargo, no ha llegado ningún tratado medieval.

El único documento que se ha conservado es anterior a la época medieval, titulado *Dipositio fabricae de pontibus*, antes del 822, según Mesqui “un verdadero formulario, que da el modo de calcular la profundidad de las cimentaciones superficiales y que explica un método de cimentación por inmersión. Todas las dimensiones se establecen por referencia al cuerpo humano (altura del cuerpo, de la entrepierna, de la rodilla, del pecho, dimensión del codo)... y se aplicaban tanto a los puentes abovedados como a los puentes mixtos. Además, nada proviene de Vitruvio”. Se trata de un documento de

origen romano puesto que la analogía con el cuerpo humano no se usó durante la Edad Media.

El puente de piedras de Zaragoza

Uno de los documentos más antiguos sobre la construcción del puente de piedra se halla en el Archivo Municipal de Zaragoza. Recoge documentos y actas sobre la traza y la obra del citado puente, que comienza a partir de 1401 y que constituye una mina de información sobre los procedimientos constructivos, materiales, maquinaria, etc., empleados en la construcción del puente (Se trata de un códice manuscrito con cubiertas de pergamino "Manuscrito del Puente de Piedras de Zaragoza" Ms. 47, Archivo Municipal de Zaragoza.)

De este se deduce que el proyecto de las pilas cumplía un sencillo dimensionado: asignar a cada pila el tercio del vano correspondiente.

Posteriormente, durante el Renacimiento, esta regla se utilizaría para el proyecto de bóvedas y cúpulas.

C.VI. RENACIMIENTO (6)

C.VI.I. Sobre arcos (Alberti)

Distingue tres tipos básicos: de medio punto, rebajado y apuntado. Recomienda que las dovelas se hagan de gran tamaño y que sean iguales entre sí. También establece la dirección de las juntas entre dovelas, que deben dirigirse hacia el centro (normal a la curva de intradós), parece obvia pero evita posibles fallos por deslizamiento.

Recomienda así mismo que la clave sea una piedra grande.

Arcos de medio punto

Considera que es el más estable y resistente. Sus observaciones son interesantes por dos motivos: constituyen el primer intento de explicación de funcionamiento estructural de un arco y ponen de relieve la importancia de la distribución de las masas en la estabilidad de un arco, hecho éste clave en el diseño estructural de las estructuras de fábrica.

Arcos rebajados y apuntados

La característica de los arcos rebajados es que producen un empuje muy poderoso y propone contrarrestarlo con tirantes de hierro. Así mismo da unos consejos de buena práctica: a) colocarlos dentro de los muros de modo que el espesor de las paredes resista el empuje; b) aun así colocar arcos de descarga de medio punto para aliviar el empuje.

En cuanto a los arcos apuntados señala que resisten fuertes cargas verticales, en particular si se colocan sobre la clave. De ahí la recomendación habitual de colocarlos en las bases de las torres.

Puentes

Las reglas para el proyecto estructural de puentes formuladas por Alberti constituyeron la doctrina oficial de puentes hasta el siglo XVIII.

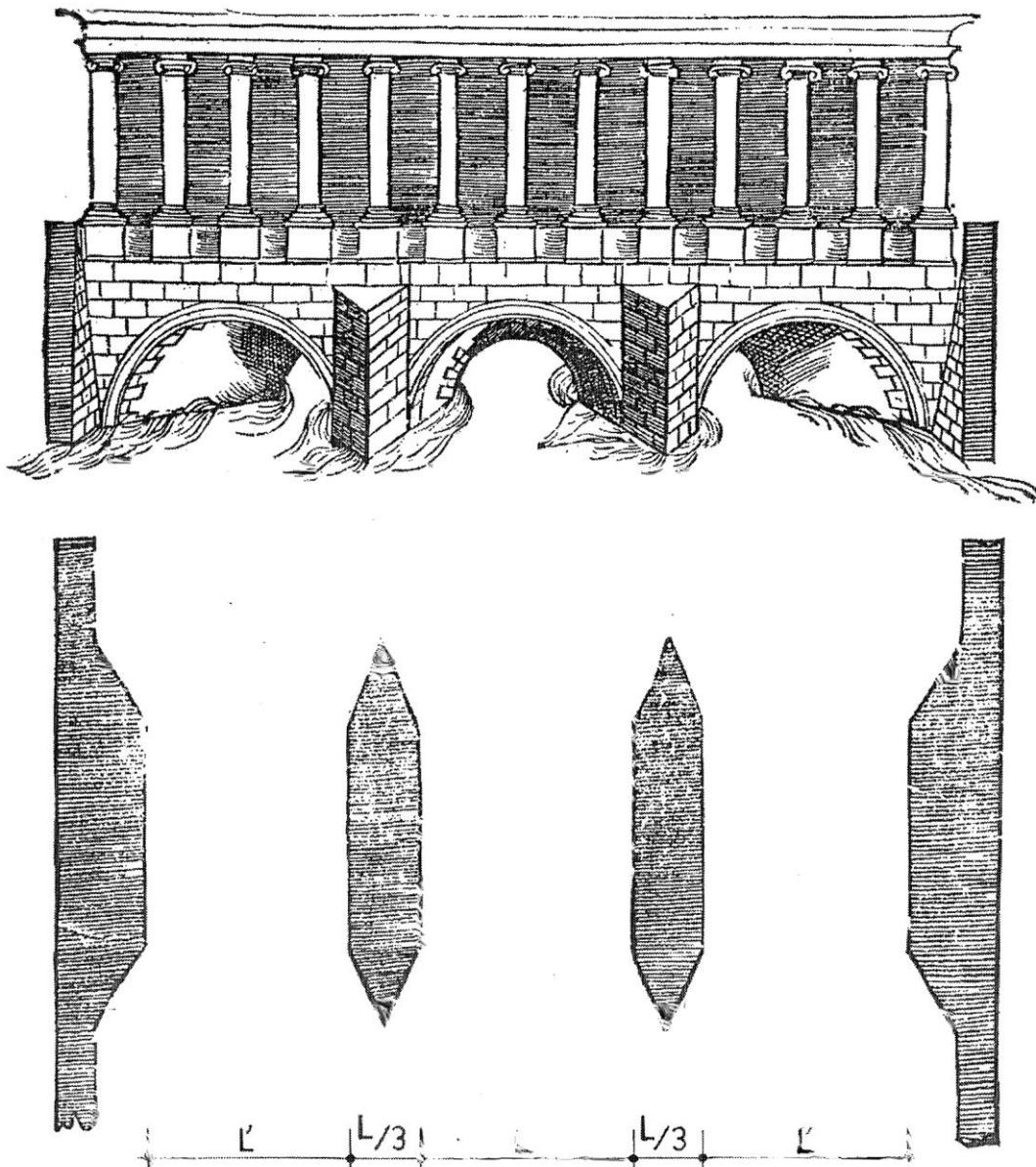


Figura 8. Regla de Alberti para dimensionado de pilas (18)

El arte de construir en Roma

Este apartado está compuesto de extractos y síntesis de la bibliografía (20)

C.VII. PROCEDIMIENTOS GENERALES DE LA CONSTRUCCIÓN DE CANTERÍA (3)

C.VII.I. Los muros

En la figura se muestra el aparejo típico de los primitivos griegos, que siguió siéndolo en Roma durante todo el Imperio.

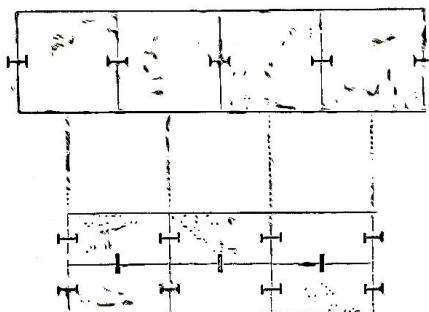


Figura 9. Aparejo de sillería griego (20)

Nunca hay en una misma hilada unas piedras dispuestas a soga y otras a tizón; o bien todas las piedras de la hilada atravesaban el muro de parte a parte; o bien ninguna lo hacía. Así, una hilada de tizones o perpiáños alternaba regularmente con una hilada formada por una doble hilera de sillares sentados a soga, Figura 9.

Este aparejo resulta muy adecuado para los muros macizos de sillería característicos de la construcción griega. Sin embargo, el muro romano, que se componía de paramentos de sillería y un relleno de hormigón tuvo que modificar este aparejo adoptando siempre una de las dos soluciones que se citan a continuación.

La primera consistía en alternar una hilada de tizones con una hilada de sogas, dando a los paramentos el aspecto indicado en la Figura 10. En la segunda solución (la más frecuente) se alternaban hiladas completas de sogas con hiladas mixtas formadas por sogas y tizones, Figura 11. Éstas son las dos únicas variantes y nunca se han encontrado en ningún edificio romano dos hiladas mixtas superpuestas directamente; siempre hay una hilada de sogas interpuesta de manera que los tizones formen unos dientes que se embuten en el hormigón.

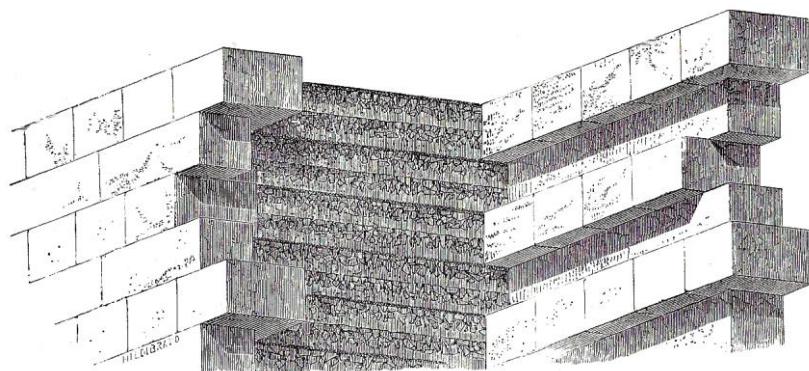


Figura 10. Aparejo de hiladas a soga alternadas con hiladas a tizón (20)

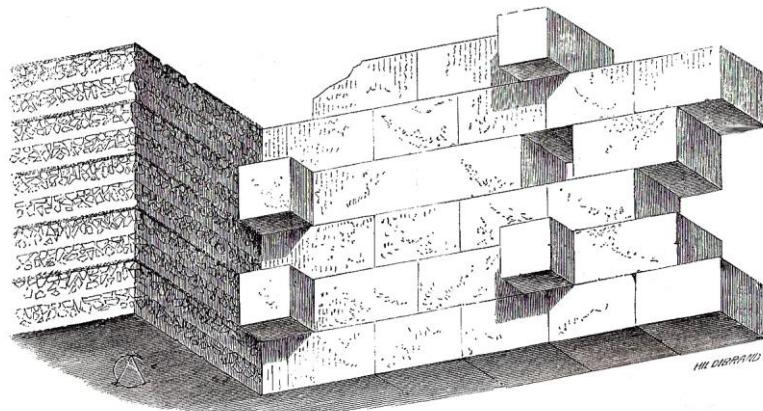


Figura 11. Aparejo de hiladas a soga alternadas con hiladas mixtas a soga y tizón (20)

Este aparejo aúna solidez y economía, y su empleo sería recomendable incluso hoy día, por su excelente conexión con el hormigón. En efecto una buena unión con el hormigón no se consigue sin más multiplicando las piedras que se embuten en los macizos, pues si los tizones están demasiado próximos, y cortan y dividen excesivamente el hormigón en que se embeben éste cedería al primer esfuerzo que tendiera a separar el paramento. Por el contrario, el tipo de aparejo de que hablamos elimina esta posibilidad, ya que los tizones presentan una separación suficiente, de manera que aunque unen enérgicamente el paramento al relleno de hormigón, no hacen peligrar la unidad del núcleo.

Otro detalle característico y bien conocido es la ausencia de mortero en las juntas, se sentaban siempre en seco. Para los romanos el mortero era sólo un aglomerante y nunca pensaron en emplearlo para transmitir o regularizar las presiones entre las piedras, lo consideraban inútil en las construcciones de cantería, por lo que fue eliminado intentando unir entre sí los sillares mediante piezas de hierro fuertemente empotradas o grapas.

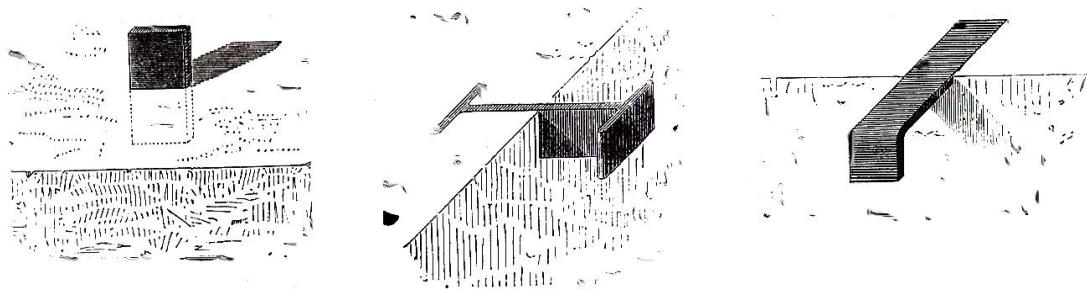


Figura 12. Tipos de grapas entre sillares, empleadas por los romanos (20)

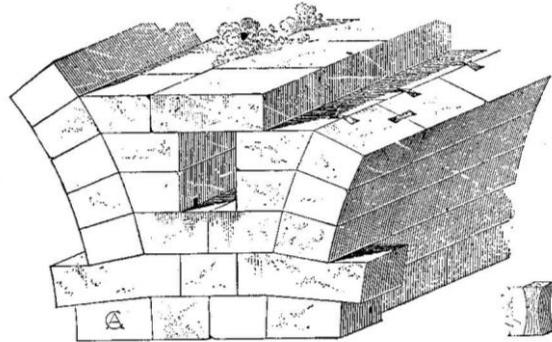


Figura 13. Uniones entre sillares empleadas en el puente de Gallargues (20)

Otra forma de unión era embutir plomo en la piedra superior con forma de taco G (Figura 14), más grueso en sus extremos, que se introducía en una caja practicada en el sobrelecho inferior, donde luego se vertía plomo fundido a través de una canaleta practicada previamente en el sillar.

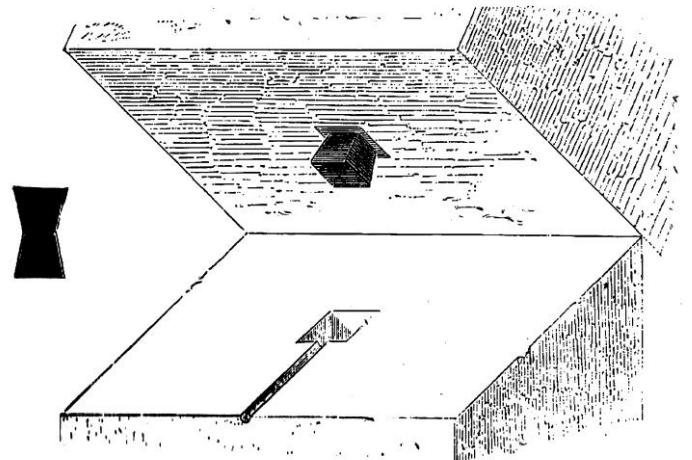


Figura 14. Unión de sillares a caja y espiga (20)

C.VIII. LAS BÓVEDAS DE CANTERÍA (4)

C.VIII.I. Bóvedas de cañón

Al estudiar las bóvedas de cantería veremos una serie de procedimientos cuyo origen no es romano sino etrusco. Estas bóvedas en su mayoría son irregulares debido a la inexperiencia del constructor si bien algunos de los aparejos demuestran una gran elegancia.

Los etruscos añadieron al arco de medio punto motivos ornamentales: imposta, clave esculpida y la arquivolta que se convertirían en elementos esenciales de la arcada romana. Sin embargo los romanos se centraron en los procedimientos de ejecución y reducción de coste.

Este deseo de economía se manifiesta en la cimbra, únicamente, de la parte superior de la bóveda o, a veces, incluso sin cimbra utilizando únicamente aparejos mediante caja y espiga para prevenir el deslizamiento.

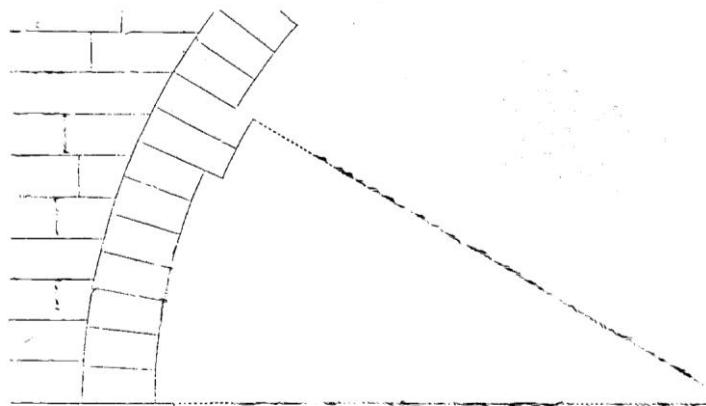


Figura 15. Dovelas en méncola para recibir cimbrado (Pont du Gard) (20)

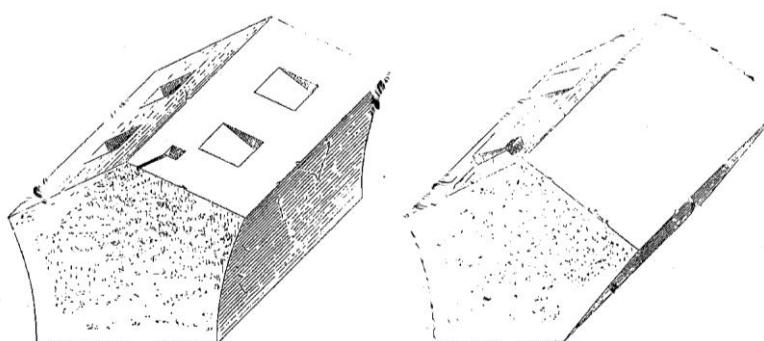


Figura 16. Uniones a caja y espiga entre las dovelas inferiores de una bóveda (Coliseo) (20)

Por otro lado un intradós basto y rugoso en los arranques, pero que se vuelve liso y regular en la parte superior, es indicativo de que las dovelas no se apoyan en nada y no precisan el labrado y alisado necesario para el buen apoyo de una dovela sobre la tablazón de la cimbra.

Una vez eliminada la parte inferior de la cimbra, el siguiente paso era intentar simplificar la parte restante: elegir el aparejo que permitiese una cimbra más sencilla y barata.

Sistema de cimbrado

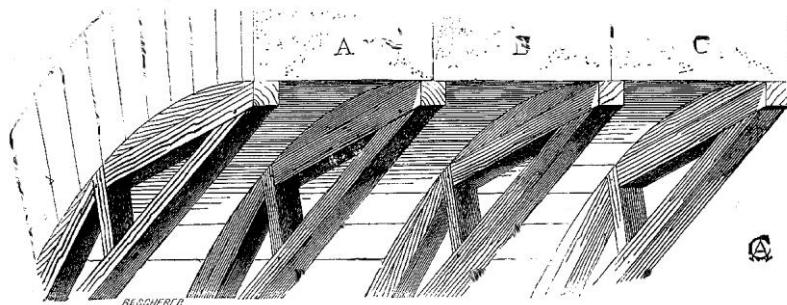


Figura 17. Construcción de bóvedas de cantería sin forro sobre las cimbras (Pont du Gard) (20)

Si la bóveda está compuesta por arcos yuxtapuestos hay que tener en cuenta que las boquillas de las dovelas son siempre iguales y la bóveda aparece dividida en rebanadas independientes, una discontinuidad que se justifica fácilmente desde el punto de vista económico. Para cimbrar una bóveda de este tipo se precisan sólo cuchillos en los planos testeros y en cada unión de arcos elementales; cada dovela apoya entre dos cerchas y no hace falta tablazón.

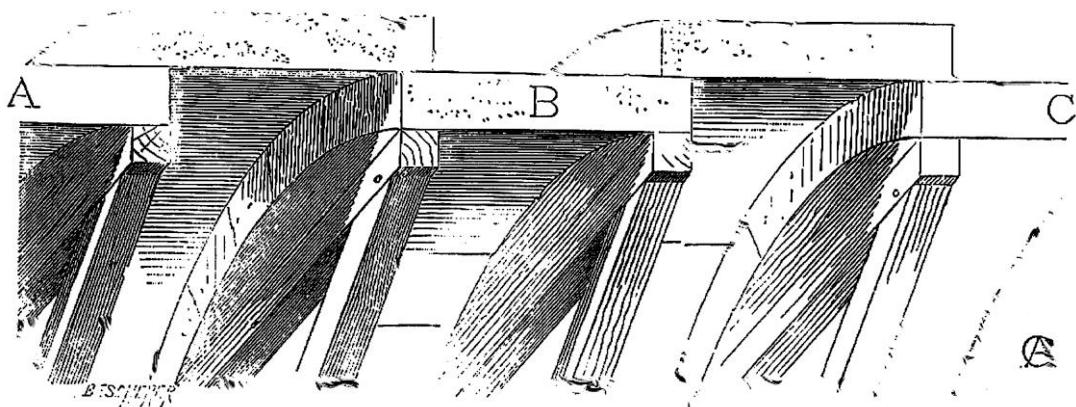


Figura 18. Sistema romano de reducción de la carga sobre las cimbras (20)

Los romanos trataron de perfeccionar este cimbrado reduciendo la carga sobre los cuchillos con disposiciones como las de la figura.

Los arcos A, B y C quedan ahora separados, cubriendose los vanos con un enlosado curvo. El ahorro es evidente, ya que sobre las cimbras sólo cargan los arcos A, B y C sin que reciban ninguna carga adicional al estar el enlosado apoyado sobre estos arcos. Los arcos forman un esqueleto resistente durante la construcción que reúne las ventajas del aparejo discontinuo y el empleo de armaduras de piedra: se suprime la tablazón y se reduce la carga sobre las cimbras.

Proceso Constructivo General Puentes de Piedra

En este apartado se amplían las láminas dibujadas por Miguel Ángel Ariza para sintetizar el proceso constructivo genérico de un puente de piedra.

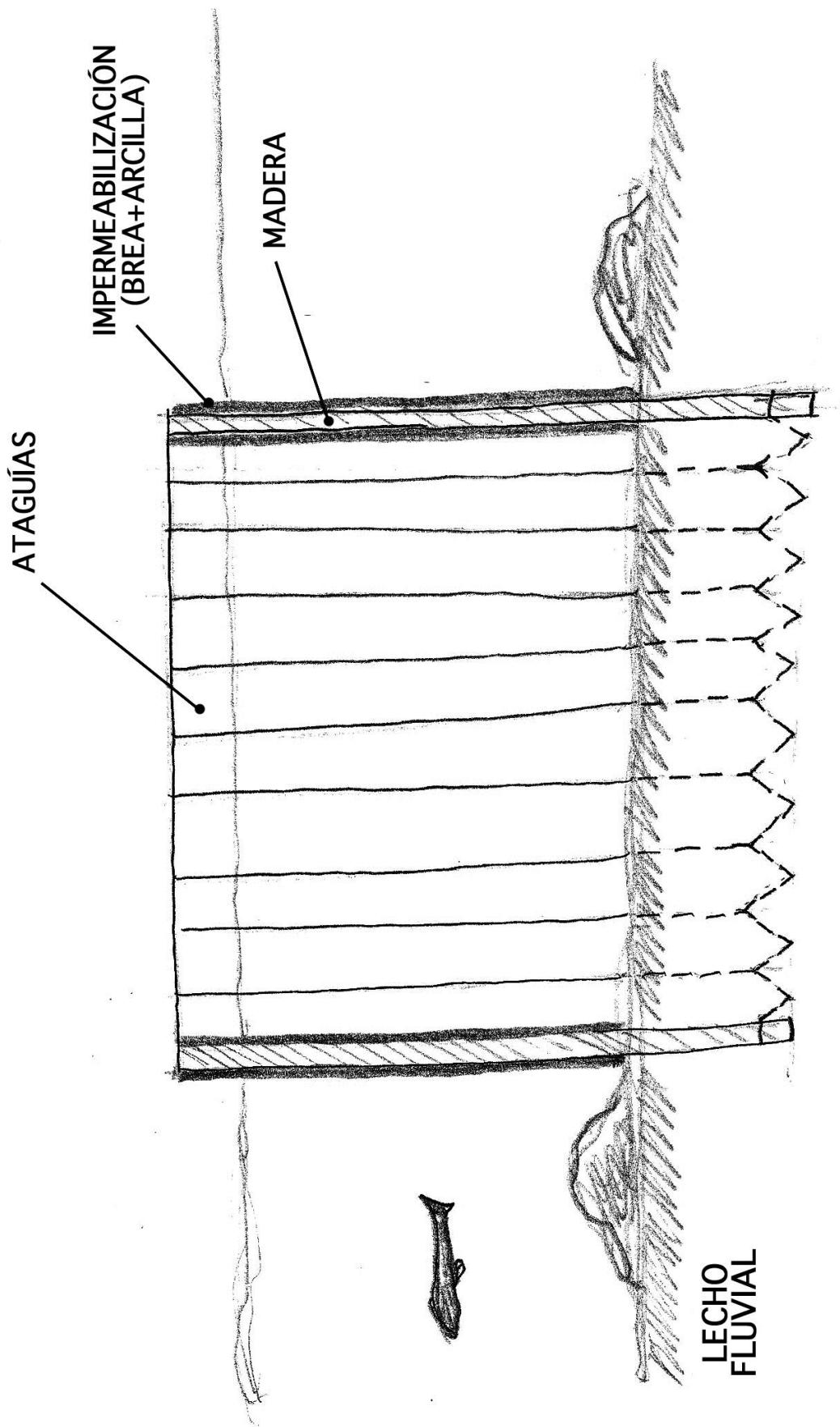


Figura 19. Tablestacado o Ataguías

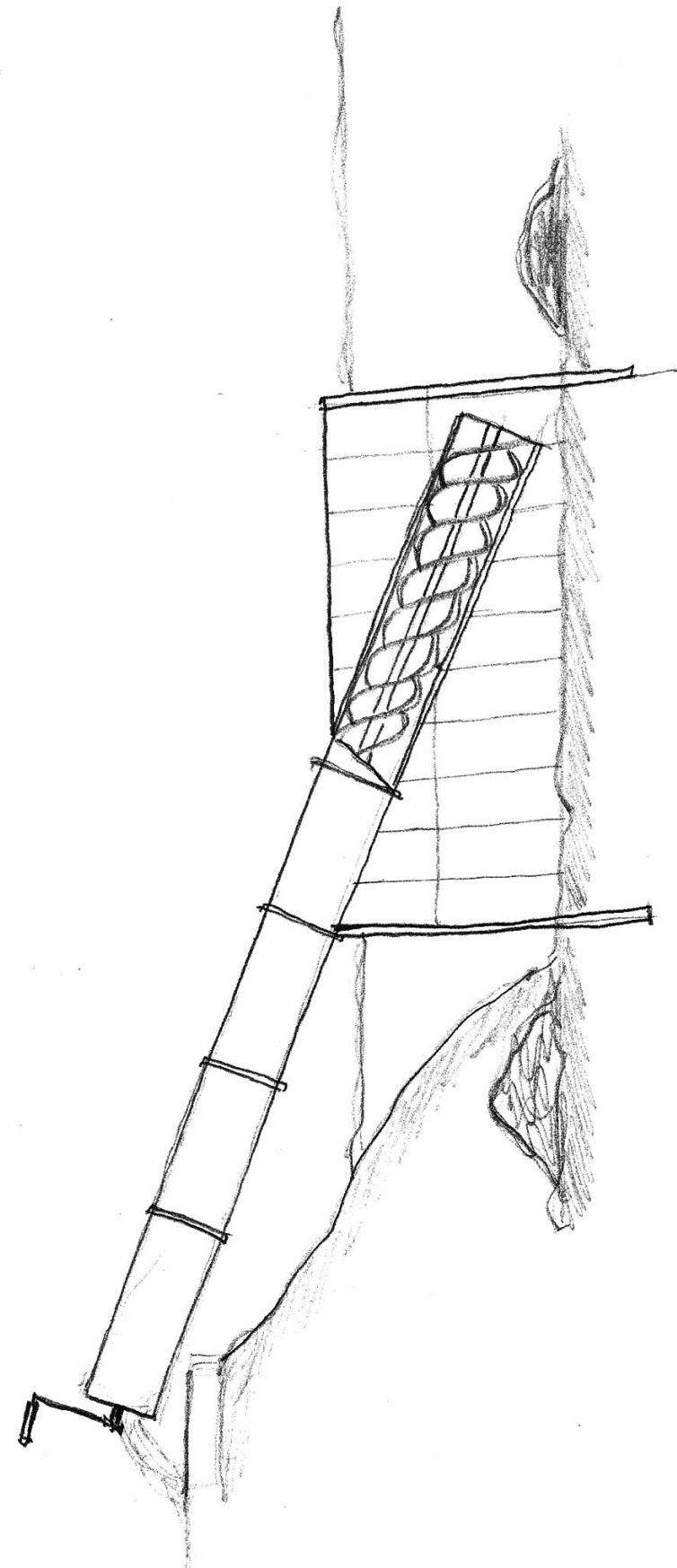
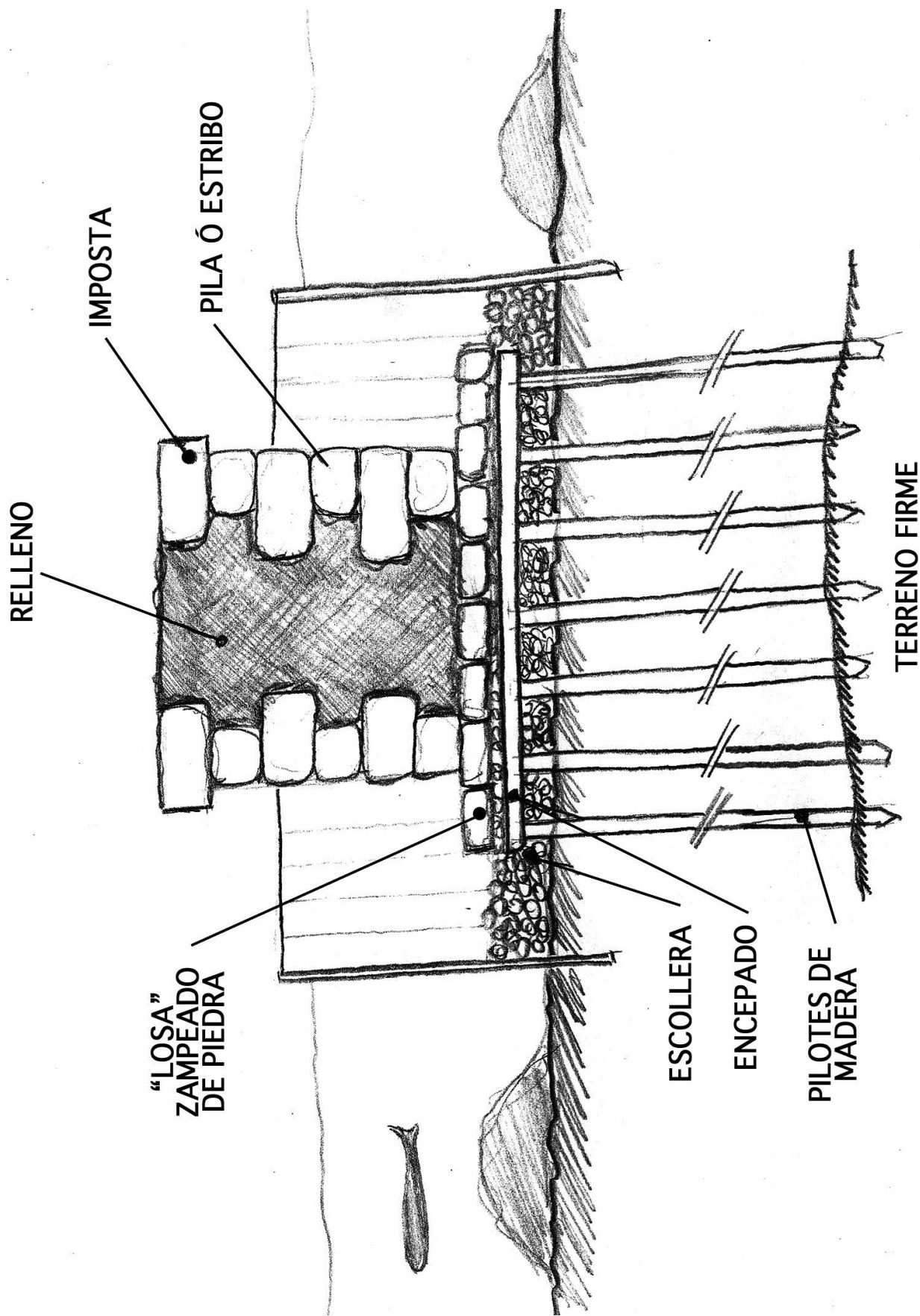


Figura 20. Extracción de agua mediante tornillo de Arquímedes



C.xxxiii
Figura 21. Cimentación y Estribo

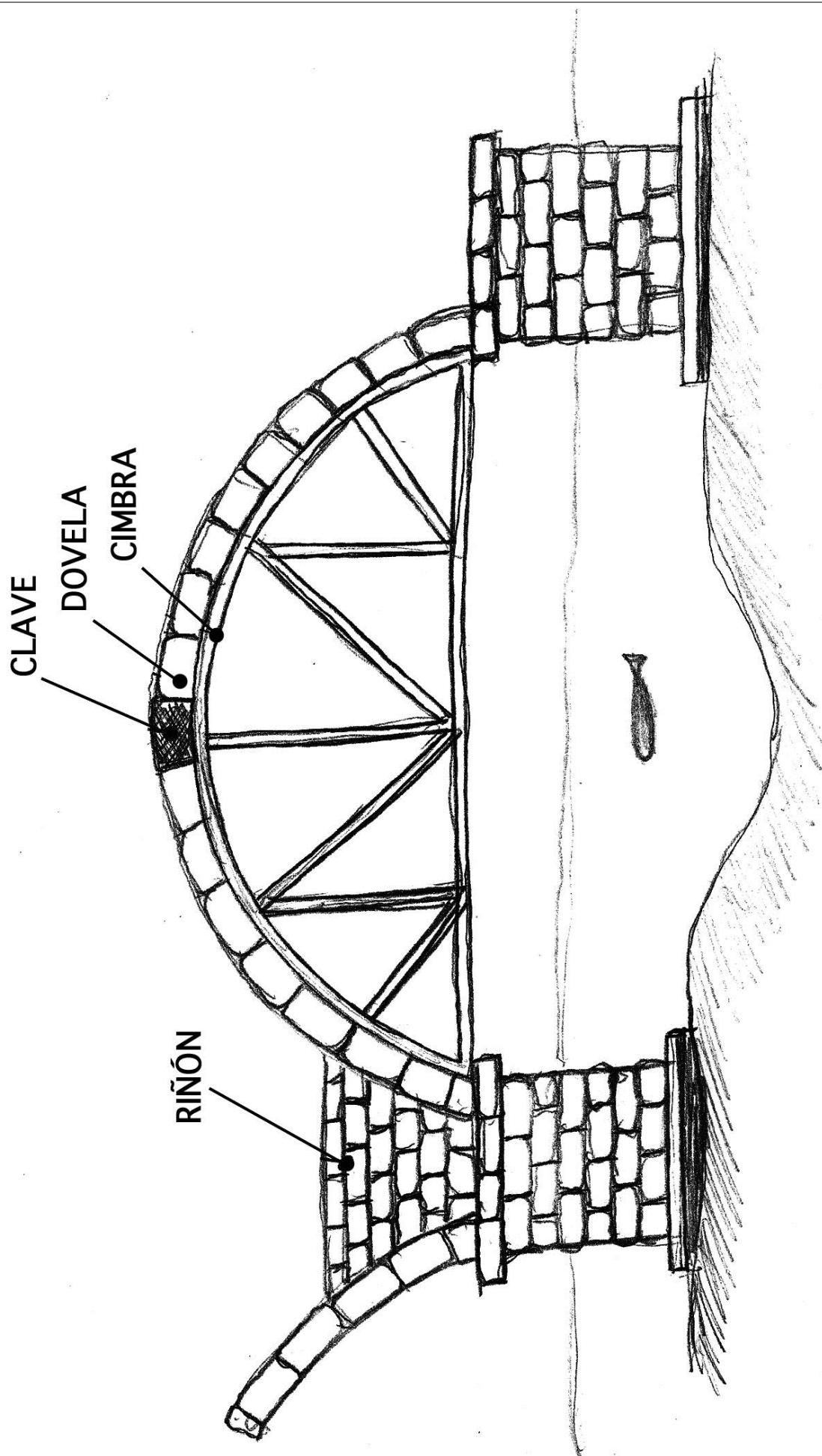


Figura 22. Cimbrado y Bóveda de Piedra

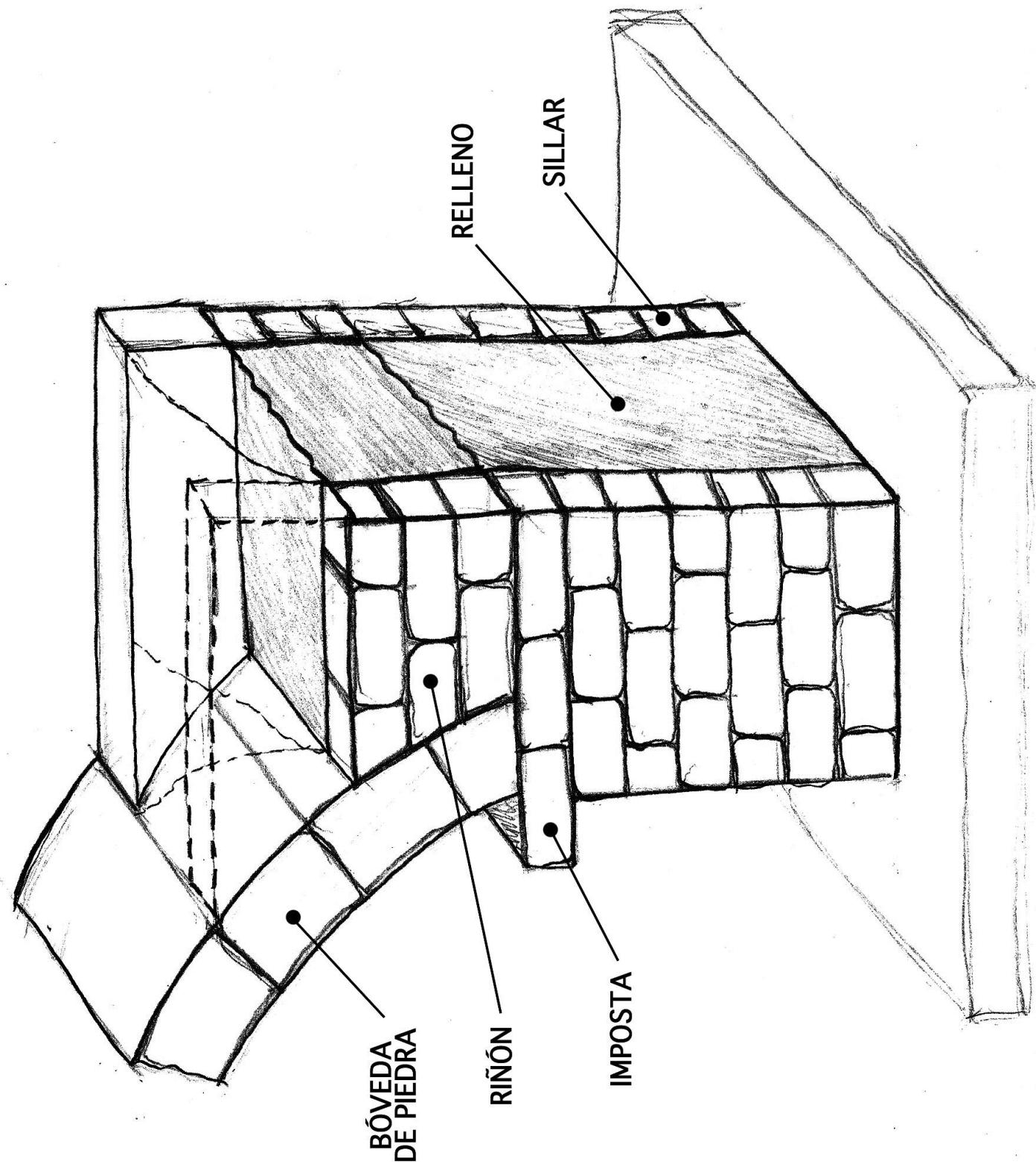


Figura 23. Relleno de las hojas de piedra

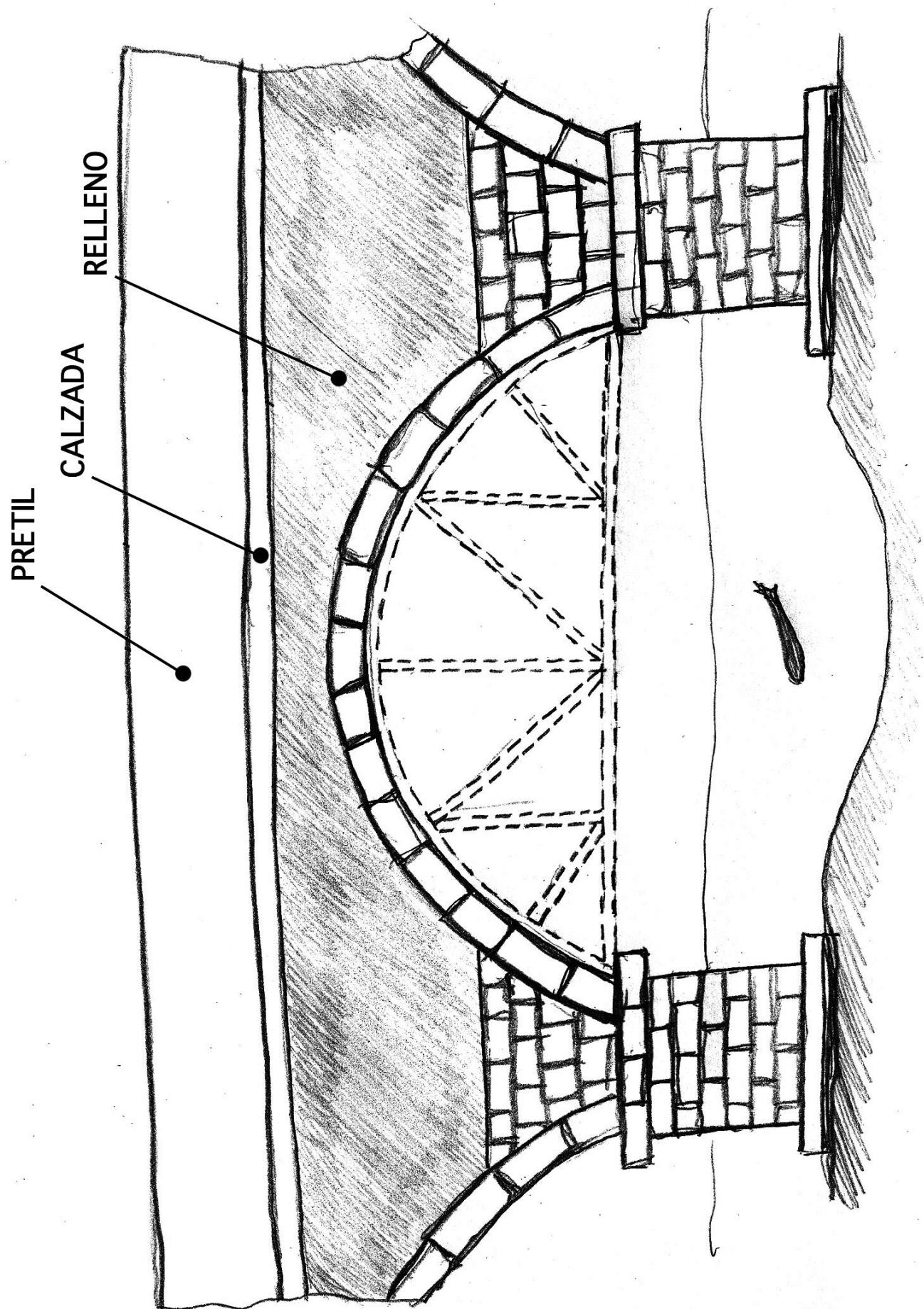


Figura 24. Pretil y Calzada. Remates

Índice de Figuras. Anexo C

Figura 1. Excentricidad del axil en las piedras (18)	xii
Figura 2. Superficie de cedencia de un material sin resistencia a tracción y con resistencia a compresión limitada (18)	xii
Figura 3. Líneas de empuje de un macizo de fábrica (18)	xiii
Figura 4. a) Pequeña separación de los apoyos; b) Pequeño acercamiento de los apoyos (18)	xiv
Figura 5. Zonas de fisuración más comunes en un puente de fábrica (18)	xiv
Figura 6. Ensayos de colapso de arcos de Danyzy (1732) (18)	xv
Figura 7. Mecanismo de fractura más común en un estribo (18)	xvi
Figura 8. Regla de Alberti para dimensionado de pilas (18)	xx
Figura 9. Aparejo de sillería griego (20)	xxi
Figura 10. Aparejo de hiladas a soga alternadas con hiladas a tizón (20)	xxii
Figura 11. Aparejo de hiladas a soga alternadas con hiladas mixtas a soga y tizón (20)	xxii
Figura 12. Tipos de grapas entre sillares, empleadas por los romanos (20)	xxiii
Figura 13. Uniones entre sillares empleadas en el puente de Gallargues (20)	xxiii
Figura 14. Unión de sillares a caja y espiga (20)	xxiii
Figura 15. Dovelas en ménsula para recibir cimbrado (Pont du Gard) (20)	xxiv
Figura 16. Uniones a caja y espiga entre las dovelas inferiores de una bóveda (Coliseo) (20)	xxiv
Figura 17. Construcción de bóvedas de cantería sin forro sobre las cimbras (Pont du Gard) (20)	xxv
Figura 18. Sistema romano de reducción de la carga sobre las cimbras (20)	xxv
Figura 19. Tablestacado o Ataguías	xxix
Figura 20. Extracción de agua mediante tornillo de Arquímedes	xxxi
Figura 21. Cimentación y Estribo	xxxiii
Figura 22. Cimbrado y Bóveda de Piedra	xxxv
Figura 23. Relleno de las hojas de piedra	xxxvii
Figura 24. Pretil y Calzada. Remates	xxxix

Índice de Tablas. Anexo C

Tabla II-1. Propiedades mecánicas de las piedras (18)	vii
Tabla II-2. Coeficientes y ángulo de rozamiento entre piedras (18)	vii
Tabla II-3. Tensión de trabajo en estructuras de fábrica (18)	x

ANEXO D.
FABRICACIÓN ADITIVA

D.I. Prototipos

Un prototipo es una importante parte en el proceso de desarrollo de un producto que, en diseño, significa algo más que un artefacto. Para ser generales y cubrir todos los aspectos del significado de prototipo para su uso en diseño se puede definir como:

Una aproximación de un producto (o sistema) o sus componentes en alguna forma para un propósito definido en su implementación.

Para este proyecto, la definición de prototipo, o modelo, se refiere a una reproducción a escala del Puente de Piedra que se ha obtenido a partir de un modelo tridimensional CAD realizado en ordenador.

La definición general de prototipo contiene tres aspectos de interés:

- La implementación del prototipo (componentes y subensamblajes)
- La forma del prototipo (virtual y física)
- El grado de exactitud (basta a exacta)

Si el modelo es completo se intentará reproducir casi todas sus características. También hay prototipos que sólo necesitan investigación de problemas asociados a un componente o subensamblaje y por tanto la definición se centrará en un aspecto. En el Puente de Piedra la idea de obtener un modelo plástico es observar con total claridad la estructura del puente y qué simplificaciones o aproximaciones geométricas han sido tomadas. Además hay que considerar que, este modelo podría ser utilizado desde una mera representación informativa de sus dimensiones a escala hasta un análisis de flujos de aire o de agua en su geometría.

Pueden ser utilizados para

- Aprendizaje y experimentos (estructuras, aerodinámica, hidrodinámica...)
- Pruebas y test
- Comunicación e interacción
- Síntesis e integración
- Planificaciones y ventas

D.II. Desarrollo Histórico

El desarrollo del Prototipado Rápido está estrechamente unido al desarrollo de la aplicación de ordenadores en la industria. Gracias al descenso en los precios de los ordenadores y al incremento de su uso en el diseño asistido por ordenador (CAD), fabricación asistida por ordenador (CAM) y las máquinas de control numérico por ordenador (CNC) han hecho que los sistemas de fabricación hayan cambiado. De hecho, no hubiera sido posible sin la existencia del CAD.

Un prototipo generalmente se requiere antes de iniciar una producción total del producto ya que dará una idea de si está preparado para una fabricación a gran escala minimizando la corrección de fallos en esta etapa (muy costosa).

La fabricación de prototipos se puede realizar de muchas formas: remoción de material, fundición, moldes, unión de partes por adhesivos, etc. Y con muchos tipos de materiales: aluminio, zinc, madera, etc.

El Prototipado Rápido pasa por tres fases de desarrollo durante los últimos 20 años:

- Prototipado Manual
- Prototipado Virtual (CAD/CAE/CAM)
- Prototipado Rápido

D.III. Fundamentos del Prototipado Rápido

Se adoptan unas aproximaciones básicas como

- Se desarrolla un modelo en un programa de diseño asistido por ordenador (CAD-CAM) representando el modelo físico que se desea obtener mediante superficies cerradas que definen un volumen sin ambigüedad. Se especifica la parte interior y la parte exterior de las fronteras del modelo para que el programa entienda qué parte es sólida o qué parte está vacía.
- El modelo sólido CAD se transforma a un formato denominado STL (StereoLithography) que origina una aproximación mediante polígonos de las superficies del modelo tridimensional. A mayor número de polígonos y menor ángulo entre ellos más precisa será la superficie obtenida en el prototipo.
- El programa de ordenador analiza el archivo STL definiendo el modelo a fabricar y sus “rodajas” que representan sus secciones transversales. Las coordenadas matemáticas de estas secciones transversales son las que se recrean en cada pasada de aporte de material de la máquina. Los materiales de aporte de la máquina pueden estar en diversas formas: sólida, líquida o polvo que incluyen papel, nylon, cera, resinas, metálicas y cerámicas.

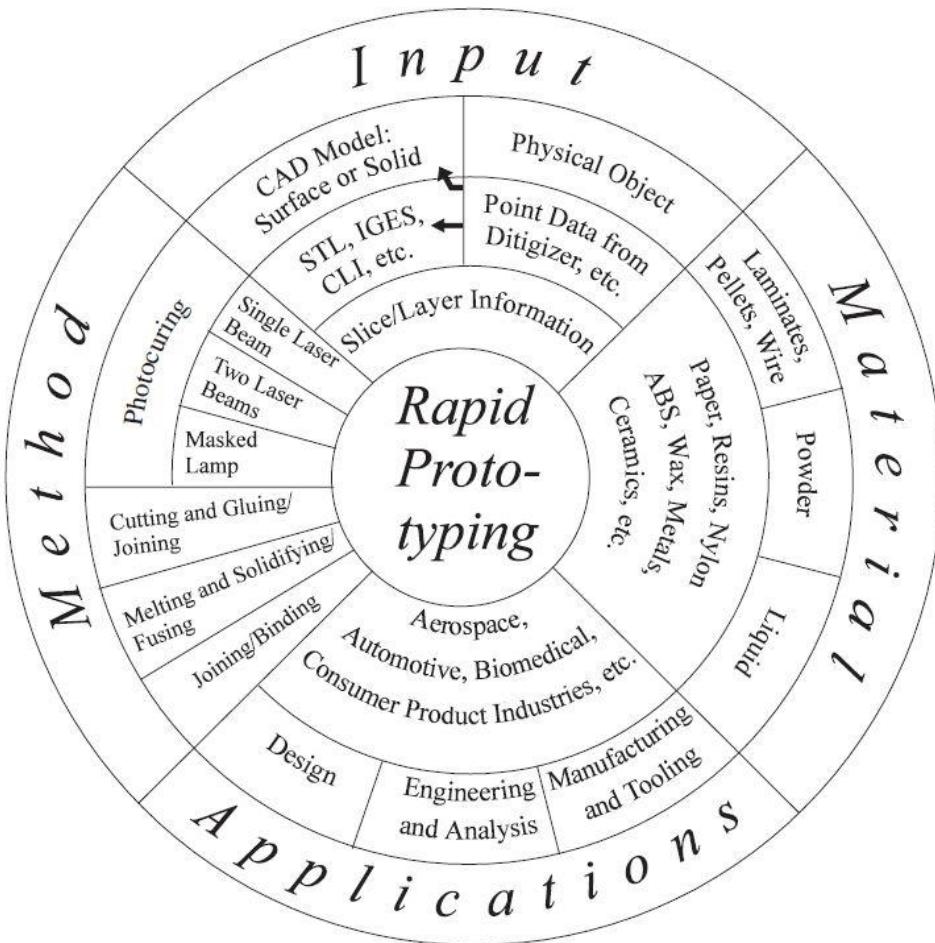


Figura 1. Descripción de los cuatro aspectos principales del prototipado rápido (49)

D.IV. Clasificación de sistemas de Prototipado Rápido

Hay multitud de sistemas de prototipado actualmente en el mercado y, cada uno, tiene sus ventajas y sus inconvenientes según lo que se quiera fabricar.

D.IV.I. Aportes Líquidos

El material de aporte se encuentra en estado líquido y, a través del proceso conocido como curado, el material se solidifica. Los sistemas de prototipado que se engloban en esta categoría son entre otros:

- SLA: 3D Systems' stereolithography apparatus
- CMET's solid object ultraviolet-laser printer (SOUP)
- EnvisionTec's Bioplotter
- Microfabrication

Como se observa en la Figura 1 hay tres métodos posibles en el "fotocurado":

- Rayo láser simple

- Rayo láser doble
- Luz Ultravioleta

D.IV.II. Aportes Sólidos

El material de aporte puede ser en hilo, láminas,... Los sistemas de prototipado que se engloban en esta categoría son entre otros:

- 3D System's multi-jet modeling system (MJM)
- CAM-LEM's CL 100
- Cubic Technologies' laminated object manufacturing (LOM)

Hay dos métodos posibles de aporte para estos sistemas (Figura 1):

- Fundido y solidificación
- Corte y Unión

D.IV.II.I. Aportes en polvo

En un sentido estricto también es un estado sólido. Sin embargo, se crea esta categoría fuera de la sólida para indicar que polvo es aporte en modo de granos o grana.

- 3D Systems' selective laser sintering (SLS)
- 3D-Micromac AG's microsintering
- Voxeljet Technology GmbH'S VX system

Todas emplean el método de unión difiriendo del de Corte y Unión porque unos emplean láser para unir y los otros utilizan adhesivos.

D.V. Desarrollo del modelo del Puente de Piedra

Gracias a la colaboración del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, a través del profesor Jorge Santolaria Mazo, se desarrolló el prototipo plástico del puente de piedra a partir del modelo tridimensional CAD/CAE realizado en "Abaqus CAE".

D.V.I. Impresora Objet

Las impresoras Objet pueden imprimir los modelos tridimensionales más complejos con una calidad excepcional. Los sistemas basados en PolyJet (patentado por la marca) se utilizan en cientos de procesos de fabricación a lo largo del mundo en un amplio espectro de uso: automoción, electrónica, juguetes, calzado médico... Tienen una familia de máquinas llamadas Eden de las que, actualmente, se posee una en la Universidad: la Eden 350V.

La Eden 350 V es una máquina profesional de construcción media (350 mm x 350 mm x 200 mm) que utiliza tecnología material Objet FullCure controlada por el software Objet Studio, proporcionando un control total sobre el proceso de prototipado rápido y proveyendo de opciones sobre el tamaño de construcción, productividad o requisitos.



Figura 2. Impresora 3D Objet Eden 500V

Las impresoras cargan dos tipos de materiales: el material de aporte y el material de soporte, que se inyectan en forma líquida en una capa plana de muy fino espesor (16 micrómetros) produciendo superficies muy suaves. Estas capas se curan gracias a la luz ultravioleta que incorpora el cabezal inyector.

El cabezal inyector se puede desplazar en el plano XY para generar las secciones transversales del modelo y la bandeja de carga se desplaza en el eje Z descendiendo en cada pasada para crecer en altura.

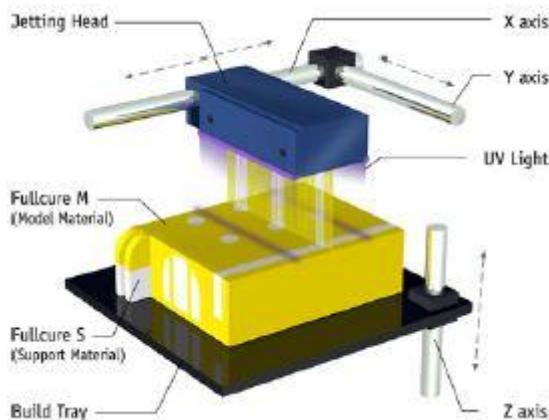


Figura 3. Componentes y Grados de Libertad de la impresora 3D

Una vez finalizado el modelo en la impresora, se debe aplicar una limpieza con una solución de sosa para retirar el material de aporte y dejar únicamente el material resistente. También se deben limpiar los cabezales de inyección para evitar una obstrucción de los conductos.

Por último, hay que tener en cuenta que la precisión mínima de la máquina es de 0.1-0.3 mm, por lo que hay que tener mucho cuidado con las dimensiones mínimas del modelo o se producirían fallos de fabricación.

D.V.II. Tratamiento Digital

Antes de poder obtener el modelo plástico final, se procede a realizar el tratamiento digital necesario, para obtener un formato legible por la máquina de prototipado rápido, a través de los siguientes programas:

- **SOLID WORKS**

Se importa la geometría creada en Abaqus CAE en formato .SAT al programa Solid Works desde el que se exportará el archivo .STL. Desgraciadamente, debido a alguna incompatibilidad entre programas, se generaban los archivos STL como superficies abiertas que no podían ser interpretadas correctamente por la impresora tridimensional. Para poder solventar este problema se tuvo que recurrir a otros programas

- **GEOMAGIC STUDIO 2013**

Se realizó la unión de los STL individuales y se reparó la malla del archivo para convertir todas las superficies libres en volúmenes cerrados. Esto es muy importante puesto que la impresora interpretaría los volúmenes abiertos como vacíos y no se llenaría de material resistente si no de material de aporte.

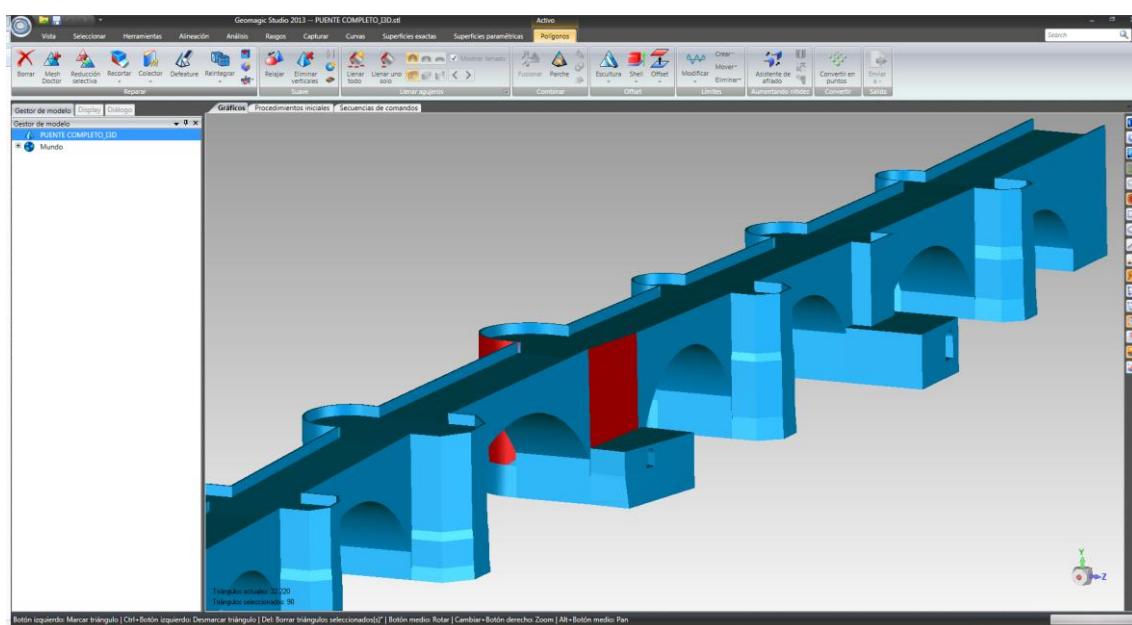


Figura 4. Geomagic Studio. Tratamiento de STL (1)

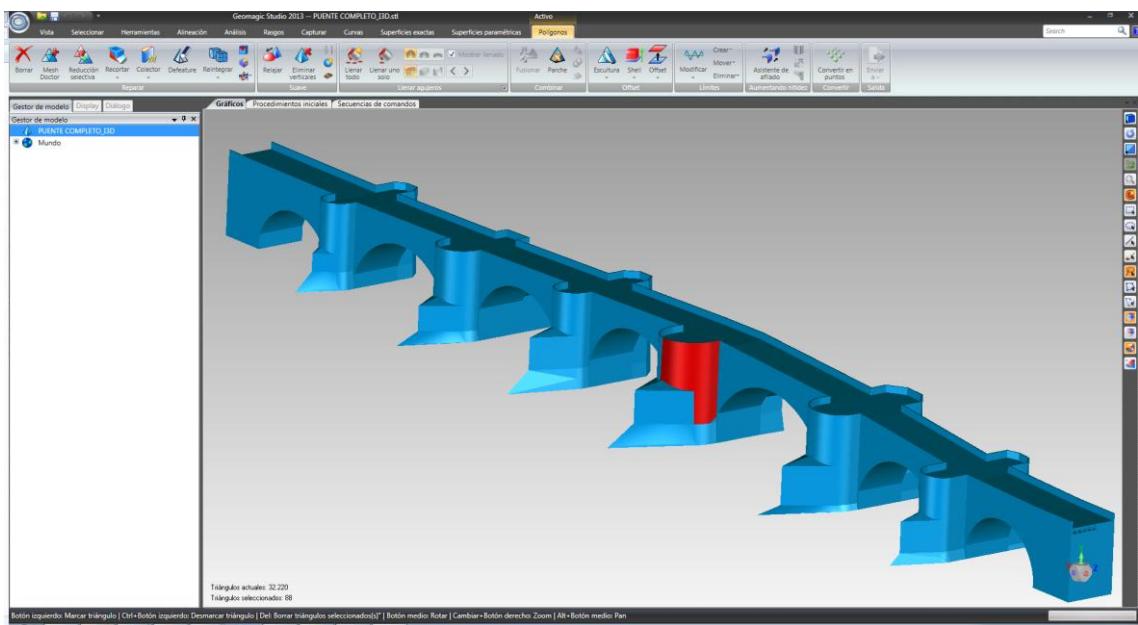


Figura 5. Geomagic Studio. Tratamiento de STL (2)

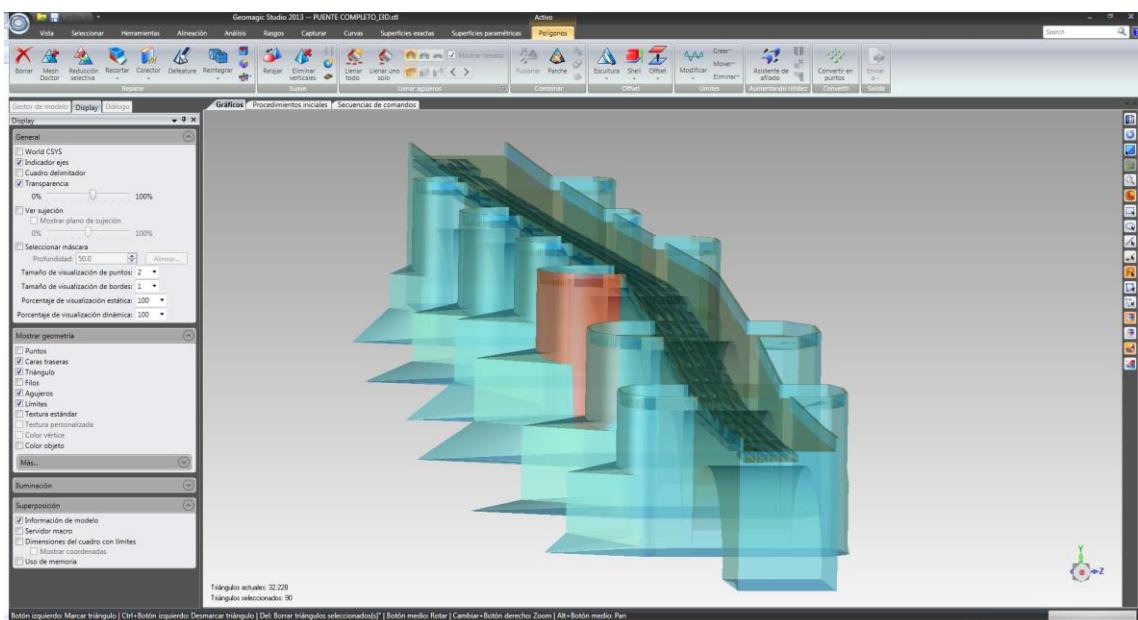


Figura 6. Geomagic Studio. Tratamiento de STL (3)

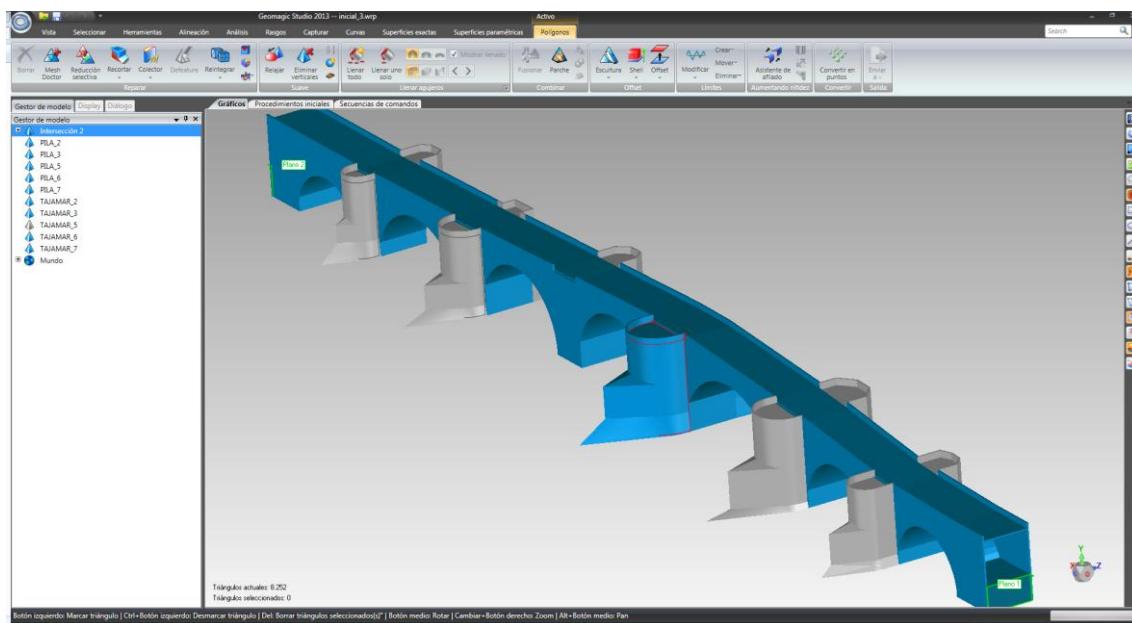


Figura 7. Geomagic Studio. Tratamiento de STL (4)

▪ MATERIALISE MAGICS 16

Programa con el que se reparan y tratan los STL como paso previo para su impresión. Se pueden grabar imágenes a través de inserción de archivos BMP.

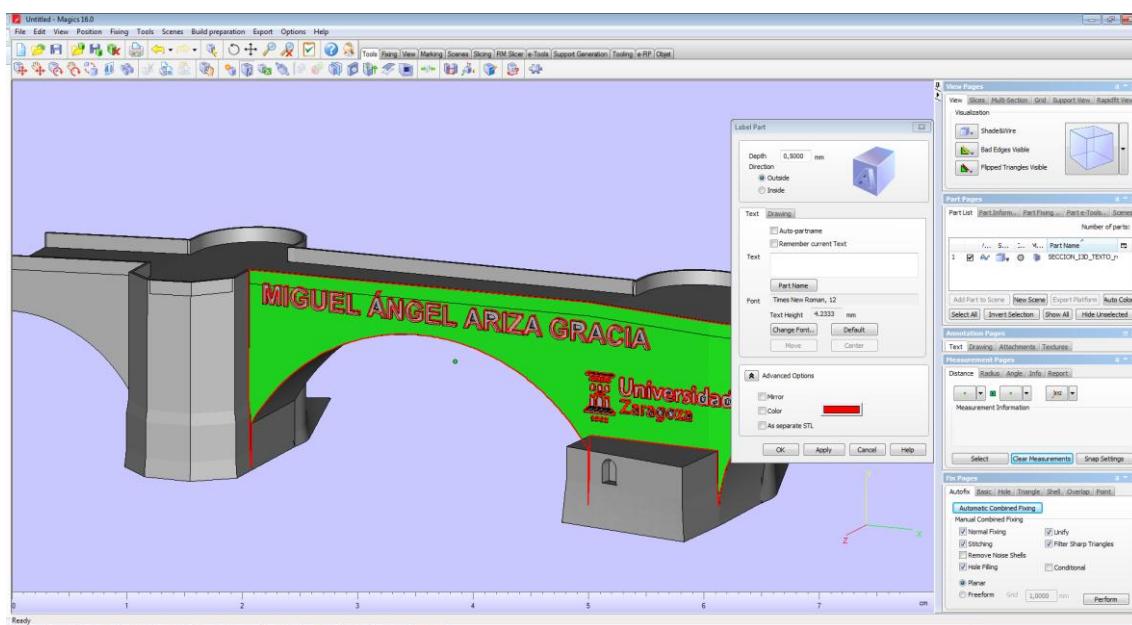


Figura 8. Aplicación de grabado mediante archivo BMP

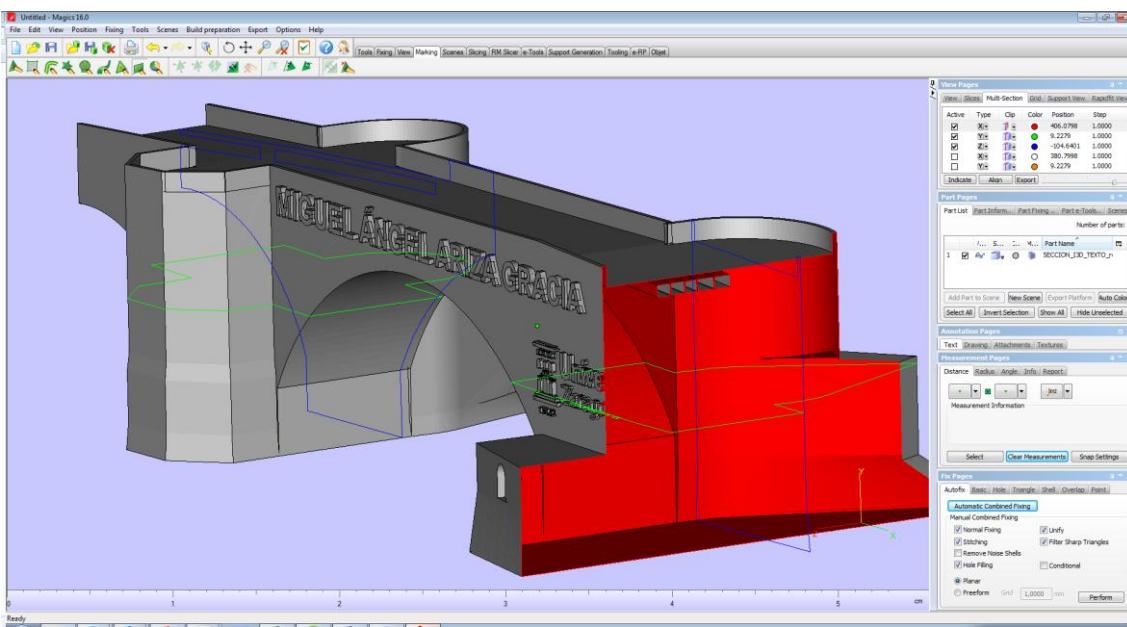


Figura 9. Comprobación de volúmenes cerrados

Como se observa en la Figura 9 toda la sección es roja excepto unos huecos correspondientes a las canalizaciones. Esto indica que el modelo es correcto y que los volúmenes están cerrados.

▪ OBJECT STUDIO

Software de las impresoras OBJET (la impresora que posee el departamento es una OBJET EDEN350V). Se cargan los archivos STL procesados (posición y orientación) en la bandeja, se valida el modelo, se selecciona el material, se estima el tiempo de fabricación y consumo de material de modelo y material de soporte... Por último se realiza el Preprocesamiento en slices de las secciones transversales y se gestiona la comunicación con la máquina.

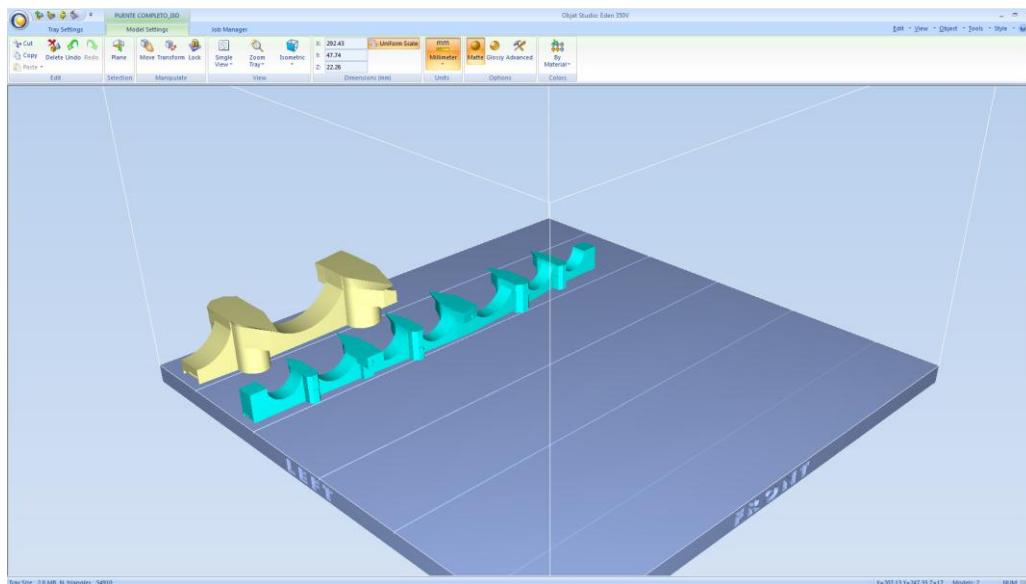


Figura 10. Posicionamiento en bandeja de impresora Objet (1)

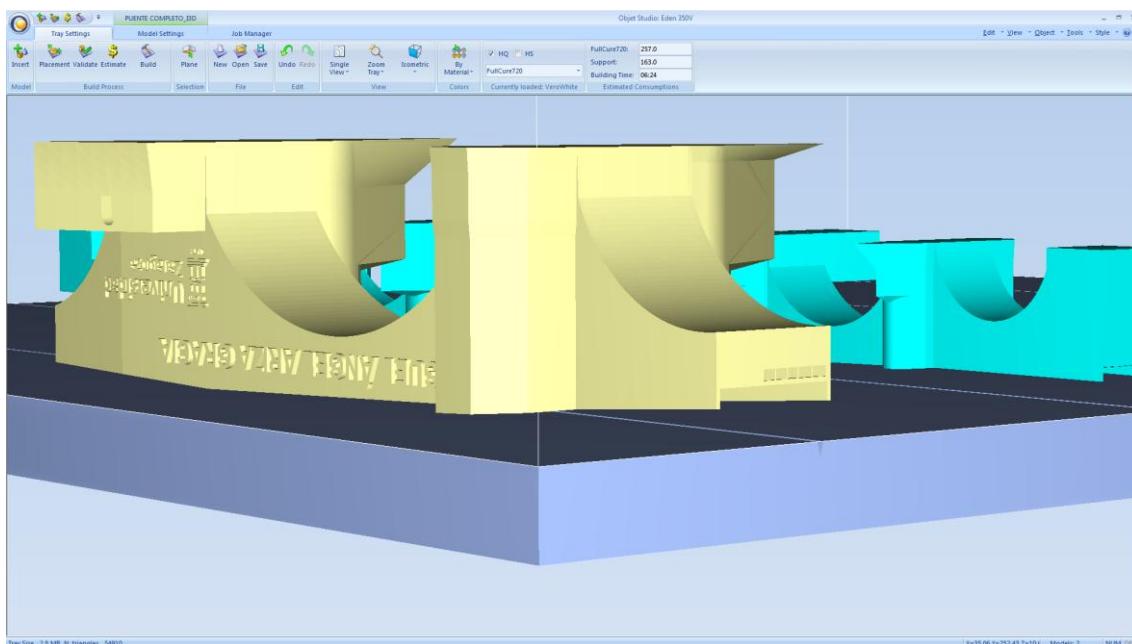


Figura 11. Posicionamiento en bandeja de impresora Objet (2)

D.V.II.I. Resultado

Tras 6 horas de impresión se obtuvieron dos modelos plásticos:

- Sección del arco 4: únicamente se reproducen las tajamares y el arco 4.
- Puente de Piedra: se reproduce el puente de piedra con sus tajamares y los pretils

Para finalizar con la colaboración de Miguel Ángel Ariza Barra se realizó una maqueta del entorno urbano en el que se localiza el puente quedando de la siguiente forma:

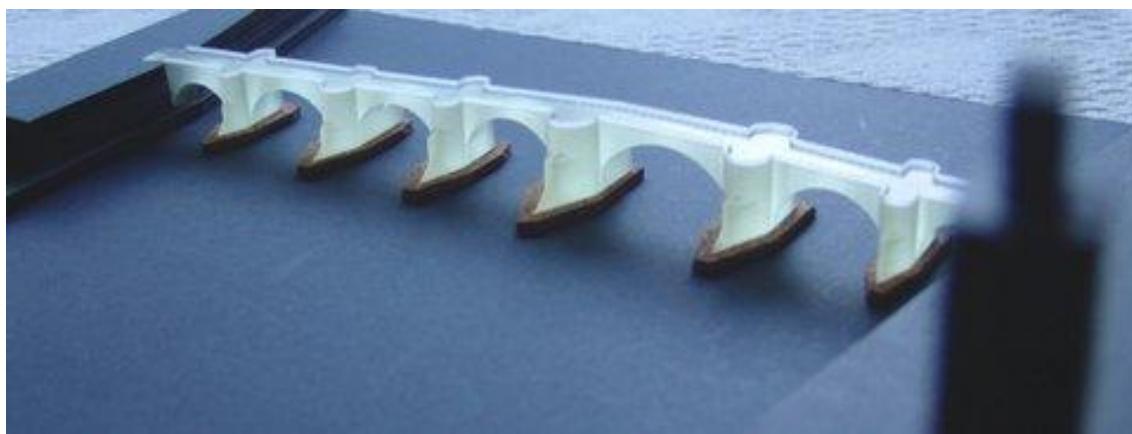


Figura 12. Fotos de la maqueta 1 (M.A. Ariza Barra)

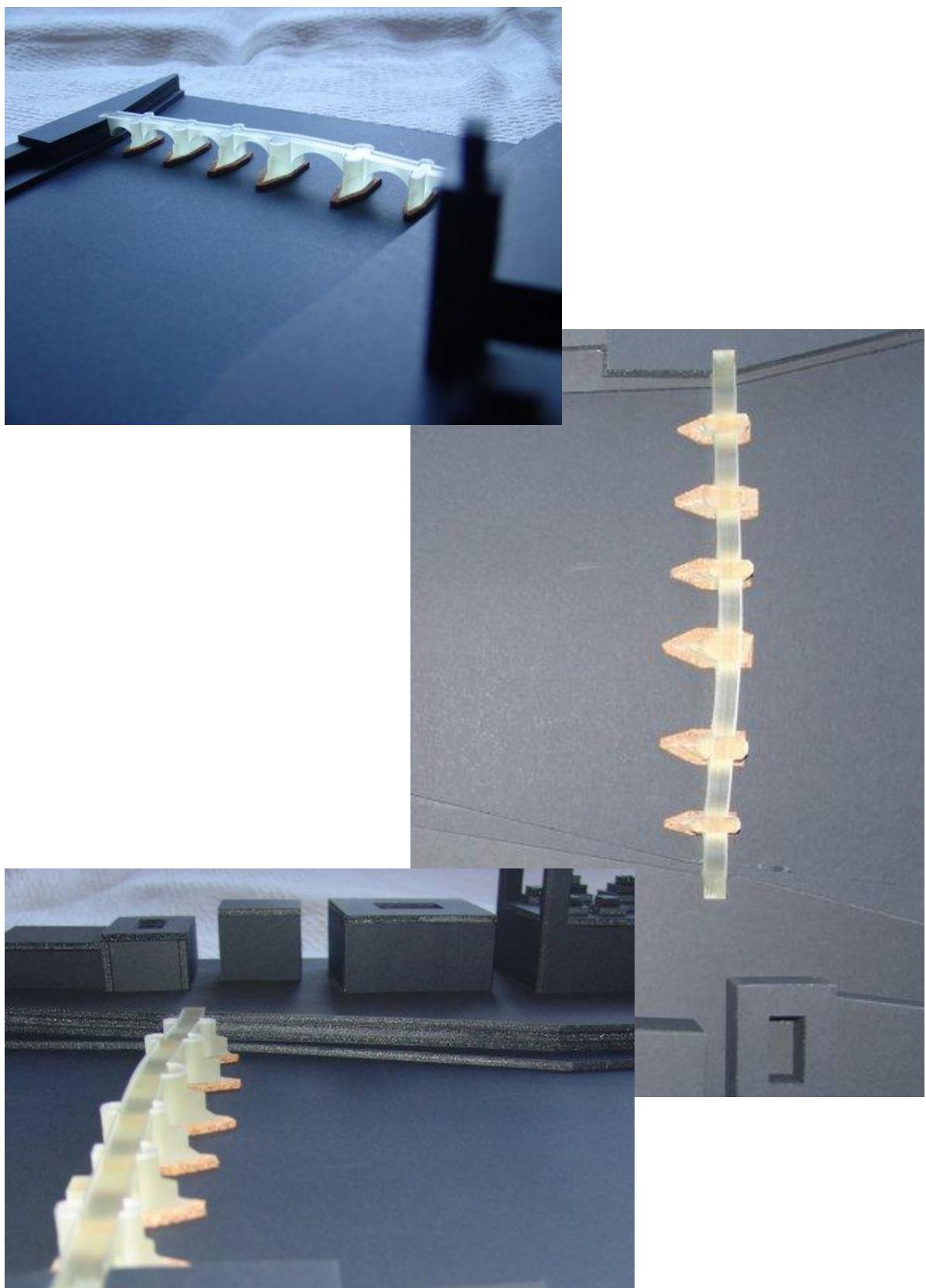


Figura 13. Fotos de la maqueta 2 (M.A. Ariza Barra)

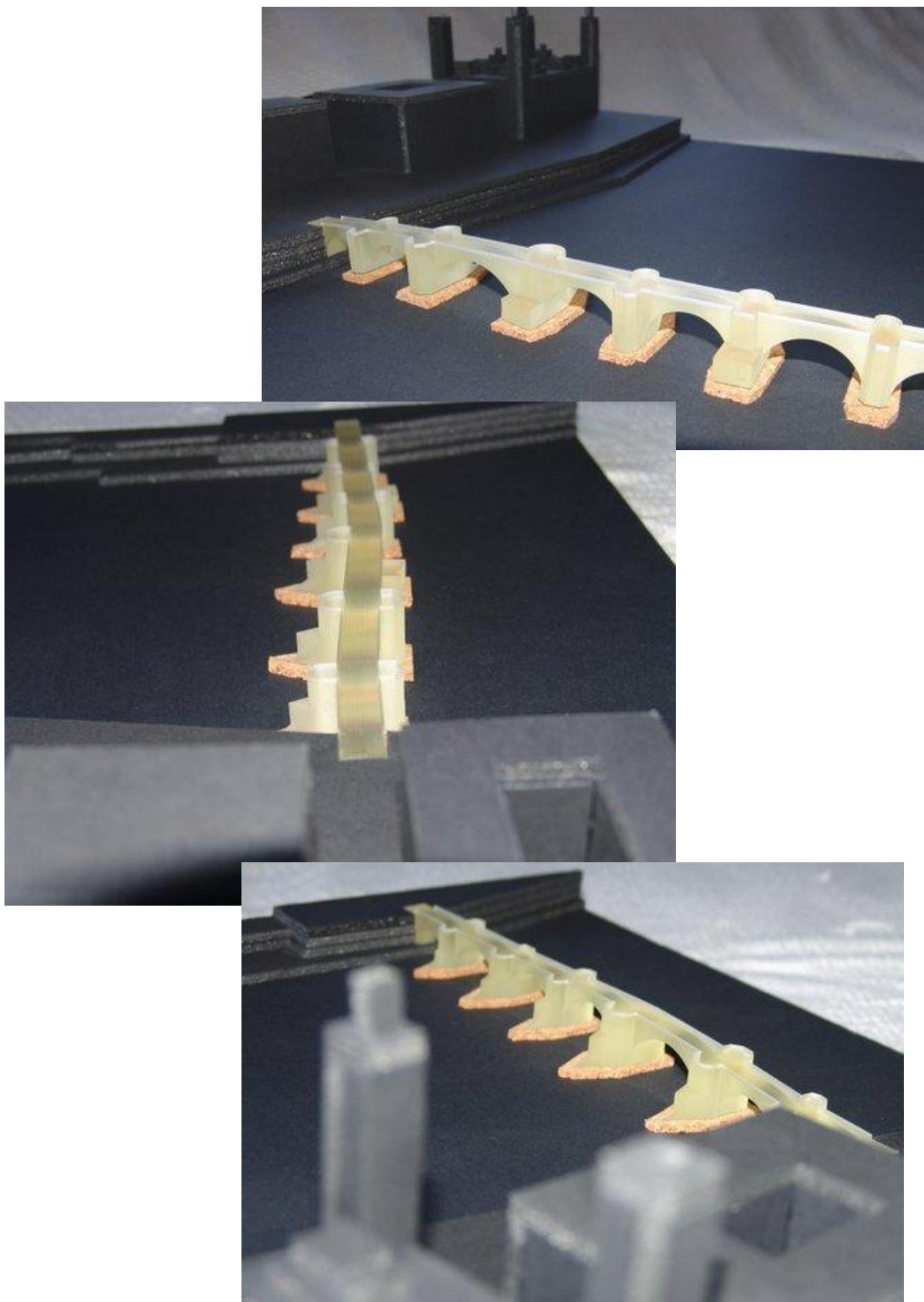


Figura 14. Fotos de la maqueta 3 (M.A. Ariza Barra)

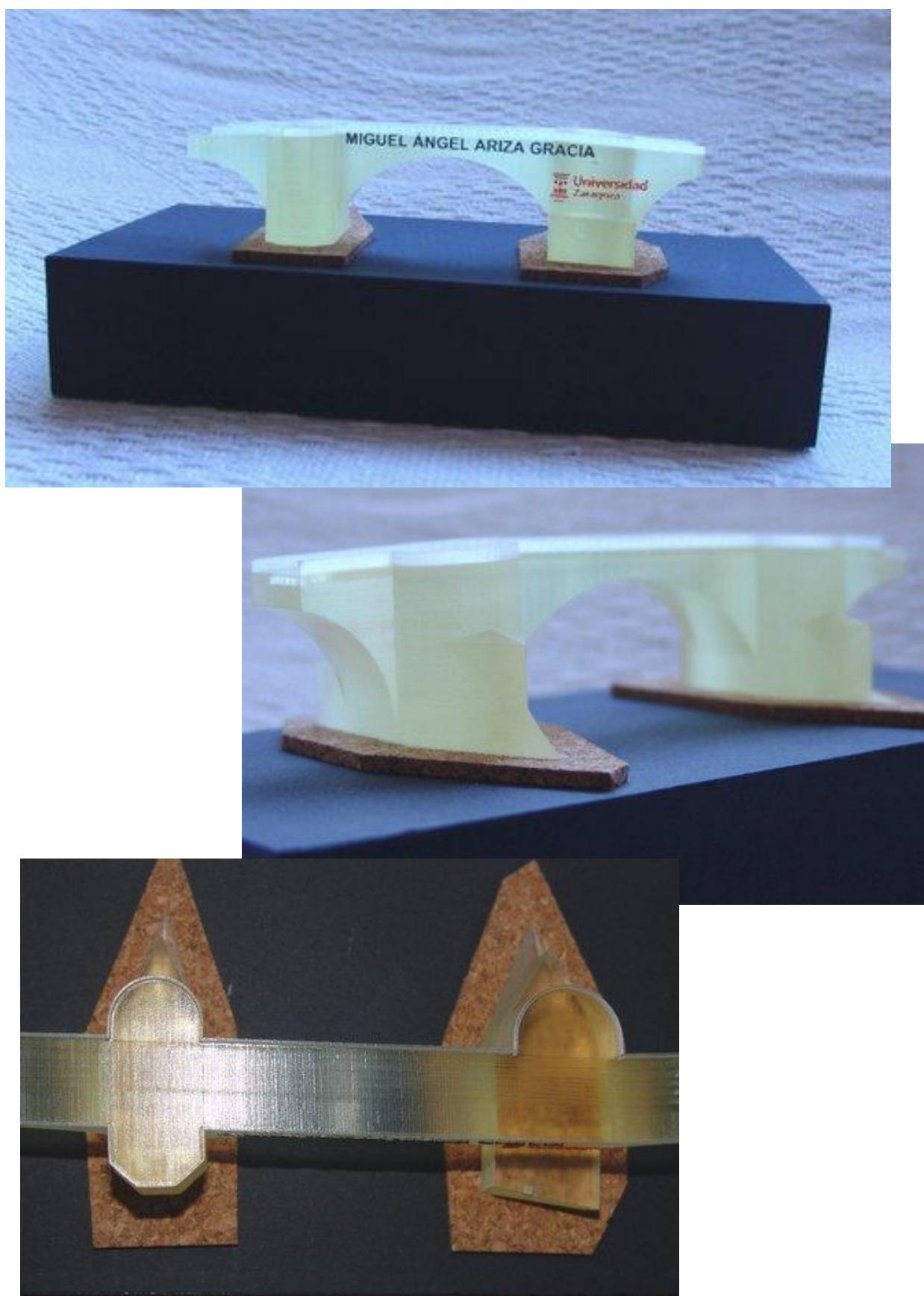


Figura 15. Fotos de la sección 1 (M.A. Ariza Barra)

Índice de Figuras. Anexo D

Figura 1. Descripción de los cuatro aspectos principales del prototipado rápido (49)	v
Figura 2. Impresora 3D Objet Eden 500V	vii
Figura 3. Componentes y Grados de Libertad de la impresora 3D	vii
Figura 4. Geomagic Studio. Tratamiento de STL (1)	viii
Figura 5. Geomagic Studio. Tratamiento de STL (2)	ix
Figura 6. Geomagic Studio. Tratamiento de STL (3)	ix
Figura 7. Geomagic Studio. Tratamiento de STL (4)	x
Figura 8. Aplicación de grabado mediante archivo BMP	x
Figura 9. Comprobación de volúmenes cerrados	xi
Figura 10. Posicionamiento en bandeja de impresora Objet (1)	xi
Figura 11. Posicionamiento en bandeja de impresora Objet (2)	xii
Figura 12. Fotos de la maqueta 1 (M.A. Ariza Barra)	xii
Figura 13. Fotos de la maqueta 2 (M.A. Ariza Barra)	xiii
Figura 14. Fotos de la maqueta 3 (M.A. Ariza Barra)	xv
Figura 15. Fotos de la sección 1 (M.A. Ariza Barra)	xvii

ANEXO E.
MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS

Este anexo no pretende ser una guía para el modelado del puente, sólo una pauta de los pasos que se han seguido para conseguirlo y los problemas que se han encontrado durante la realización.

El modelado se ha realizado íntegramente en Abaqus CAE.

En este modelado se han utilizado unidades del sistema internacional:

- Fuerza: Newton [N]
- Longitud: metro [m]
- Volumen: metro cúbico [m^3]³
- Tiempo: segundos: [s]

Y más concretamente:

- Peso: [kg/m^3]
- Fuerza distribuida: [N/m^2]
- Módulo elástico (E): [N/m^2]
- Poisson: [-]
- Aceleración (gravedad): [m/s^2]

E.I. Dimensiones

El modelado del puente se ha realizado tras una previa y exhaustiva investigación sobre las dimensiones del puente. Al provenir de varias fuentes distintas, los valores de las luces de los arcos, no eran exactas por lo que se utilizaron los valores obtenidos del Proyecto de Recalce y del Informe de infraestructuras (Anexo I. Planos y Láminas y Anexo H. Documentación del Ayuntamiento) como base para los arcos y las pilas. Para las pilas se utilizan valores aproximados, que respetan su forma geométrica, debido a que, al ser elementos de escasa entidad estructural en éste análisis, son un mero ornamento.

Los valores utilizados para el modelado geométrico en Abaqus se reflejan en los planos mostrados al final del anexo.

E.II. Pre-proceso

E.II.I. Geometría

La primera fase del modelado consiste en realizar unos modelos bidimensionales con la estructura a conseguir (Figura 1). El objeto era intentar construir el modelo tridimensional a partir de la extrusión (Extrude) del plano bidimensional seleccionado. Esto hubiera sido posible si la planta del puente hubiese sido plana; pero como la planta del puente tiene una ligera inclinación que abarca los arcos 3º y 4º en su totalidad y, posteriormente, una ligera deriva en las últimas arcadas, este proceso era del todo inaceptable por dejar huecos en el modelo debido a que al extrusión se realizaba en el plano normal al dibujo.

La primera acción para solventar este problema fue la simplificación del modelo: la planta constaría de dos tramos rectos y uno inclinado aproximadamente 3'5º. Con esto no se lograba utilizar el comando de extrusión ya que, en el plano inclinado, seguía generando huecos.

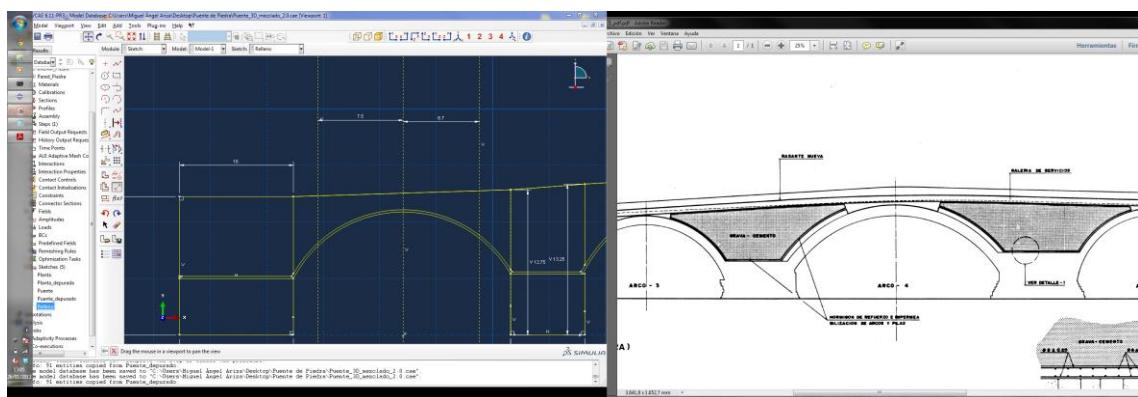


Figura 1. Trazado de Sketch para modelado

Se intentó recurrir al modelado por barrido (Sweep) al cual, dándole un segmento espacial al que seguir (camino o path) y una sección crea un sólido tridimensional. Ésta opción de modelado fue utilizada en partes concretas del modelo pero no podía ser utilizada de manera extensiva

para realizar el puente por problemas de superposición de sólido (problema inverso a los huecos dejados por la extrusión).

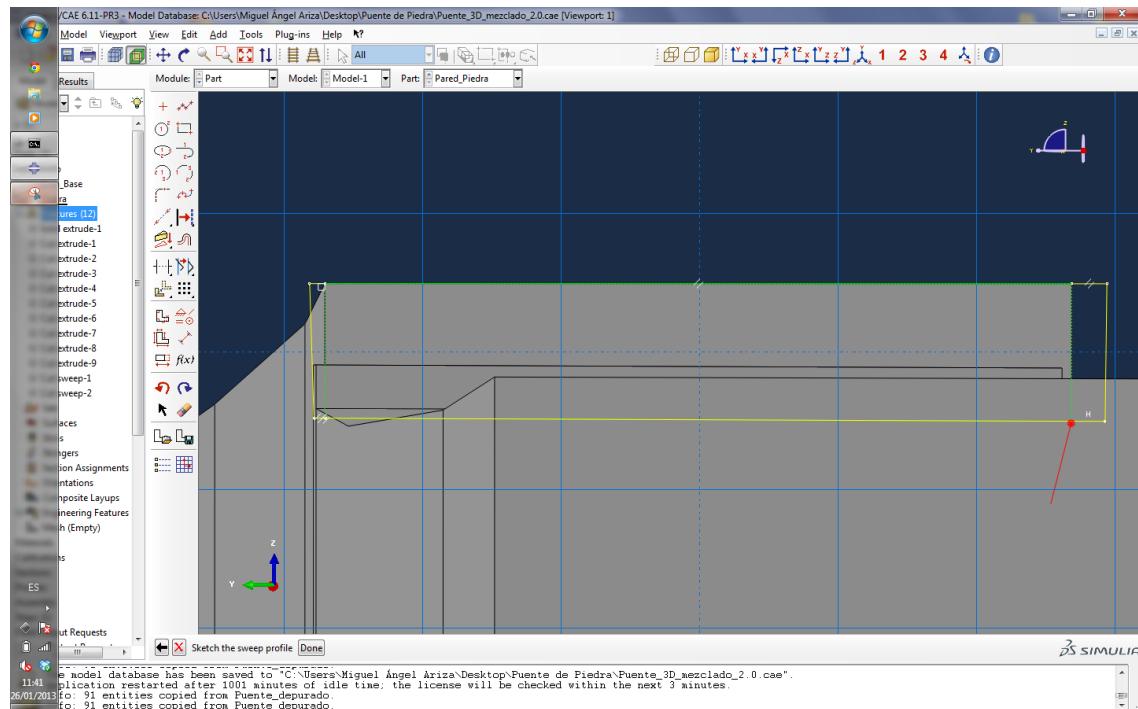


Figura 2. Sweep (Rojo - Path; Amarillo - Section)

Finalmente se optó por una de las técnicas de modelado más avanzadas de las que se dispone en Abaqus: el Loft. Esta técnica pretende realizar el modelado geométrico de un cuerpo tridimensional mediante la unión de los cortes transversales de su geometría mediante planos (costillas). Estas costillas se pueden unir controlando las tangencias, y otros parámetros de entrada, permitiendo unir sólidos de distinto tamaño. Esta propiedad era el requisito necesario para poder crear el sólido del puente rellenando los huecos que dejaba la extrusión.

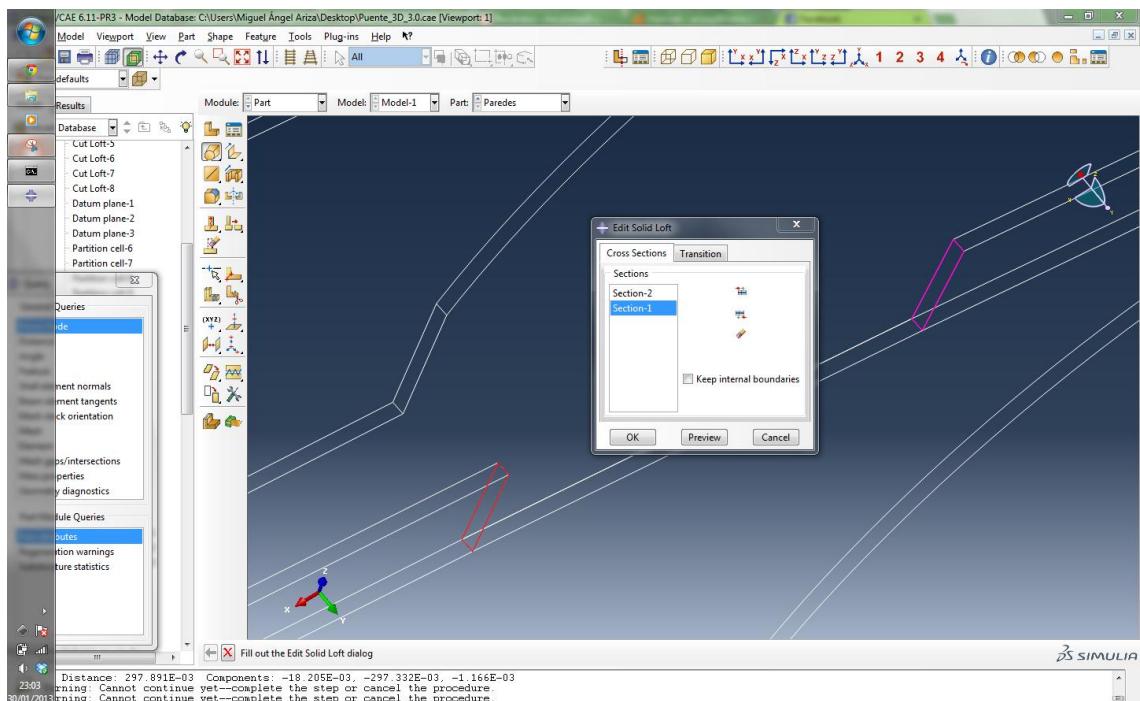


Figura 3. Definición de dos secciones para el LOFT (rosa y rojo)

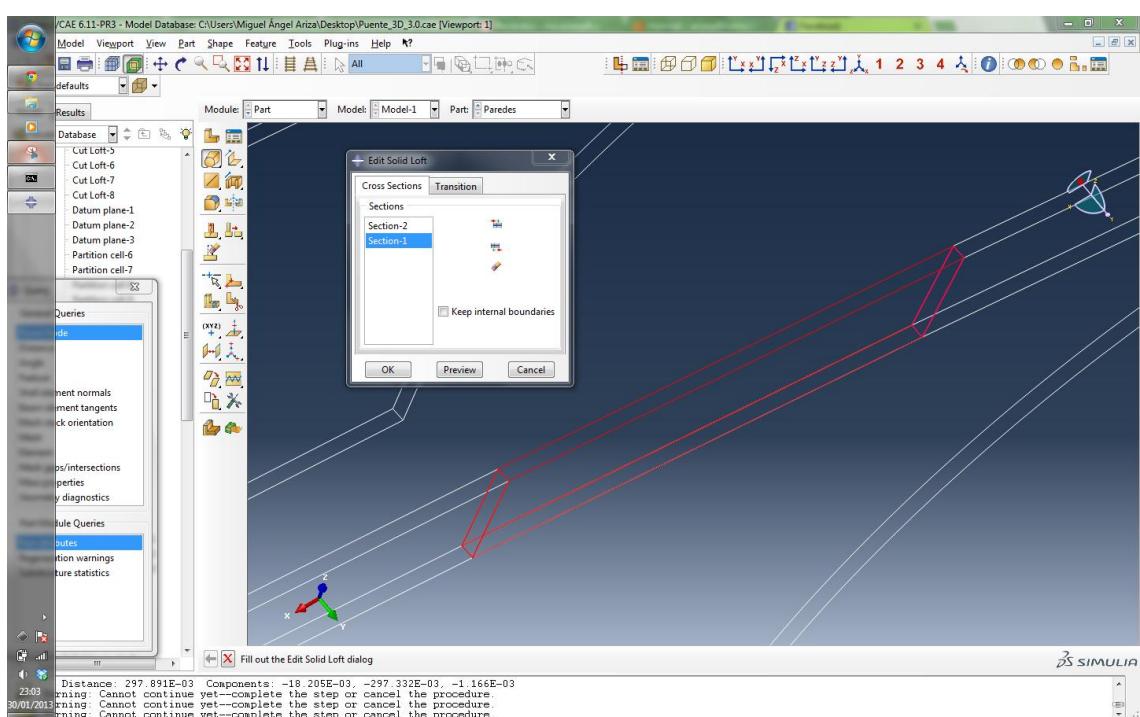


Figura 4. Generación del sólido por LOFT uniendo ambas secciones

Teniendo en cuenta este proceso y habiendo definido previamente cada sketch de cada pieza se obtienen las piezas del modelo:

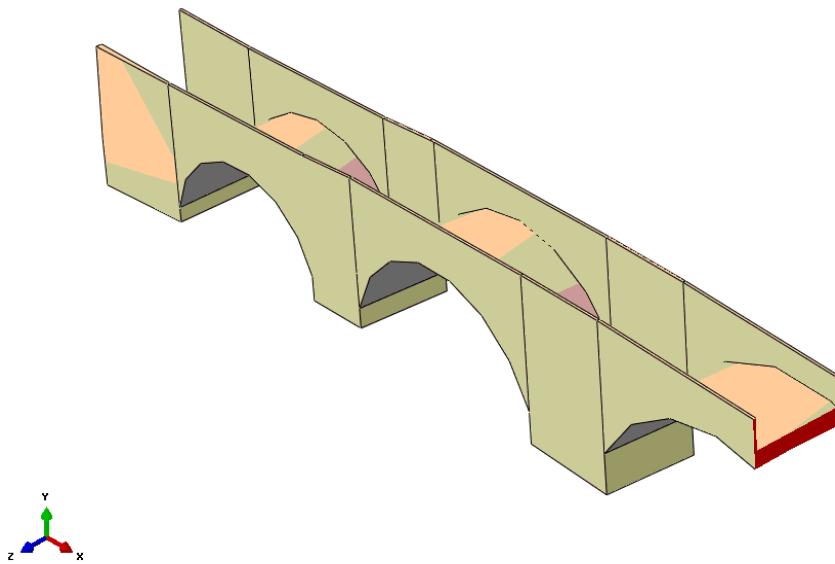


Figura 5. Interior de Piedra y Paredes de Piedra

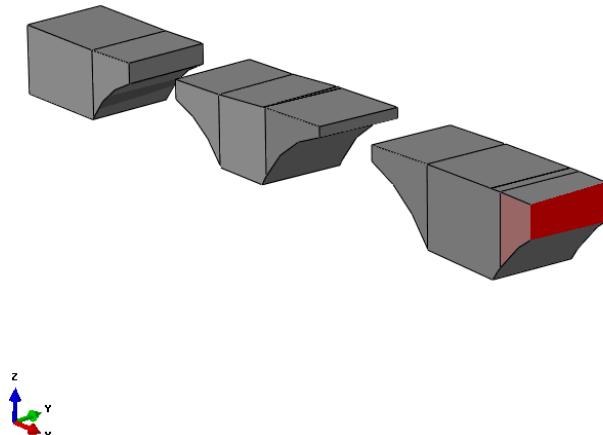


Figura 6. Relleno de Grava cemento

El modelado se compone de 30 partes: CANALIZACIÓN, GRAVA CEMENTO, HORMIGÓN, INTERIOR DE PIEDRA, LOSA_35, PAREDES, PILA_n PIEDRA ($n=2..7$), PILA_n RELLENO, TAJAMAR_n PIEDRA, TAJAMAR_n RELLENO.

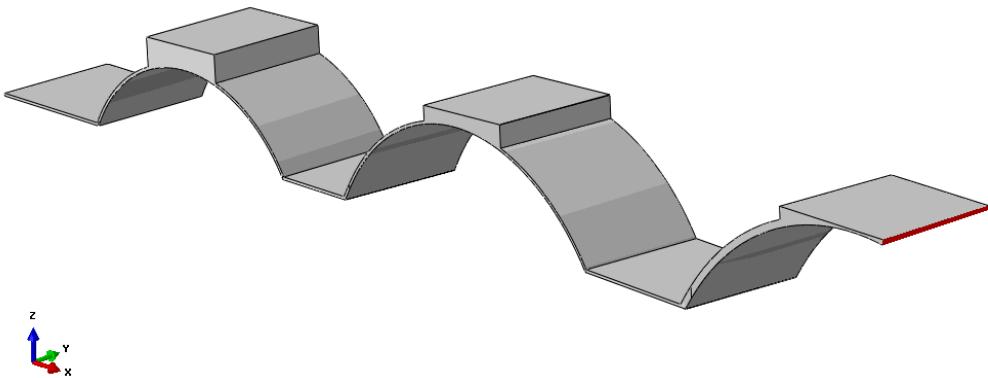


Figura 7. Relleno de hormigón armado

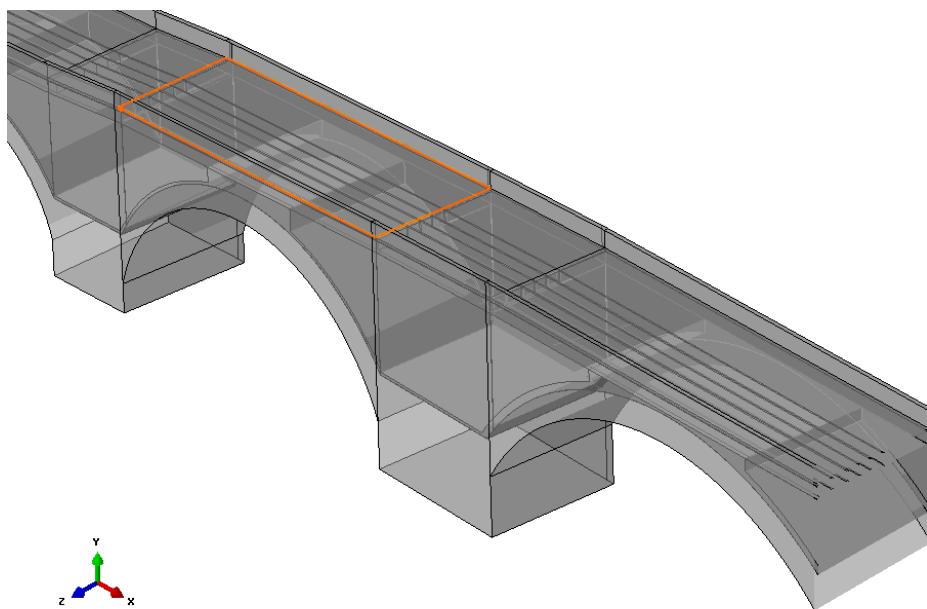


Figura 8. Montaje de cada pieza del puente (Transparente)

Para la realización de algunas piezas también se ha utilizado la suma y resta booleana de elementos permitiendo así un ajuste óptimo entre sus caras para la posterior definición de los contactos.

Hay que tener en cuenta que cada pieza que se genera (Part) es individual y que, por sí sola, no se puede calcular. Para calcularla hay que ponerla dentro de un conjunto global llamado ensamblaje (Assembly) que permite definir las relaciones de las piezas, sus cargas y todos aquellos parámetros que puedan envolver al conjunto (gravedad, temperatura...)

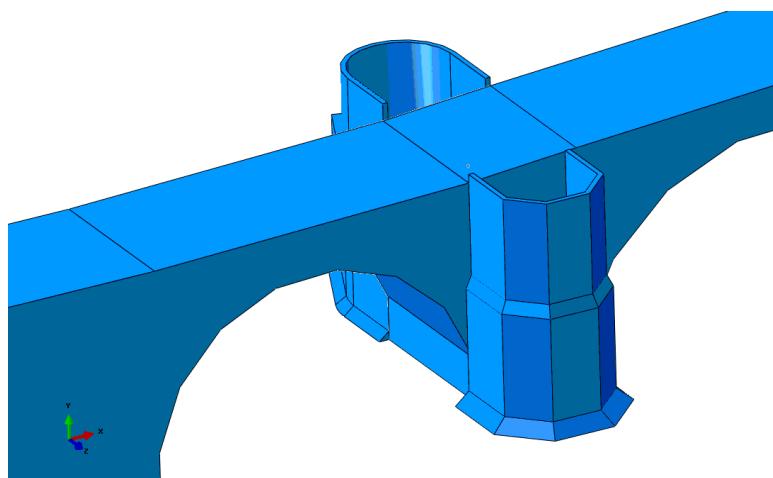


Figura 9. Muestra de ensamblaje 1 (No el definitivo)

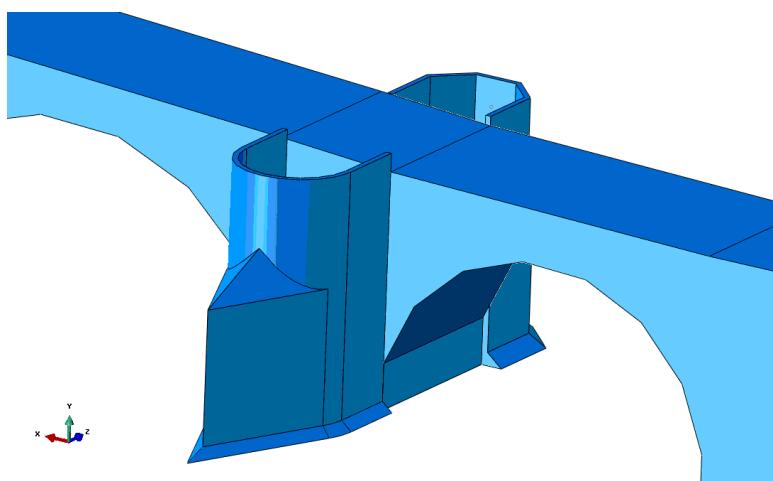


Figura 10. Muestra de ensamblaje 2 (No el definitivo)

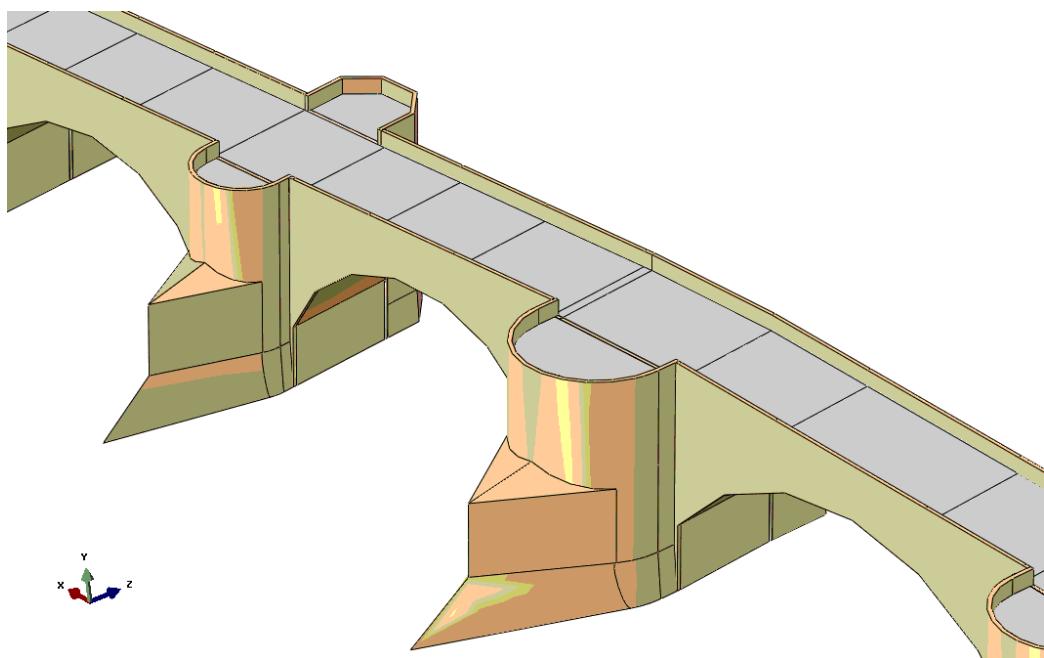


Figura 11. Ensamblaje definitivo

E.II.II. Materiales

Una vez que la geometría está definida se aplican los materiales. Hay que tener en cuenta que en Abaqus no se definen las unidades si no que, al introducir los datos, el usuario debe saber si están en unidades del sistema internacional, o no, ya que los resultados se darán en consecuencia.

En Abaqus se definen los materiales a través de tres pasos:

- Propiedades del material (Material Properties): se precisa de la densidad, módulo elástico y coeficiente de Poisson.
- Tipo de Sección (Section Type): se asigna una sólida y homogénea para geometría 3D.
- Asignación de la sección y la propiedad a la parte deseada.

Así pues los materiales son elásticos lineales e isótropos con las propiedades determinadas en el Anexo A. Materiales.

Posteriormente se define una sección sólida homogénea y se aplica a las partes según sean: piedra caliza, hormigón o relleno.

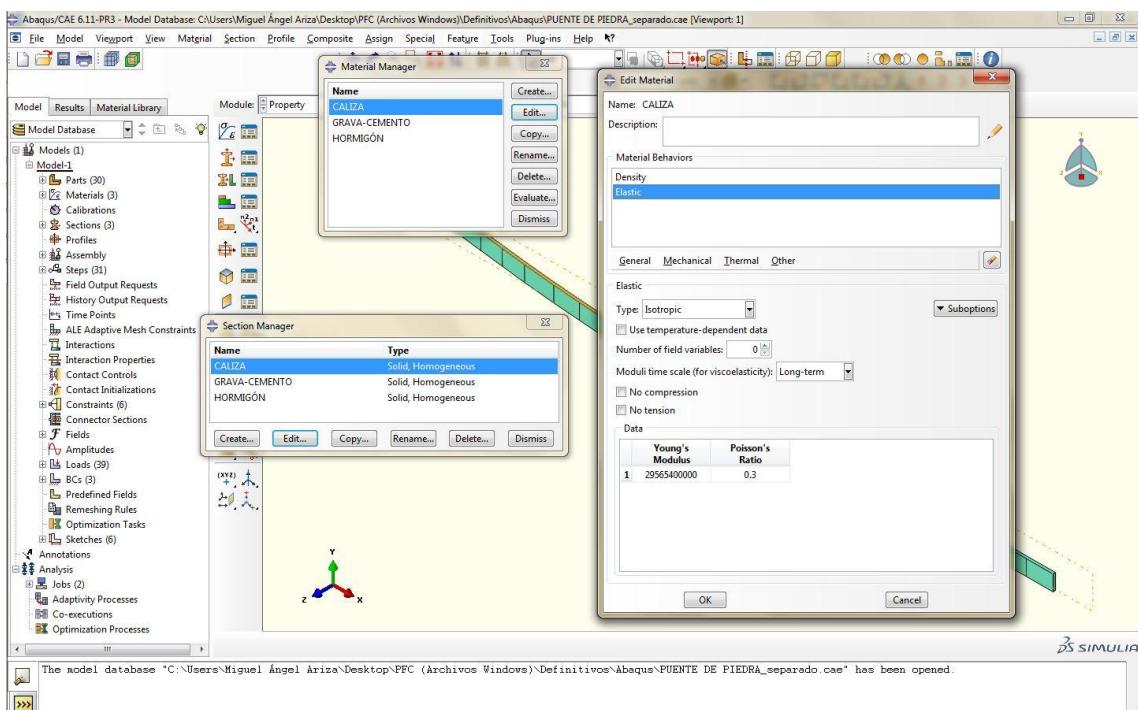


Figura 12. Definición de materiales en el módulo Property

E.II.III. Step

Los step de cálculo son aquellos pasos en los que se realiza un cálculo. Se pueden definir los pasos de cálculo (Figura 13), máximos y mínimos, métodos de iteración, grandes desplazamientos... Para este modelo en concreto, se han realizado 31 steps de cálculo estático correspondientes a los distintos estados de carga definidos por la normativa en el Anexo B. Cargas, incluyendo las hipótesis particulares de cálculo de los autobuses. Además, para el análisis de frecuencias naturales, se incluye otro step adicional.

Estos step son muy importantes ya que, una vez obtenidos los resultados, es la única forma de combinar las hipótesis de tensión y desplazamientos mediante los tensores y vectores correspondientes. Nota: Abaqus no permite modificar las cargas de fuerzas en la base de datos .odb.

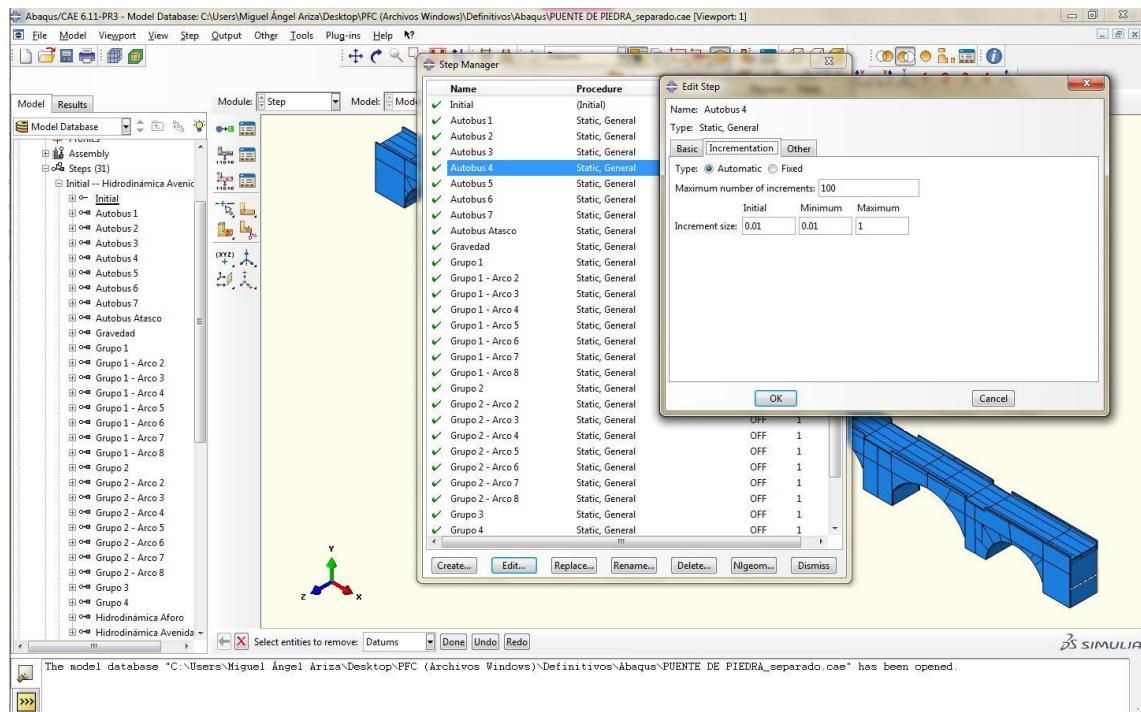


Figura 13. Control de incremento de pasos en el módulo Step

E.II.IV. Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno (Boundary Conditions) son aquellas que sirven para delimitar, de la forma más precisa posible en el programa, el comportamiento real de lo que se quiere calcular. Existen dos vertientes muy diferenciadas de las condiciones de contorno:

1. Cargas (Boundary Conditions – Loads): son todas aquellas cargas físicas o de acción climática que soporta del objeto de cálculo. Vienen dadas por la normativa específica de cada ámbito o por la observación de los fenómenos reales que inciden sobre él.
2. Desplazamientos (Boundary Conditions – Displacement): son todas aquellas limitaciones de desplazamiento o movimiento que tiene el elemento.

Como se ha comentado en el apartado de mallado, se han creado grupos de nodos en los centros de los arcos para poder aplicar las cargas de los autobuses y el resto (viento, agua, cargas distribuidas) se ha aplicado sobre superficies previamente preparadas en la geometría.

Las cargas se han aplicado según la normativa definida en el Anexo B. Cargas; los desplazamientos se han impedido en la base y en los empotramientos sur y norte de las riveras según la observación del modelo real y el estudio de las cimentaciones que, al estar cosidas al

terreno como se ha estudiado de su última remodelación (Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza), se considera que impedirán los asientos del terreno así como los desplazamientos.

Se aplican 39 cargas según normativa definida en el Anexo B correspondiente quedando de la siguiente forma:

- Autobús cargado: 255.000 N
- Autobús vacío: 188.000 N
- Gravedad: 9.81 m/s²
- Grupo 1 Aceras: 2.500 N/m²
- Grupo 1 Calzada: 9.000 N/m²
- Grupo 1 Área Remanente: 2.500 N/m²
- Grupo 1 Vehículo pesado: 600.000 N
- Grupo 2 Calzada: 3.600 N/m²
- Grupo 2 Remanente: 1.000 N/m²
- Grupo 2 Vehículo pesado: 450.000 N
- Grupo 3 Aceras: 5.000 N/m²
- Grupo 4 Aceras: 5.000 N/m²
- Grupo 4 Aglomeración: 5.000 N/m²
- Hidrodinámica Aforo (1.5 m): 20.000 N/m²
- Hidrodinámica Avenida (4 m): 20.000 N/m²
- Viento Presión 0-10 m: 21.500 N/m²
- Viento Presión 10-15 m: 23.500 N/m²
- Viento Presión 15-20 m: 25.500 N/m²
- Viento Succión 0-10 m: -25.600 N/m²
- Viento Succión 10-15 m: -28.000 N/m²
- Viento Succión 15-20 m: -30.200 N/m²

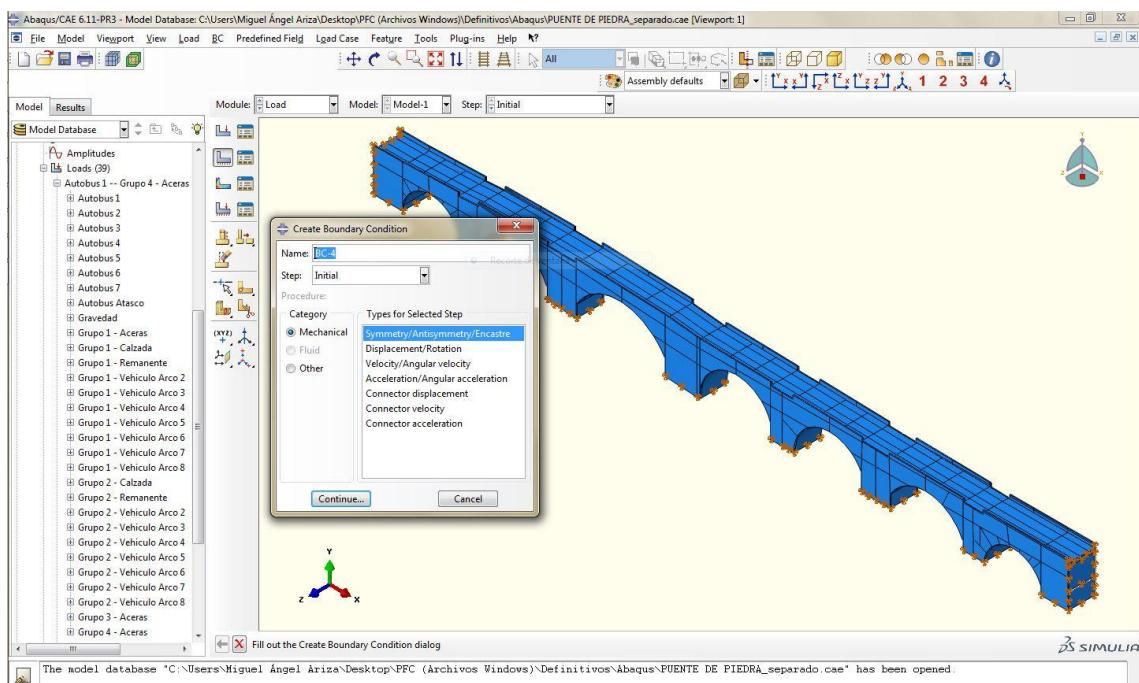


Figura 14. Módulo Load - Introducción de condiciones de contorno de desplazamiento

E.II.V. Mallado

En casi toda la documentación que se encuentra de elementos finitos se sitúa el mallado como el paso final al cálculo. Aquí, sin embargo, se establece delante de las condiciones de contorno por una cuestión práctica.

Abaqus permite mallar antes de establecer cargas y esto es muy interesante porque, cuando el modelo está mallado, se pueden crear grupos de elementos o nodos en los que establecer cargas. Si no se hubiese mallado previamente al paso de establecer cargas éstas sólo pueden ser cargas en superficies de geometría y nodos de geometría limitando altamente, e incluso haciendo imposible, el posicionamiento de las cargas.

Para el mallado hay que tener en cuenta, además, otras dos cosas que son muy importantes:

1. Topología virtual (Virtual Topology) que elimina segmentos (edges), nodos y caras que simplifican la geometría y permiten su mallado.
2. Particiones (Cell Partition) que “trocean” la geometría de forma que puedan mallarse estructuradamente.

Unas buenas estrategias de partición de los sólidos y de aplicación de la topología virtual consiguen que las “parts” no mallables (color naranja) puedan mallarse (color amarillo o verde).

En este modelado se han utilizado combinadamente los dos tipos de mallado básico: estructurado (structured) y barrido (sweep). Utilizando un tamaño de semilla (seed) de 0.3 (el ancho del pretil del puente). Lo que ha resultado en:

- Mallado sin pilas
 - Número de nodos: 1.172.112
 - Número de elementos: 938.982
 - 825.876 elementos hexaédricos lineales del tipo C3D8
 - 113.106 elementos hexaédricos lineales del tipo C3D8R

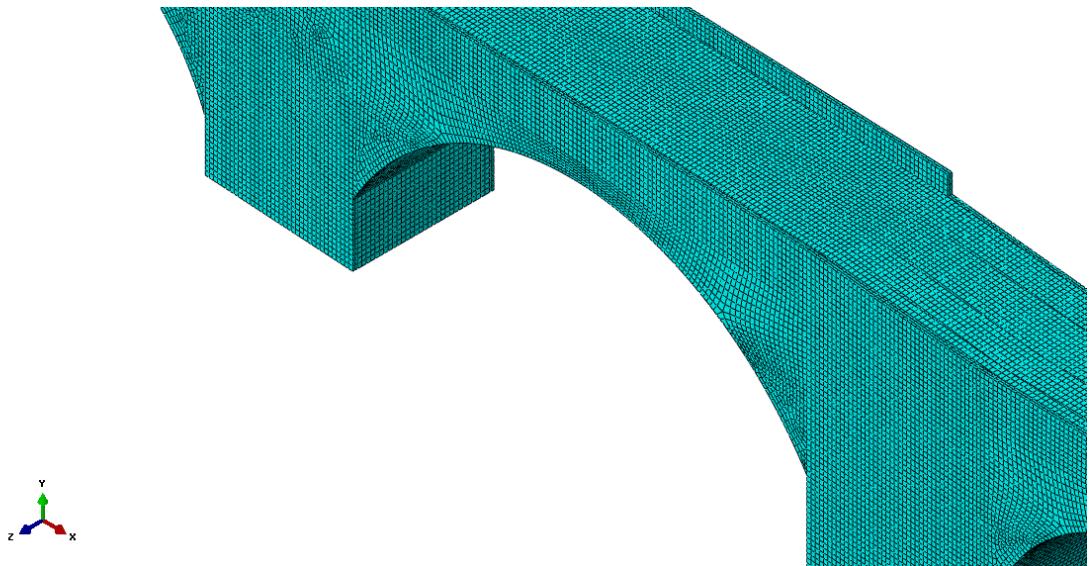


Figura 15. Mallado sin pilas

- Mallado con pilas
 - Número de nodos: 1.363.738
 - Número de elementos: 1.100.118
 - 987.012 elementos hexaédricos lineales del tipo C3D8
 - 113.106 elementos hexaédricos lineales del tipo C3D8R

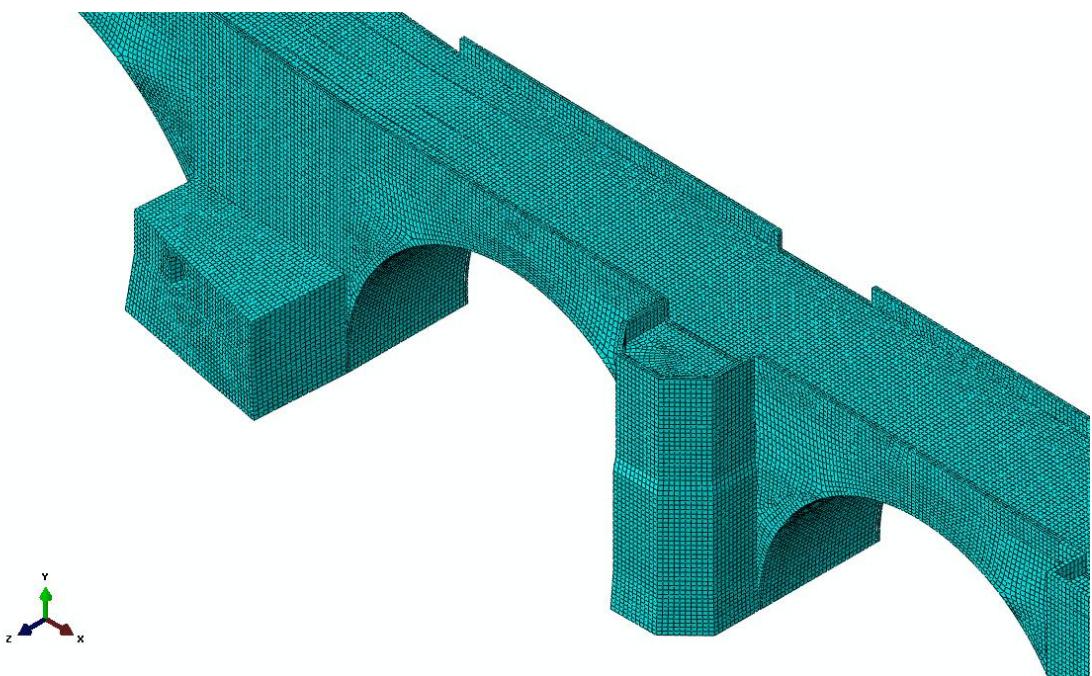


Figura 16. Mallado con Pilas

Los hexaedros son elementos del tipo C3D8 y C3D8R cuyas características son:

- C3D8: elemento cubico de aplicación general con integración completa (8 puntos de integración) que no es adecuado para comportamientos plásticos del material, coeficientes de Poisson elevados o flexión en placas finas.

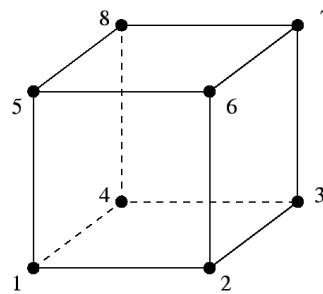


Figura 17. Elemento C3D8 (29)

- C3D8R: elemento cubico de aplicación general con integración reducida (1 punto de integración) que, sin embargo, tiene las mismas funciones de forma que el elemento C3D8. Presenta inconvenientes como: insuficiente rigidez en flexión, tiene buena precisión ante tensiones y deformaciones pero al estar localizadas en el centro del elemento (punto de integración) requiere de elementos muy pequeños, posee modos espúreos de energía cero por lo que no es muy útil sin control hourglass.

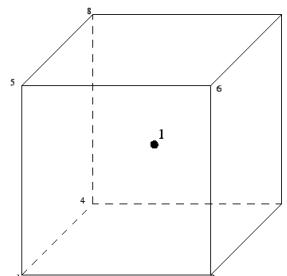


Figura 18. Elemento C3D8R (29)

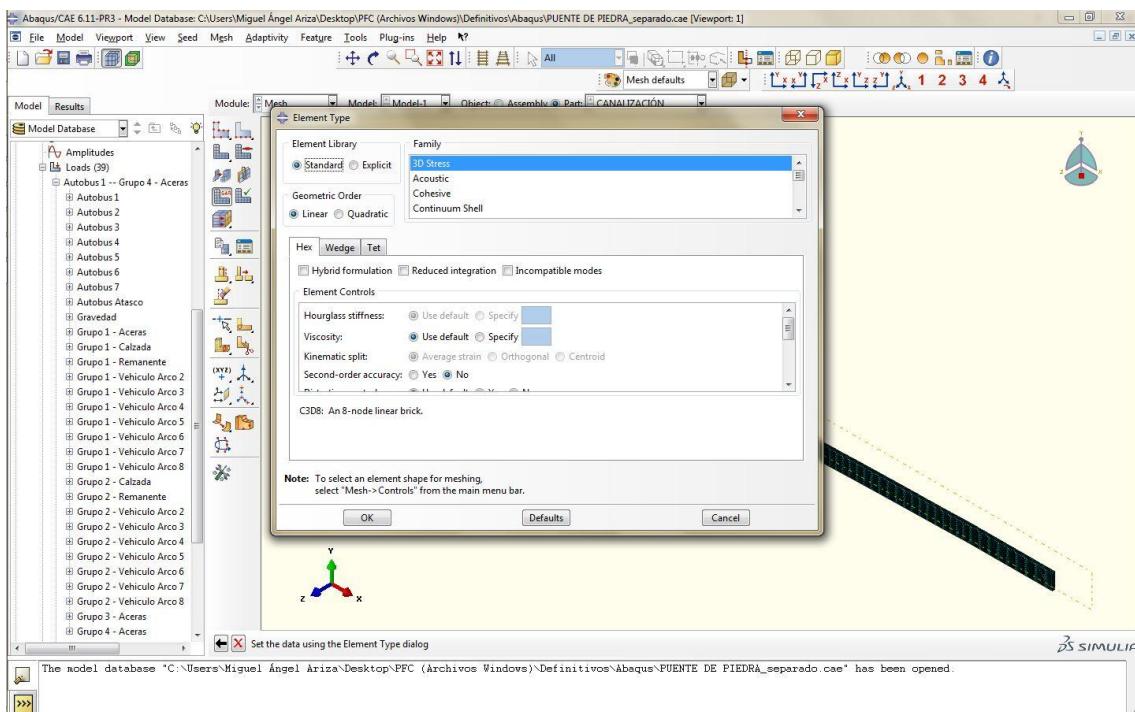


Figura 19. Selección del tipo de elemento en el módulo Mesh

Los tetraedros son elementos del tipo C3D10 cuyas características son:

- C3D10: es un elemento tetraédrico cuadrático lineal con 10 puntos de integración que se comporta bastante bien para propósitos generales con la ventaja añadida de tener un mallado total de los elementos.

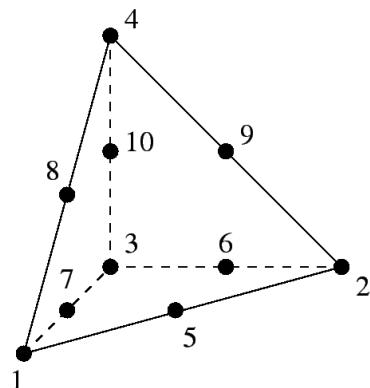


Figura 20. Elemento C3D10 (29)

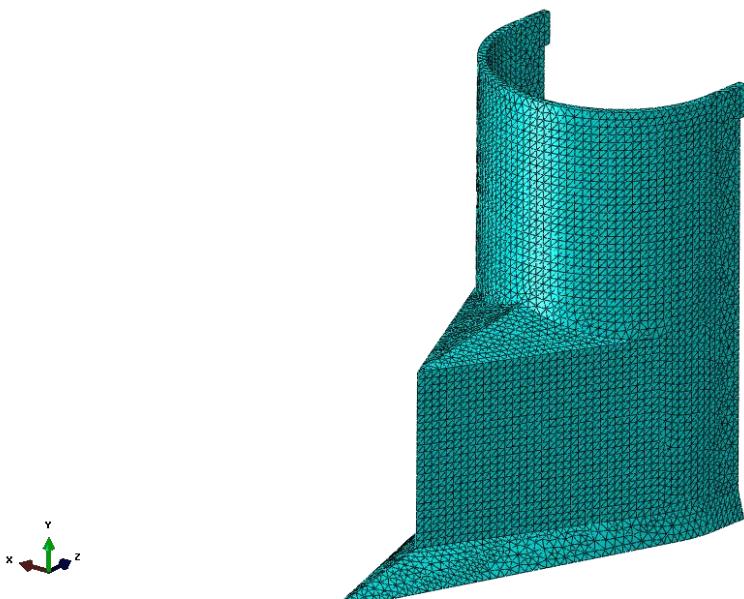


Figura 21. Mallado de tajamares

E.II.VI. Cálculo

Una vez completado todo el proceso de modelado se somete a cálculo a través de un trabajo (job) de cálculo en el que se especificará el porcentaje de memoria física a utilizar y si existe parallelización en los cálculos.

En este modelo se han realizado todos los cálculos en paralelo con los siguientes requisitos de cálculo en el clúster Hermes del I3A de la Universidad de Zaragoza:

- Cálculo estático
 - 32 CPUS
 - 60.000 GB de RAM
 - Horas de cálculo:
 - Inicio: Día 25 de Julio a las 4:11:40 PM
 - Fin: Día 26 de Julio a las 11:34:58 PM
 - Tiempo transcurrido: 31 h 23 min 18 s
 - Tamaño de datos:
 - Archivo CAE 70.168 KB
 - Archivo INP 128.912 KB
 - Archivo ODB 10.434.893 KB
- Cálculo de frecuencias naturales
 - 8 CPUS
 - 30.000 GB de RAM
 - Horas de cálculo (sin pilas):
 - Inicio: Día 25 de Julio a las 8:11:00 AM
 - Fin: Día 26 de Julio a las 12:27:09 AM
 - Tiempo transcurrido: 28 h 16 min 9 s
 - Tamaño de la base de datos (sin pilas):
 - Archivo CAE 71.956 KB
 - Archivo INP 126.832 KB
 - Archivo ODB 6.337.567 KB
 - Horas de cálculo (con pilas):
 - Inicio: Día 29 de Julio a las 5:01:01 PM
 - Fin: Día 29 de Julio a las 9:38:50 PM
 - Tiempo transcurrido: 4 h 37 min 49 s
 - Tamaño de la base de datos (con pilas):
 - Archivo CAE 68.676 KB
 - Archivo INP 146.154 KB
 - Archivo ODB 1.986.164 KB

E.III. Post-proceso

Una vez realizado el cálculo se procede al post-proceso de información de las tensiones, desplazamientos y frecuencias naturales obtenidos. Para ello se cuenta con las herramientas de visualización de los campos de tensiones y desplazamientos en diferentes colores.

Hay que tener especial cuidado con estos campos porque, a veces, no representan realmente lo que se quiere observar: depende de la escala a la que se trabaje.

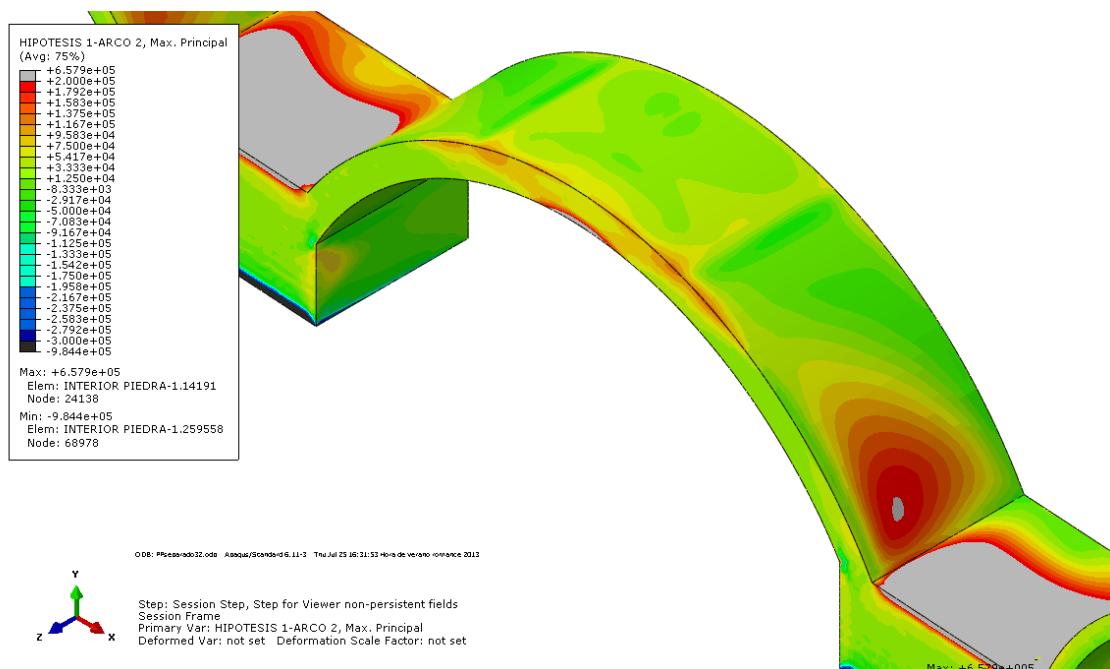


Figura 22. . Arco 4 en Hipótesis 1 sin cambio de escala

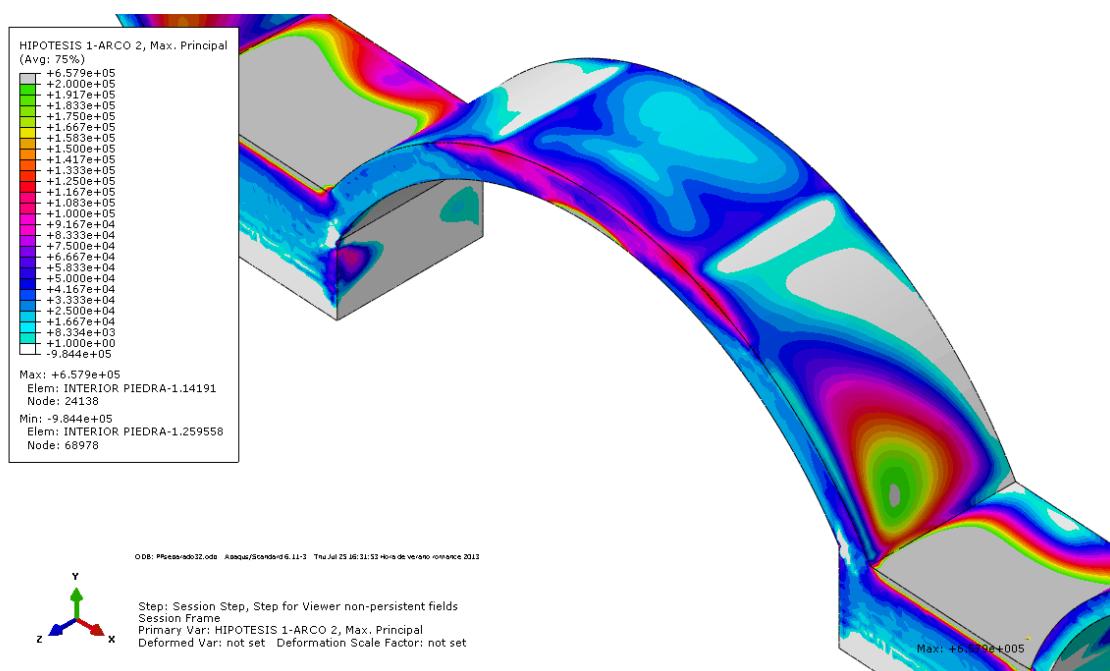


Figura 23. Arco 4 en Hipótesis 1 con tensiones únicamente positivas

Como se observa en las figuras la percepción de las tensiones cambia si se limita a resultados positivos o se mantiene la escala por defecto.

Para calcular las combinaciones de las hipótesis de carga según la normativa, se puede realizar mediante la combinación de los tensores de tensiones de cada step de cálculo grabado en la base de datos, o bien, obteniendo los datos punto a punto y desarrollando una Excel de cálculo.

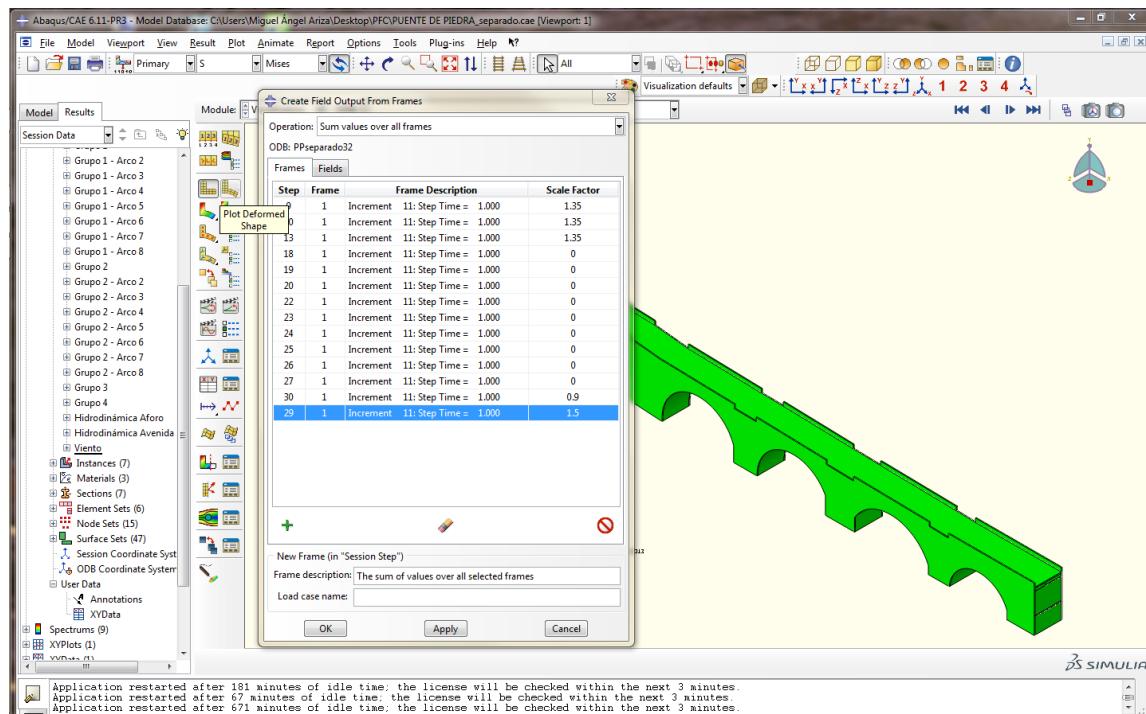


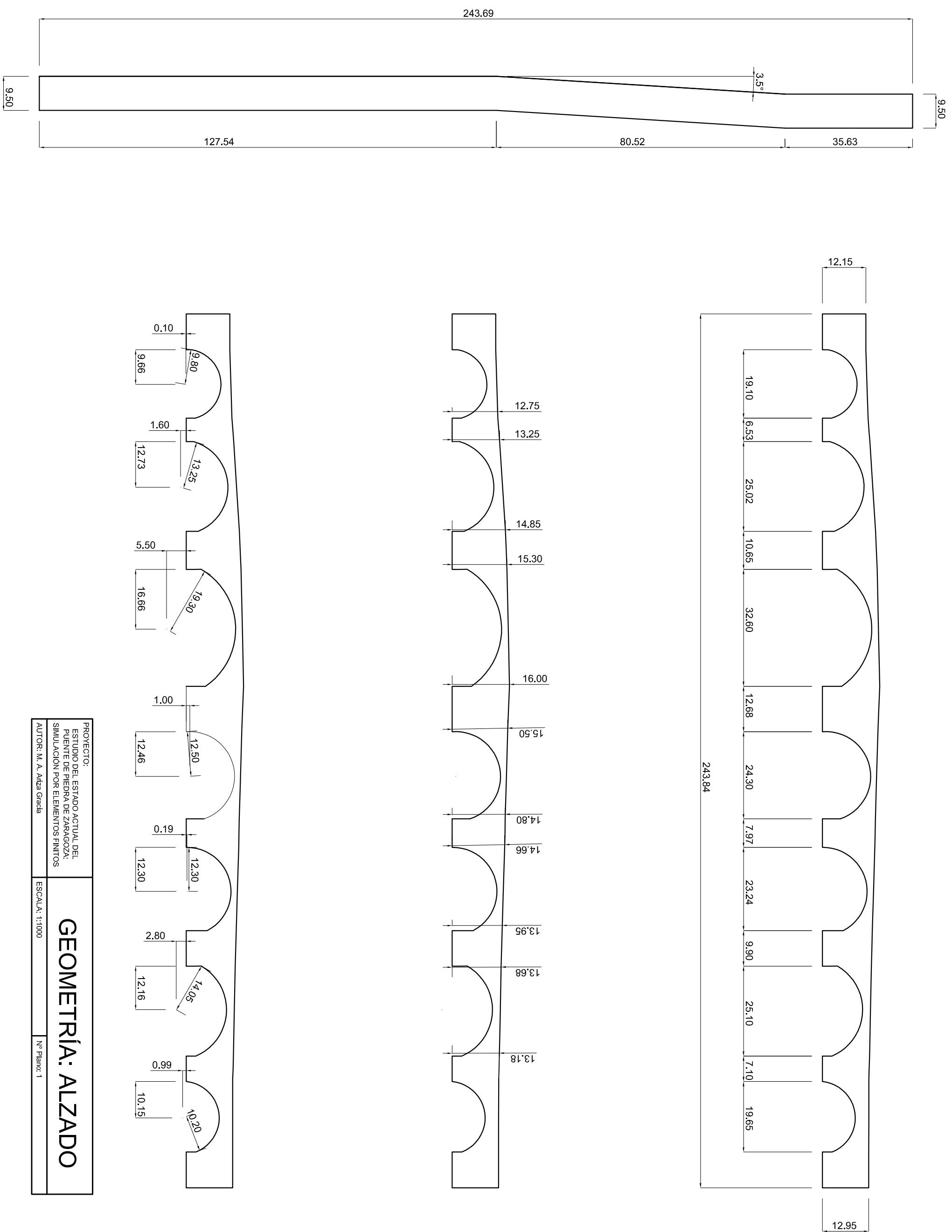
Figura 24. Combinaciones de hipótesis realizadas en Abaqus

Como comentario final es notable destacar que también se pueden sacar informes de los datos de la base de datos a Excel o que se pueden realizar operaciones con los datos de los nodos y realizar las gráficas de la evolución de la tensión del nodo con el tiempo dentro del mismo programa Abaqus.

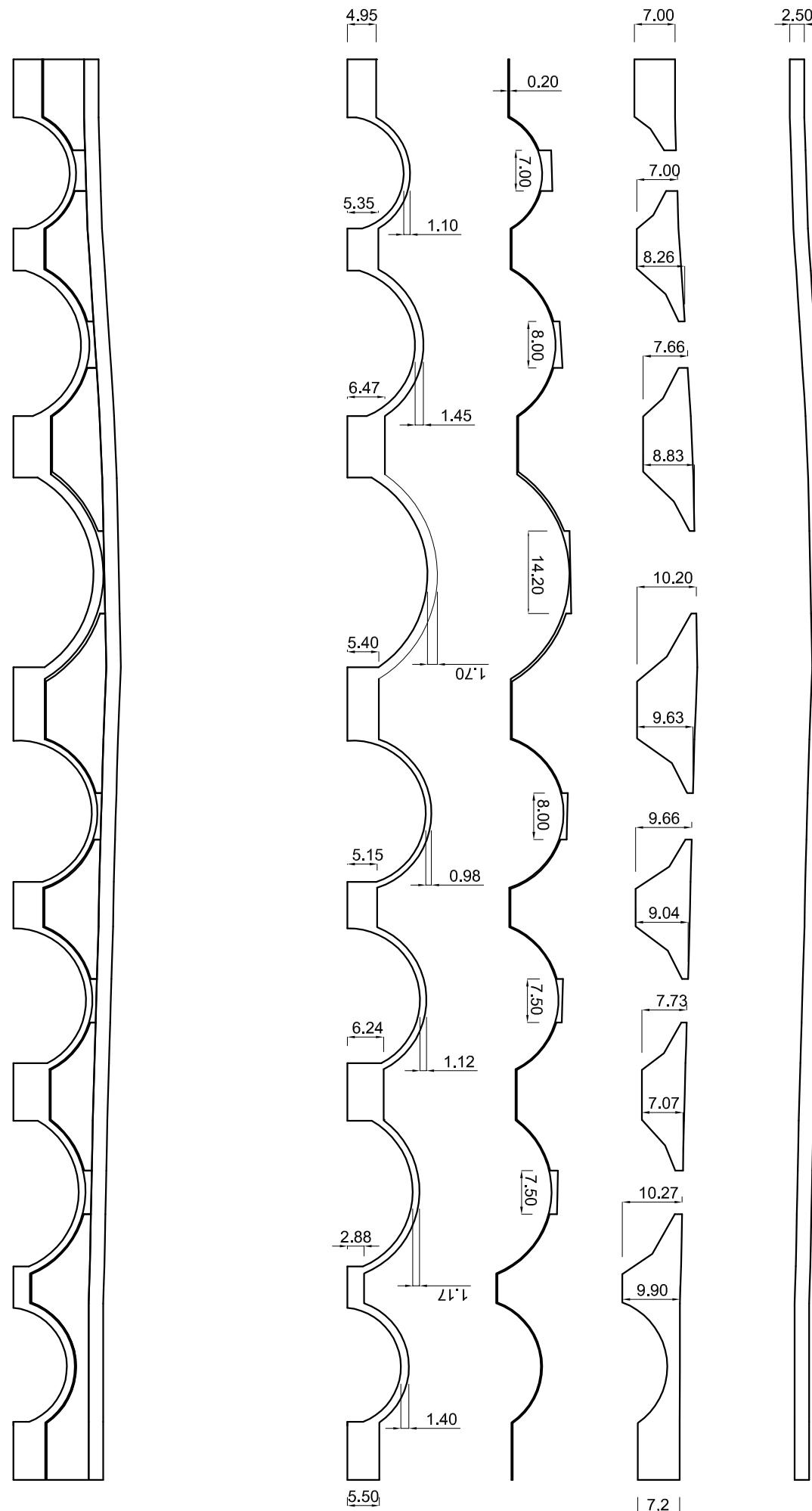
Índice de Figuras. Anexo E

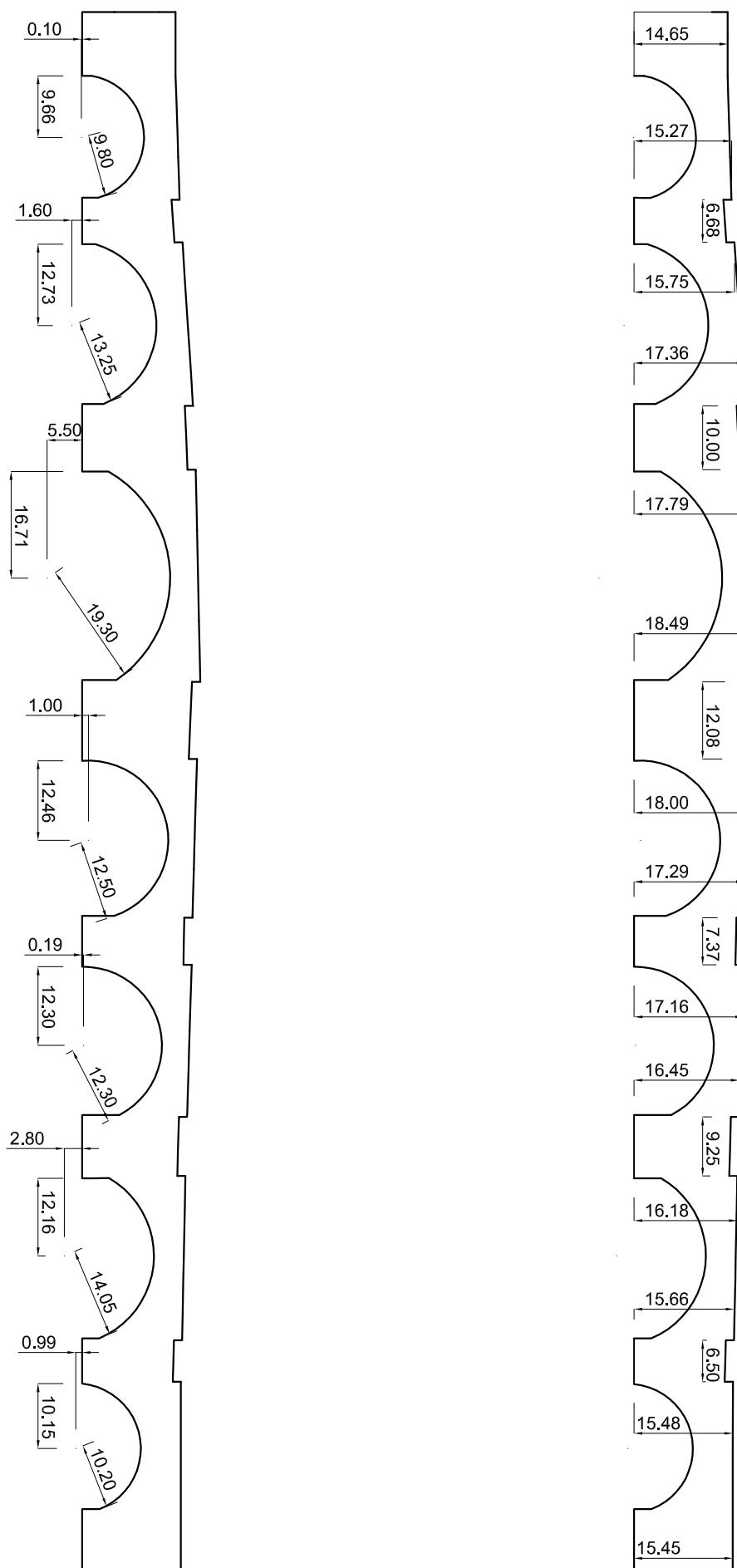
Figura 1. Trazado de Sketch para modelado	iv
Figura 2. Sweep (Rojo - Path; Amarillo - Section)	v
Figura 3. Definición de dos secciones para el LOFT (rosa y rojo)	vi
Figura 4. Generación del sólido por LOFT uniendo ambas secciones	vi
Figura 5. Interior de Piedra y Paredes de Piedra	vii
Figura 6. Relleno de Grava cemento	vii
Figura 7. Relleno de hormigón armado	viii
Figura 8. Montaje de cada pieza del puente (Transparente)	viii
Figura 9. Muestra de ensamblaje 1 (No el definitivo)	ix
Figura 10. Muestra de ensamblaje 2 (No el definitivo)	ix
Figura 11. Ensamblaje definitivo	ix
Figura 12. Definición de materiales en el módulo Property	x
Figura 13. Control de incremento de pasos en el módulo Step	xi
Figura 14. Módulo Load - Introducción de condiciones de contorno de desplazamiento	xii
Figura 15. Mallado sin pilas	xiv
Figura 16. Mallado con Pilas	xiv
Figura 17. Elemento C3D8 (29)	xv
Figura 18. Elemento C3D8R (29)	xv
Figura 19. Selección del tipo de elemento en el módulo Mesh	xv
Figura 20. Elemento C3D10 (29)	xvi
Figura 21. Mallado de tajamares	xvi
Figura 22. Arco 4 en Hipótesis 1 sin cambio de escala	xviii
Figura 23. Arco 4 en Hipótesis 1 con tensiones únicamente positivas	xviii
Figura 24. Combinaciones de hipótesis realizadas en Abaqus	xix

Planos de modelado (Abaqus)



PROYECTO: ESTUDIO DEL ESTADO ACTUAL DEL PUENTE DE PIEDRA DE ZARAGOZA; SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	GEOMETRÍA: ALZADO
AUTOR: M. A. Ariza Gracia	ESCALA: 1:1000





PROYECTO: ESTUDIO DEL ESTADO ACTUAL DEL PUENTE DE PIEDRA DE ZARAGOZA; SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	GEOMETRÍA: ALZADO
AUTOR: M. A. Ariza Gracia	ESCALA: 1:1000

Nº Plano: 3

ANEXO F.
ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis tensional de la estructura se realiza según las hipótesis de carga definidas en la normativa desarrollada en el Anexo B. Cargas optándose por buscar los puntos de máxima tensión principal y los de mínima tensión principal para comprobar, a posteriori, según el Criterio de Rankine o de Tensiones Máximas Principales, los puntos de ruptura del material.

Esto se debe a que la piedra es un material que presenta un comportamiento diferente a tracción que a compresión.

F.I. Criterio de Rankine

Es un criterio de resistencia estática según el cual el material resistirá en el punto analizado siempre que la tensión normal máxima en dicho punto no supere la tensión admisible obtenida en el ensayo de tracción y la tensión normal mínima no sea inferior a la tensión admisible obtenida en el ensayo de compresión del material:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &< S_{adm_t} \\ \sigma_3 &> -S_{adm_c}\end{aligned}$$

donde σ_1 es la tensión principal máxima y σ_3 es la tensión principal mínima.

Las tensiones admisibles de tracción se obtienen del ensayo de tracción (límite de fluencia en materiales dúctiles y límite de rotura para los frágiles) y las tensiones admisibles de compresión son las obtenidas en el ensayo de compresión.

El coeficiente de seguridad se obtiene de:

$$C.S = \min \left(\left| \frac{S_{adm_t}}{\max(0, \sigma_1)} \right|, \left| \frac{S_{adm_c}}{\min(0, \sigma_3)} \right| \right)$$

El criterio de Rankine puede representarse gráficamente de la siguiente forma:

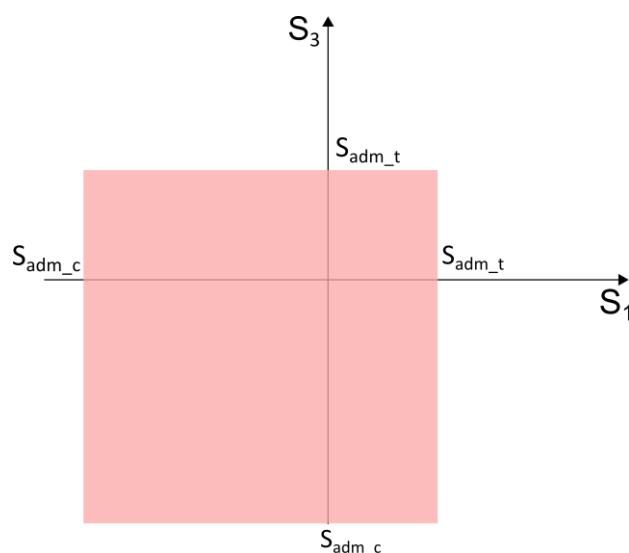


Figura 1. Criterio de Rankine

F.II. Tensiones del modelo

F.II.I. Interior de Piedra. Máximas principales

ARCO 2		INTERIOR PIEDRA		
Hipótesis		(MAXIMOS)	(MINIMOS)	
1	Pila 4 top (Node 24138;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.14191)	6.579E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.844E+05
2-arc3	Pila 5 top (Node 53256;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.655E+05
2-arc4	Pila 4 top (Node 24138;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.14191)	6.556E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.810E+05
2-arc5	Pila 5 top (Node 53256;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc6	Pila 5 top (Node 53256;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.222116)	3.408E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc7	Pila 5 top (Node 53256;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.222116)	3.396E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc8	Pila 5 top (Node 53256;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68246; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05
3	Pila 5 top (Node 24138;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.14191)	6.579E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.844E+05
4	Pila 5 base (Node 21;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.948442)	6.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.925E+05
6	Pila 4 top (Node 24138;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.14191)	6.544E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.780E+05
7 - arc 2	Pila 5 top (Node 24138;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.14191)	4.625E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.027E+05
8-arc3	Pila 4 top (Node 24138;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc4	Pila 4 top (Node 24138;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.14191)	4.608E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc5	Pila 4 top (Node 24138;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.003E+05

8-arc6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc7	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.611E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.018E+05
8-arc8	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.611E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.012E+05
9	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.027E+05
10	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.658E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.087E+05
11	Pila 4 base (Node 21; Elem: INTERIOR PIEDRA - 1.94842)	7.421E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-8.554E+05
12	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.598E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.980E+05
13	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	2.502E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-4.888E+05
ARCO 3				
Hipótesis	INTERIOR PIEDRA (MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.579E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.844E+05
2-arc2	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.655E+05
2-arc4	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.387E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.655E+05
2-arc5	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc6	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.408E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc7	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.396E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc8	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05

3	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.578E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.844E+05
4	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.925E+05
6	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.544E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.780E+05
7 - arc3	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.027E+05
8-arc2	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc4	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.607E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc5	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.003E+05
8-arc6	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc7	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.611E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.018E+05
8-arc8	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.011E+05
9	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.027E+05
10	Pila 5 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.658E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.087E+05
11	Pila 4 base (Node 21; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.94842)	7.416E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-8.554E+05
12	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.598E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.980E+05
13	Pila 4 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	2.502E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-4.888E+05
ARCO 4				
Hipótesis	INTERIOR PIEDRA (MAXIMOS)		(MINIMOS)	

1	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.574E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.844E+05
2-arc2	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68246; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.655E+05
2-arc3	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68246; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.655E+05
2-arc5	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68246; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc6	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.409E+05	Pila 7 base (Node 68246; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc7	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc8	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68246; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05
3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.574E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.844E+05
4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.620E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.925E+05
6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.540E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.781E+05
7-arc4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.621E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.028E+05
8-arc2	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.608E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.607E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc5	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.615E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.003E+05
8-arc6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.607E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc7	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.608E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.018E+05

8-arc8	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.608E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.012E+05
9	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.621E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.027E+05
10	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.655E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.087E+05
11	Pila 4 top (Node 21; INTERIOR PIEDRA- 1.94842)	7.443E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-8.554E+05
12	Pila 4 top (Node 24138; INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.595E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.980E+05
13	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	2.502E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-4.888E+05
ARCO 5 INTERIOR PIEDRA				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.593E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.845E+05
2-arc2	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc3	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc4	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc6	Pila 5 top (Node 53234; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.159238)	3.416E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc7	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc8	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05
3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.589E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.844E+05
4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.634E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.925E+05

6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.554E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.781E+05
7-arc5	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.635E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.028E+05
8-arc2	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.003E+05
8-arc3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.003E+05
8-arc4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.615E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.003E+05
8-arc6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc7	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.019E+05
8-arc8	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.012E+05
9	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.632E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.028E+05
10	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.666E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.087E+05
11	Pila 4 base (Node 21; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.94842)	7.349E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-8.554E+05
12	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.606E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.981E+05
13	Pila 5 top (Node 53234; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.159238)	2.508E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-4.889E+05
ARCO 6 INTERIOR PIEDRA				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.578E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.844E+05
2-arc2	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.408E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05

2-arc3	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.408E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc4	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.409E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc5	Pila 5 top (Node 53234; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.159238)	3.416E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.656E+05
2-arc7	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.408E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc8	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.408E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05
3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.578E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.843E+05
4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.623E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.924E+05
6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.543E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.780E+05
7-arc6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.027E+05
8-arc2	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.607E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc5	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.002E+05
8-arc7	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.018E+05
8-arc8	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.011E+05
9	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.623E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.027E+05

10	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.657E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.087E+05
11	Pila 4 base (Node 21; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.94842)	7.420E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-8.553E+05
12	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.598E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.980E+05
13	Pila 5 top (Node 53234; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.159238)	2.511E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-4.889E+05
ARCO 7 INTERIOR PIEDRA				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.579E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.873E+05
2-arc2	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.396E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc3	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.396E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc4	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc5	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc6	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.408E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.694E+05
2-arc8	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.715E+05
3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.579E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.865E+05
4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.946E+05
6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.544E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.802E+05
7-arc7	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.625E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.049E+05

8-arc2	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.611E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.018E+05
8-arc3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.611E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.018E+05
8-arc4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.608E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.018E+05
8-arc5	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.019E+05
8-arc6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.018E+05
8-arc8	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.611E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.028E+05
9	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.043E+05
10	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.658E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.103E+05
11	Pila 4 base (Node 21; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.94842)	7.422E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-8.570E+05
12	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.598E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.996E+05
13	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	2.502E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-4.917E+05
ARCO 8 INTERIOR PIEDRA				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.579E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.861E+05
2-arc2	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05
2-arc3	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05
2-arc4	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05

2-arc5	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.404E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05
2-arc6	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.408E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.677E+05
2-arc7	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	3.397E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-6.715E+05
3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.579E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.856E+05
4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.937E+05
6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	6.544E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-9.793E+05
7-arc8	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.625E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.040E+05
8-arc2	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.611E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.012E+05
8-arc3	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.011E+05
8-arc4	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.608E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.012E+05
8-arc5	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.618E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.012E+05
8-arc6	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.610E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.011E+05
8-arc7	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.611E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.028E+05
9	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.624E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.036E+05
10	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.658E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-7.096E+05
11	Pila 4 base (Node 21; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.94842)	7.421E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-8.563E+05

12	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.598E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.989E+05
13	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	2.502E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-4.904E+05
HIPÓTESIS RESTANTES				
	INTERIOR PIEDRA			
Puntos	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
5	Pila 4 base (Node 21; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.94842)	1.327E+06	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-1.210E+06
14	Pila 5 top (Node 53256; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.222116)	2.479E+05	Pila 7 base (Node 68426; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.159238)	-4.842E+05
15	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	3.109E+05	Pila 7 base (Node 68932; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.251198)	-5.443E+05
HIPÓTESIS LÓGICA DE SERVICIO				
	INTERIOR PIEDRA			
Puntos	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
17	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.598E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.980E+05
18	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.595E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.980E+05
19	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.604E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.981E+05
20	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.599E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.980E+05
21	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.606E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.997E+05
22	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.598E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.998E+05
23	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.598E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.986E+05
24	Pila 4 top (Node 24138; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.14191)	4.600E+05	Pila 7 base (Node 68978; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.259558)	-6.991E+05

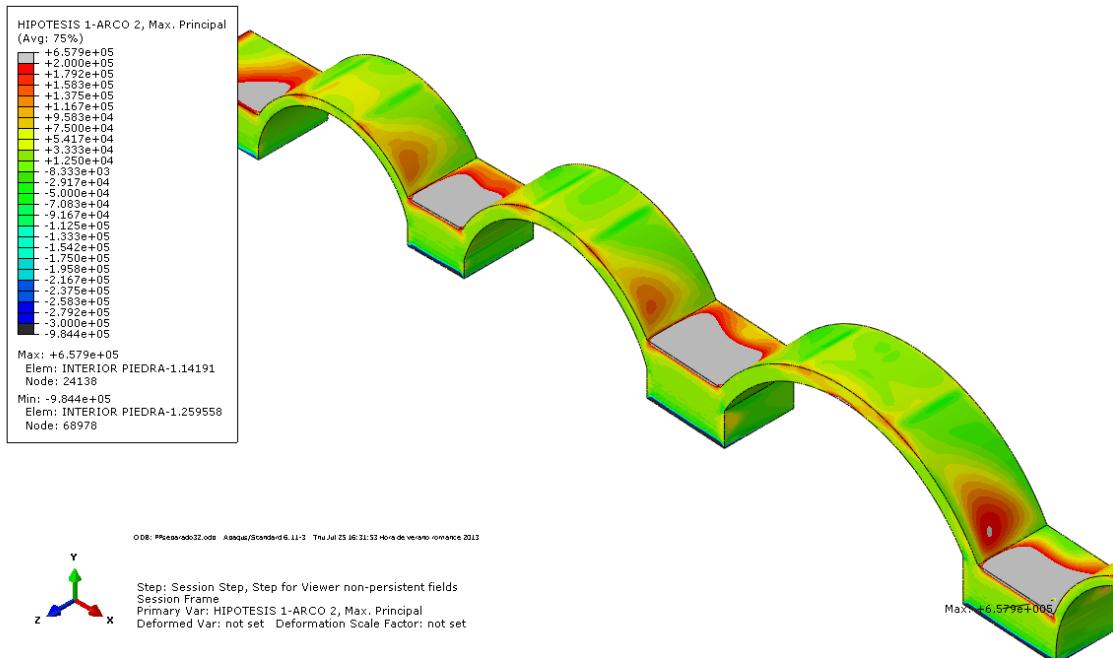


Figura 2. Hipótesis 1. Arcos 2, 3 y 4. Frontal. Max. ppal.

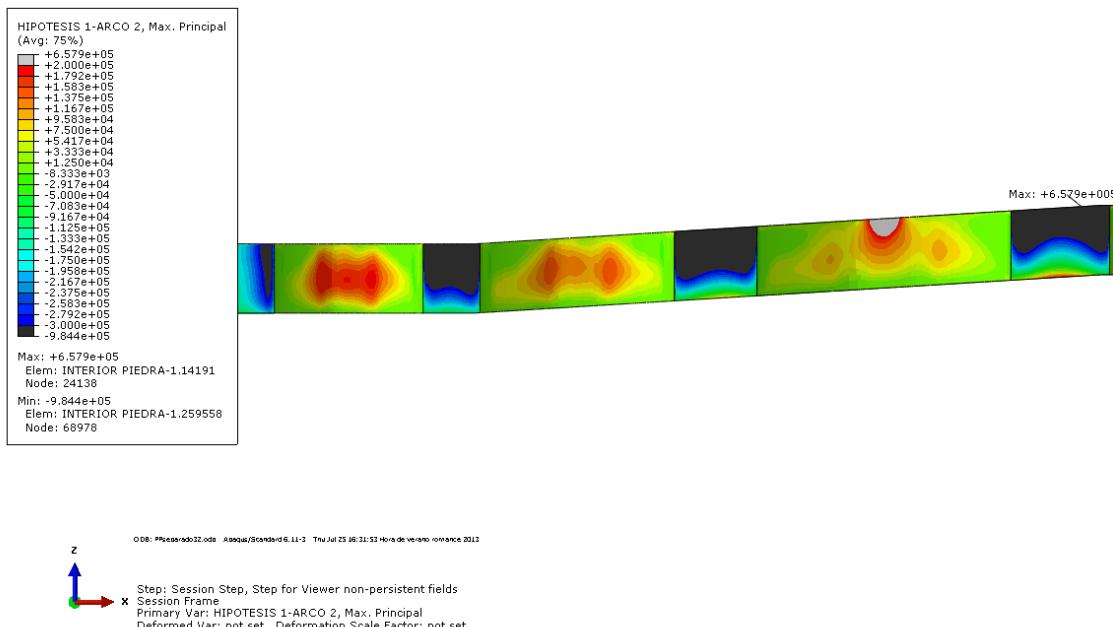


Figura 3. Hipótesis 1. Arcos 2, 3 y 4. Inferior. Max. ppal.

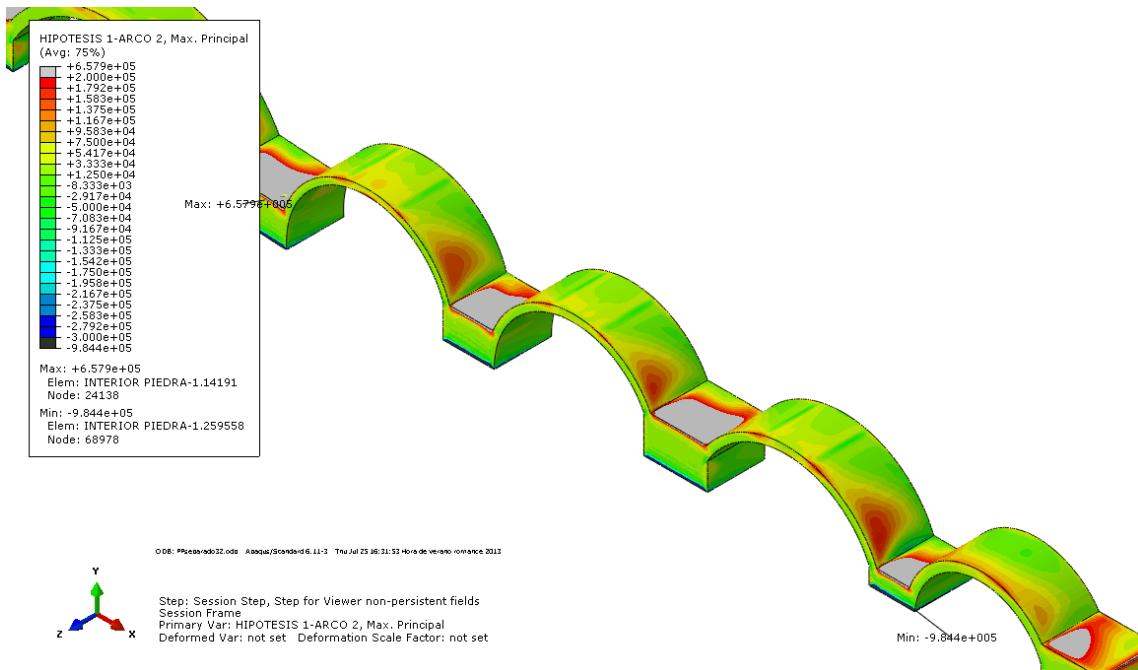


Figura 4. Hipótesis 1. Arcos 5, 6, 7, 8. Frontal. Max. ppal.

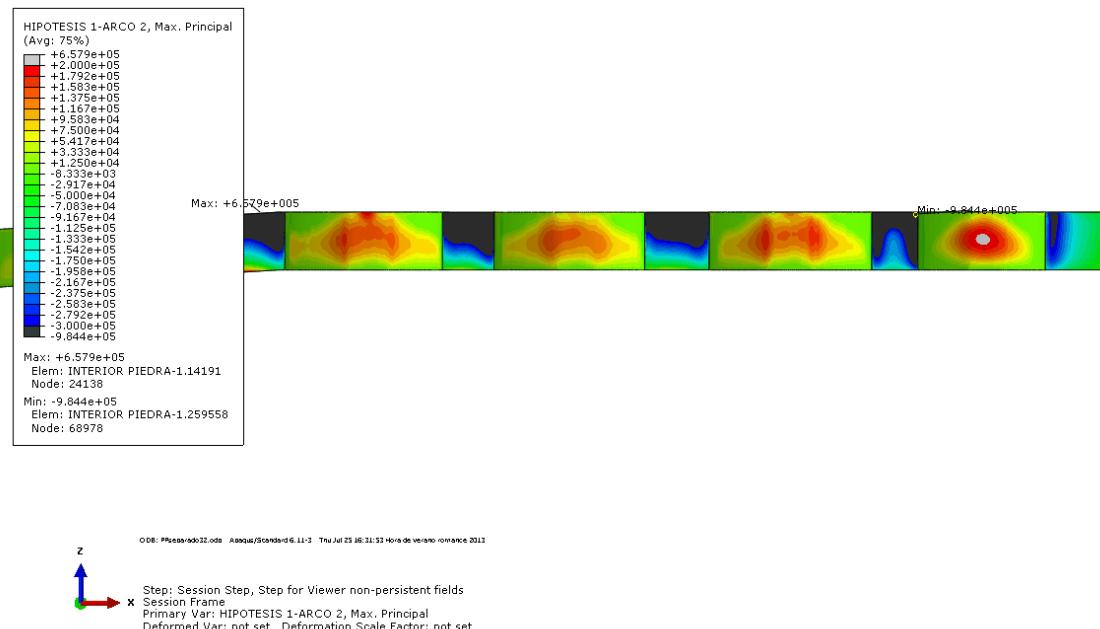


Figura 5. Hipótesis 1. Arcos 5, 6, 7, 8. Inferior. Max. ppal.

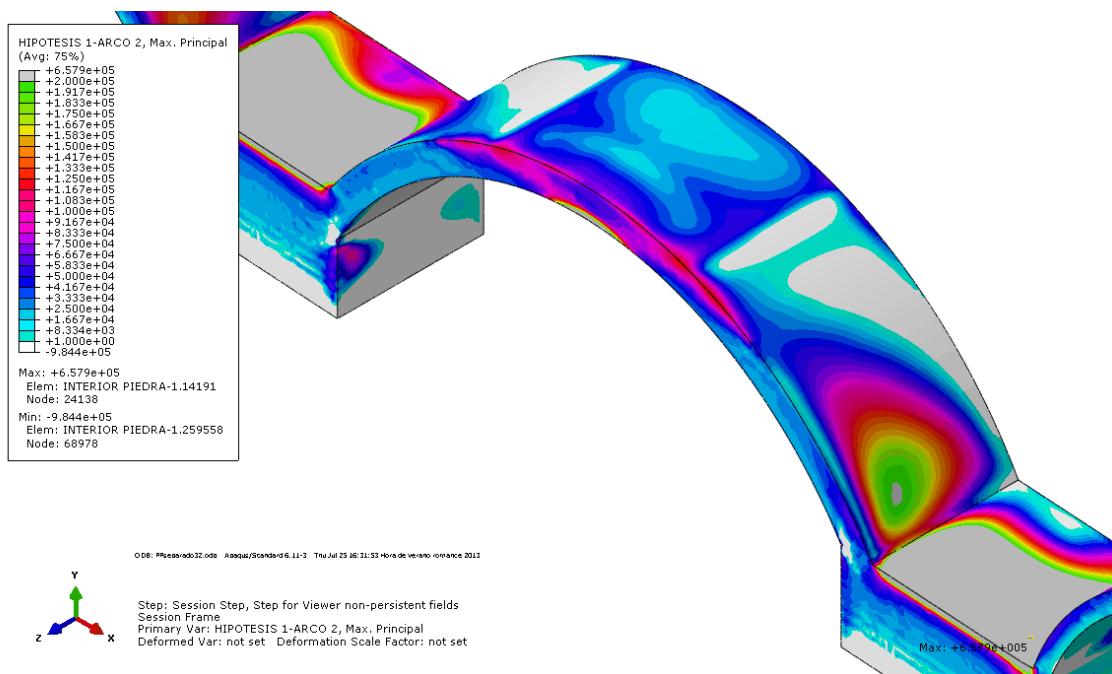


Figura 6. Hipótesis 1. Arco 4. Tensiones positivas

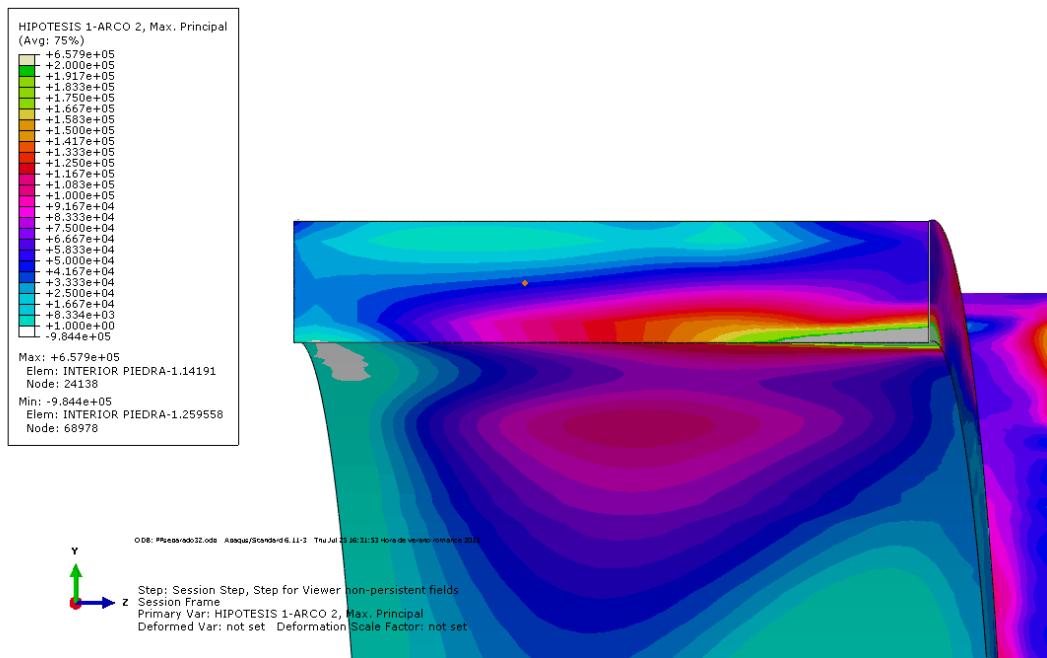


Figura 7. Hipótesis 1. Corte Arco 4. Tensiones Positivas

F.II.III. Interior de Piedra. Mínimas Principales

ARCO 2	INTERIOR PIEDRA		
Hipótesis	(MAXIMOS)	(MINIMOS)	
1	Arco 4 Arranque (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.826E+03	Arco 4 Clave (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA - 1.1367)
2-arc3	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.149307)	-1.906E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)
2-arc4	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-3.900E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)
2-arc5	Arco 5 Clave (Node75222; Elem: INTERIOR PIEDRA - 1.153486)	-1.413E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)
2-arc6	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA - 1.146114)	-1.610E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)
2-arc7	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.149307)	-1.902E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)
2-arc8	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.149307)	-1.907E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)
3	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.876E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)
4	Pila 3 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.91471)	-5.606E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)
6	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.188E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)
7-arc2	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.100E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)
8-arc3	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.715E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)
8-arc4	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.987E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)

8-arc5	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.775E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.194E+06
8-arc6	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.801E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc7	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.799E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc8	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.804E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
9	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-6.152E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.215E+06
10	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-6.772E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.259E+06
11	Pila 3 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.91471)	8.582E+04	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.174E+06
12	Pila 3 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.91471)	8.582E+04	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.174E+06
13	Arco 5 Clave (Node 2992; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.140958)	-1.403E+04	Arco 5 Clave (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-3.041E+06
ARCO 3 INTERIOR PIEDRA				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.714E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.916E+06
2-arc2	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.906E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc4	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.923E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.178E+06
2-arc5	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.153486)	-1.412E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.141E+06

2-arc6	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.146114)	-1.610E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc7	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.900E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc8	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.906E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
3	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.791E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.914E+06
4	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.518E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.972E+06
6	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.106E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.868E+06
7-arc3	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.984E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.217E+06
8-arc2	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.715E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc4	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.916E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.210E+06
8-arc5	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.690E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.194E+06
8-arc6	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.715E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc7	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.713E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.198E+06
8-arc8	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.719E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
9	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-6.065E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.215E+06

10	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-6.682E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.259E+06
11	Pila 4 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.91471)	8.478E+04	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.174E+06
12	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.480E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.182E+06
13				
ARCO 4	INTERIOR PIEDRA			
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.088E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.937E+06
2-arc2	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.925E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.178E+06
2-arc3	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.923E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.178E+06
2-arc5	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.76048)	-1.422E+04	Arco 4 Arranque (Node 1249; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.76048)	-4.176E+06
2-arc6	Arco 6 Clave (Node 46354; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.146114)	-1.612E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.178E+06
2-arc7	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.919E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.178E+06
2-arc8	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.925E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.178E+06
3	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.269E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.929E+06
4	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.962E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.988E+06

6	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-3.628E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.884E+06
7-arc4	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.055E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.233E+06
8-arc2	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.987E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.210E+06
8-arc3	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.916E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.210E+06
8-arc5	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.968E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.205E+06
8-arc6	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.978E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.210E+06
8-arc7	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.986E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.210E+06
8-arc8	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.990E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.210E+06
9	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.031E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.227E+06
10	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.882E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.270E+06
11	Pila 3 top (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.91471)	8.418E+04	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.186E+06
12	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.763E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.194E+06
13	Arco 5 Clave (Node 2992; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.140958)	-1.417E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-3.067E+06
ARCO 5	INTERIOR PIEDRA			
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	

1	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.794E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-5.907E+06
2-arc2	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.153486)	-1.413E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.141E+06
2-arc3	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.153486)	-1.412E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.141E+06
2-arc4	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.153486)	-1.422E+04	Arco 4 Arranque (Node 1249; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.76048)	-4.176E+06
2-arc6	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.153486)	-1.420E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.141E+06
2-arc7	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.153486)	-1.409E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.141E+06
2-arc8	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.153486)	-1.413E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.141E+06
3	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.852E+03	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-5.907E+06
4	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.581E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-5.966E+06
6	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.165E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-5.862E+06
7-arc5	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.066E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.211E+06
8-arc2	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.775E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.194E+06
8-arc3	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.690E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.194E+06
8-arc4	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.968E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.205E+06

8-arc6	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.776E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.194E+06
8-arc7	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.774E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.194E+06
8-arc8	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.779E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.194E+06
9	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.126E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.210E+06
10	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.746E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.254E+06
11	Pila 3 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.91471)	8.583E+04	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-5.169E+06
12	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.540E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.177E+06
13	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.153486)	-1.031E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-3.040E+06
ARCO 6				
Hipótesis				
INTERIOR PIEDRA				
(MAXIMOS)				
1	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.826E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-5.916E+06
2-arc2	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.146114)	-1.610E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.143E+06
2-arc3	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.146114)	-1.610E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.143E+06
2-arc4	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.146114)	-1.612E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.178E+06
2-arc5	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.153486)	-1.420E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-4.141E+06

2-arc7	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.146114)	-1.605E-04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc8	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.153486)	-1.610E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
3	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.876E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.914E+06
4	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.606E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.972E+06
6	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.188E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.869E+06
7-arc6	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.100E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.217E+06
8-arc2	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.801E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc3	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.715E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc4	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.987E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.210E+06
8-arc5	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.776E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.194E+06
8-arc7	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.799E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc8	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.805E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
9	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.152E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.215E+06
10	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.773E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.259E+06

11	Pila 3 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.91471)	8.582E+04	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.174E+06
12	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.565E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.182E+06
13	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.146114)	-1.178E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-3.041E+06
ARCO 7 INTERIOR PIEDRA				
Hipótesis (MAXIMOS) (MINIMOS)				
1	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.824E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.916E+06
2-arc2	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.902E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc3	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.900E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc4	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.919E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.178E+06
2-arc5	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.153486)	-1.409E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.141E+06
2-arc6	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.146114)	-1.605E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc8	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.901E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
3	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.875E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.914E+06
4	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.605E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.972E+06
6	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.187E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.868E+06

7-arc7	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.098E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.217E+06
8-arc2	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.799E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.199E+06
8-arc3	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.713E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.198E+06
8-arc4	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.986E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.210E+06
8-arc5	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.774E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.194E+06
8-arc6	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.799E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.199E+06
8-arc8	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.803E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.199E+06
9	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.151E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.215E+06
10	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.771E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.259E+06
11	Pila 3 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.91471)	8.582E+04	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-5.174E+06
12	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.563E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.182E+06
13	Arco 5 Clave (Node 2992; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-1.401E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-3.041E+06
ARCO 8				
Hipótesis	INTERIOR PIEDRA (MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.831E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-5.916E+06

2-arc2	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.907E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc3	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.906E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc4	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.925E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.178E+06
2-arc5	Arco 5 Clave (Node 75222; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.153486)	-1.413E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.141E+06
2-arc6	Arco 6 Clave (Node 46534; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.146114)	-1.610E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
2-arc7	Arco 5 Clave (Node 75103; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.149307)	-1.901E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.72801)	-4.143E+06
3	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.880E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.914E+06
4	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.610E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.972E+06
6	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.192E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-5.869E+06
7-arc8	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.105E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.217E+06
8-arc2	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.804E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc3	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.719E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.199E+06
8-arc4	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-4.990E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.210E+06
8-arc5	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.779E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.194E+06

8-arc6	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.805E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.199E+06
8-arc7	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.803E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.199E+06
9	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.156E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.215E+06
10	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-6.777E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.259E+06
11	Pila 3 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.91471)	8.582E+04	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-5.174E+06
12	Arco 4 Clave (Node 83025;Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.568E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.182E+06
13	Arco 5 Clave (Node 2992; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-1.403E+04	Arco 4 Arranque (Node 1248; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.72801)	-3.041E+06

HIPÓTESIS RESTANTES				
INTERIOR PIEDRA				
Puntos	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
5	Pila 3 base (Node 30462; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.91471)	1.698E+05	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-7.325E+06
14	Arco 5 Clave (Node 2992; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.140958)	-1.383E+04	Arco 4 Arranque (Node 1247; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.69554)	-3.006E+06
15	Arco 5 Clave (Node 75105; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.149318)	-1.680E+04	Arco 4 Arranque (Node 1228; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.7861)	-3.218E+06

HIPÓTESIS LÓGICA DE SERVICIO				
INTERIOR PIEDRA				
Puntos	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
17	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.618)	-5.566E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA-1.1367)	-4.182E+06

18	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.718E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.194E+06
19	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.967E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.183E+06
20	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-4.747E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.191E+06
21	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.532E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.177E+06
22	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.561E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.182E+06
23	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.568E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.182E+06
24	Arco 4 Clave (Node 83025; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.618)	-5.141E+03	Arco 4 Arranque (Node 15; Elem: INTERIOR PIEDRA- 1.1367)	-4.185E+06

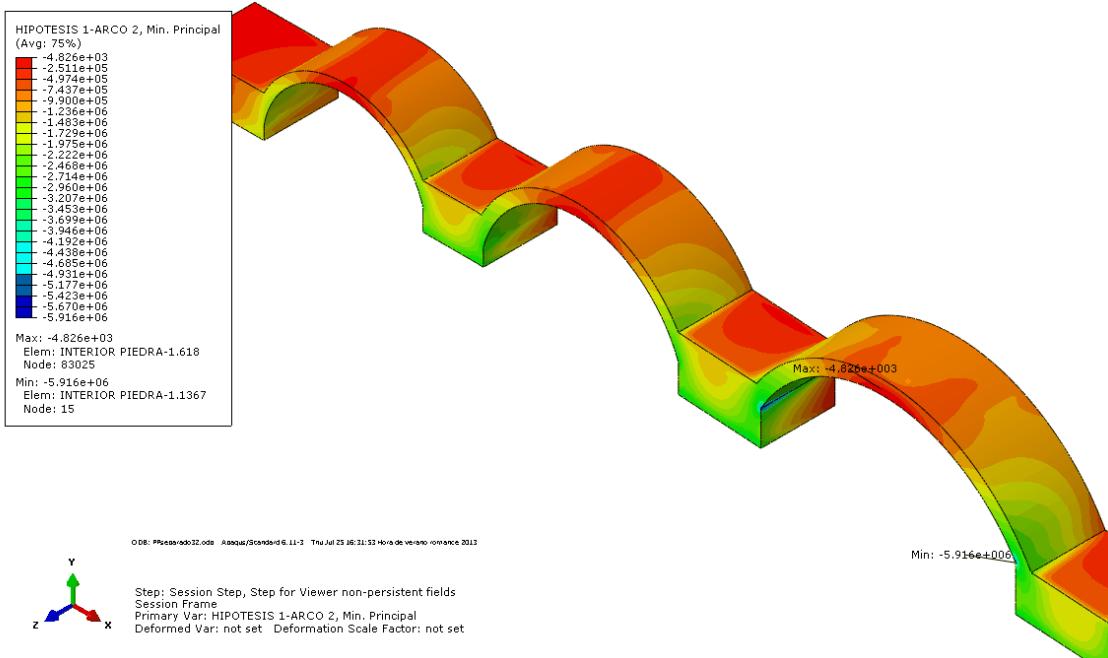
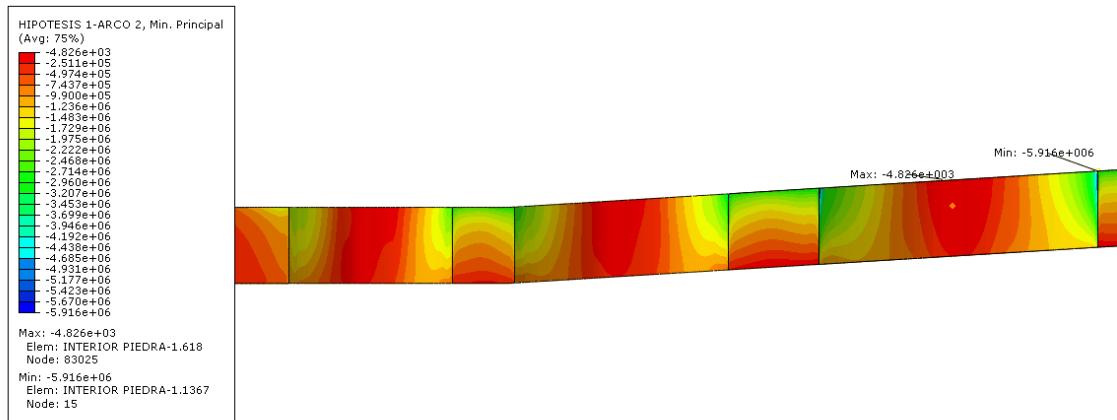


Figura 8. Hipótesis 1. Arcos 2, 3 y 4. Frontal. Min. Ppal



ODB: PRseab-ado32.odb Asque/Standard 6.11.3 Thu Jul 25 16:31:53 Hora de verano romance 2013

Step: Session Step, Step for Viewer non-persistent fields
Session Frame
Primary Var: HIPOTESIS 1-ARCO 2, Min. Principal
Deformed Var: not set Deformation Scale Factor: not set

Figura 9. Hipótesis 1. Arcos 2, 3 y 4. Inferior. Min. ppal.

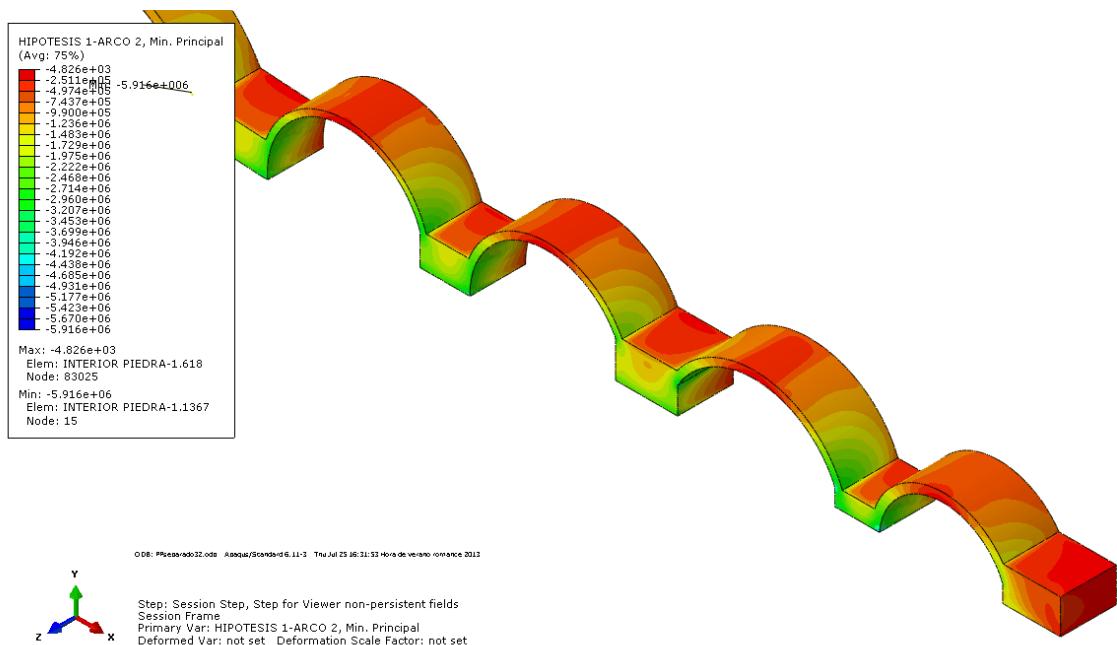
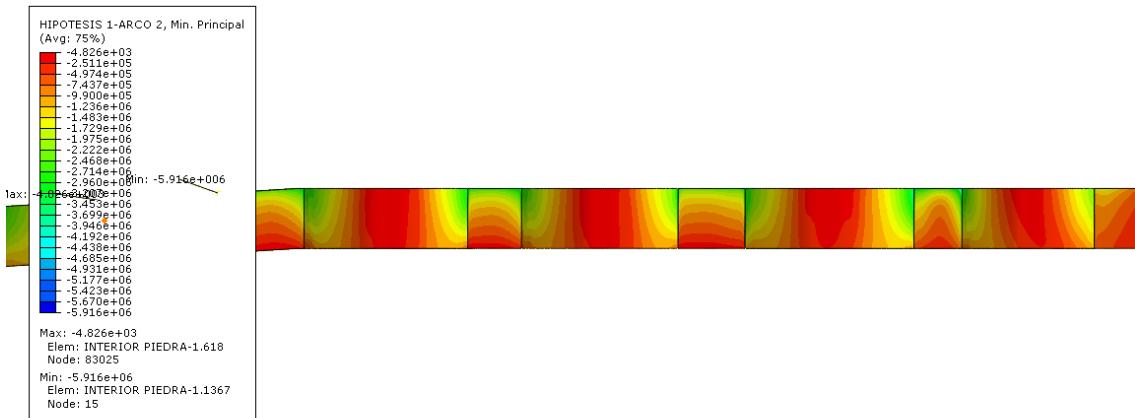


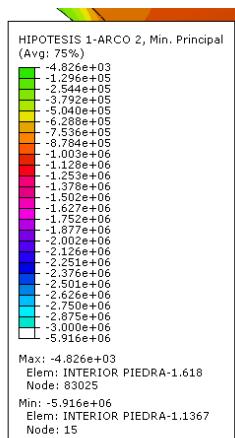
Figura 10. Hipótesis 1. Arcos 5, 6, 7 y 8. Frontal. Min. ppal.



O DB: PRsear-nd32.ods Asque/Standar6.11.3 Thu Jul 25 16:31:53 Hora de verano romance 2013

Step: Session Step, Step for Viewer non-persistent fields
Session Frame
Primary Var: HIPOTESIS 1-ARCO 2, Min. Principal
Deformed Var: not set Deformation Scale Factor: not set

Figura 11. Hipótesis 1. Arcos 5, 6, 7, 8. Inferior. Min. ppal.



O DB: PRsear-nd32.ods Asque/Standar6.11.3 Thu Jul 25 16:31:53 Hora de verano romance 2013

Step: Session Step, Step for Viewer non-persistent fields
Session Frame
Primary Var: HIPOTESIS 1-ARCO 2, Min. Principal
Deformed Var: not set Deformation Scale Factor: not set

Figura 12. . Hipótesis 1. Arco 4. Frontal. Detallado

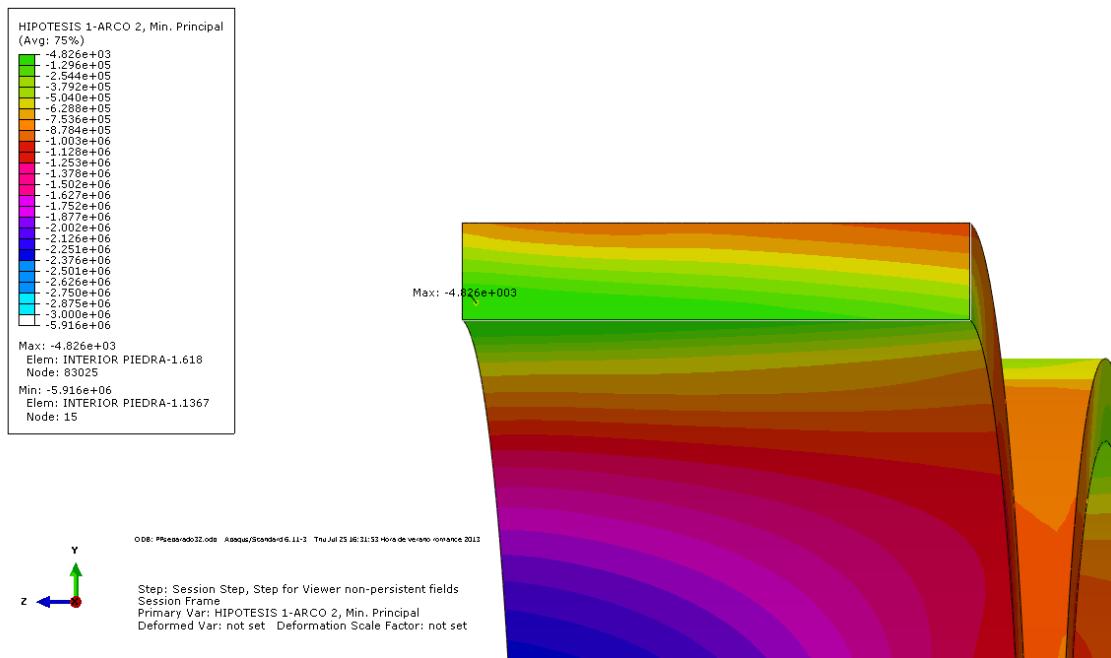


Figura 13. . Hipótesis 1. Arco 4. Corte. Detallado

F.II.V. Paredes de Piedra. Máximas Principales

PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)	(MINIMOS)		
1	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.399E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.548E+05
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.380E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.524E+05
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.346E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.403E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.547E+05
3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.403E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.547E+05
4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.432E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.605E+05
6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.364E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.501E+05
7 - arc 2	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.432E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.366E+05
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.418E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.418E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05

8-arc6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
9	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.435E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.365E+05
10	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.456E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.408E+05
11	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.920E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-6.657E+05
12	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.729E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.344E+05
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.399E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.548E+05
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05

		PAREDES		
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.403E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.547E+05
4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.432E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.605E+05
6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.364E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.501E+05
7 - arc 3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.432E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.366E+05
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.418E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.418E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
9	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.435E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.365E+05
10	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.456E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.408E+05
11	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.920E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-6.657E+05
12	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.729E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.344E+05

1	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.399E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.548E+05
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232: Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232: Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232: Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232: Elem: PAREDES-1.22835)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232: Elem: PAREDES-1.22835)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232: Elem: PAREDES-1.22835)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.403E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.547E+05
4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.432E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.605E+05
6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.364E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.501E+05
7-arc4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.432E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.367E+05
8-arc2	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.418E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.428E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05

8-arc8	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
9	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.435E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.365E+05
10	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.456E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.408E+05
11	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.920E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-6.657E+05
12	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.729E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.344E+05
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.399E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.549E+05
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.556E+05
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.556E+05
3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.403E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.547E+05
4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.432E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.605E+05

6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.364E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.502E+05
7-arc5	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.432E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.367E+05
8-arc2	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
9	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.435E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.365E+05
10	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.456E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.408E+05
11	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.920E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-6.657E+05
12	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	1.729E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.344E+05
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)		3.399E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)		2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)

2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.347E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.542E+05
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.403E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.546E+05
4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.432E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.605E+05
6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.364E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.501E+05
7-arc6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.432E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.366E+05
8-arc2	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.417E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.348E+05
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
9	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.435E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.365E+05

10	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.456E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.408E+05
11	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.920E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-6.657E+05
12	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	1.729E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.344E+05
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.396E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.566E+05
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.556E+05
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.346E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.356E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.569E+05
3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.401E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.560E+05
4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.430E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.618E+05
6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.362E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.515E+05
7-arc7	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.430E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.380E+05

8-arc2	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.416E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.422E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.368E+05
9	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.433E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.375E+05
10	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.455E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.418E+05
11	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.919E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-6.667E+05
12	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.404E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.342E+05
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	1.728E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.354E+05
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.409E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.566E+05
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05

2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.556E+05
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.358E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.555E+05
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	2.356E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-4.569E+05
3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.411E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.560E+05
4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.440E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.618E+05
6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	3.372E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-7.515E+05
7-arc8	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.440E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.380E+05
8-arc2	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.423E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.358E+05
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.422E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.368E+05
9	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.441E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.375E+05
10	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.462E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.418E+05
11	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.926E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-6.667E+05

12	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.412E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.342E+05
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22714)	1.736E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.354E+05
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
5	Empotramiento Norte (Node 487; Elem: PAREDES-1.52510)	4.113E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-9.457E+05
14	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.712E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.321E+05
15	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	1.877E+06	Pila 7 base (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-3.983E+05
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
17	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
18	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
19	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
20	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.406E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.332E+05
21	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.404E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.342E+05
22	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.411E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.347E+05
23	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.409E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.337E+05
24	Empotramiento Norte (Node 497; Elem: PAREDES-1.52510)	2.408E+06	Pila 7 (Node 229; Elem: PAREDES-1.22714)	-5.340E+05

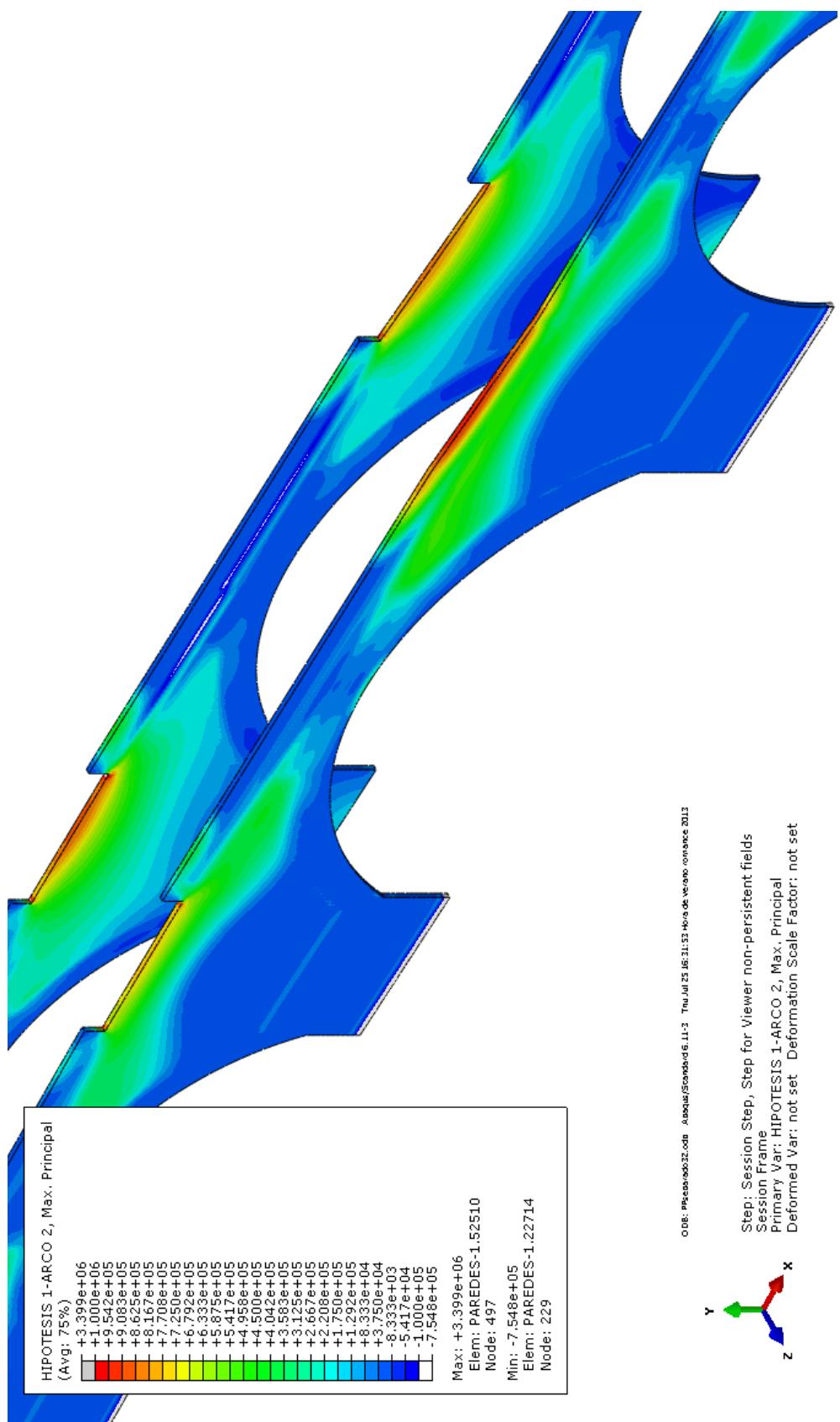


Figura 14. Hipótesis 1. Tensiones máximas principales. Paredes de piedra.

F.II.VI. Paredes de Piedra. Mínimas Principales

PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)	(MINIMOS)		
1	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.986E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.977E+06
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.983E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.958E+06
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.547E+06
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.583E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.590E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06
3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.975E+06
4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.995E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-6.020E+06
6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.980E+06
7 - arc 2	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.372E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.245E+06
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.370E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.370E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06

8-arc6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
9	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.243E+06
10	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.378E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.277E+06
11	Hueco 6 (Node 105532; Elem: PAREDES-1.90037)	2.096E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.289E+06
12	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.217E+06
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.167E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-2.610E+06
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.986E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.977E+06
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.547E+06
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06

PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)	(MINIMOS)		
3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.975E+06
4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.995E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-6.020E+06
6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.940E+06
7 - arc 3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.372E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.245E+06
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.370E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.370E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
9	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.243E+06
10	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.378E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.277E+06
11	Hueco 6 (Node 105532; Elem: PAREDES-1.90037)	2.096E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.289E+06
12	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.217E+06
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.167E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-2.610E+06

1	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.986E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.977E+06
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.547E+06
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06
3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.975E+06
4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.995E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-6.020E+06
6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.940E+06
7-arc4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.372E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.245E+06
8-arc2	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.370E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.370E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06

8-arc8	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
9	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.243E+06
10	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.378E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.277E+06
11	Hueco 6 (Node 105532; Elem: PAREDES-1.90037)	2.096E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.289E+06
12	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.218E+06
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.167E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-2.610E+06
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.986E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.978E+06
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.547E+06
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.547E+06
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.547E+06
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.547E+06
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06
3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.975E+06
4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.995E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-6.020E+06

6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.940E+06
7-arc5	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.371E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.245E+06
8-arc2	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
9	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.224E+06
10	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.378E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.277E+06
11	Hueco 6 (Node 105532; Elem: PAREDES-1.90037)	2.096E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.290E+06
12	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.218E+06
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.167E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-2.610E+06
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.986E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.977E+06
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06

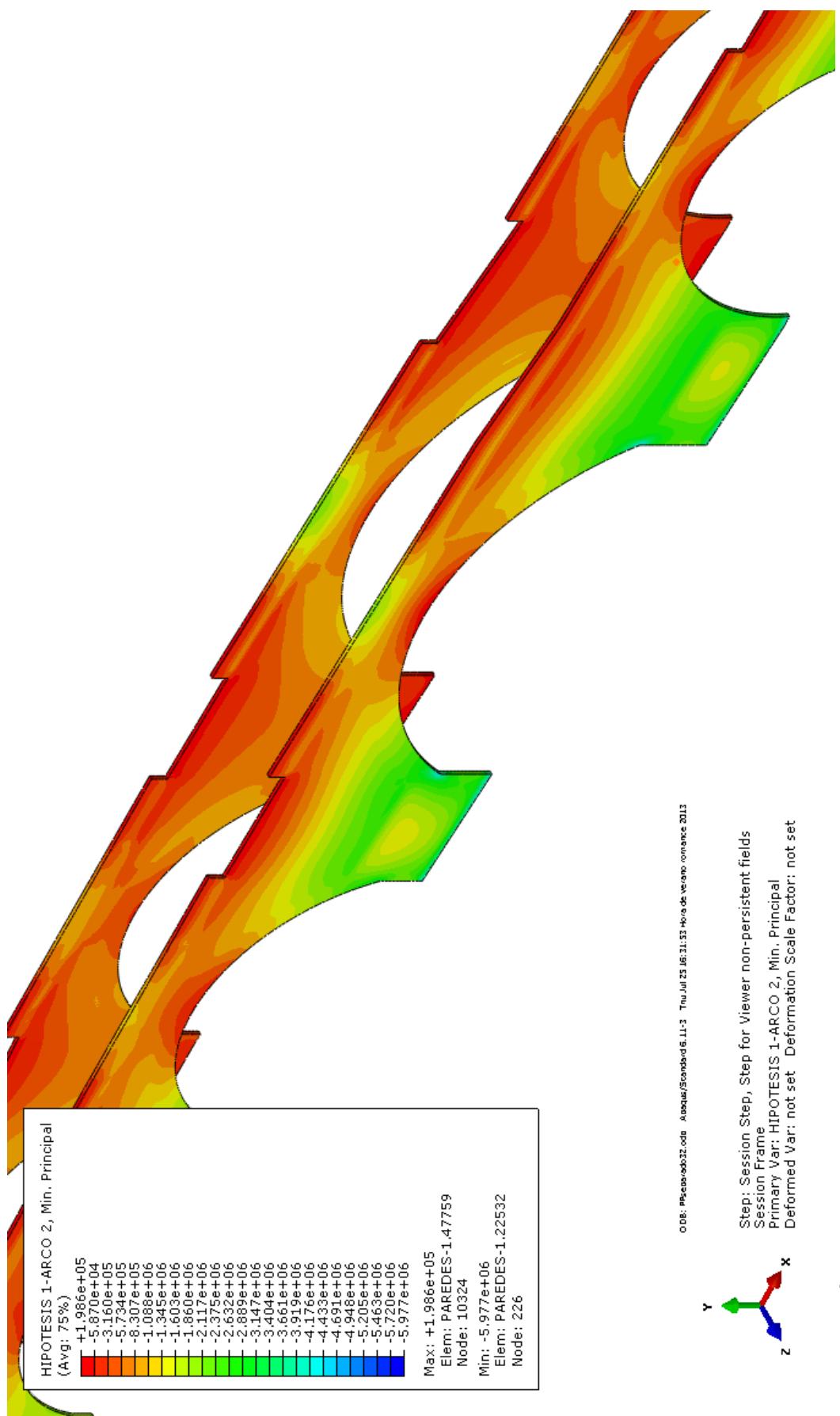
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.584E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.548E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.546E+06
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.548E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.547E+06
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06
3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.975E+06
4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.995E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-6.020E+06
6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.940E+06
7-arc6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.371E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.245E+06
8-arc2	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.369E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
9	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.243E+06

10	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.378E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.277E+06
11	Hueco 6 (Node 105532; Elem: PAREDES-1.90037)	2.108E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.289E+06
12	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.217E+06
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1-167e5	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-2.610E+06
PAREDES				
Hipótesis		(MAXIMOS)	(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.982E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.992E+06
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.583E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.557E+06
2-arc8	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.589E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.569E+06
3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.974E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.986E+06
4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.992E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-6.031E+06
6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.974E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.951E+06
7-arc7	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.368E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.256E+06

8-arc2	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.367E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc8	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.377E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.247E+06
9	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.362E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.251E+06
10	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.376E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.285E+06
11	Hueco 6 (Node 105532; Elem: PAREDES-1.90037)	2.098E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.297E+06
12	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.363E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.225E+06
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.166E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-2.618E+06
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
1	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	2.004E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.993E+06
2-arc2	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06
2-arc3	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06
2-arc4	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06

2-arc5	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06
2-arc6	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.590E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.558E+06
2-arc7	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.589E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.569E+06
3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.978E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.975E+06
4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.990E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-6.020E+06
6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.991E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.952E+06
7-arc8	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.385E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.257E+06
8-arc2	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc3	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc4	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc5	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc6	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.379E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.239E+06
8-arc7	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.377E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.247E+06
9	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.375E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.252E+06
10	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.388E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.285E+06
11	Hueco 6 (Node 105532; Elem: PAREDES-1.90037)	2.096E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-5.298E+06

12	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.375E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.226E+06
13	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22532)	1.172E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-2.618E+06
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
5	Hueco 6 (Node 105532; Elem: PAREDES-1.90037)	3.123E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-7.523E+06
14	Empotramiento Norte (Node 232; Elem: PAREDES-1.22835)	1.156E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-2.591E+06
15	Empotramiento Norte (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	1.158E+05	Pila 7 base (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-3.127E+06
PAREDES				
Hipótesis	(MAXIMOS)		(MINIMOS)	
17	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.37E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.22E+06
18	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.218E+06
19	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.218E+06
20	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.365E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.218E+06
21	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.363E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.226E+06
22	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.374E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.231E+06
23	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.371E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.222E+06
24	Empotramiento Norte (Node 10324; Elem: PAREDES-1.47759)	1.368E+05	Pila 7 (Node 226; Elem: PAREDES-1.22532)	-4.224E+06



F.IVIII

Figura 15. Hipótesis 1. Tensiones Mínimas Principales. Paredes de piedra

F.III. Desplazamientos del modelo

F.III.I. Interior de Piedra

ARCO 2				
Hipótesis	(MINIMO)	(MINIMO)		
1	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-2.377E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.890E-03
2-arc3	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.655)	1.850E-03
2-arc4	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35- 1.22646)	1.982E-03
2-arc5	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc6	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc7	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
2-arc8	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
3	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-2.374E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.892E-03
4	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-2.415E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.925E-03
6	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-2.340E-03	Arco 4(Node: LOSA_35-1.8548)	2.864E-03
7 - arc 2	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.723E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.040E-03
8-arc3	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.028E-03
8-arc4	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.047E-04
8-arc5	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.028E-03

8-arc6	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.029E-03
8-arc7	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.029E-03
8-arc8	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.029E-03
9	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.721E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.041E-03
10	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.751E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.066E-03
11	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.5766)	-1.922E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8547)	2.661E-03
12	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.696E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.8548)	2.020E-03
13	Arco 4 (Node: INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.358E-03	Arco 4 (Node: LOSA_35-1.655)	1.358E-03
ARCO 3				
Hipótesis	(MINIMOS)		(MINIMOS)	
1	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-2.375E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.888E-03
2-arc2	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc4	Arco 4 (Node LOSA_35-1.22646)	-1.979E-03	Arco 4 (Node LOSA_35- 1.22646)	1.981E-03
2-arc5	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.848E-03	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.849E-03
2-arc6	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc7	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc8	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03

3	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-2.373E-03	Arco 4 (Node LOSA_35-1.8548)	2.890E-03
4	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-2.414E-03	Arco 4 (Node LOSA_35-1.8548)	2.923E-03
6	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.6784)	-2.339E-03	Arco 4 (Node LOSA_35-1.8548)	2.863E-03
7 - arc3	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.722E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.039E-03
8-arc2	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
8-arc4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.046E-03
8-arc5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.707E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.027E-03
8-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
8-arc7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
8-arc8	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
9	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.720E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.040E-03
10	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.750E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.065E-03
11	Arco (Node INTERIOR PIEDRA- 1.5766)	-1.921E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8547)	2.660E-03
12	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.695E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.019E-03
13	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA- 1.655)	-1.357E-03	Arco 4 (Node INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.357E-03
ARCO 4				
Hipótesis				
	(MINIMOS)		(MINIMOS)	
1	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.426E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.921E-03
2-arc2	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	1.982E-03
2-arc3	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	-1.979E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	1.981E-03
2-arc5	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	1.981E-03

2-arc6	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	1.982E-03
2-arc7	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	1.982E-03
2-arc8	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	1.982E-03
3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.411E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.915E-03
4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.452E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.948E-03
6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.378E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.887E-03
7 - arc 4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.760E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.064E-03
8-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.047E-03
8-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.046E-03
8-arc5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.046E-03
8-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.047E-03
8-arc7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.047E-03
8-arc8	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.047E-03
9	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.748E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.059E-03
10	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.779E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.084E-03
11	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.7105)	-1.950E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8547)	2.675E-03
12	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.723E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8547)	2.038E-03
13	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	-1.450E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	1.452E-03
ARCO 5				
Hipótesis	(MINIMOS)		(MINIMOS)	
1	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.375E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.888E-03
2-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.848E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.849E-03
2-arc4	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.22646)	1.981E-03

2-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc8	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.373E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.890E-03
4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.414E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8448)	2.923E-03
6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.339E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.863E-03
7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.722E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.039E-03
8-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
8-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.707E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.027E-03
8-arc4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.739E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.046E-03
8-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8448)	2.028E-03
8-arc7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
8-arc8	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
9	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.9049)	-1.720E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.040E-03
10	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.9049)	-1.750E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.065E-03
11	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.5766)	-1.921E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8547)	2.660E-03
12	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.695E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.019E-03
13	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.357E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.357E-03
<hr/>				
ARCO 6				
Hipótesis	(MINIMOS)		(MINIMOS)	
1	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.377E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.890E-03
2-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03

2-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc4	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	1.982E-03
2-arc5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
2-arc8	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.374E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.892E-03
4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.415E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8448)	2.925E-03
6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.340E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.864E-03
7-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.723E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.040E-03
8-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
8-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
8-arc4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.047E-03
8-arc5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8448)	2.028E-03
8-arc7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
8-arc8	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
9	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.9049)	-1.721E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.041E-03
10	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.9049)	-1.751E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.066E-03
11	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.5766)	-1.922E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8547)	2.661E-03
12	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.696E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.020E-03
13	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.358E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.358E-03
ARCO 7				
Hipótesis	(MINIMOS)		(MINIMOS)	

1	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.377E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.890E-03
2-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
2-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc4	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	1.982E-03
2-arc5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
2-arc8	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.374E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.892E-03
4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.415E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8448)	2.925E-03
6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.340E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.864E-03
7-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.723E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.040E-03
8-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
8-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
8-arc4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.047E-03
8-arc5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8448)	2.028E-03
8-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
8-arc8	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
9	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.9049)	-1.721E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.041E-03
10	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.9049)	-1.751E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.066E-03
11	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.5766)	-1.922E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8547)	2.661E-03
12	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.696E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.020E-03

13	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.358E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.358E-03
ARCO 8				
Hipótesis				
1	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.377E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.890E-03
2-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
2-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc4	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	-1.980E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.22646)	1.982E-03
2-arc5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.849E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.850E-03
2-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
2-arc7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.850E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.851E-03
3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.374E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.892E-03
4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.415E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8448)	2.925E-03
6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-2.340E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.864E-03
7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.723E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.040E-03
8-arc2	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
8-arc3	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.028E-03
8-arc4	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.736E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.047E-03
8-arc5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.708E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8448)	2.028E-03
8-arc6	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
8-arc7	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.709E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.029E-03
9	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.721E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	2.041E-03
10	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.751E-03	Arco 4 (LOSA_35- 1.8548)	1.066E-03

11	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.5766)	1.922e-3	Arco 4 (LOSA_35-1.8547)	2.661E-03
12	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.696E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.020E-03
13	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.358E-03	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.358E-03
HIPÓTESIS RESTANTES				
Puntos (MINIMOS) (MINIMOS)				
5	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.7036)	-2.656E-03	ARCO 4 (LOSA-35-1.8547)	3.835E-03
14	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	-1.340E-03	ARCO 4 (INTERIOR PIEDRA-1.655)	1.340E-03
15	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.452E-03	ARCO 4 (RELLENO-1.24456)	1.487E-03
HIPÓTESIS LÓGICA DE SERVICIO				
Puntos (MINIMOS) (MINIMOS)				
17	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.696E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.020E-03
18	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.723E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.038E-03
19	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.710E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.029E-03
20	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6784)	-1.723E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.038E-03
21	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.695E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.019E-03
22	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.696E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.020E-03
23	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.696E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.020E-03
24	Arco 4 (INTERIOR PIEDRA-1.6285)	-1.707E-03	Arco 4 (LOSA_35-1.8548)	2.027E-03

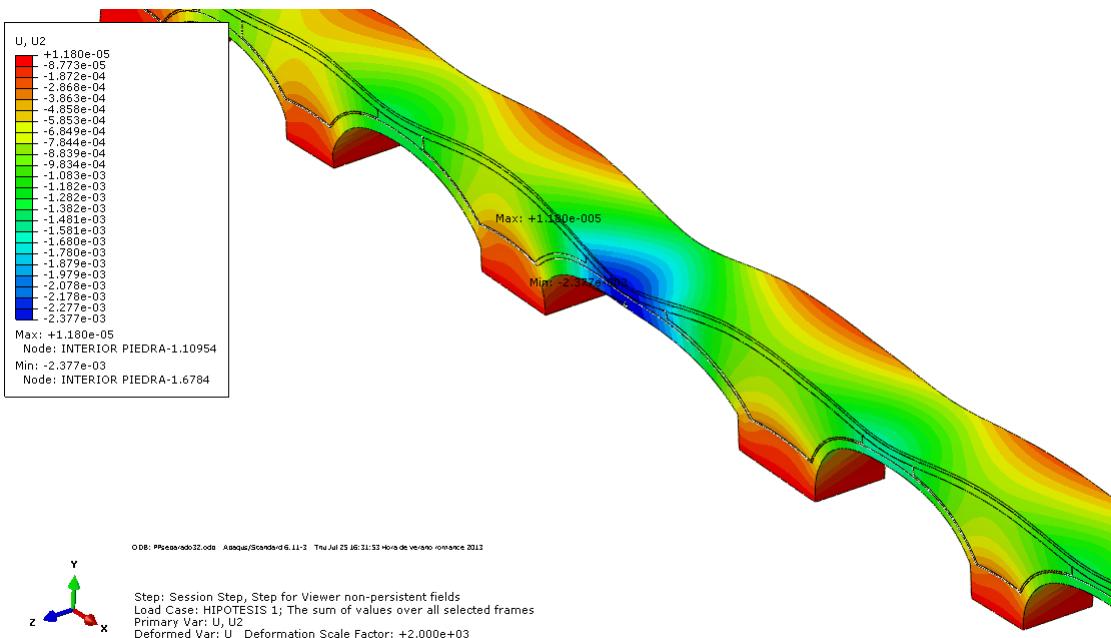


Figura 16. Hipótesis 1. Desplazamiento Arco 4

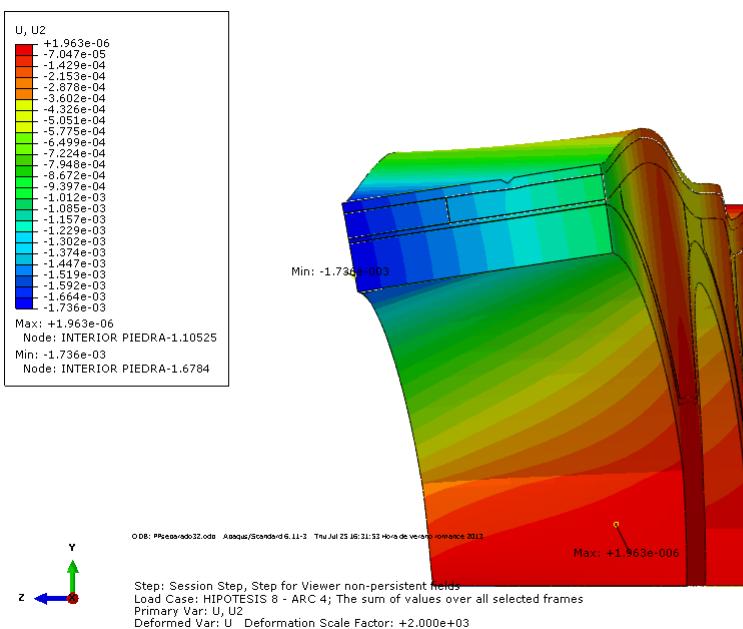


Figura 17. Hipótesis 1. Desplazamiento transversal arco 4

F.IV. Frecuencias naturales del modelo

F.IV.I. Frecuencias naturales sin pilas

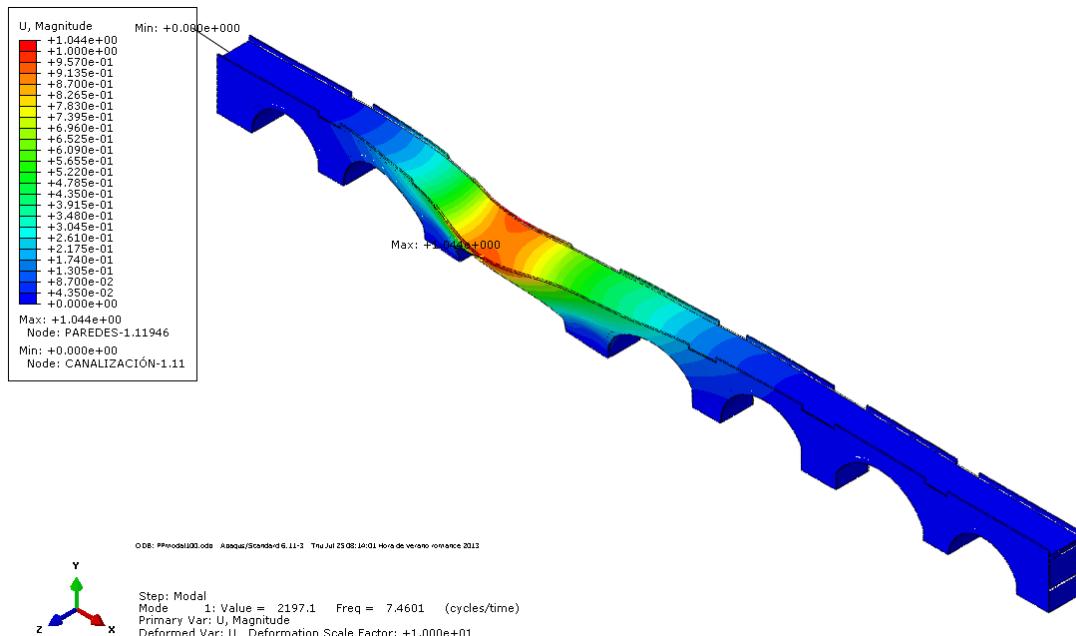


Figura 18. . Frecuencia natural 1 (7.46 Hz). Sin pilas

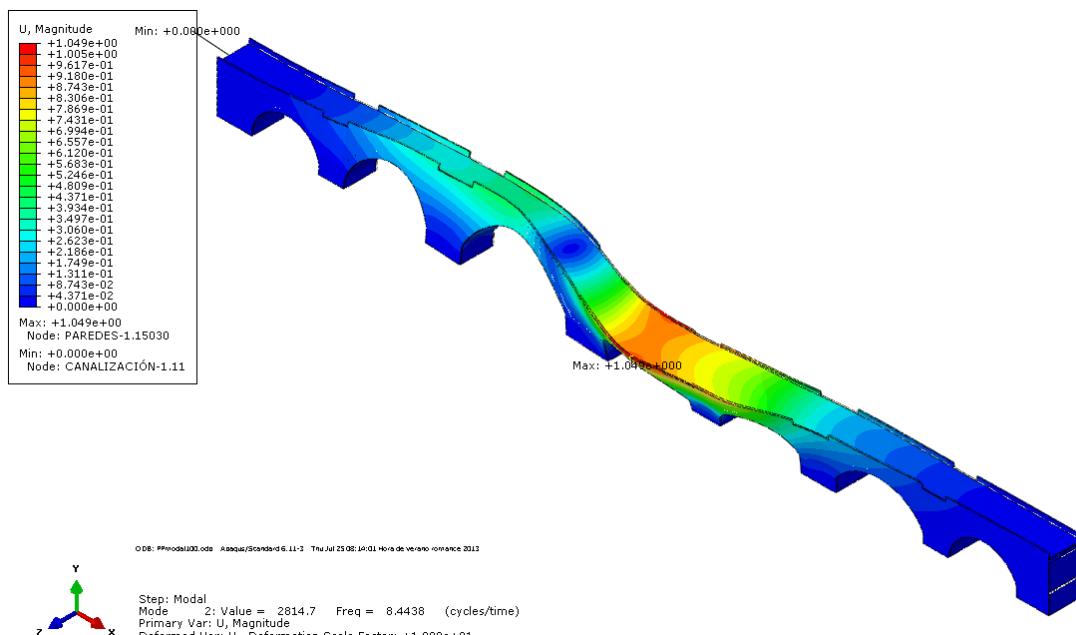


Figura 19. . Frecuencia natural 2 (8.44 Hz). Sin pilas

Anexo F. Análisis de Resultados

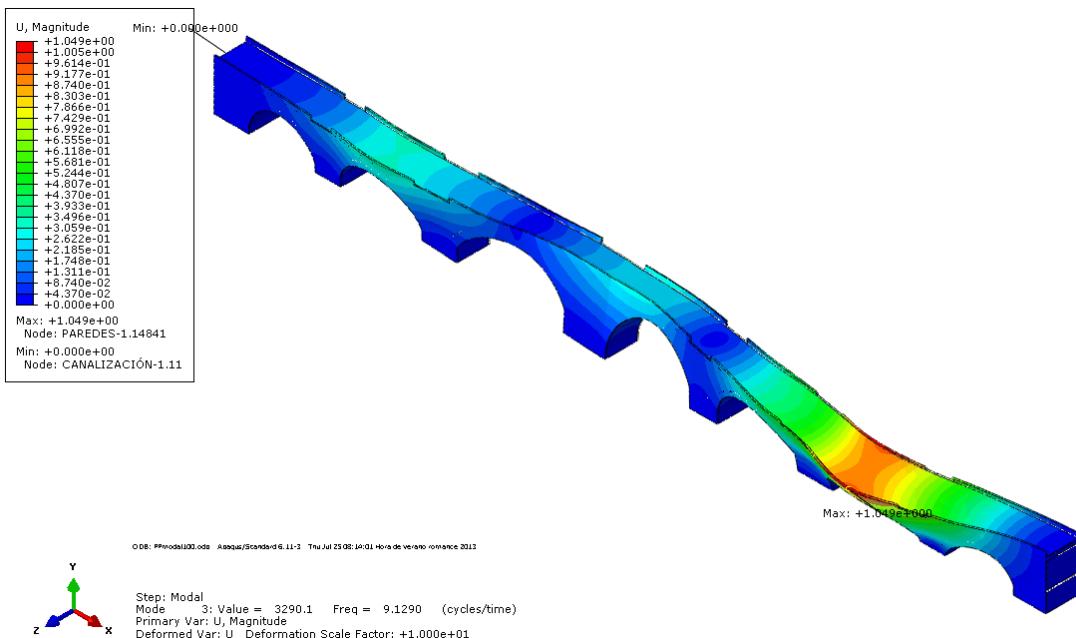


Figura 20. Frecuencia natural 3 (9.12 Hz). Sin pilas

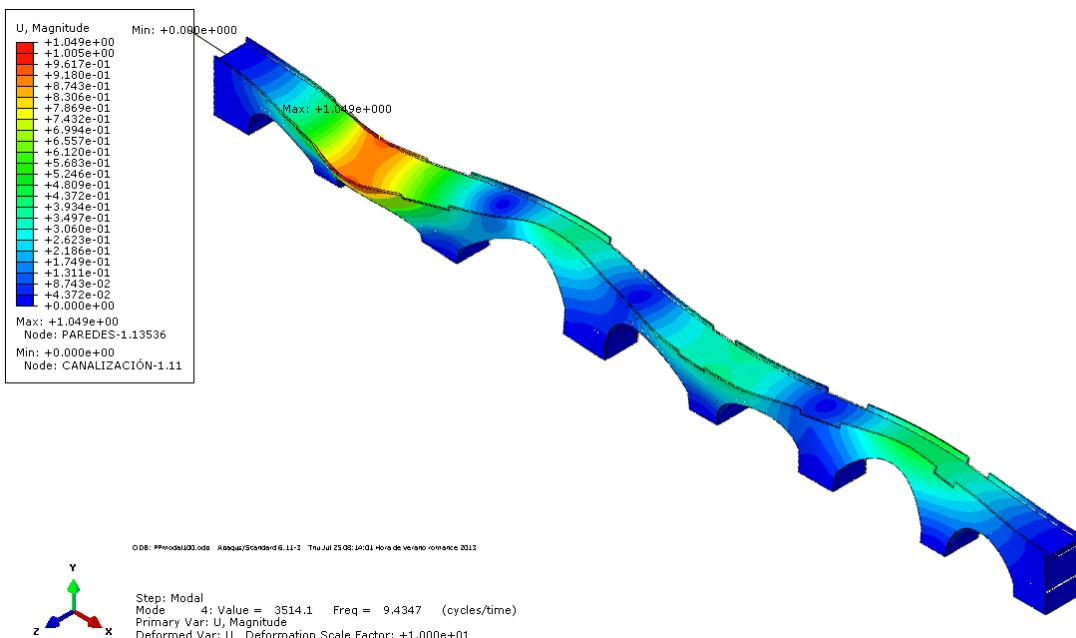


Figura 21. Frecuencia natural 4 (9.43 Hz). Sin pilas

$$F_{lxx}$$

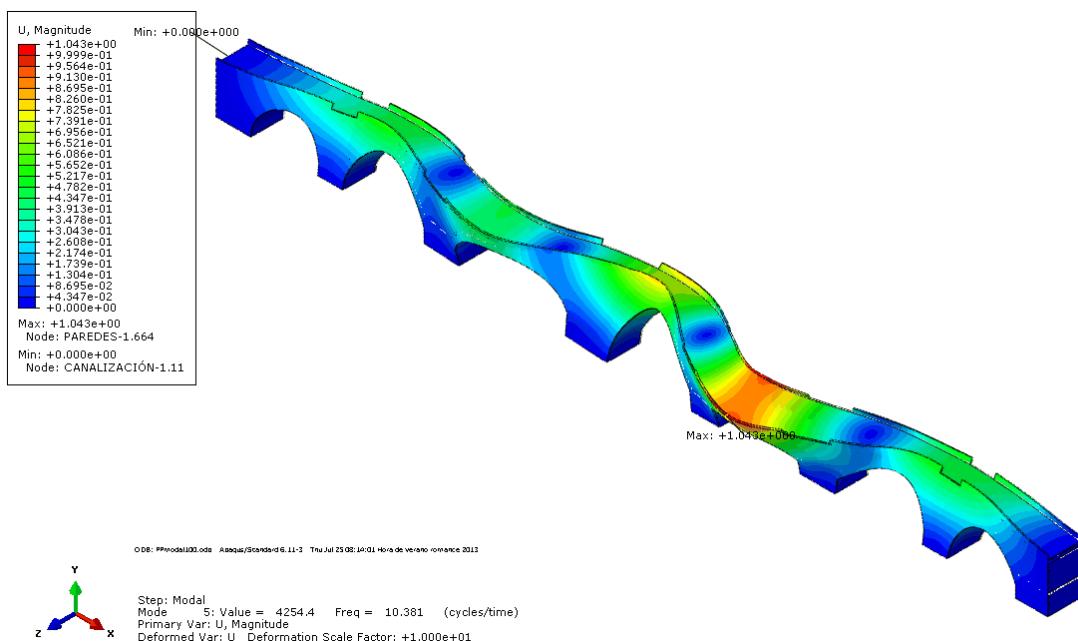


Figura 22. . Frecuencia natural 5 (10.38 Hz). Sin pilas

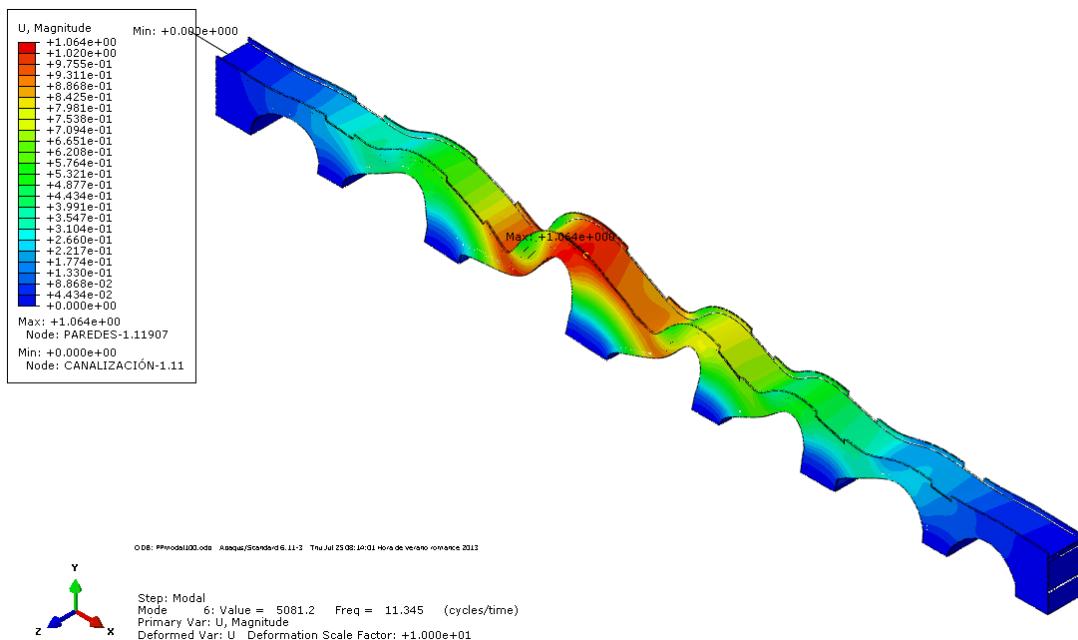


Figura 23. Frecuencia natural 6 (11.34 Hz). Sin pilas

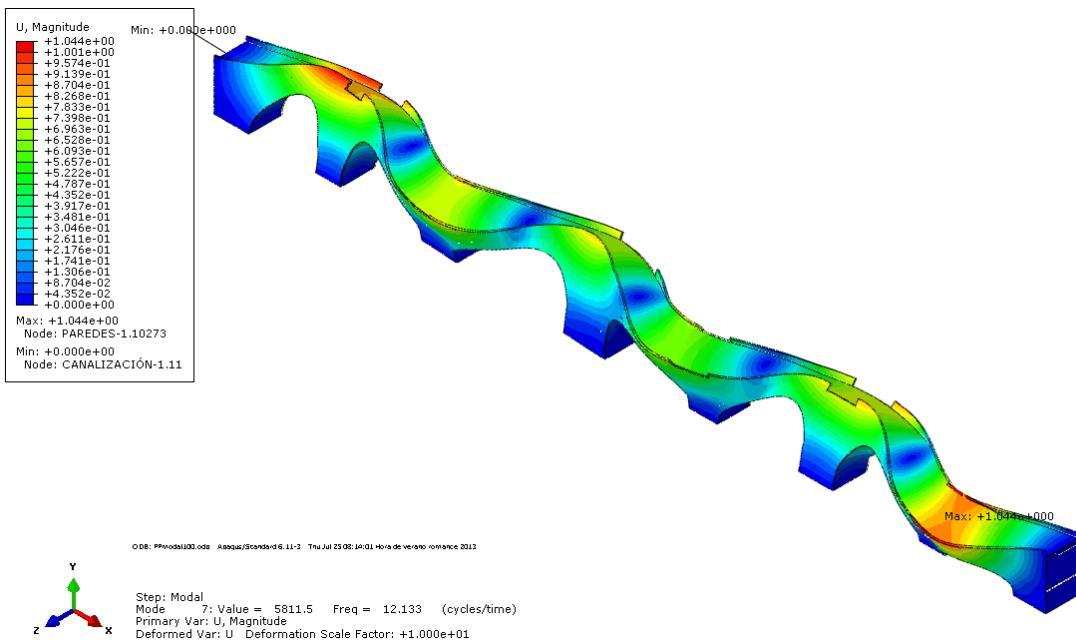


Figura 24. Frecuencia natural 7 (12.13 Hz). Sin pilas

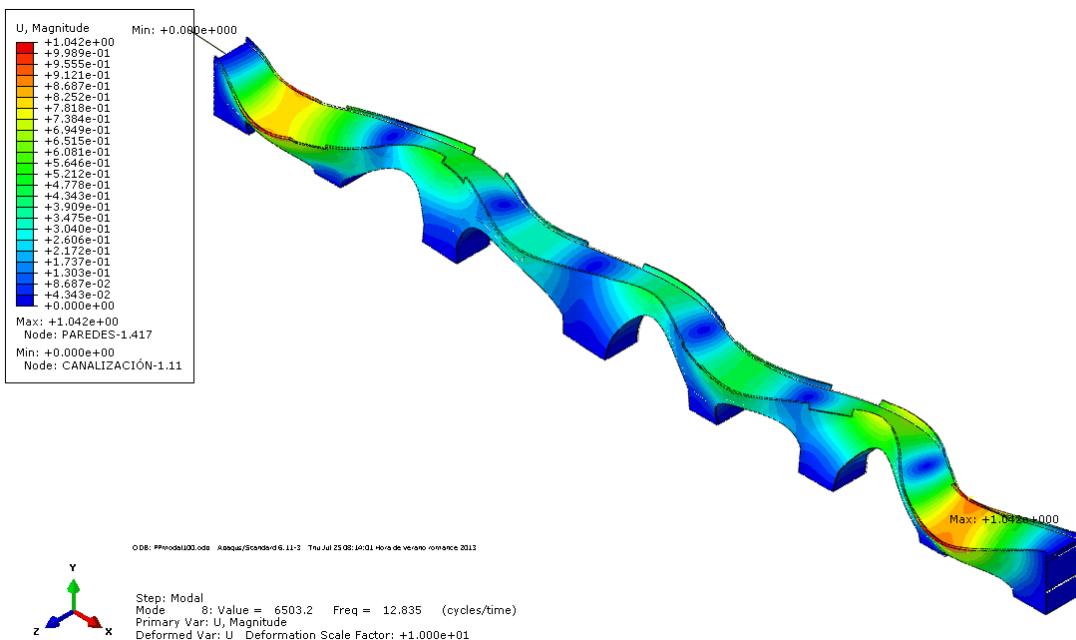


Figura 25. Frecuencia natural 8 (12.83 Hz). Sin pilas

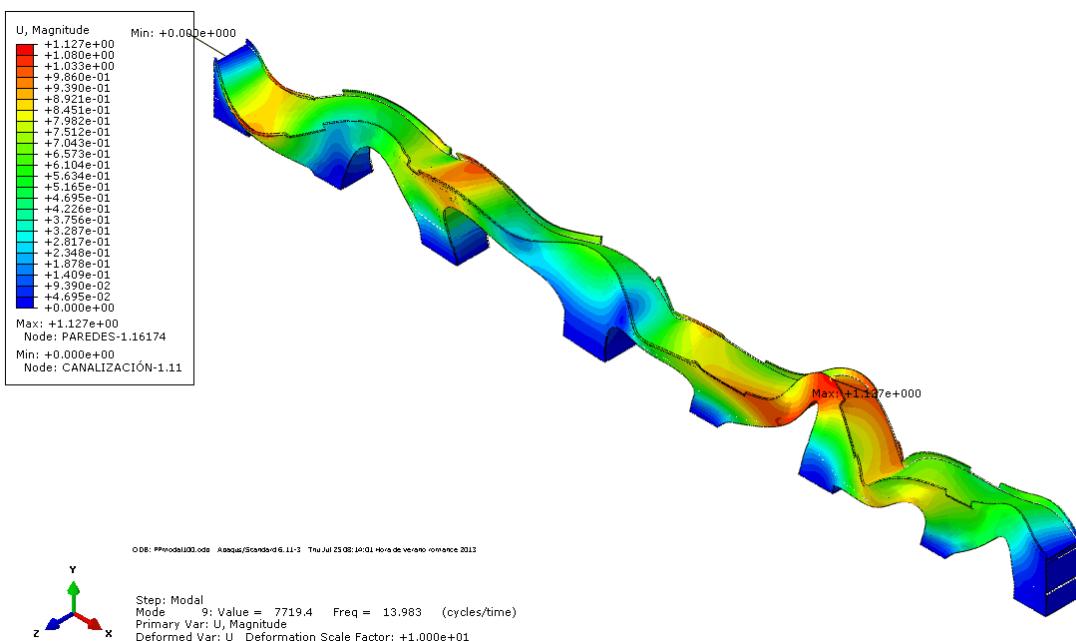


Figura 26. Frecuencia natural 9 (13.98 Hz). Sin pilas

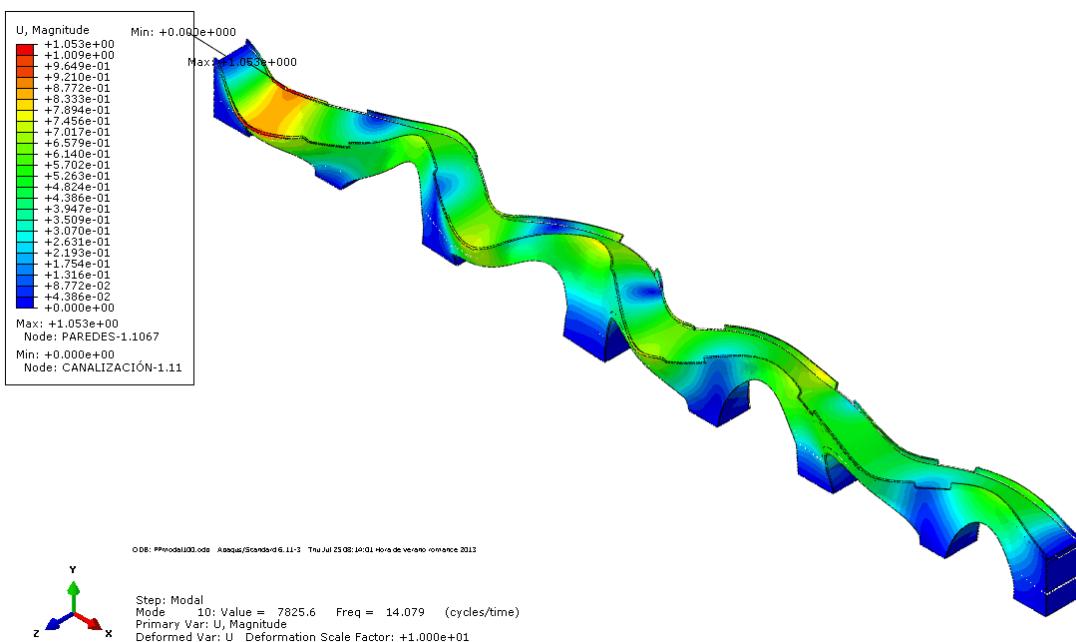


Figura 27. Frecuencia natural 10 (14.08 Hz). Sin pilas

F.IV.II. Frecuencias naturales con pilas

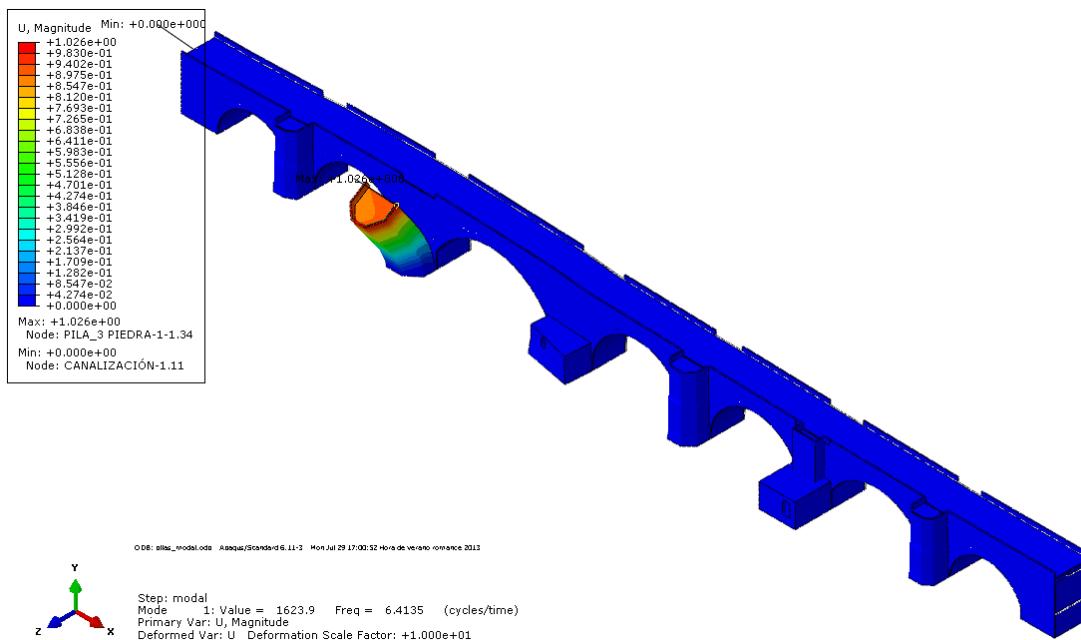


Figura 28. . Frecuencia natural 1 (6.41 Hz). Con pilas

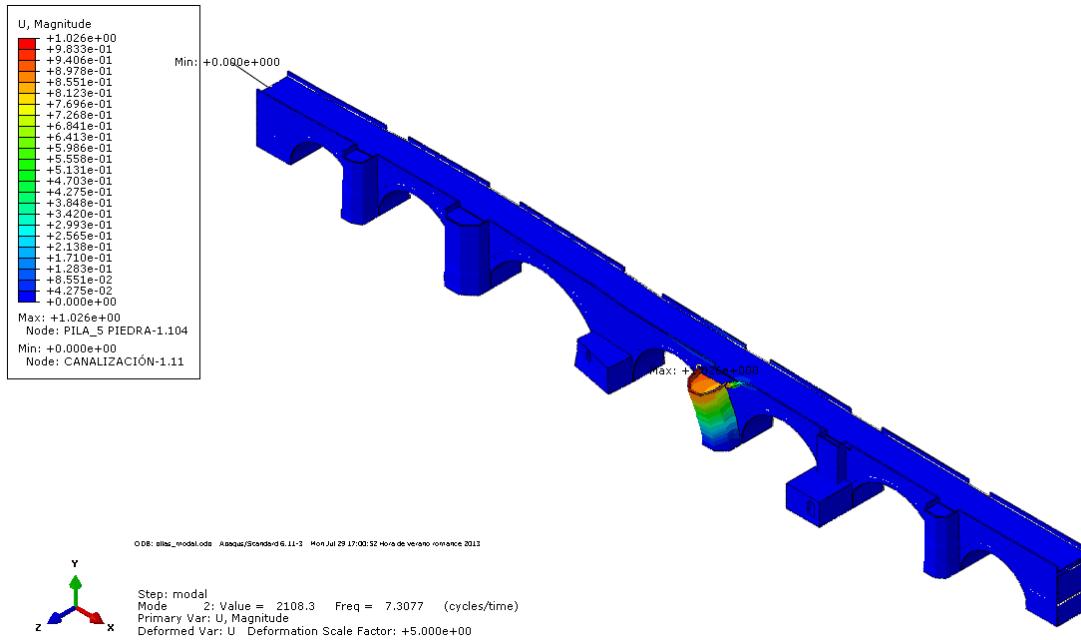


Figura 29. Frecuencia natural 2 (7.31 Hz). Con pilas

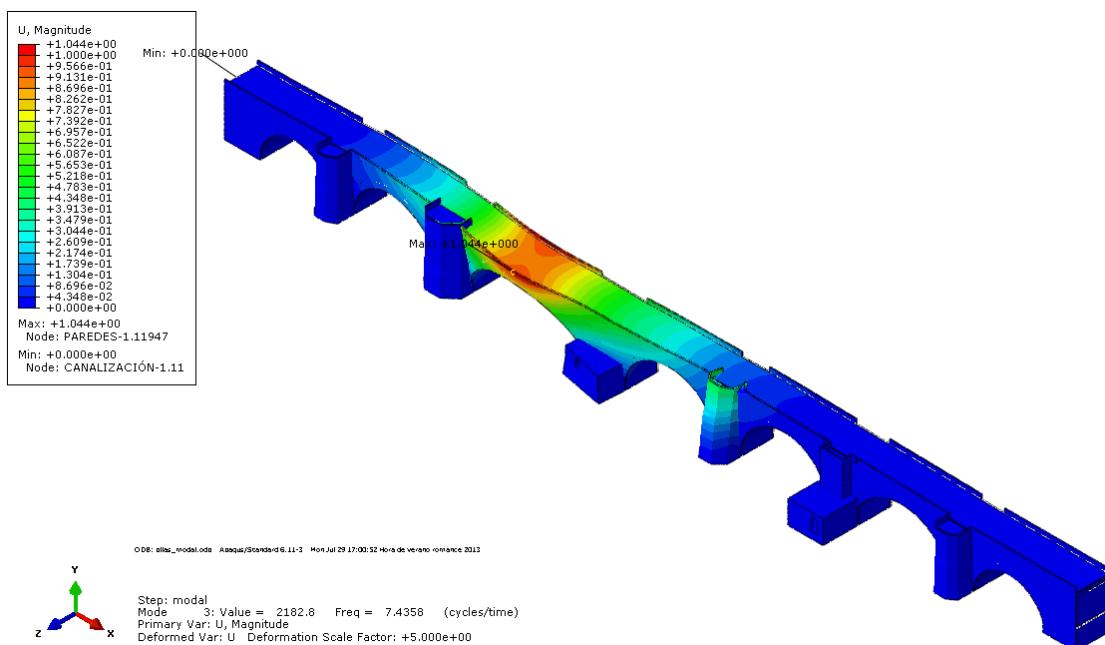


Figura 30. Frecuencia natural 3 (7.43 Hz). Con pilas

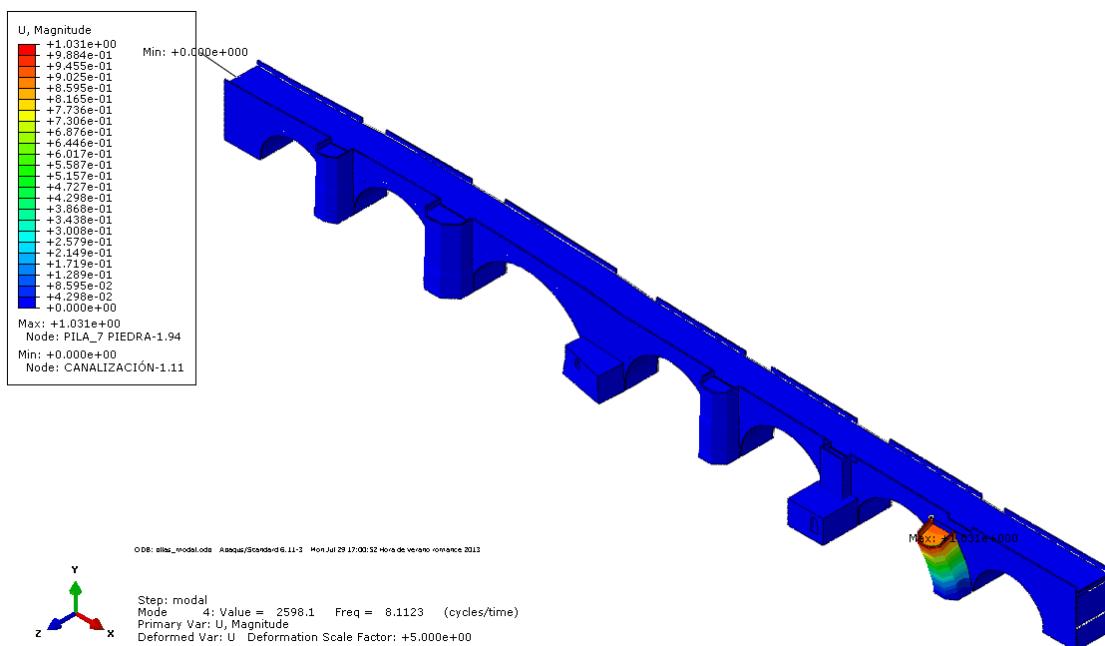


Figura 31. Frecuencia natural 4 (8.11 Hz). Con pilas

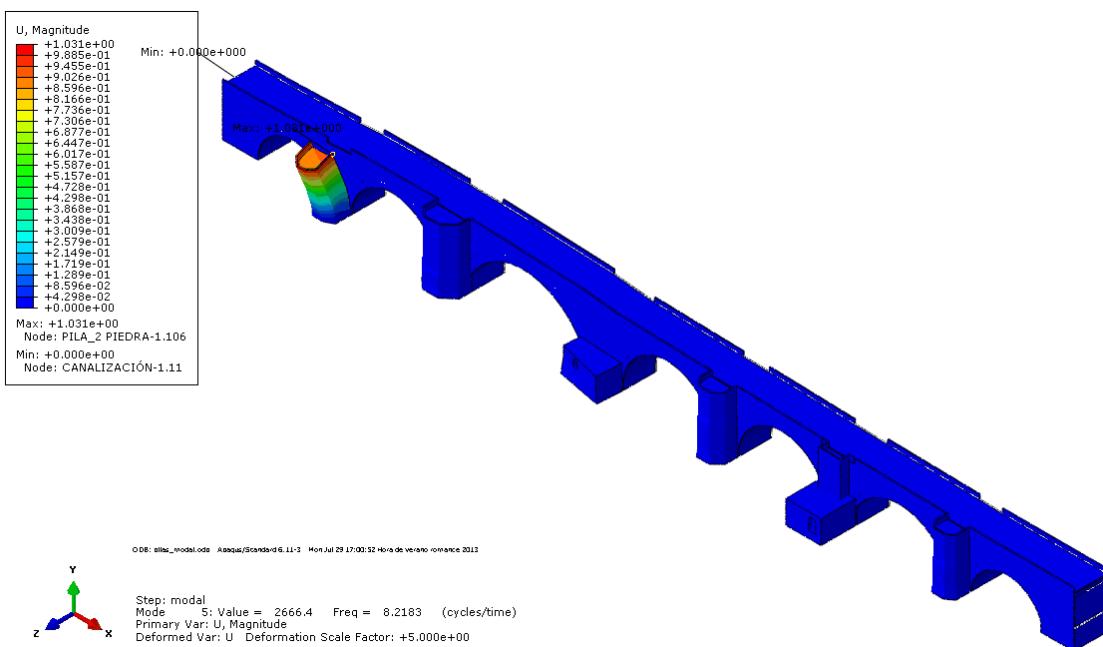


Figura 32. Frecuencia natural 5 (8.21 Hz). Con pilas

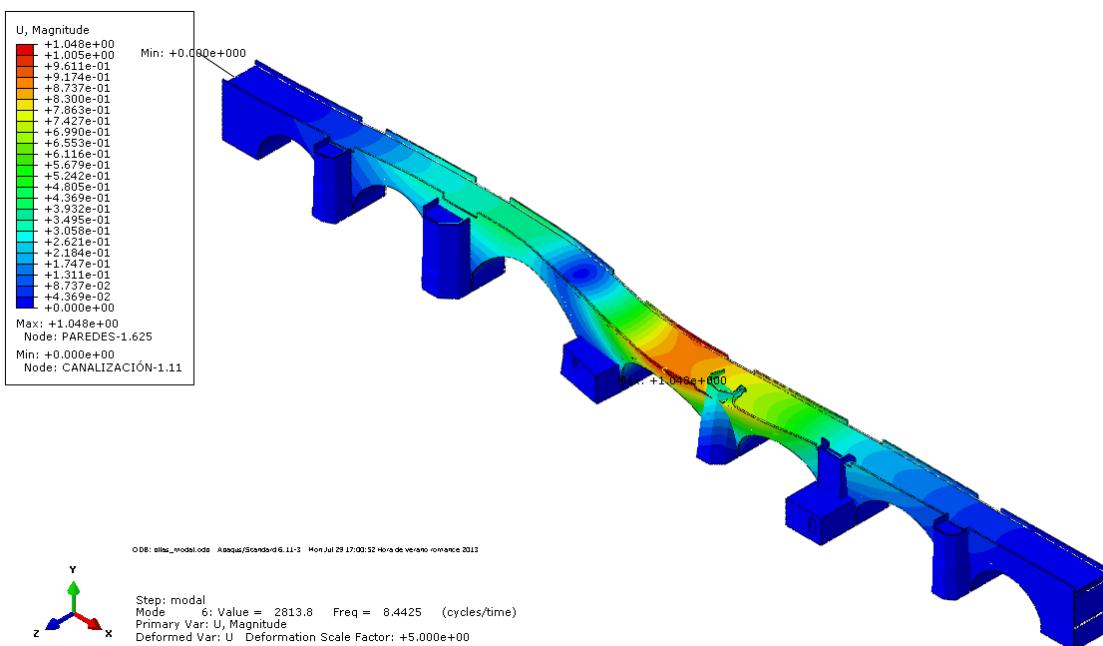


Figura 33. Frecuencia natural 6 (8.44 Hz). Con pilas

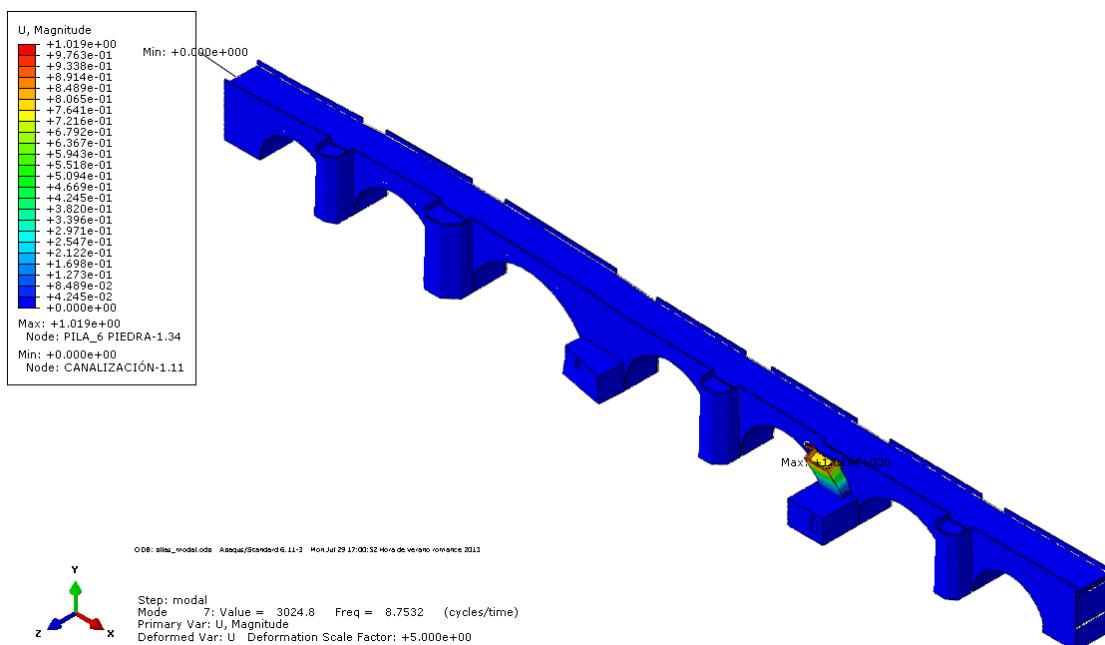


Figura 34. Frecuencia natural 7 (8.74 Hz). Con pilas

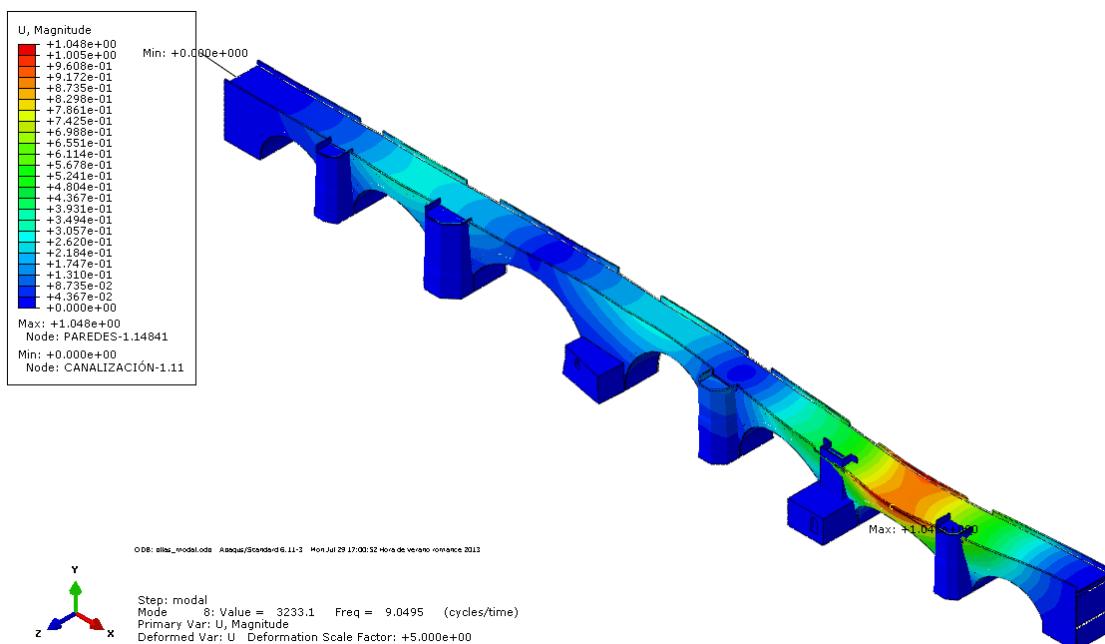


Figura 35. Frecuencia natural 8 (9.05 Hz). Con pilas

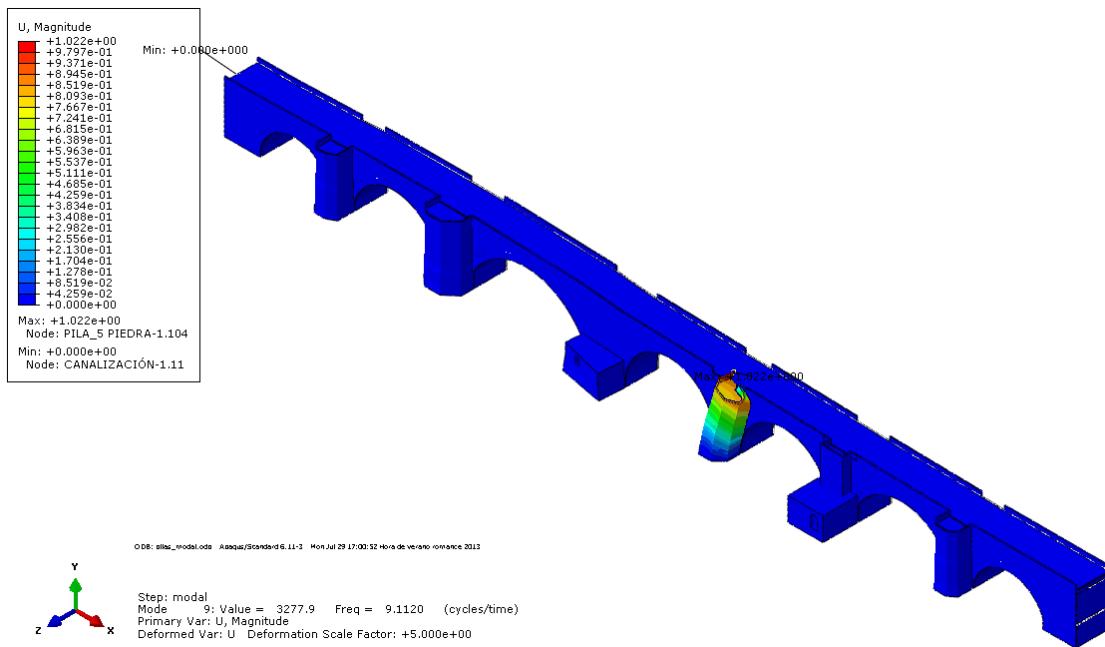


Figura 36. Frecuencia natural 9 (9.11 Hz). Con pilas

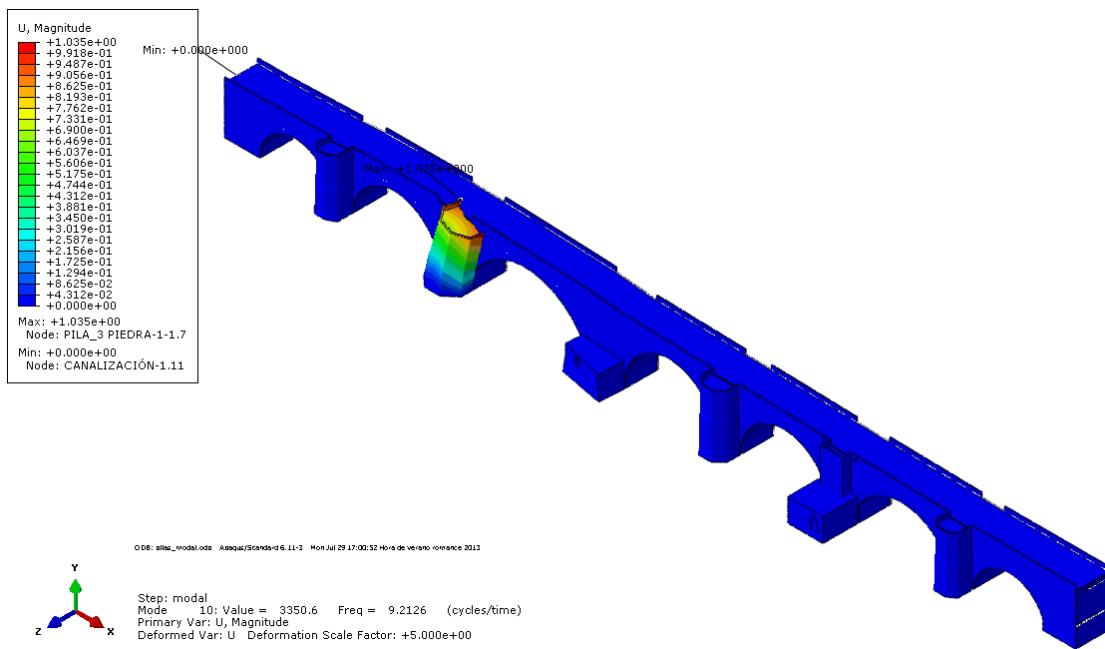


Figura 37. Frecuencia natural 10 (9.21 Hz). Con pilas

F.V. Comprobación de tensiones

Las comprobaciones estructurales se han realizado atendiendo al criterio de Rankine y a varios criterios encontrados en la bibliografía (18) y reflejados en el Anexo C. Construcción.

El criterio de Rankine atiende a la resistencia de compresión del material y la resistencia de tracción (Tabla V-1). La resistencia a compresión de la piedra se obtiene gracias al informe RODIO del Anexo H. Documentación del Ayuntamiento de Zaragoza. Sin embargo no se tienen datos de la resistencia a tracción y por tanto se trabajan las siguientes hipótesis:

- La resistencia a tracción es el 10% de la de compresión
- La resistencia a tracción se mueve en el rango de 0.5 – 5 MPa según la bibliografía consultada (18).

Por tanto se analizarán las tensiones dentro de ese rango de acción.

Por otro lado los criterios clásicos (Tabla V-2): de compresión (s. XIX) que contemplaban que la resistencia de la fábrica a compresión es 1/10 de la resistencia de la piedra, el criterio de Engesser que contempla una combinación de la resistencia de la piedra y la resistencia de la junta y los criterios de compresión tabulados en el CIB.

Por último, se determinará si las tensiones en las que trabaja el Puente de Piedra de Zaragoza se sitúan dentro del rango de trabajo de monumentos de los que actualmente se han realizado mediciones (Tabla V-3).

Tabla V-1. Propiedades resistentes de la piedra. Excel

PIEDRA			
	kp/cm²	N/m²	MPa
Resistencia Compresión	120.000	11772000.000	11.772
Resistencia Tracción (Huerta)	50.968	5000000.000	5.000
Resistencia Tracción (Huerta)	5.097	500000.000	0.500

Tabla V-2. Propiedades resistentes de la fábrica (18)

FABRICA	kp/cm ²	N/m ²	MPa
Compresión (s. XIX)	12.000	1177200.000	1.177
Compresión Engesser (1907) (m=0)	42.000	4120200.000	4.120
Compresión Engesser (1907) (CS= 4)	10.500	1030050.000	1.030
Compresión Engesser (1907) (CS=8)	5.250	515025.000	0.515
Compresión CIB (M4)	41.7941	4100000.0000	4.1000
Compresión CIB (M3)	47.9103	4700000.0000	4.7000
Compresión CIB (M2)	54.0265	5300000.0000	5.3000
Compresión CIB (M1)	63.2008	6200000.0000	6.2000
Compresión CIB (M4) (CS=4)	10.4485	1025000.0000	1.0250
Compresión CIB (M3) (CS=4)	11.9776	1175000.0000	1.1750
Compresión CIB (M2) (CS=4)	13.5066	1325000.0000	1.3250
Compresión CIB (M1) (CS=4)	15.8002	1550000.0000	1.5500
Tracción	0.000	0.000	0.000

Tabla V-3. Rango de tensiones de monumentos conocidos (18)

RANGOS CONOCIDOS	MPa (N/mm ²)
Pilares de la cúpula de S. Genoveva en París	2.9
Pilares de la iglesia de Santa Sofía de Constantinopla	2.2
Pilares de la Catedral de Palma de Mallorca	2.2
Pilares de la cúpula de San Pedro en Roma	1.7
Puente de Morbegno (L=70 m)	7
Puente de Plauen (L=90 m)	6.9
Puente de Villeneuve (L=96 m)	5.7
Viaducto de Salcano en Göritz (L=85 m)	5.1
Puente sobre el Rocky River (L=85 m)	4.4
Puente de Luxemburgo (L=85 m)	4.8

Tabla V-4. Parejas de tensiones principales máximas. Interior de piedra

INTERIOR PIEDRA		
Hipótesis	Max Ppal (MPa)	Min Ppal (MPa)
Hipótesis 5	1.327	0.025
Hipótesis 5	-1.210	-4.500
Hipótesis 5	0.223	-7.325
ARCO 8 Hipótesis 2 - arc4	0.061	-0.019
Hipótesis 21	0.461	-0.460
Hipótesis 21	-0.700	-2.550
Hipótesis 18	0.115	-0.005
Hipótesis 18	0.115	-4.194

Tabla V-5. Parejas de tensiones principales máximas. Paredes de piedra

PAREDES DE PIEDRA		
Hipótesis	Max Ppal (MPa)	Min Ppal (MPa)
Hipótesis 5	4.113	0.191
Hipótesis 5	-0.946	-6.300
Hipótesis 5	1.141	0.312
Hipótesis 5	-0.838	-7.523
Hipótesis 22	2.411	0.129
Hipótesis 22	-0.535	-3.600
Hipótesis 22	1.298	0.137
Hipótesis 22	-0.440	-4.231

Según el criterio de Rankine para el criterio de fallo de materiales:

Tabla V-6. Criterio de Rankine. Interior Piedra

INTERIOR PIEDRA				
Hipótesis	Rankine (Tracción)	CS	Rankine (Compresión)	CS
Hipótesis 5	Fallo	0.887	Resiste	478.926
Hipótesis 5	Resiste	0.973	Resiste	2.616
Hipótesis 5	Resiste	5.274	Resiste	1.607
ARCO 8 Hipótesis 2 - arc4	Resiste	19.226	Resiste	611.532
Hipótesis 21	Resiste	2.556	Resiste	25.619
Hipótesis 21	Resiste	1.682	Resiste	4.616
Hipótesis 18	Resiste	10.237	Resiste	2495.125
Hipótesis 18	Resiste	10.228	Resiste	2.807

Tabla V-7. Criterio de Rankine. Paredes de piedra

PAREDES DE PIEDRA		Rankine (Tracción)	CS	Rankine (Compresión)	CS
Hipótesis 5	Fallo	0.286	Resiste	61.795	
Hipótesis 5	Resiste	1.245	Resiste	1.869	
Hipótesis 5	Resiste	1.032	Resiste	37.695	
Hipótesis 5	Resiste	1.405	Resiste	1.565	
Hipótesis 22	Fallo	0.488	Resiste	91.398	
Hipótesis 22	Resiste	2.202	Resiste	3.270	
Hipótesis 22	Fallo	0.907	Resiste	85.677	
Hipótesis 22	Resiste	2.675	Resiste	2.782	

Según los criterios clásicos de fallo para la fábrica:

Tabla V-8. Comprobación resistente s. XIX y Engesser. Interior Piedra

INTERIOR PIEDRA							
Hipótesis	Compresión (s. XIX)	Compresión Engesser (1907) (m=0)	CS	Compresión Engesser (1907) (CS= 4)	CS	Compresión Engesser (1907) (CS=8)	CS
Hipótesis 5	OK	OK	167.624	OK	41.906	OK	20.9
Hipótesis 5	No OK	No OK	0.916	No OK	0.229	No OK	0.114
Hipótesis 5	No OK	No OK	0.562	No OK	0.141	No OK	0.070
ARCO 8	OK	OK	214.036	OK	53.509	OK	26.75
Hipótesis 2 - arc4							5
Hipótesis 21	OK	OK	8.967	OK	2.242	OK	1.121
Hipótesis 21	No OK	OK	1.616	No OK	0.404	No OK	0.202
Hipótesis 18	OK	OK	873.294	OK	218.32	OK	109.1
Hipótesis 18	No OK	No OK	0.982	No OK	0.246	No OK	0.123
							62

Tabla V-9. Comprobación resistente s. XIX y Engesser. Paredes de piedra

PAREDES DE PIEDRA							
Hipótesis	Compresión (s. XIX)	Compresión Engesser (1907) (m=0)	CS	Compresión Engesser (1907) (CS= 4)	CS	Compresión Engesser (1907) (CS=8)	CS
Hipótesis 5	OK	OK	21.628	OK	5.407	OK	2.704
Hipótesis 5	No OK	No OK	0.654	No OK	0.164	No OK	0.082
Hipótesis 5	OK	OK	13.193	OK	3.298	OK	1.649
Hipótesis 5	No OK	No OK	0.548	No OK	0.137	No OK	0.068
Hipótesis 22	OK	OK	31.989	OK	7.997	OK	3.999
Hipótesis 22	No OK	OK	1.145	No OK	0.286	No OK	0.143
Hipótesis 22	OK	OK	29.987	OK	7.497	OK	3.748
Hipótesis 22	No OK	No OK	0.974	No OK	0.243	No OK	0.122

Tabla V-10. Comprobación resistente según CIB. Interior de Piedra

INTERIOR PIEDRA								
Hipótesis	Compresión CIB (M4)	CS	Compresión CIB (M3)	CS	Compresión CIB (M2)	CS	Compresión CIB (M1)	Tracción
Hipótesis 5	OK	166.802	OK	191.212	OK	215.622	OK	Fisuración
Hipótesis 5	No OK	0.911	OK	1.044	OK	1.178	OK	No Fisura
Hipótesis 5	No OK	0.560	No OK	0.642	No OK	0.724	No OK	Fisuración
ARCO 8	OK	212.987	OK	244.156	OK	275.325	OK	Fisuración
Hipótesis 2 - arc4	OK	8.923	OK	10.229	OK	11.534	OK	Fisuración
Hipótesis 21	OK	1.608	OK	1.843	OK	2.078	OK	No Fisura
Hipótesis 21	OK	869.012	OK	996.185	OK	1123.357	OK	Fisuración
Hipótesis 18	No OK	0.978	OK	1.121	OK	1.264	OK	Fisuración
Hipótesis 18	No OK	0.978	OK	1.121	OK	1.264	OK	Fisuración

Tabla V-11. Comprobación resistente según CIB. Paredes de Piedra

PAREDES DE PIEDRA								
Hipótesis	Compresión CIB (M4)	CS	Compresión CIB (M3)	CS	Compresión CIB (M2)	CS	Compresión CIB (M1)	Tracción
Hipótesis 5	OK	21.522	OK	24.672	OK	27.822	OK	Fisuración
Hipótesis 5	No OK	0.651	No OK	0.746	No OK	0.841	No OK	No Fisura
Hipótesis 5	OK	13.128	OK	15.050	OK	16.971	OK	Fisuración
Hipótesis 5	No OK	0.545	No OK	0.625	No OK	0.705	No OK	No Fisura
Hipótesis 22	OK	31.832	OK	36.491	OK	41.149	OK	Fisuración
Hipótesis 22	OK	1.139	OK	1.306	OK	1.472	OK	No Fisura
Hipótesis 22	OK	29.840	OK	34.207	OK	38.574	OK	Fisuración
Hipótesis 22	No OK	0.969	OK	1.111	OK	1.253	OK	No Fisura

Índice de Figuras. Anexo F

Figura 1. Criterio de Rankine	iii
Figura 2. Hipótesis 1. Arcos 2, 3 y 4. Frontal. Max. ppal.	xv
Figura 3. Hipótesis 1. Arcos 2, 3 y 4. Inferior. Max. ppal.	xv
Figura 4. Hipótesis 1. Arcos 5, 6, 7, 8. Frontal. Max. ppal.	xvi
Figura 5. Hipótesis 1. Arcos 5, 6, 7, 8. Inferior. Max. ppal.	xvi
Figura 6. Hipótesis 1. Arco 4. Tensiones positivas	xvii
Figura 7. Hipótesis 1. Corte Arco 4. Tensiones Positivas	xvii
Figura 8. Hipótesis 1. Arcos 2, 3 y 4. Frontal. Min. Ppal	xxx
Figura 9. Hipótesis 1. Arcos 2, 3 y 4. Inferior. Min. ppal.	xxxi
Figura 10. Hipótesis 1. Arcos 5, 6, 7 y 8. Frontal. Min. ppal.	xxxi
Figura 11. Hipótesis 1. Arcos 5, 6, 7, 8. Inferior. Min. ppal.	xxxii
Figura 12. . Hipótesis 1. Arco 4. Frontal. Detallado	xxxii
Figura 13. . Hipótesis 1. Arco 4. Corte. Detallado	xxxiii
Figura 14. Hipótesis 1. Tensiones máximas principales. Paredes de piedra.	xlv
Figura 15. Hipótesis 1. Tensiones Mininmas Principales. Paredes de piedra	lviii
Figura 16. Hipótesis 1. Desplazamiento Arco 4	lxviii
Figura 17. Hipótesis 1. Desplazamiento transversal arco 4	lxviii
Figura 18. . Frecuencia natural 1 (7.46 Hz). Sin pilas	lxix
Figura 19. . Frecuencia natural 2 (8.44 Hz). Sin pilas	lxix
Figura 20. Frecuencia natural 3 (9.12 Hz). Sin pilas	lxx
Figura 21. Frecuencia natural 4 (9.43 Hz). Sin pilas	lxx
Figura 22. . Frecuencia natural 5 (10.38 Hz). Sin pilas	lxxi
Figura 23. Frecuencia natural 6 (11.34 Hz). Sin pilas	lxxi
Figura 24. Frecuencia natural 7 (12.13 Hz). Sin pilas	lxxii
Figura 25. Frecuencia natural 8 (12.83 Hz). Sin pilas	lxxii
Figura 26. Frecuencia natural 9 (13.98 Hz). Sin pilas	lxxiii
Figura 27. Frecuencia natural 10 (14.08 Hz). Sin pilas	lxxiii
Figura 28. . Frecuencia natural 1 (6.41 Hz). Con pilas	lxxiv
Figura 29. Frecuencia natural 2 (7.31 Hz). Con pilas	lxxiv
Figura 30. Frecuencia natural 3 (7.43 Hz). Con pilas	lxxv
Figura 31. Frecuencia natural 4 (8.11 Hz). Con pilas	lxxv
Figura 32. Frecuencia natural 5 (8.21 Hz). Con pilas	lxxvi
Figura 33. Frecuencia natural 6 (8.44 Hz). Con pilas	lxxvi
Figura 34. Frecuencia natural 7 (8.74 Hz). Con pilas	lxxvii
Figura 35. Frecuencia natural 8 (9.05 Hz). Con pilas	lxxvii
Figura 36. Frecuencia natural 9 (9.11 Hz). Con pilas	lxxviii
Figura 37. Frecuencia natural 10 (9.21 Hz). Con pilas	lxxviii

Índice de Tablas. Anexo F

Tabla V-1. Propiedades resistentes de la piedra. Excel	lxxix
Tabla V-2. Propiedades resistentes de la fábrica (18)	lxxx
Tabla V-3. Rango de tensiones de monumentos conocidos (18)	lxxx
Tabla V-4. Parejas de tensiones principales máximas. Interior de piedra	lxxxi
Tabla V-5. Parejas de tensiones principales máximas. Paredes de piedra	lxxxi
Tabla V-6. Criterio de Rankine. Interior Piedra	lxxxi
Tabla V-7. Criterio de Rankine. Paredes de piedra	lxxxii
Tabla V-8. Comprobación resistente s. XIX y Engesser. Interior Piedra	lxxxii
Tabla V-9. Comprobación resistente s. XIX y Engesser. Paredes de piedra	lxxxii
Tabla V-10. Comprobación resistente según CIB. Interior de Piedra	lxxxiii
Tabla V-11. Comprobación resistente según CIB. Paredes de Piedra	lxxxiii

ANEXO G. RESTAURACIÓN

G.I. Intervenciones en los puentes de piedra

El patrimonio actual de puentes sería diferente de no haberse producido intervenciones en ellos. Algunas negativas, porque han introducido transformaciones que degradan su fisionomía o son reparaciones de baja calidad, aunque también han existido intervenciones positivas. Pero no debe perderse de vista que las intervenciones han permitido que los puentes hoy en día sigan existiendo y puedan ser extensamente utilizados.

El mantener vivos, en funcionamiento, los puentes de piedra es lo que los ha preservado hasta hoy en día, pero es conveniente mantenerlos con un uso para tráfico secundario (que es para lo que fueron concebidos).

A la hora de restaurar un objeto, podemos replantearnos si es industrial o si es una obra de arte. Si el objeto es industrial la restauración pretenderá por todos los medios que recupere su funcionalidad. Sin embargo, una obra de arte, se pretenderá restablecer en su unidad formal, estética y documental y la funcionalidad quedará relegada a un segundo plano. Ahora bien, en nuestro Puente de Piedra, toda intervención futura, deberá considerar fundamental el cuidado y potenciación del valor monumental, pero, a la vez, sin descuidar su función y su uso, que han sido la génesis de su construcción. Es decir, que al valor documental e histórico-artístico, como monumento, hay que añadir su valor como objeto arquitectónico y elemento significativo o emblemático para una población y una sociedad, que se ha identificado a lo largo del tiempo con todos sus valores.

G.I.I. Actuaciones en los puentes históricos

Las actuaciones sobre puentes históricos deben tener dos orientaciones:

- Intervenir para que cumplan su función y mantenga los requisitos de seguridad que se exige a los puentes en el momento actual.
- Conservar o recuperar los valores monumentales como parte del patrimonio histórico-artístico de la humanidad.

En muchas intervenciones, como en el Puente de Piedra, ambas son simultáneas y se deben complementar, aunque su armonización sea difícil. Ha habido y hay intervenciones que han dado origen a realizaciones de diverso carácter:

- Reparaciones, reconstrucciones o restauraciones, cuyo objetivo único es que siga cumpliendo su función.
- Actuaciones para adaptarlos a las nuevas necesidades funcionales (exigencias del tráfico).
- Sustituciones por nuevos puentes cuando no es posible mantener el tráfico, o el original ha quedado en situación de ruina técnica.

G.I.II. Tipología de afecciones en los puentes

G.I.II.I. Cimentaciones

La cimentación siempre ha sido el punto débil de los puentes cuando el terreno es deficiente por no absorber los esfuerzos que les transmiten. La única técnica existente de cimentación profunda consistía en pilotes de madera que era, en la mayoría de los casos, insuficiente ya que, cuando se producía una socavación por los efectos de una fuerte avenida, perdían su resistencia estructural.

G.I.II.II. Bóvedas de los arcos

Con frecuencia los problemas están asociados a deformaciones del arco o de la bóveda. Se puede producir una grieta longitudinal debido a la diferencia de rigidez entre los arcos de borde y el interior de la bóveda. La solución consiste en realizar un cosido transversal a base de varillas de acero inoxidable, de fibra de vidrio o de carbono, envueltas en un mortero especial de reparación (formulaciones epoxídicas contrastadas).

G.I.II.III. Características de la piedra

Su patología está asociada a problemas de durabilidad dependiente del material. Muchos puentes tienen una vida limitada por el deterioro progresivo de la piedra, y ello por diversas causas de meteorización agravada por la contaminación: erosión eólica, erosión o ataque químico del agua, heladidad... Existen distintos tratamientos para protección superficial de la piedra según sea su tipo.

G.I.II.IV. Empuje de tierras sobre los tímpanos

El material de relleno de la bóveda o de los estribos puede producir empujes laterales elevados sobre los tímpanos u hojas exteriores debidos a altas sobrecargas. Se pueden asociar patologías como fisuración y agrietamientos de los sillares y crecimiento de vegetación con raíces en el relleno, que pueden llegar a producir empujes adicionales y reventar los paramentos.

G.I.III. Actuaciones de adaptación

Las principales son motivadas por las nuevas necesidades funcionales del tráfico rodado que exigen al puente. También en la Edad Media se construyeron torres de defensa en los puentes que no las tenían, que servían para su defensa y para el cobro de pontazgo. Algunos incluso han tenido edificios sobre ellos.

Se han constatado obras de adaptación en todas las épocas, pero la mayoría de ellas son recientes, de cuando se han precisado para uso nuevo de los medios de transporte y, algunas veces, con una barbarie sorprendente.

Las adaptaciones más comunes observadas afectan a la geometría del puente y pueden afectar tanto a la planta como al alzado:

- Ensanche de los arcos mediante bóvedas de hormigón adosadas:

Desfigura el puente original y su recuperación no es fácil porque puede dañar la bóveda primitiva al ser retirada. La ventaja es que ensancha por un lado pero se conserva uno de los paramentos originales del puente.

- Ensanche mediante vigas adosadas al puente original:

Se ignora la existencia de una obra anterior a la que hay que adecuarse. Las vigas nuevas se apoyan en las tajamares del puente o en nuevas pilas de hormigón. En general el puente es recuperable desmontando las vigas y suprimiendo apoyos adicionales.

- Ensanche de los arcos realizando una nueva bóveda con el intradós por encima del trasdós de la primitiva:

El arco antiguo queda a la vista del nuevo. En esta solución se intenta conservar y respetar el puente original aunque, a veces, puede desfigurarlo.

- Ensanche mediante voladizos laterales:



Figura 1. Voladizos del Puente de Piedra (8)

Es el más utilizado; se han dispuesto voladizos de distintos tipos: losa de hormigón o ménsulas con una losa entre ellas. La perturbación de esta solución está en función del tamaño del voladizo, pero introduce un elemento extraño en la obra original que rompe su carácter y no se integra en ella. Es fácilmente reversible.

- Ensanche mediante translación paralela de uno de los paramentos:

Supone el desmontaje de uno de los paramentos, la ampliación de la cimentación, las bóvedas se ensanchan interiormente con relleno y piedra, la solución menos agresiva, o bien en hormigón. Este es el procedimiento, aunque muy utilizado, más delicado porque es difícilmente reversible, es el más caro y presenta problemas de compatibilidad de la estructura por tener diferentes propiedades mecánicas (rigidez, coeficiente de Poisson, módulo elástico, dilatación...). Además precisa un montaje y desmontaje cuidadoso.

En cuanto a las adaptaciones en alzado, generalmente se han recorado los tímpanos haciendo perder el “lomo de asno” y, con ello, la composición original del puente. Sin embargo su recuperación es fácil.

G.II. Principales afecciones sobre monumentos históricos

G.II.I. Meteorización y clima

El deterioro de materiales en medio ambientes atmosféricos es un proceso de equilibrio físico-químico que opera a mayor o menor velocidad. Esto se debe a las diferencias entre el ambiente de servicio del material y el ambiente de formación del mismo (temperatura, presión, acidez...). El resultado es que la piedra pierde sus características originales (cohesión, porosidad, microfracturación, color...).

El agua es clave en los procesos de meteorización ya que es agente reactor con muchos de los componentes químicos de las piedras. Si existe agua en estado líquido y gaseoso la degradación es mayor y continua, por procesos de transporte de materia (erosión). Además, si la piedra es porosa y el agua filtra en el interior, se pueden generar tensiones de tracción internas, gracias a la creación de sales o a la congelación del agua, pudiendo llegar a fracturar la roca.

Por último, un factor muy importante, que se comentará a posteriori, es la contaminación por la cual se puede incrementar enormemente la velocidad de erosión debido a fuertes ácidos, metales pesados o partículas en suspensión.

G.II.I.I. Factores Ambientales

- Temperatura y agua

Se denominan condiciones termohigrométricas y deben ser especificadas para un estudio de las causas de alteración. Depende de la intensidad de lluvia y su escorrentía, humedad y temperatura del aire, puntos de helada... Las variaciones de temperatura ocasionan los procesos de deterioro debido a las dilataciones del material o a su congelación. Además pueden controlar otros procesos físicos y químicos.

- Días de sol

Puede suponer el incremento brusco de la dilatación térmica en una determinada zona del edificio y la consecuente generación de tensiones internas de tracción, que puedan ocasionar grietas y fisuras en el material. Además, debido a la evaporación del agua filtrada en la roca se pueden generar sales solubles precipitadas con generación de costras o eflorescencias.

- Viento

Puede evaporar el agua (viento seco), puede acelerar los procesos de alteración (viento húmedo) e, indirectamente, aumentar la abrasión del

punte debido al arrastre de partículas sólidas en suspensión que chocan contra el edificio.

- Procesos biológicos

Por último, los organismos vivos pueden ser especialmente dañinos ya que pueden contribuir acelerando enormemente los procesos de degradación. Los más importantes son:

- Bacterias
- Líquenes
- Musgo
- Hongos
- Algas
- Plantas
- Animales excavadores
- Excrementos de aves

G.II.II. Alteración mecánica

Supone la modificación de las propiedades mecánicas sin producir cambios en la composición química debido a la acción de esfuerzos sobre el material que ocasionan deformaciones internas, microfracturas y macrofracturas; pudiendo generar el fallo del material.

El origen puede ser interno: incrementos térmicos o hielo; o el origen puede ser externo: pesos, cargas, vibraciones, impactos...

G.II.III. Temperatura

Los cambios globales de temperatura tienen un efecto doble:

- Expansiones y contracciones que producen la fatiga del material y su consecuente fracturación.
- Las condiciones de confinamiento del material ofrecen resistencia a las dilataciones generando unas tensiones que puedan llegar a causar fallos en el material.

Es importante resaltar que no solo depende de las diferencias de temperatura sino también de la rapidez y frecuencia de estos cambios; ya que los cambios bruscos son los más dañinos.

G.II.IV. Humedecimiento

El efecto del agua localizada infiltrada en las piedras es triple:

- Pueden producir cambios de volumen que generen tensiones internas que induzcan el fallo del material.
- La presencia de “agua ordenada” en los sistemas porosos puede producir esfuerzos sobre las paredes confinantes durante los procesos de secado y mojado.
- Pueden inducir unas tensiones y deformaciones considerables debido a la congelación del agua en los poros y occasionar microfisuras

internas. Debido a este aumento de volumen puede producirse el fallo del material o un nacimiento y crecimiento de grieta.

G.II.III. Alteración en ambientes contaminados

Los materiales más susceptibles a alterarse por la acción de los agentes contaminantes son los carbonatados (calizas, mármoles, morteros de cal...). Estos están constituidos por minerales carbonatados cuya solubilidad aumenta en soluciones ácidas. Por tanto se observa un rápido deterioro de los carbonatos por reacción con ácidos de carbono, azufre y nitrógeno dispersos en la atmósfera en forma de aerosoles.

Existe, además, otro tipo de deterioro que afecta por deposición de materia en suspensión sobre los monumentos. La formación de costras negras es un deterioro estético con un ennegrecimiento generalizado que justificaría una limpieza; estas costras disparan el deterioro de carácter químico y mecánico por lo que es ingenuo pensar que la formación de estas costras es beneficiosa para los materiales al suponer una "protección".

G.II.III.I. Ataque Ácido

Proviene de la presencia en cantidades importantes de gases contaminantes en la atmósfera que, al combinarse con el agua atmosférica, forman ácidos que se encuentran dispersos en aerosoles.

Los más importantes a considerar son: el ácido carbónico (H_2CO_3), el ácido sulfuroso (H_2SO_3), el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3). A estos hay que sumar los efectos de los metales pesados, hidrocarburos, óxidos de Hierro... cuyo efecto es la formación de costras negras.

- Dióxido de Carbono

Se encuentra de forma natural en la atmósfera pero, durante los últimos decenios, su concentración ha aumentado en áreas urbanas debido a dos causas: el ciclo biosférico y la actividad industrial. La combustión del carbón, petróleo y derivados genera grandes cantidades de CO_2 .

La combustión de gasolina produce el 60% total del CO_2 de origen industrial generando, durante su quemado, dióxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y, si la combustión no es buena, monóxido de carbono e hidrocarburos no descompuestos. Esta mala combustión sumada a la actividad fotoquímica del sol puede generar lo que se denomina "niebla fotoquímica" en la que los hidrocarburos se oxidan generando óxidos de carbono y nitrógeno que, a su vez, derivan en ácido carbónico y ácido nítrico (altamente corrosivos).

■ Costra Negra

Cualquier superficie expuesta al aire es susceptible de ser recubierta por materiales que son arrastrados por el viento y que, con el paso del tiempo, cambiarán su coloración sufriendo un oscurecimiento.

Los depósitos pueden presentar grosor, grado de adherencia y morfología muy diferenciadas pudiendo asociarse, casi sistemáticamente, al procesos de deterioro del material pétreo (exfoliaciones, desconchamientos, pérdidas de cohesión...). Con el tiempo estas deposiciones consolidan y endurecen, cambiando el comportamiento de los materiales pudiendo inducir el fallo del material original.

La composición de estas costras puede ser muy variada. La mayor parte son compuestos de carbono procedentes de las combustiones de los vehículos y con una coloración negra. Además pueden existir cantidades variables de metales pesados y compuestos orgánicos de origen dudoso. Por último, en zonas con actividad de aves, por ejemplo palomas con sus excrementos (palomina), pueden encontrarse también fosfatos hidratados de calcio y potasio.

G.III. Propuestas de restauración

Se va a tratar de dar una propuesta de restauración, o una línea general que se podría seguir, para abordar las afecciones que sufre el puente de Piedra de Zaragoza, los tratamientos superficiales más adecuados y la reparación de grietas y fisuras.

G.III.I. Tratamientos superficiales

G.III.I.I. Sustitución de sillería

Los sillares de piedra en muy mal estado de conservación deberán de sustituirse por otros nuevos. Esta sustitución debe ser posterior a un estudio exhaustivo de las características de la piedra en mal estado: tipo de piedra, resistencia, textura, color... Siempre que sea posible el sillar sustituto debería ser de la misma cantera de la que se extrajo el original, pues ofrecerá total compatibilidad física y estructural con los originales.

Si se precisa la utilización de un mortero, para la sustitución del sillar o para el rejuntado, se utilizarán aquellos compatibles con las propiedades de la piedra o del mortero ya existente; para ello se obtendrían datos de los morteros de cal utilizados en el monumento, adoptando un mortero bastardo de cal hidráulica y cemento que muy bien podría contener piedra de la misma cantera que la original molida como árido, realizando pruebas hasta adoptar un color y tono adecuados proponiendo como huella de la intervención actual un rehundido respecto al sillar original. Se debe tender a morteros de cal, los cuales conviven muy bien con elementos de piedra caliza y con morteros puzolánicos, y no recurrir a los morteros de cemento, que evitan la transpiración de la piedra y no tienen buena compatibilidad con los morteros de cal de los antiguos monumentos.

Por último, y con afán de preservar el carácter propio de la obra, las reparaciones y sus materiales deben ser distinguibles, a corta distancia, mediante una textura en la talla o, incluso, una letra "R" de restaurado.

G.III.I.II. Limpieza

Esta estrategia persigue la retirada de todo aquel material extraño adherido al material original, pero sin eliminar completamente la pátina. Es una operación delicada e importante, dado que puede ser irreversible y debe ser llevada a cabo por personal experto, puesto que se utilizan productos que podrían llegar a ser nocivos, deben de poseer los conocimientos adecuados y no deben producir daños en el material original.

Generalmente no se llega a limpiar totalmente la superficie, para conservar la pátina y conservar, a su vez, las características históricas, artísticas y arqueológicas del monumento original.

Para seleccionar el método de limpieza adecuado se deben tener en cuenta las siguientes particularidades:

- Tipo de piedra
- Grado de alteración
- Tallado liso o rugoso
- Origen de las suciedades, páginas, costras...

Además, antes de que se aplique un tratamiento concreto, se recomienda realizar unos ensayos en pequeñas áreas del edificio para ver posibles afecciones negativas y observar la correcta respuesta del mismo.

Existen diversas técnicas que pueden ser aplicadas:

- Limpieza mecánica
- Lavado con agua y cepillo blando (nunca de acero)
- Enarenado húmedo controlado (Limpieza hidroneumática)
- Enarenado seco controlado
- Agua nebulizada (spray) a baja presión
- Agua atomizada a baja presión
- Limpieza química
- Ácidos y bases fuertes
- Agentes tensoactivos (jabones)
- Sales disueltas
- Limpiezas con arcillas especiales
- Limpieza de costras biogénicas

Pueden ser generadas por plantas, animales y microorganismos y con una alta dificultad de retirada. Generalmente se usan solventes orgánicos como disolventes alcalinos débiles (butilamina, trietanolamina) para grasas y aceites o disolventes clorurados para las ceras. Para manchas bituminosas (asfalto) y graffiti (resinas acrílicas o celulosicas coloreadas) pueden retirarse con solventes aromáticos (tolueno, xileno) o alifáticos (solventes clorurados).

G.III.II. Tratamientos de grietas y fisuras

Generalmente para el tratamiento de las grietas y fisuras, se actuará por consolidación de la piedra mediante lechada consolidante inyectada profundamente, mejorando así su cohesión interna. Sus principales cometidos son recuperar o aumentar las características mecánicas del material reduciendo la porosidad.

Dependiendo de la profundidad de penetración se obtiene mayor o menor éxito y ésta, a su vez, depende de la porosidad, características del material inyectado y del método de aplicación.

Para la aplicación "in situ" hay diversos métodos como la aplicación a brocha o a chorro (superficial), soluciones vaporizadas o en forma de spray (capilaridad), la aplicación de tampones cubiertos con material

plástico para evitar la evaporación (capilaridad) o practicar orificios en el material para inyectar el consolidante a presión.

Existen dos tipos de consolidantes: orgánicos e inorgánicos.

■ Inorgánicos: son más duraderos, frágiles y con mayor afinidad química y física pero no pueden llenar grandes fisuras. Los principales tipos son:

- Aluminato de potasio
- Hidróxido de Calcio: muy aplicable para rocas calcáreas o caliza. Ante la contaminación se transforma en yeso siendo bastante nocivo para la rehabilitación.
- Hidróxido de Bario: es interesante para las piedras calizas debido a la similitud del Bario con el Calcio y de la afinidad de propiedades en los coeficientes de dilatación térmica y baja solubilidad. Además en ambientes contaminados el carbonato de bario se transforma en sulfato de bario aumentando la eficacia del tratamiento.
- Silicatos Inorgánicos
- Fluorsilicatos
- Alquil-Alcoxi-Silanos y Alquil-Aril-Polisiloxanos

■ Orgánicos: tienen mejores propiedades elásticas que aumentan la resistencia del material pétreo, pueden sellar grandes espacios. Por el contrario, presentan dificultades de penetración, tienen propiedades muy diferentes a las del material original, pudiendo ocasionar diferencias de comportamiento (térmico, degradación ultravioleta, por agua, oxígeno o biogénica...) y envejecen más rápido que los inorgánicos. Todos están constituidos a base polímeros sintéticos compuestos por un único monómero (homopolímero) o por dos o tres monómeros distintos (copolímeros). Los polímeros de cadenas lineales (termoplásticos) presentan un deslizamiento viscoso ante esfuerzos elevados que hacen que no puedan ser empleados como consolidantes estructurales siendo, además, teóricamente reversibles. Los polímeros de estructura reticular (termoestables) son muy rígidos y frágiles por lo que son aplicables como "adhesivos estructurales" capaces de soportar cargas sin deformarse aunque son considerados irreversibles. Los principales tipos son:

- Resinas acrílicas: no es una resina estructural al ser temoplástica. Generalmente son de polimetilmecrácilato o polibutilmetacrilato.
- Resinas fluoradas
- Polietilenglicoles y Polioxietileno: son termoplásticos obtenidos de la polimerización del óxido de etileno. No son comúnmente utilizados para restaurar piedra.
- Resinas Epoxidicas: su uso más generalizado es como adhesivo para fijar fracturas y cavidades aunque tiene alta reactividad ultravioleta y, al tiempo, tiende a amarilllear y pulverizarse.
- Resina de poliéster: no son extensamente utilizadas como consolidantes.

Como alternativa a las varillas de acero inoxidable se han empezado a utilizar varillas de fibra de vidrio (Puentes de Serranos y Trinidad en Valencia, puente Romano en Córdoba), o varillas de fibra de carbono, como armaduras fijadas con resinas epoxi para realizar cosidos en los



Figura 2. Proceso de cosido con varillas de vidrio (42)

puentes de fábrica con la intención de fijar los sillares. Las varillas están hechas de hilos de fibra de vidrio puestos a tensión e impregnados con una resina de forma que trabajen en conjunto. Se fabrican mediante pultrusión y se encuentran disponibles en diferentes rangos de diámetros (6 a 32 mm) pudiendo ser utilizadas en alternativa a las barras de acero inoxidable. Entre otras ventajas cuentan con:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a tracción superior a la del acero (entre 1'5 y 2 veces) pero un cuarto de su peso

- Aislantes térmicos y eléctricos
- Buena resistencia a choques y a cargas puntuales y violentas
- Excelente resistencia a fatiga
- Dimensionalmente estables ante solicitudes térmicas con poca variabilidad en su dilatación.
- Son inertes

Las propiedades mecánicas (43):

- Resistencia de adhesión máxima: 11'6 MPa
- Resistencia a tracción: 655 MPa (Barra de 16 mm)
- Resistencia a corte: 140 MPa (barra de 16 MPa)
- Módulo elástico: 40.800 MPa (aproximadamente el 20% del módulo del acero)
 - Coeficiente de dilatación térmica
 - Transversal: $2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
 - Longitudinal: $6-10 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
 - Peso específico: 1'9 g/cm³

Otra aplicación de las fibras de vidrio o de carbono, consiste en la aplicación mediante capas de mallas de fibra resistente en el intradós de las bóvedas, como armado de colaboración con un mortero cementoso bicomponente con reactividad puzolánica (específico para piedras), colaborando estructuralmente por aumento del espesor de la bóveda y absorción de las tracciones y, siempre que, permitiese la transpiración de la humedad.

Hay que evitar rigidizar una estructura que no lo es, ya que podríamos cambiar el comportamiento estructural de la misma con dramáticas consecuencias. Por eso estos sistemas resultan adecuados en los puentes puesto que aportan colaboración a tracción, poco peso y respetan al máximo la forma de trabajo del puente. Antiguamente se realizaban enlosados de hormigón armado que, con el paso del tiempo, se han demostrado claramente perjudiciales por rigidizar la estructura y evitar la transpiración de la estructura, y por no ser compatibles con los materiales originales.

Índice de Figuras. Anexo G

<i>Figura 1. Voladizos del Puente de Piedra (8)</i>	v
<i>Figura 2. Proceso de cosido con varillas de vidrio (42)</i>	vi

Bibliografía

1. LLoris, Miguel Beltrán y Cabeza, Guillermo Fatás. *HISTORIA DE ZARAGOZA. VOLUMEN 2. CAESAR AUGUSTA, CIUDAD ROMANA.* Zaragoza : Caja de Ahorros de la Inmaculada - Ayuntamiento de Zaragoza, 1998. ISBN 978-84-7820-948-4.
2. Gallo, Isaac Moreno. *VÍAS ROMANAS - INGENIERÍA TÉCNICA Y CONSTRUCTIVA.* 2006. ISBN 84-7790-404-9.
3. Cabeza, Guillermo Fatás. *GUÍA HISTÓRICO-ARTÍSTICA DE ZARAGOZA.* 4th. Zaragoza : Institución "Fernando el Católico" - Ayuntamiento de Zaragoza, 2008. ISBN 978-84-7820-948-4.
4. Pros, Joaquín Lostal y Navarro, Arturo Ansón. *HISTORIA DE CUATRO CIUDADES: SALDUIE, CAESARAUGUSTA, SARAGUSTA, ZARAGOZA.* Zaragoza : Ayuntamiento de Zaragoza- Caja Inmaculada, 2001. ISBN 84-8069-225-1.
5. Casado, Carlos Fernández. CAJA 21895. *Estudio Previo De Restauración Del Puente De Piedra.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivos Municipales (Seminario), 1983.
6. Dragados; Geoexperts. CAJA 209814. *Mejoras Al Pliego De Condiciones; Informe Geotécnico.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Seminario).
7. Casado, Carlos Fernández. CAJA 21894. *Estudio Previo De Restauración Del Puente De Piedra.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Seminario), 1983.
8. CAJA 202976. *Fotos De Diciembre De 1973.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Seminario), 1973.
9. Casado, Carlos Fernández. CAJA 209815. *Proyecto De Recalce Del Puente De Piedra.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Seminario), 1985.
10. OCISA. CAJA 209820. *Informe Ocisa. Geometría de Tajamares.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Seminario).
11. CAJA 208461. *Planos Julio 1979.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Seminario), 1979.
12. IBB: Institut für Bautenschutz und Bausanierung. CAJA 209818. *Planos Y Composición Química De La Piedra.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Seminario), 1990.
13. CAJA 209821. *Proyecto De Restauración.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza- Archivo Municipal (Seminario), 1992.
14. Casado, Carlos Fernández. CAJA 209817. *Proyecto De Recalce De 1987.* Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Seminario).

15. Servicio de Infraestructuras de Zaragoza. *INFORME DE INSPECCIÓN PRINCIPAL DEL PUENTE DE PIEDRA SOBRE EL RÍO EBRO (0010), SITUADO SOBRE LOS DISTRITOS DE CASCO HISTÓRICO Y EL ARRABAL DE ZARAGOZA*. Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Infraestructuras, 2008.
16. Palacio de Montemuzo. CAJAS 499, 50, 959, 1732 y 1765. Zaragoza : Excelentísimo Ayuntamiento de Zaragoza - Archivo Municipal (Palacio de Montemuzo), 1850-1950.
17. Martínez, José Luis, Martín-Caro, José A. y León, Javier. *MONOGRAFÍAS SOBRE EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS DE FÁBRICA*. Evaluación Estructural de Puentes de Arco de Fábrica. Madrid : UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003.
18. Fernández, Santiago Huerta. *ARCOS, BÓVEDAS Y CÚPULAS*. Geometría y Equilibrio en el cálculo tradicional de Estructuras de Fábrica. 1º. Madrid : Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2004.
19. Heyman, Jacques. *EL ESQUELETO DE PIEDRA. MECÁNICA DE LA ARQUITECTURA DE FÁBRICA*. Madrid : Instituto Juan de Herrera. Ministerio de Fomento. CEDEX (Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas). CEHOPU (Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo).
20. Choisy, Auguste. *EL ARTE DE CONSTRUIR EN ROMA*. 1. Madrid : Instituto Juan de Herrera. Ministerio de Fomento. CEDEX (Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas). CEHOPU (Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas)., 1999.
21. Soguero, Fernando. *EL BLOG DE FERNANDO*. [En línea] 2011. <http://fsoguero.blogspot.com.es/2011/02/el-puente-de-piedra.html>.
22. Vallejo, Luis I. González de, y otros. *INGENIERÍA GEOLÓGICA*. Madrid : Prentice Hall, 2002.
23. Salas, J.A. Jiménez y Alpañés, J.L. de Justo. *GEOTECNICA Y CIMIENTOS. VOL. 1 - Propiedades de los suelos y de las rocas*. 2º. 1975.
24. *SIGNIFICADO ESTRUCTURAL DEL RELLENO EN LOS PUENTES DE ARCO DE FÁBRICA*. Álamo, J.A. Martín-Caro, Martínez, J.L. Martínez y León, Javier. Madrid : 12º Conferencia Internacional de Fábrica y Mampostería Ladrillo/Bloque, 2000.
25. J.L. Martínez, J.A. Marín-Caro Álamo y León, Javier. *MONOGRAFÍAS SOBRE EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS DE FÁBRICA*. Evaluación Estructural de Puentes Arco de Fábrica. Madrid : UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., 2003.

26. Casquero, A. Ramos y González, Javier León. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS RELLENOS EN BÓVEDAS HISTÓRICAS DE FÁBRICA. Madrid : UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., 2011.
27. Cueto, Elías. APUNTES DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO. Zaragoza : UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, 2011-2012.
28. UNIVERSITAT SAN JAUME I DE CASTELLÓN. Área de Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. MECAPEDEA: Enciclopedia Virtual de Ingeniería Mecánica. [En línea] 2013. http://www.mecapedia.uji.es/criterio_de_Rankine.htm.
29. CalculiX CrunchiX User's Manual. [En línea] 2011. http://web.mit.edu/calculix_v2.4/CalculiX/ccx_2.4/doc/ccx/node19.htm
30. DASSAULT SYSTEMES. Abaqus CAE 6.11 User's Manual. [En línea] 2011.
31. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL EHE-08. Madrid : Gobierno de España, 2008.
32. Ministerio de Fomento. INSTRUCCIÓN SOBRE LAS ACCIONES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO DE PUENTES DE CARRETERA: IAP-11. s.l. : Gobierno de España, 2012.
33. Ministerio de Fomento. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE). Documento Básico de Seguridad Estructural: Acciones de la Edificación (DB SE-AE). s.l. : Gobierno de España, 2012.
34. Canal Historia. ROMAN ENGINEERING (YOUTUBE). [En línea] <http://www.youtube.com/watch?v=Su7iVBUnfkw>.
35. HILL'S FOLLY: JAMES J. HILL AND THE STONE ARCH BRIDGE. [En línea] <http://www.youtube.com/watch?v=QTjEceZfjFE>.
36. CONSTRUCCIÓN DE PUENTES ROMANOS. [En línea] <http://roble.pntic.mec.es/~mbedmar/iesao/historia/construc.htm>.
37. ANÁLISIS CONSTRUCTIVO DE LOS PUENTES ROMANOS. Fuentes, Manuel Durán. Mérida : I Congreso sobre las Obras Públicas Romanas, 2002.
38. LOS PUENTES ROMANOS: PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN. Fuentes, Manuel Durán. A Coruña : UNIVERSIDAD DE A CORUÑA. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.
39. Troyano, Leonardo Fernández. EL PATRIMONIO HISTÓRICO DE LAS OBRAS PÚBLICAS Y SU CONSERVACIÓN: LOS PUENTES. s.l. : Informes de la Construcción, 1985.
40. —. ADAPTACIÓN FUNCIONAL DE LOS PUENTES DE FÁBRICA. Madrid : CEDEX - Asociación Técnica de Carreteras, 2000.

41. RESTAURACIÓN Y RECALCE DEL PUENTE DE PIEDRA DE ZARAGOZA SOBRE EL RÍO EBRO. Troyano, Leonardo Fernández. Valencia : Jornada El Patrimonio de la Obra Pública y los criterios y técnicas de restauración: los puentes históricos, 2007.
42. Vinuesa, Celia. LA RESTAURACIÓN DEL CLAUSTRO DE LOS JERÓNIMOS EN LAS OBRAS DE AMPLIACIÓN DEL MUSEO DEL PRADO (Y III). [En línea] 2009. <http://artedemadrid.wordpress.com/2009/05/25/la-restauracion-del-claustro-de-los-jeronimos-en-las-obras-de-ampliacion-del-museo-del-prado-y-iii/>.
43. BKI. INTERNATIONAL (Belgium). Fibra de Vidrio. Catálogo de FORTIUS. [En línea] <http://www.fortius.be/PDF/SP%20GFRP%20Folleto%20Afl.PDF>.
44. Mapei FRG System. FRP Y PRG SYSTEM: LOS SISTEMAS PARA EL REFUERZO Y LA ADECUACIÓN ESTÁTICA DE LAS ESTRUCTURAS. [En línea] <http://www.mapei.com/public/ES/linedocument/frpyfrgsystem.pdf>.
45. Morales, Rafael Pérez. LAS HUELLAS DEL TIEMPO. EL PUENTE ROMANO DE CÓRDOBA. [En línea] <http://www.lap-arquitectos.com/web/?p=619>.
46. SCHRÉDER SOCELEC. Luminarias SCHRÉDER SOCELEC. [En línea] <http://www.schreder.com/ess-es/Pages/default.aspx>.
47. Fundición Dúctil Benito. Benito.com: Expertos en Equipamiento Urbano. Luminarias Clásicas. [En línea] <http://www.benito.com/>.
48. Vozmediano, Ignacio Lombillo. TESIS DOCTORAL. INVESTIGACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE ENSAYOS LIGERAMENTE DESTRUCTIVOS (MDT) UTILIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA IN SITU DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO. . Santander : UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica. Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2010.
49. Chua, Chee Kai; Leong, Kah Fai; Lim, Chu Sing RAPID PROTOTYPING - Principles and Applications. 3rd. World Scientific Publishing Co. Singapore 2011