

V Congreso de Administración y Tecnología para el Diseño

**Análisis estructural de
bóvedas y cúpulas.**

**Arq. Manuel Fortea Luna
Arq. José Luis Pedrera Zamorano**

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE BÓVEDAS Y CÚPULAS

Arq. Manuel Fortea Luna
Arq. José Luis Pedrera Zamorano

Universidad de Extremadura, Cáceres, España, Departamento de Construcción
correo: fortea@unex.es
correo: jlpedrera@unex.es

RESUMEN

Las bóvedas y cúpulas son un sistema constructivo permanente a lo largo de toda la historia del hombre como constructor. Su origen se sitúa en tierras bíblicas, entre el Tigris y el Éufrates. Su existencia se ha constatado en ciudades como Ur, Babilonia o Nínive. Sin embargo su conocimiento y desarrollo se han visto condenados al ostracismo tras la aparición de nuevas tecnologías, como el acero y el hormigón.

Extremadura es una tierra con gran abundancia de bóvedas y cúpulas. Este contexto ha permitido mantener vivo el interés por estas piezas, por su construcción, funcionamiento e investigación.

En esta línea hemos desarrollado un software capaz de analizar cualquier estructura abovedada, que partiendo de su geometría y el estado de cargas, se pueden determinar las tensiones de trabajo en cada uno de sus puntos, así como los puntos de articulación (que serán los puntos donde aparecerán las grietas) y los coeficientes de seguridad de cada elemento (indicador de lo lejos o cerca que se encuentra de una situación crítica). Todo ello basado en la teoría de los estados límites y los teoremas del profesor Jacques Heyman referente al comportamiento de las fábricas.

Esta recuperación del conocimiento de técnicas antiguas se ha demostrado válido, tanto para intervenir en edificios históricos, como para su utilización en obras nuevas de ciertas características.

PALABRAS CLAVE

Nuevas Tecnología, Tecnologías tradicionales, Construcción, sistemas informáticos.

HISTORIA

CARYBO es una herramienta informática, de elaboración propia, para el cálculo y análisis de estructuras de fábrica (de piedra o cerámica) incluyendo arcos, bóvedas, contrafuertes, estribos, arbotantes, escaleras y muros. El campo de acción es cualquier pieza estructural que trabaje exclusivamente a compresión. En 1998 se editó el libro “Bóvedas Extremeñas”, del cual es autor el que suscribe junto con Vicente López Bernal. La segunda parte de la obra son un conjunto de tablas de cálculo de 24 bóvedas, en las que a partir de unos datos simples se obtienen unos resultados básicos por cada tipo de bóveda. Para la confección de estas tablas se utilizó un pequeño programa sobre una hoja de cálculo estándar, que convertía un problema gráfico en otro estrictamente numérico. Desde entonces hasta hoy el programa ha sido mejorado y ampliado progresiva y sucesivamente hasta la última versión del año 2011 sobre soporte Java, que ha sido registrado con el N° de Registro BA/78-11.

MÉTODO

Conceptualmente el programa resuelve gráficamente el problema de buscar una línea de fuerza en un gajo de arco conocida su sección, su densidad y las cargas que sobre él actúan, dentro del coeficiente de seguridad marcado previamente. Para ello descompone el arco en 200 dovelas, asignando a cada una un peso en función de su volumen y densidad. Basado en el principio de simetría estudia solo el medio arco, sustituyendo el otro medio por una fuerza horizontal que es la que le transmite el otro medio arco, y que será la fuerza necesaria para mantenerlo en equilibrio. El procedimiento es parte manual y parte automático. Manualmente se van dando valores a las variables, y automáticamente mediante expresiones matemáticas se obtienen los resultados de cada caso. Si la línea de fuerza se sale de la sección o el coeficiente de seguridad es inferior al deseado se desecha la solución y se dan valores nuevos a las variables. Cada vez se pueden alterar varias variables o una sola. Obviamente existe más de una línea de fuerza que cumpla las condiciones establecidas. De todas ellas elegiremos la que produce el menor empuje horizontal, por aquello de que la naturaleza no derrocha energía gratuitamente.

COEFICIENTE DE SEGURIDAD

Las tensiones de trabajo en estas fábricas son bajas. Siguiendo los criterios de Heyman el punto crítico de estas estructuras no está en las tensiones sino en el equilibrio, y éste está condicionado fundamentalmente por la geometría. Por tanto utilizaremos un coeficiente de seguridad geométrico en lugar de uno tensional. El coeficiente de seguridad geométrico es un valor adimensional que indica la posición de la línea de fuerza respecto al centro a su paso por una sección transversal de la pieza. Un valor infinito quiere decir que la línea de fuerza pasa justamente por el centro de la sección, un valor de 3 quiere decir que la línea de fuerza pasa dentro de 1/3 de la sección.

Un valor de 1 quiere decir que la línea de fuerza pasa justo por el extremo de la sección. Un valor mayor de 1 quiere decir que la línea de fuerza pasaría fuera de la sección, situación imposible, pues antes hubiera sobrevenido el colapso.

Consta de tres partes, una primera donde se introducen los datos, una segunda, que es el proceso de cálculo propiamente dicho donde se dan valores a las variables, y una tercera donde se obtienen los resultados. Los datos a introducir son los siguientes: primera la densidad aparente del material, segundo la geometría del elemento, tercero las cargas horizontales y verticales sobre el elemento. Definida la geometría y la densidad, el programa obtiene directamente el peso propio del elemento que se suma a las cargas anteriores quedando así definido el estado total de las fuerzas actuantes. Con la geometría definida, el estado de cargas fijado, y siguiendo los principios de Jacques Heyman, escogemos una “Línea de Fuerza” de entre todas las que cumplan el Teorema de Seguridad, la que menor empuje horizontal produzca. Dicha “Línea de Fuerza” nos ofrece varios resultados: Primero las reacciones en los apoyos. Segundo la tensión de trabajo en cada punto del elemento. Tercero el Coeficiente de Seguridad Geométrico en cada punto del elemento. Cuarto los puntos críticos, aquellos los que el Coeficiente de Seguridad Geométrico es mínimo, siendo los puntos donde se producirán las articulaciones y consecuentemente donde aparecerán las grietas.

GAJO DE CARAS PARALELAS

Supongamos el caso más simple, el de un arco de sección circular, como se muestra en la figura Gajo Arco Circular, cuyos arranques son los punto A y B, la clave del intradós el punto C, la clave del extradós el punto D, con un espesor de hoja “e”, y unos rellenos en los senos hasta los puntos E y F. Llamamos luz (L) del arco al diámetro de la circunferencia con centro en O y radio OA, flecha (f) a la distancia OC, espesor de la hoja (e) a la distancia CD, altura de relleno de los senos (Hr) a la distancia AE o BF, y espesor del arco (d) al ancho en planta.

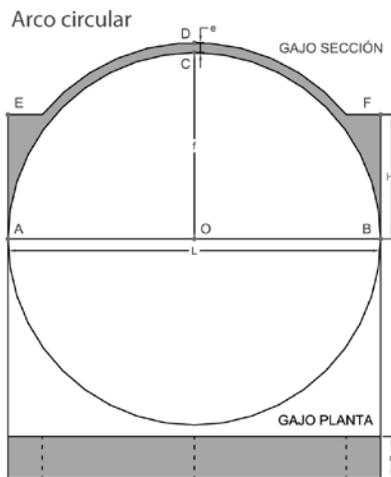


Figura 1: Gajo Arco circular

La primera consideración al introducir los datos es el material con el que está construido el arco (piedra, ladrillo). Este dato determinará la densidad aparente del material, para generar automáticamente la carga de peso propio en cada punto.

DATOS: GEOMETRÍA

La geometría de la pieza en sección viene determinada por la cara intradós y la extradós. La línea de intradós es una circunferencia de centro O y radio OA . La línea de extradós es una línea paralela a esta a una distancia CD hasta encontrarse con la horizontal EF . La flecha OC coincide con el valor del radio de la circunferencia OA . En planta es un rectángulo de longitud AB y anchura “ d ”.

Pero obviamente no todos los arcos son circulares, los hay de muy diversas figuras. Veamos algunos de ellos, por ejemplo el elíptico como se ve en la figura Gajo Arco Elíptico. En este caso la circunferencia se ha transformado en una elipse. La línea de intradós es por tanto una elipse con el centro en el punto O , semieje mayor OA y semieje menor OC . La línea de extradós es una línea paralela a esta a una distancia CD hasta encontrarse con la horizontal EF . La flecha OC coincide con el valor del semieje menor de la elipse. En planta es un rectángulo de longitud AB y anchura “ d ”.

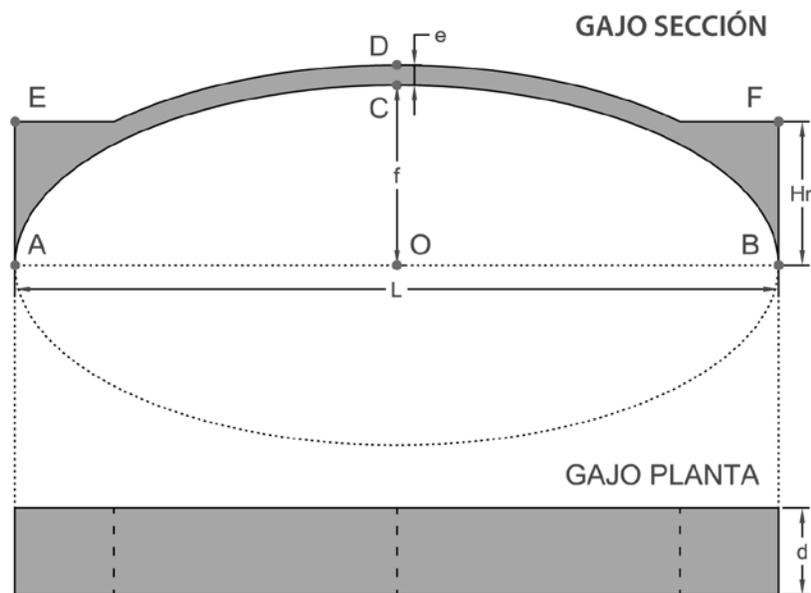


Figura 2: Gajo Arco elíptico

El arco rebajado es un arco circular incompleto. Como podemos ver en la figura Gajo Arco Rebajado el diámetro de la circunferencia no coincide con la distancia AB . La línea de intradós es un trozo de una circunferencia de centro O y radio OA , a la que se ha recortado por los extremos una distancia Rd , cuyo valor coincide con la mitad de la diferencia entre el diámetro de la circunferencia y la

distancia AB entre los arranques. La línea de extradós es una línea paralela a ésta a una distancia CD hasta encontrarse con la horizontal EF. La flecha OC coincide con el valor del radio de la circunferencia OA. En planta es un rectángulo de longitud AB y anchura “d”.

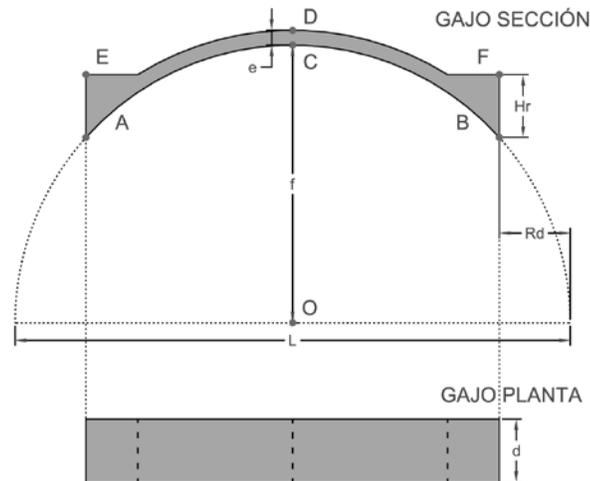


Figura 3: Gajo Arco Rebajado

El arco apuntado es la unión de dos arcos circulares incompletos. Como podemos ver en la figura Gajo Arco Apuntado el diámetro de la circunferencia no coincide con la distancia AB. Media línea de intradós es un trozo de una circunferencia de centro O y radio OB, a la que se ha recortado por el centro una distancia R_i , cuyo valor coincide con la mitad de la diferencia entre el diámetro de la circunferencia y la distancia AB entre los arranques. La línea de extradós es una línea paralela a ésta a una distancia “e” hasta encontrarse con la horizontal EF. En planta es un rectángulo de longitud AB y anchura “d”.

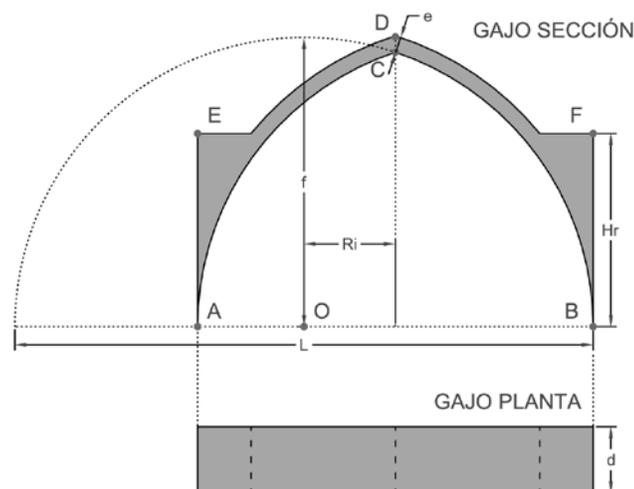


Figura 4: Gajo Arco Apuntado

El programa acepta cargas en el arco, además de la del peso propio, de dos tipos, una carga continua sobre todo el arco, y cargas puntuales, tanto verticales como horizontales, aplicadas en cualquier punto del arco. Las cargas puntuales también admiten las dos direcciones en sentido vertical y horizontal. En la figura Gajo Arco Cargas se muestran los ejemplos de cargas admisibles. La carga Q es una carga uniforme en todo el arco. La carga puntual F1 es una carga gravitatoria. La carga F2 es una carga con componente vertical y horizontal. La carga F3 en sentido ascendente y oblicua es la acción que ejercería un puntal colocado en el intradós del arco.

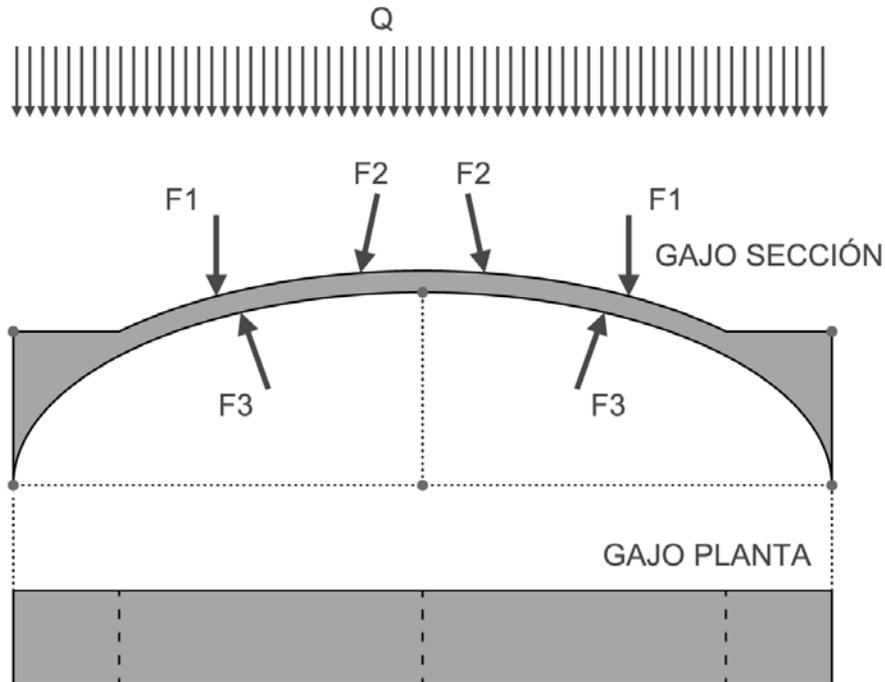


Figura 5: Gajo Arco Cargas

El Coeficiente de Seguridad Geométrico es un valor adimensional que indica la posición de la línea de fuerza respecto al centro a su paso por una sección transversal de la pieza. En la figura Gajo Coeficiente de Seguridad Geométrico se puede ver la franja donde debe circular la Línea de Fuerza para un Coeficiente de Seguridad Geométrico de “n”, esto es la franja debe tener un ancho no mayor del espesor de la hoja dividido por el Coeficiente de Seguridad geométrico “e/n”.

Valor considerado de C.S.G. para arcos es de 1.1, lo que quiere decir que la Línea de Fuerza debe estar contenida en el 90% de la sección. Este valor es recomendado por el propio Jaques Heyman, por lo que lo aceptamos de manera generalizada. No sucede así para otros elementos como muros o pilares que son aconsejables otros valores. En arcos, y siguiendo las indicaciones de Heyman, se estima que un Coeficiente de Seguridad aceptable es 1,1, que quiere decir que la Línea de Empujes está dentro del 90% de la sección.

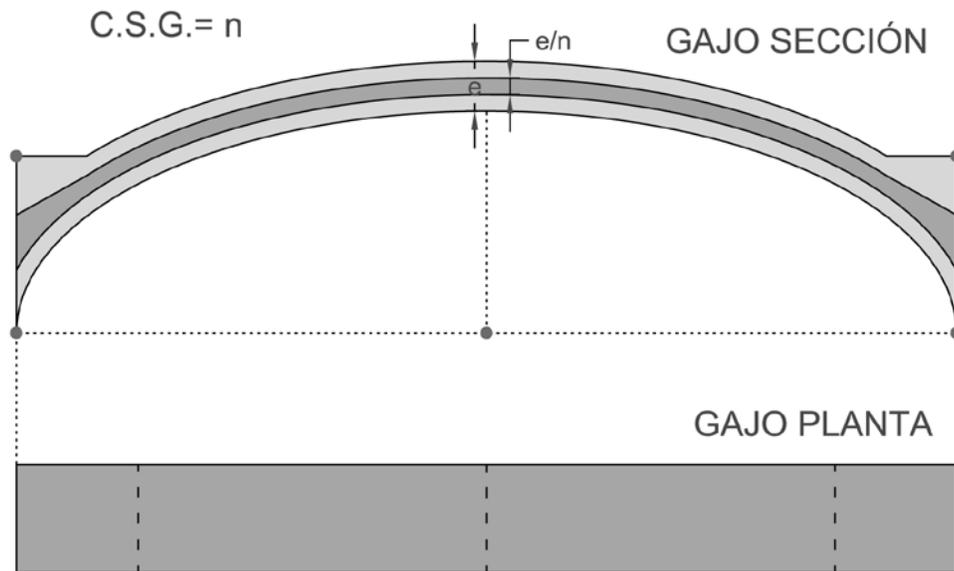


Figura 6: Gajo Coeficiente de Seguridad Geométrico

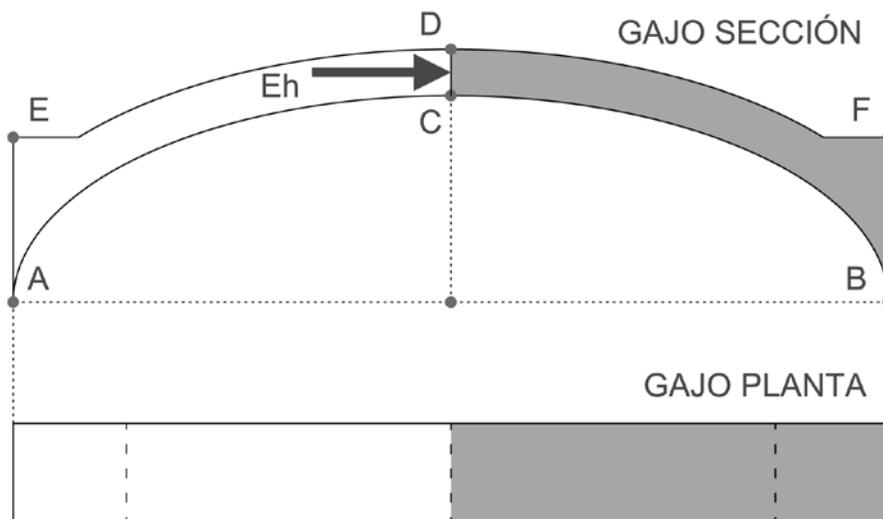


Figura 7: Gajo Arco-Semiarco

El semiarco se divide en dovelas, piezas independientes. Carybo divide el semiarco en 100 dovelas cortadas por planos verticales. Para el cálculo, el que los cortes sean verticales o radiales, no tiene ningún efecto. Como se aprecia en la figura Arco Dovelas cada dovela viene definida por las líneas de extradós e intradós, con un ancho constante de una centésima parte de la longitud del semiarco. La línea de empuje comienza en la clave con la acción que le transmite el otro semiarco.

De los elementos que intervienen en la Línea de Fuerza, los pesos y cargas de las dovelas son datos. El empuje E_h del otro semiarco y su punto de aplicación Ac son variables. Es decir modificando el valor de E_h o la altura del punto Ac se obtienen nuevas Líneas de Fuerza. En cualquier caso, ésta debe estar contenida en una franja, dentro de la propia sección del gajo, determinada por el Coeficiente de Seguridad Geométrico fijado previamente. Si la línea de empuje saliera fuera de esos límites manipulamos una de las variables (el empuje horizontal en la clave, o el punto de aplicación), o bien las dos, hasta obtener una línea de empuje que cumpla las condiciones deseadas. De todas las Líneas de Fuerza posibles, que satisfagan las condiciones impuestas, elegimos aquella cuyo empuje horizontal sea menor. En la figura Arco Conjunto Líneas de Fuerza la que acomete en el punto Ac_1 con un empuje E_1 provoca una reacción en el punto R_1 de magnitud Et_1 , la que acomete en el punto Ac_2 lo hace con una fuerza de E_2 llegando al extremo del arco en el punto R_2 con una magnitud de Et_2 . Este tipo de arco concretamente provoca un empuje mayor en el extremo cuanto más alto es el punto de ataque en la clave de la fuerza horizontal. En arcos peraltados y apuntados sucede lo contrario

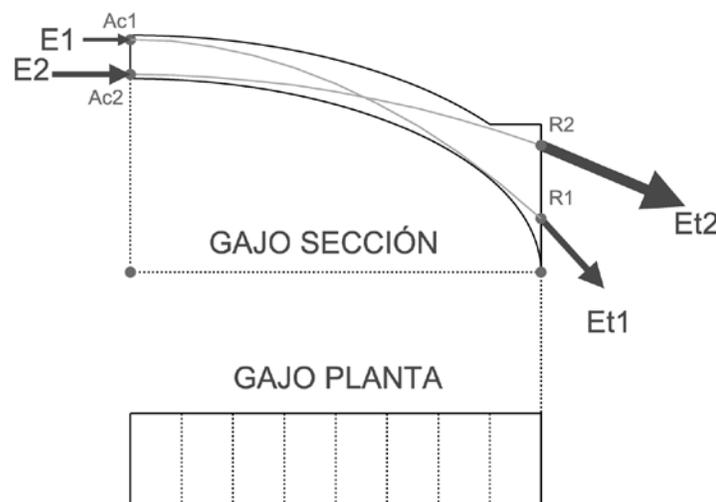


Figura10: Gajo Arco Conjunto Línea de Fuerza

Conocida la línea del intradós del arco y su espesor sabremos la superficie del intradós. En la figura Arco Superficie el producto de la longitud de la línea curva ACB por el espesor "d" es la superficie del intradós del arco, que también se obtiene matemáticamente sumando las caras inferiores de todas las dovelas. Esta superficie del intradós es "en verdadera magnitud", dato importante para el constructor a efectos de cuantificar el material necesario para su realización. A este asunto le dedicaron mucho tiempo tratadistas tan conocidos como Hernán Ruiz y otros, cuya solución se obtenía por procedimientos gráficos. Si dividimos esta superficie en verdadera magnitud del arco por la superficie en proyección en planta, obtenemos un valor adimensional al que llamaremos Coeficiente de

Concavidad. Para una superficie completamente plana este valor sería 1, para el caso de un arco circular este valor sería $1/2$, y sería aun mayor para un arco apuntado. Este dato nos da una idea del grado de concavidad del arco, de lo lejos que está la clave respecto de los arranques en dirección vertical. Si es menor de $1/2$ será un arco rebajado, si es mayor será apuntado o peraltado.

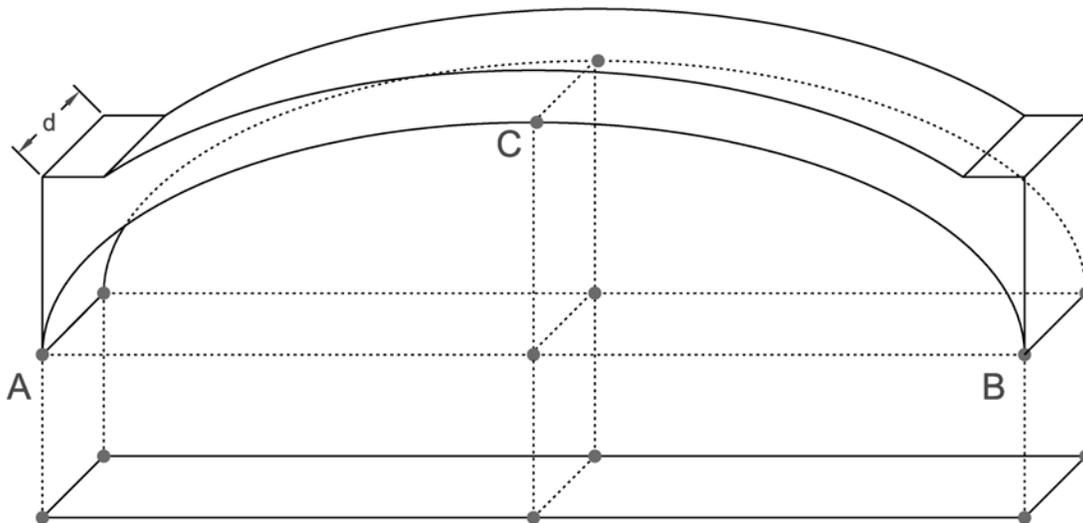


Figura 11: Gajo Arco Superficies

Las cargas totales las conocemos, son la suma de las cargas externas mas las generadas por el peso propio. Si este valor lo dividimos por la superficie en planta del arco tendremos la carga total por unidad de superficie en proyección horizontal. Este valor referente al peso propio es igualmente interesante para el constructor, pues sabrá la cantidad de material que necesitará para construcción de todo el arco con el relleno de los senos incluido.

La Línea de Fuerza termina en el extremo del arco en el punto R (figura Arco reacciones en apoyo) a una altura “ Y_r ” respecto del arranque del arco, con un valor total de E_r , y con una inclinación de ángulo “ a ”. El arco estará apoyado en algún elemento (muro, pilar, etc.). Este resultado es el que utilizaremos para analizar el soporte, sabiendo que ha de aceptar esta acción, con ese valor y en ese punto concreto de aplicación. La resultante E_r tiene dos componentes, una vertical igual al peso propio del arco más las sobrecargas verticales, y una horizontal variable según los estados de equilibrio. El arco será mas estable cuanto menor sea la componente horizontal de esta fuerza, y al mismo tiempo cuanto menor sea esa componente horizontal mas bajo es el punto de aplicación “R”.

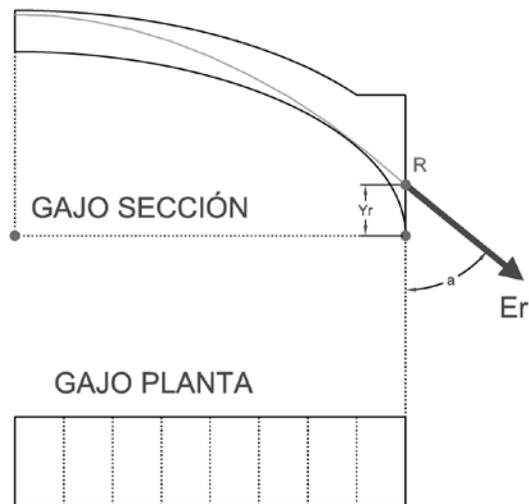


Figura12: Gajo Arco Reacciones en apoyo

Los puntos en los que la Línea de Fuerza se aproxima a los límites de la sección, son los puntos donde se producirán las articulaciones previas al colapso (figura Gajo Arco Articulaciones). Las articulaciones son los puntos por donde se rompe el arco para convertirse en un mecanismo. A pequeños desplazamientos de los apoyos aparecerán unas grietas en el arco coincidiendo con las articulaciones en la cara opuesta. Las articulaciones del intradós producirán grietas en el extradós, y viceversa.

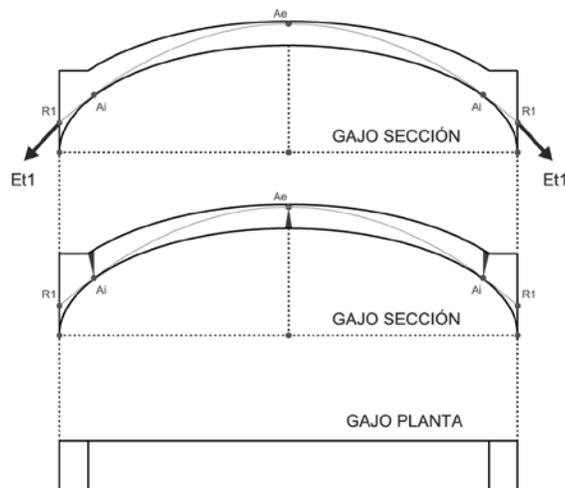


Figura13: Gajo Arco Articulaciones

Para el colapso se han de producir al menos 3 articulaciones. Supongamos que los apoyos se desplazan, entonces el arco se divide en cuatro piezas unidas por las articulaciones, que al mismo tiempo hacen de charnela. El momento del colapso es cuando las piezas “quepan” en su viaje hasta el suelo, que es su último destino (figura Gajo Arco Colapso). Ese momento es cuando las tres articulaciones estén alineadas horizontalmente. La luz de colapso es la luz del arco aumentada en la distancia igual a $2 \times AC(1 - \cos(a))$, es decir dos veces la distancia entre articulaciones (AC) multiplicado por uno menos el coseno del ángulo formado la línea que une dos articulaciones seguidas y la horizontal. Este es el momento teórico del colapso, pero en la realidad se produce antes por la rotura de las esquinas en los puntos de las articulaciones. No obstante, el valor de luz de colapso nos da una idea de lo lejos o cerca que está un arco de su situación crítica. Por ejemplo cuanto más cerca están las articulaciones entre sí menor es la luz de colapso, y por el contrario, cuanto más alejadas están las articulaciones entre sí, mayor será los desplazamientos entre los apoyos necesarios para llegar al colapso.

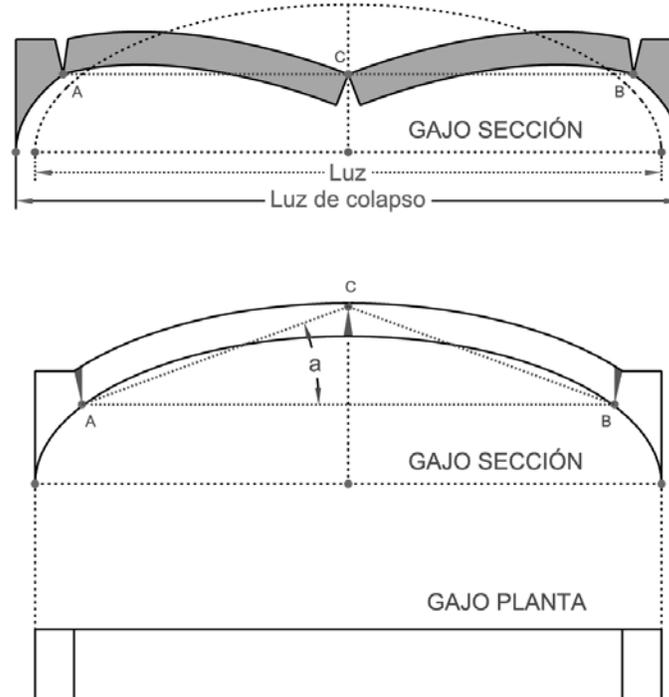


Figura 14: Gajo Arco Colapso

El Coeficiente de Seguridad Geométrico (C.S.G.) es un número adimensional que indica en cada dovela la posición por donde circula la Línea de Empuje respecto al límite. Se ha fijado un mínimo de 1.1, que quiere decir que está dentro del 90% de la sección. Los puntos en los que el CSG sea 1.1 coincidirán con los puntos donde se producen las articulaciones. Cuanto mayor sea el valor de CSG mas se aproxima la Línea de Fuerza al centro de la sección. En definitiva el valor de CSG nos indica por donde circula la Línea de Fuerza en el interior del arco.

Conocida la fuerza que circula por cada dovela sabremos a la tensión que trabaja, sin más que dividir dicha fuerza por la sección de la dovela. Normalmente estos valores suelen estar muy por debajo de las tensiones admisibles del material, por lo que esta condición no suele ser determinante para la estabilidad del arco.

Conjunto de gajos de caras paralelas

Una bóveda de cañón no es más que una sucesión de arcos situados uno junto a otro. Desde un punto de vista estructural basta analizar una rodaja de bóveda para obtener todos los datos necesarios. Para analizar una bóveda de cañón la dividiremos en partes mediante cortes sucesivos de planos verticales paralelos a una distancia determina. Tomaremos una de estas partes, que en definitiva es un arco, lo analizaremos y exportaremos los resultados a lo largo de toda la bóveda.

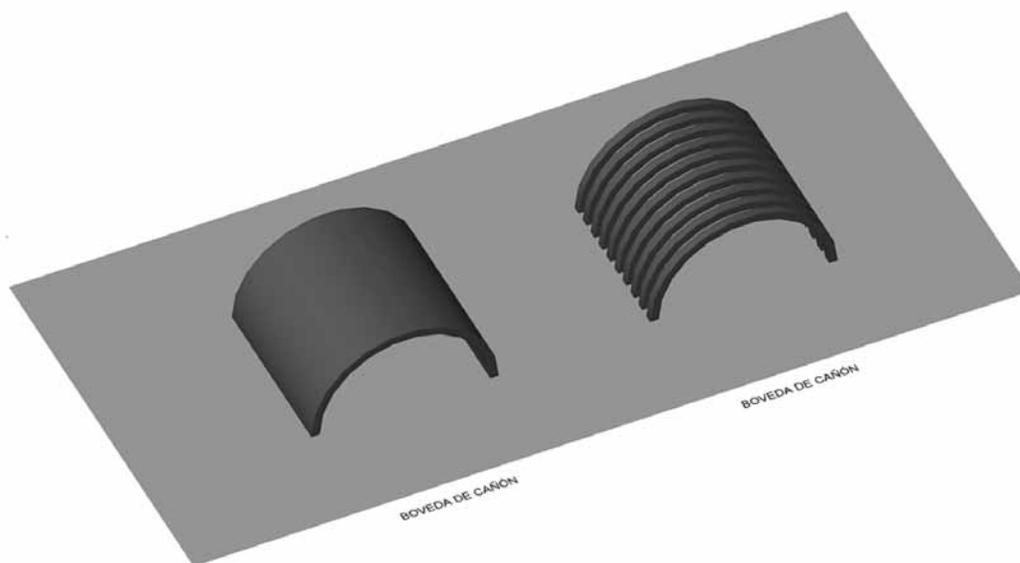


Figura 15: Gajo Bóveda Cañón

Una bóveda de arista es la intersección de dos bóvedas de cañón. Para su análisis la descompondremos en un conjunto de arcos. En primer lugar consideraremos dos arcos que circulan por las diagonales con arranque en dos vértices opuestos y que se cruzan en la clave. En segundo lugar descompondremos en arcos cada una de las cuatro bóvedas de cañón que emergen de cada lado. Los arcos de estas bóvedas van disminuyendo de luz conforme se van acercando a la clave, y no se apoyan en muros sino en estos arcos diagonales. Cada arco, o trozo de arco lo analizaremos independientemente con su geometría y carga. Los arcos diagonales los analizaremos teniendo en cuenta que sobre ellos descansan los arcos de las correspondientes bóvedas de cañón, y por tanto reciben todos los esfuerzos que aquellas transmiten.

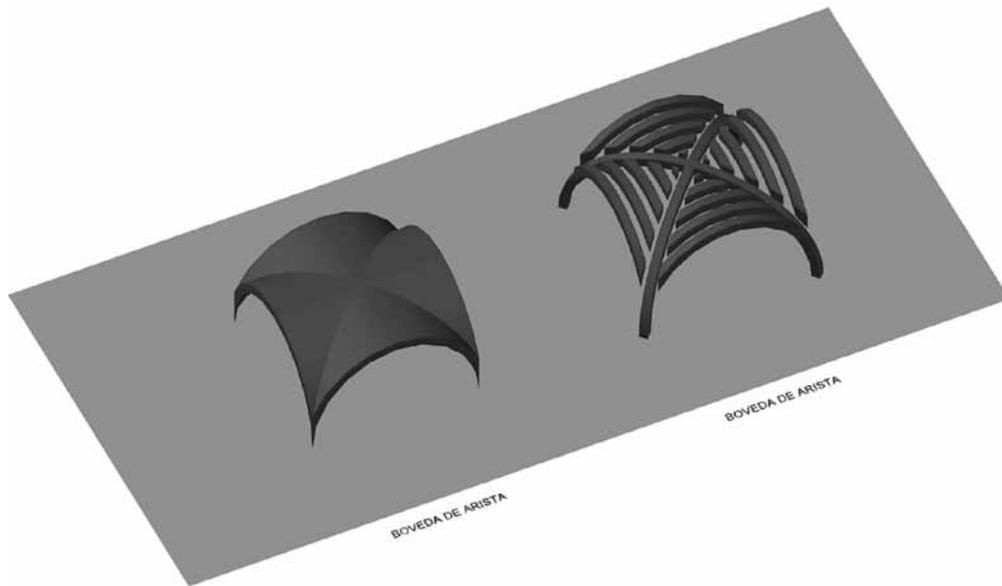


Figura 16: Gajo Bóveda de arista

Una cúpula es una superficie de revolución, cuyo eje de rotación pasa por la clave. Jack Heyman ya señaló cual es el modo más común de agrietarse una cúpula. Es fácil de comprobarlo incluso en casa. No hay más que tomar la cáscara de una media naranja exprimida, apoyarla en la mesa y presionarla en la clave hasta que comience a aparecerle grietas. Observaremos que aparecen unas grietas radiales hasta una cierta altura, sin llegar a la clave, como se muestra en el dibujo siguiente.

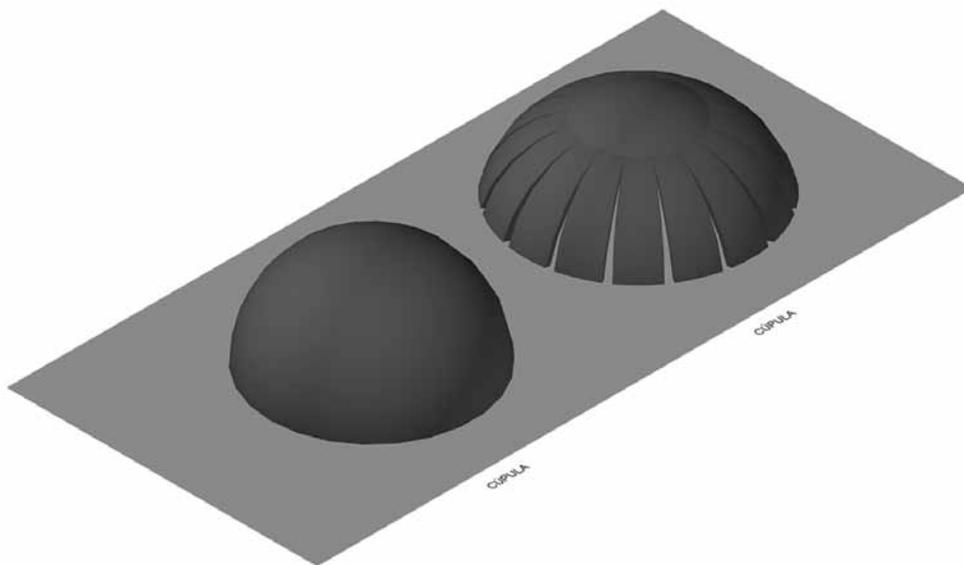


Figura 17: Grietas en cúpula

Si queremos descomponer una cúpula en gajos estos no serán de caras paralelas como en el caso de las bóvedas de cañón. En este caso estamos ante una superficie de revolución, por lo que para descomponerla en gajos, estos han de ser en forma de cuña, teniendo cada uno la parte más estrecha está en la clave, y la parte más ancha en la base o apoyo. La forma de agrietarse la semicúpula ya nos está indicando las partes que se independizan ante situaciones extremas, al igual que sucede en las bóvedas de arista. La pieza se descompone estructuralmente en diferentes partes autónomas de funcionamiento independiente. Las grietas vienen a fijar los límites entre cada una de ellas. Obviamente estamos hablando de grietas de segregación (y no de articulación). Estas grietas se observan tanto por el intradós como por el extradós, y por ellas no circula ninguna fuerza porque no existe contacto entre las partes, ni siquiera por un punto como sucede en las grietas de articulación. Si descomponemos en gajos la cúpula deformada de Heyman, haciendo coincidir cada grieta con cada gajo obtenemos lo que se representa a continuación.

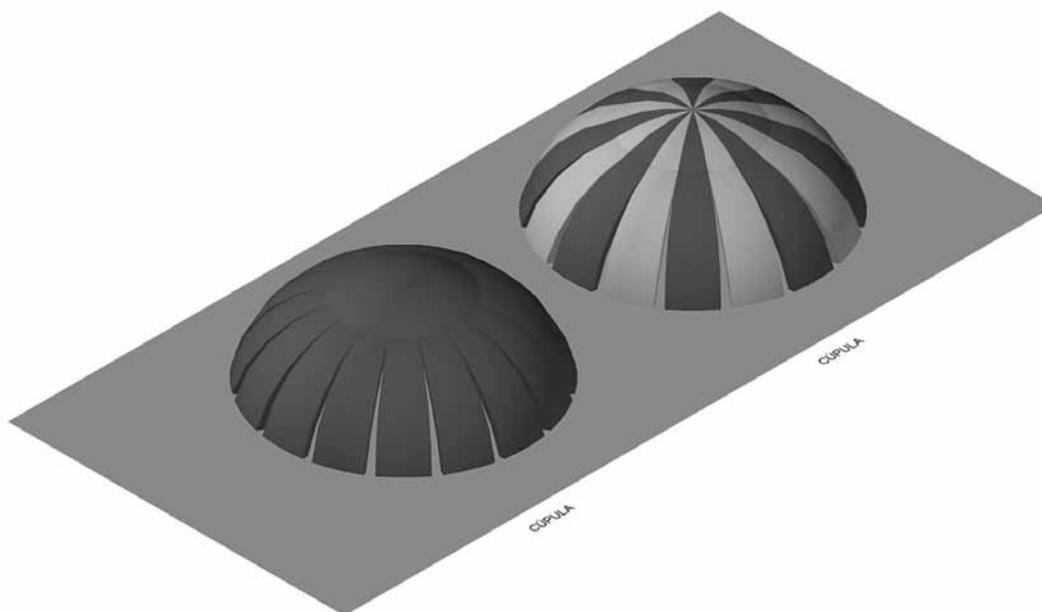


Figura 18: Gajos de una cúpula deformada

La diferencia entre los gajos de una bóveda de cañón y los de una cúpula de revolución está en la posición de sus caras extremas. En el caso de la bóveda las caras son paralelas y en el caso de la cúpula las caras son convergentes hasta coincidir justo en el punto más elevado, en la clave. Cuando aislamos un gajo de bóveda, vemos que cada uno es autosuficiente, y cada medio gajo está equilibrado por su oponente. Sin embargo en la cúpula cada gajo, que corresponde a la semisección de la cúpula, no está equilibrado por su oponente, sino que está sostenido por los colaterales. Este razonamiento es más claro si imaginamos una cúpula con óculo central, donde no existe ningún contacto entre gajos oponentes.

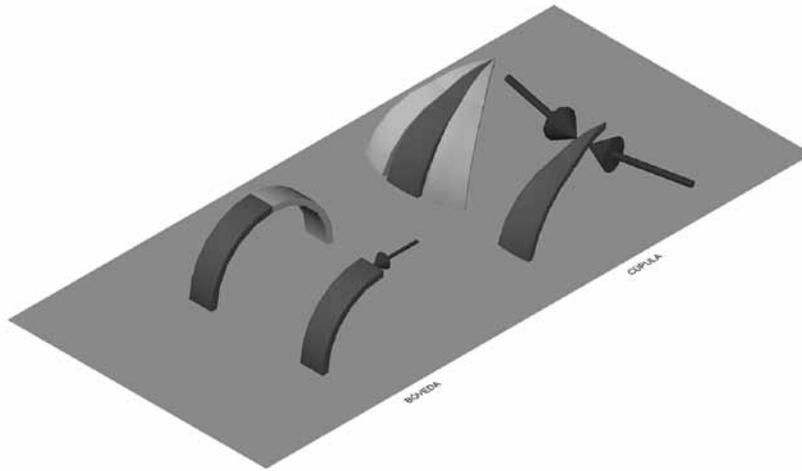


Figura 19: Semigajos de bóveda y cúpula

Consideramos un semigajo. Para mantenerse en equilibrio debemos sustituir sus apoyos por las fuerzas que aquellos ejerzan. En el caso de la bóveda es la fuerza que ejerce el semiarco opoente, en el caso de la cúpula son las fuerzas que ejercen los gajos colaterales.

RESULTADOS

Supongamos una bóveda de arista, de la cual conocemos sus datos geométricos, su sección y las cargas a la que está sometida. Siguiendo el método señalado anteriormente se descompone en una serie de arcos, dos diagonales circulando por las aristas, y una serie de ellos que descansan sobre los primeros.

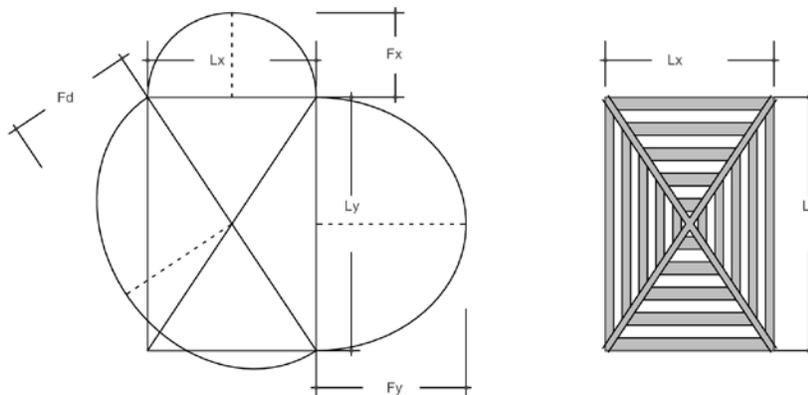


Figura 20: Bóveda de arista

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OCTUBRE 2011

Inicialmente se introducen los datos geométricos. El ejemplo siguiente es una bóveda de planta rectangular de base 4x3 metros, con una altura en la clave de 1,5m y un canto de hoja de 12 cms.

DATOS: Geometría	
Lado Y en m.	4,00
Flecha Lado Y	1,20
Lado X en m.	3,00
Flecha Lado X	1,20
Diagonal m.	5,00
Flecha diagonal	1,20
Canto hoja m.	0,12
Altura relleno de hombros m.	0,45

Posteriormente se introducen las cargas. El programa nos pregunta la densidad del material, en este caso de 1,8Tn/m³ correspondiente a un ladrillo macizo. Así mismo nos pregunta si tiene relleno hasta la clave, o es solo la hoja. También habremos de darle el dato de sobrecarga uniforme si la hubiere, en este caso 200 Kp/m².

DATOS. Cargas	
Densidad en Tn/m ³	1,80
Relleno hasta la clave(1=si 0=no)	1
Sobrecarga uniforme Kp/m ² .	200

A partir de aquí el programa propone distintas líneas de fuerza que satisfagan las condiciones iniciales, y el operador va desechando o escogiendo las que le parecen más satisfactorias. Una vez seleccionada una de ellas obtenemos los resultados. Los primeros son datos puramente geométricos, especialmente la superficie en verdadera magnitud del intradós. Cantidad importante a efectos de construcción para poder cuantificar el material. El segundo dato es el denominado Factor de Concavidad. Éste es un número adimensional que expresa el cociente entre la superficie en verdadera magnitud y la superficie en planta. Cuanto más se aproxima a la unidad mas plana es la bóveda y viceversa.

RESULTADOS: Geometría	
Superficie en planta en m ²	12,00
Superficie verdadera magnitud por el intrados en m ²	12,89
Factor de concavidad	1,074

De las cargas propias de la bóveda y la sobrecarga considerada obtenemos las cargas totales, tanto en términos absolutos como por unidad de superficie.

RESULTADOS: Cargas	
Peso total de la bóveda en Kp.	7992
Peso total de la bóveda en Kp/m ² Proyección horizontal	666

De la línea de fuerza elegida obtenemos los resultados de empujes y reacciones en los apoyos, y la altura exacta en la que se producen.

RESULTADOS: Empujes	
Empuje horizontal en pechina dirección diagonal en Kp.	1936
Empuje vertical en pechina en Kp.	1998
Coord. Y empuje respecto de la pechina m.	0,30
Inclinación del empuje en grados respecto la horizontal	45,9
Empuje horizontal en pechina dirección X en Kp.	1162
Empuje horizontal en pechina dirección Y en Kp.	1549

Por último obtenemos unos datos referentes a las tensiones de trabajo tanto en formato numérico como gráfico. En este caso vemos que la tensión máxima es de 6,82 Kp/cm², un valor realmente bajo comparado con las tensiones de trabajo del concreto o el acero

RESULTADOS: Tensiones, C.S.G.	
TENSION MÁXIMA EN KP/CM ²	6,82
COEFICIENTE DE SEGURIDAD GEOMÉTRICO MÍNIMO	1,114

Del cronograma de tensiones vemos que la tensión máxima solo se produce en las pechinas, donde se encuentran los apoyos, siendo el resto de tensiones muy bajas.

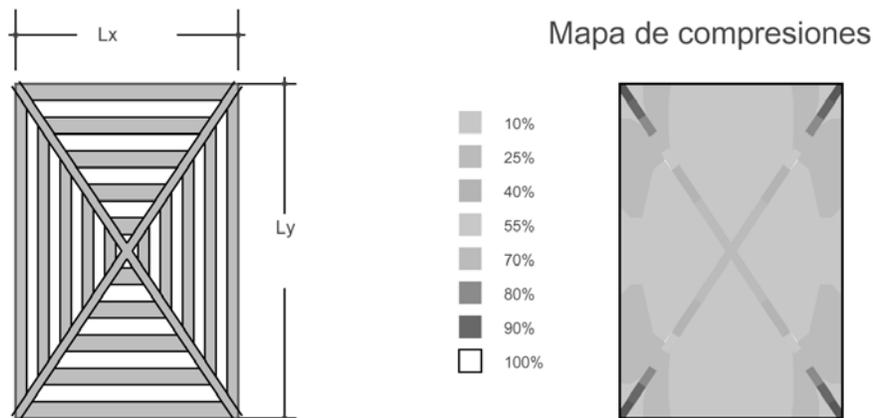


Figura 21: Cronograma de tensiones