

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Conservación de Puentes de Piedra en el Perú: Criterios para su intervención Estructural

Tesis para optar el Grado de Magister en Ingeniería Civil, presentado por:

Héctor Aldo Bardales Salazar

ASESOR:

Mg. Daniel Enrique Torrealva Dávila

Lima, Agosto del 2013

*A Dios por guiar y bendecir mi camino en todo momento,
ya que con su presencia ilumina y reconforta mi corazón.*

*A mi admirable madre Delina Carmen
y mis hermanos Iván y Franz,
por su motivación, cariño y confianza.*

*A mi abuelita Gaudencia;
mis tías, tíos, primas, primos;
por su afecto y confianza incondicional
que ayudaron a cumplir mi objetivo.*

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al Mg. Daniel Torrealva Dávila, por su gentileza en el asesoramiento y permitir la posibilidad de haber desarrollado el presente trabajo de investigación.

A los catedráticos Mg. Daniel Quiun Wong y Dr. Marcial Blondet Saavedra, por su constante motivación y entusiasmo que desarrollaron en mi persona para el estudio de estas construcciones existentes. De la misma forma al Mg. César Huapaya Huapaya, por el apoyo y comentarios en el desarrollo del presente trabajo.

Mi sencilla gratitud al Dr. Hugo Scaletti Farina, por transmitir sin reservas su conocimiento y su incondicional orientación para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco de forma especial la colaboración de la oficina de Dirección de Patrimonio Histórico Colonial y Republicano del Ministerio de Cultura sede nacional, el Ministerio de Cultura sede Huánuco y sede Arequipa, y de la Biblioteca Municipal de Lima, por permitirme consultar sus bibliografías y revisar sus archivos fotográficos.

Una especial gratitud a mis amigos y compañeros de clase de la Maestría en Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por aquellos buenos momentos que pasamos compartiendo conocimientos, experiencias, oportunidades de capacitación y desarrollo permanente; contribuyendo ampliamente en la innovación y fortalecimiento de conocimientos en mi formación profesional.

De igual manera a cada uno de los miembros del Jurado por la amabilidad que brindaron en la revisión del presente trabajo de investigación.

CONTENIDO GENERAL	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
CONTENIDO GENERAL	iv
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	ix
CAPITULO I: EL PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1 Antecedentes del Problema de Investigación	1
1.2 Definición del Problema de Investigación	1
1.3 Justificación e Importancia	2
1.4 Hipótesis	3
1.5 Limitaciones de la Investigación	3
1.6 Objetivos	3
CAPITULO II: CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LAS CARTAS INTERNACIONALES EN MONUMENTOS HISTORICOS.	
2.1 Antecedentes Sobre Conservación de Puentes Históricos Tipo Arco	4
2.2 Restauración	4
2.3 Conservación	7
2.4 Preservación	11
2.5 Reconstrucción	11
2.6 Incompatibilidad y Restricciones con las Normas Actuales de Diseño y Construcción	12
2.7 Características de las Obras Históricas para una Evaluación Estructural	13
2.8 Consideraciones Antes de Intervenir un Puente Histórico	15
CAPITULO III: LOS PUENTES DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA CON BOVEDA DE ARCO	
3.1 Los Puentes en la Historia, Evolución y Desarrollo de los Puentes de Piedra en Arco	18
3.1.1 Los Puentes en la Historia	18
3.1.2 Evolución y Desarrollo de los Puentes de Piedra con Bóveda de Arco	19

3.2 Criterios de Diseño de los Puentes de Mampostería de Piedra: Siglo XVII, XVIII, XIX	29
3.2.1 Hooke y la Catenaria Invertida	30
3.2.2 Philippe de La Hire y la Teoría de la Cuña	31
3.2.3 Jean Rodolphe Perronet	32
3.3 Elementos de los Puentes de Mampostería de Piedra en Arco	34
3.3.1 Elementos Componentes de los puentes de Mampostería	34
3.3.2 Materiales Constituyentes en los Puentes de Mampostería.	38
3.3.3 Elementos Estructurales de dos Puentes de Mampostería	41
3.4 Funcionamiento Estructural de los Puentes de Arco de Mampostería	48
3.4.1 Polígono Funicular	48
3.4.2 Arco Funicular	49
3.4.3 Comportamiento de un Puente Arco de Mampostería	51
3.4.4 Funcionamiento de los Puentes Esviados	56
3.4.5 Formas de Colapso en un Puente Arco de Mampostería	57
3.5 Patologías en los Puentes de Mampostería con Bóveda de Arco	61
3.5.1 La Socavación	61
3.5.2 Movimiento en los Apoyos	62
3.5.3 Degradación de los Materiales	62
3.6 Intervenciones en los Puentes Históricos	63
3.6.1 Intervenciones de Adaptación	64
3.6.2 Reparaciones, Reconstrucciones y Restauraciones	68
3.6.3 Sustitución de Puentes Históricos	69
3.7 El Puente de Mampostería de Piedra como Patrimonio Cultural	70
CAPITULO IV: LOS PUENTES HISTORICOS EN EL PERU	
4.1 Los Puentes Antiguos en el Perú	72
4.2 Los Puentes de Mampostería de Piedra con Bóveda de Arco en el Perú	73
CAPITULO V: CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	
5.1 Criterio General	85
5.2 Documentación de Información Disponible	85
5.2.1 Geometría	86
5.2.2 Características de los Materiales	86

5.2.3 Naturaleza y Estado del Puente	86
5.2.4 Caracterización estructural – Clasificación Tipológica.	87
5.2.5 Caracterización Geométrica	87
5.2.6 Caracterización Mecánica	91
5.3 Comportamiento Estructural por el Método de Elementos Finitos	95
5.4 Diagnóstico de Evaluación	96
5.5 Propuesta de Conservación e Intervención	97
CAPITULO VI: CASO APLICATIVO: PUENTE TRUJILLO, LIMA – PERU	
6.1 Búsqueda de Información	99
6.1.1 Ubicación	99
6.1.2 Condición de Patrimonio	99
6.1.3 Antigüedad	99
6.1.4 Reseña Cronológica del Puente Trujillo	100
6.1.5 Naturaleza y Estado del Puente	105
6.1.6 Caracterización Estructural – Clasificación Tipológica	107
6.2 Comportamiento Estructural del Puente Mediante MEF	111
6.2.1 Análisis Preliminar	111
6.2.2 Análisis Estructural del Puente Trujillo	116
6.3 Diagnóstico de Análisis	129
6.4 Propuesta de Intervención Estructural	130
6.4.1 Trabajos Preliminares	130
6.4.2 En la Superestructura	131
6.4.3 En la Subestructura	131
CONCLUSIONES	133
RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFIA	136

RESUMEN

Los puentes de mampostería de piedra o ladrillo forman una parte importante del patrimonio arquitectónico del Perú. Aunque no muy numerosos su importancia radica en que representan el estado del arte de la ingeniería de aquel entonces, los cuales en muchos casos se siguen utilizando hasta nuestros días, como es el caso de varios puentes ubicados en las ciudades de Lima, Arequipa, Huánuco, etc.

En el presente trabajo de Tesis se describe el proceso de evaluación estructural al Puente Trujillo o Puente de Piedra, ubicado en el centro histórico de la ciudad de Lima y construido a inicios del siglo XVII, con el fin de conocer su comportamiento estructural y sugerir una adecuada intervención, así como promover una cultura de conservación.

La metodología expuesta a continuación nos muestra el desarrollo de la evaluación estructural en base a las cartas internacionales en monumentos históricos, al conocimiento histórico, la geometría, los materiales y la forma constructiva. Usando la teoría de los elementos finitos se desarrolló un modelo tridimensional del puente, aplicando al modelo un análisis estático lineal, un análisis modal, un análisis sísmico estático y un análisis frente a una sobrecarga vehicular. Siendo esencial los dos primeros análisis para obtener el comportamiento global de la estructura.

ABSTRACT

The bridges of stone or brick masonry are an important part of the architectural heritage of Peru. Although they aren't very numerous, its importance focuses in representing the art's state of engineering that time, which in many cases are still used to this day, as is the case of several bridges located in the cities of Lima, Arequipa, Huánuco etc.

This thesis's work describes the structural evaluation process to Trujillo Bridge or known as Stone Bridge, located in the historic center of the Lima city and built in the early seventeenth century, in order to know its structural behavior and suggest an appropriate intervention, so as promote an education of conservation.

The methodology described to following shows us the development of the structural evaluation based on international charters of historical monuments, historical knowledge, geometry, materials and type of construction. The finite element theory was used for development a three dimensional model from the bridge, applying to model a linear static analysis, a modal analysis, a seismic static analysis and a vehicular overload analysis. The first two analyzes are essential for getting the global behavior of the structure.

INTRODUCCIÓN

Los puentes de piedra con bóveda de arco se caracterizan por ser los primeros puentes que simbolizaron la inmortalidad de sus proyectistas y constructores, debido precisamente a la resistencia de sus materiales y la relación mínima de su tipología natural con su entorno físico; siendo necesario por estas razones el conocimiento y aplicación de medidas de conservación para su continua existencia.

En el Perú esta tipología de puentes se desarrollaron desde la época colonial española, pero esto no significa que no le prestemos importancia por lo que represento a nuestra historia, por el contrario estos fueron edificados con materiales y mano de obra propios de nuestro entorno; además el desarrollo de estos puentes significo un gran desarrollo en el ámbito ingenieril de las estructuras, por tanto es deber de nosotros continuar con su preservación y continuidad en el tiempo, pero que esto no implique cambios radicales en su forma.

Para materializar este trabajo se han desarrollado distintos aspectos que dan contenido a los diferentes capítulos de este documento.

En el capítulo 1 se menciona sobre los antecedentes del problema, su definición, su justificación e importancia, generar una hipótesis y posteriormente los objetivos trazados para este estudio.

En el capítulo 2 se hace una descripción general de los conceptos fundamentales de las cartas internacionales en monumentos históricos, así como las restricciones existentes con las normas vigentes de diseño y construcción, sus características y consideraciones para evaluar una edificación histórica.

En el capítulo 3 se recopila y resume el conocimiento técnico que en materia de los puentes de mampostería con bóveda de Arco se han desarrollado en países principalmente de Europa. Comenzando con su historia, su desarrollo y los criterios que se usaron para su proyección y construcción; para después definir sus elementos, su

funcionamiento estructural, sus patologías presentes, sus intervenciones para su continuidad y conceptualizar al puente de mampostería como patrimonio cultural.

En el capítulo 4 se recoge información sobre puentes que forman parte del patrimonio arquitectónico y cultural del Perú. Se analiza su estado actual y su influencia para el medio en que fue construido.

En el capítulo 5 se describen las pautas para desarrollar una evaluación estructural en puentes de mampostería, teniendo presente las guías normativas en monumentos históricos y recomendaciones técnicas aplicables en análisis de estructuras que sean de utilidad en casos prácticos de evaluación e intervención.

En el capítulo 6 se presenta la materialización de los conceptos técnicos en un caso práctico, en donde se desarrolló el análisis de la estructura ante diferentes cargas presentes y que puedan presentarse. Los resultados analíticos obtenidos muestran daños localizados y posible colapso del puente, cuando éste afronta cargas sísmicas o fuertes sobrecargas vehiculares, debido a la escasa capacidad resistente de sus materiales que lo conforman.

CAPITULO I

EL PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes del Problema de Investigación

Los Puentes han sido y es sin duda alguna, un elemento indispensable para el desarrollo de una civilización y su cultura; es por eso que las primeras nociones geométricas en el diseño de arcos estructurales fueron muy importantes a lo largo de la ingeniería estructural, sobretodo antes del conocimiento de la teoría de estructuras. Así por ejemplo tenemos a los romanos como los precursores y grandes maestros de la ingeniería civil aplicada a las obras públicas con todo su esplendor.

Además, los condicionantes básicos en la elección de la localización de un puente fueron: el trazado de la vía, la existencia de una población ribereña o la fundación de una nueva ciudad o colonia. En el primer caso el encuentro del río con la vía era lo que anticipaba la ubicación de la obra que posteriormente se concretaba en función de la forma topográfica del cauce y las características geotécnicas del terreno; en los otros dos casos la proyección estaba más obligada por el entorno del núcleo de la población que obligaba a los constructores a forzar la solución técnica.

Los puentes y en especial los puentes de piedra, son en parte la infraestructura del transporte en un país y por ende forman parte del patrimonio de las Obras Públicas y aunque generalmente no se las consideran patrimonio cultural de la humanidad. Por ello para poder preservar este legado de puentes es necesaria una correcta conservación.

1.2 Definición del Problema de Investigación

A través de la historia nuestras estructuras civiles, en nuestro caso los puentes, han recibido diversas intervenciones estructurales, ya sea para reparar y reconstruir zonas colapsadas o reforzarlos sísmicamente. En Perú, los antiguos peruanos sin duda lo realizaban, sin embargo se tienen algunos registros desde la llegada de los españoles. Estas estructuras puentearías en su gran mayoría son de mampostería, que en su diseño y construcción fueron concebidas para soportar cargas de gravedad y pequeñas sobrecargas. No se conoce o se registre que incluyeran algún otro parámetro, es así como se desconoce su real comportamiento y más aún durante sismos anteriores.

La presencia de materiales nuevos y modernos presentan cierto grado de facilidad constructiva, por lo que la construcción de los puentes de Piedra en Arco evidencien ciertamente un abandono a niveles distintos de puntos de vista; aquí citamos dos aspectos claramente definidos como por ejemplo con respecto a lo social el cual implica

la escaza o la falta de valoración cultural y, en lo científico debido a su desconocimiento por el comportamiento real de la gran mayoría de ellas ante situaciones críticas.

De esta manera podemos mencionar en primer lugar el abandono que tienen algunos puentes, en muchos casos sustituyéndolos en su función con obras nuevas y de esta manera abandonándolos a su suerte, teniendo por ende que ya nadie se ocuparía de su mantenimiento y conservación. Y en segundo lugar podemos mencionar las intervenciones negativas en los puentes para poder adaptarlos a las nuevas necesidades que solicita la sociedad, como por ejemplo el tráfico actual, estas intervenciones pueden ser desde su derribo para sustituirlos, hasta transformaciones más o menos radicales haciéndose tal vez un daño irreversible si esta transformación es grave.

Son muchas las transformaciones que se realizaron y se realizan en puentes antiguos tal vez sin ningún cuidado, resolviéndose el problema de la forma más simple y económica posible, aunque el resultado final este transgrediendo con la integridad de la obra original. Sin tener en cuenta quizás el estilo arquitectónico e ingenieril que estas representan para la humanidad. Por ello existen diversos puentes históricos que se perdieron ya sea porque fueron mal reconstruidos o fueron sustituidos innecesariamente.

En este ámbito el problema de investigación se plantea, con la siguiente interrogante:

¿Cuál sería el procedimiento técnico para evaluar el comportamiento estructural real de un puente de mampostería de piedra con bóveda de arco, que permitirá establecer medidas para su conservación e integridad estructural?

1.3 Justificación e Importancia

La conservación e integridad de monumentos históricos como en este caso son los puentes de piedra, significa en términos concretos preservar el normal funcionamiento para el cual fueron diseñados y construidos, ya sea restringiendo su carga de servicio o reforzándolos sin perder su integridad original; en ese sentido muchas veces se planifica nuevas infraestructuras, o se proyecta y construye un nuevo puente. A lo largo de la historia los puentes de piedra han sido frecuentemente afectados por diversas intervenciones, en los que muchas veces es necesario actuar en ellos, y por tanto la toma de decisiones sobre ellos pueden transformarlos sustancialmente o irreversiblemente.

Actualmente se cuenta con programas suficientemente capaces de desarrollar modelos modernos a gran escala que nos permita saber su comportamiento, pero para estas estructuras estas técnicas necesitan ser adaptados basados en un claro conocimiento del comportamiento de sus elementos estructurales, y teniendo un gran respeto por la cultura y las técnicas con las cuales fueron construidas.

En tal sentido, la ejecución del presente estudio, reviste gran importancia sociocultural, por el interés que se dará para la conservación e integridad de los puentes de piedra en arco, además será como una guía para los propios ingenieros, ya que se hace necesario saber el que hacer en una intervención de esta naturaleza y la importancia de la intervención que se realiza.

1.4 Hipótesis

Para el desarrollo del presente trabajo se consideró la siguiente hipótesis: “Si definimos medidas para conservar un puente de mampostería de piedra con bóveda de arco, a partir de un procedimiento técnico que nos permita evaluarlo estructuralmente entonces podríamos intervenirlo o alterarlo lo menos posible”.

1.5 Limitaciones de la Investigación

La limitación que presenta el presente trabajo de investigación es el de contar con una escasa información inventariada de la construcción y existencia de puentes de piedra en el Perú, ya sea debido al desconocimiento de los mismo pobladores o tal vez a la poca importancia que se le da a estas estructuras, y ante este panorama el Instituto Nacional de Cultura busca la importancia cultural de estas obras.

Otra limitación que enmarca este trabajo, es debido al hermetismo de algunas instituciones o personas involucradas con la estructura, para brindar alguna información.

1.6 Objetivos

Objetivo General:

- Contribuir con un procedimiento para evaluar, diagnosticar e intervenir estructuralmente un puente de piedra abovedado en arco y facilitar su conservación.

Objetivos Específicos:

- Conocer las características geométricas y los elementos estructurales de un puente con bóveda de arco.
- Estudiar la concepción estructural de este tipo de puentes y explorar el estado en la que se encuentran actualmente.
- Obtener resultados analíticos de un modelo estructural que represente de manera adecuada su comportamiento.
- Sugerir medidas para su conservación e integridad estructural.

CAPITULO II

CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LAS CARTAS INTERNACIONALES EN MONUMENTOS HISTORICOS

2.1 Antecedentes Sobre Conservación de Puentes Históricos Tipo Arco

La conservación de puentes de mampostería en el ámbito internacional ya posee un gran significado social y cultural por preservar este legado, así mismo existen diversas restauraciones de puentes de piedra en arco, por ejemplo podemos citar algunos: en España, el puente marmolejo, el puente de Segura y el Puente de Alcántara; en Alemania el puente real (the Royal Bridge), el puente con serie de arcos (Arcade Bridge); siendo China el país en seguir construyendo algunos de sus puentes hasta inicios del S. XX y obviamente conservando aún la técnica de construcción y la manera correcta de darle un adecuado mantenimiento a estas estructuras.

En Latinoamérica, pese quizás a que este tipo de estructuras representaba el legado del viejo continente, podemos contar con varios puentes conservados como por ejemplo en Brasil el puente de Antonio Dias (Ponte de Antonio Dias, Antonio Dias' Bridge), el puente seco (Ponte Seca, Dry Bridge), el puente del palacio antiguo (Ponte do Palácio Velho, Old Palace's Bridge); en Colombia el puente La Libertad.

En el Perú tenemos escasos trabajos de conservación en puentes registrados o publicados, pero sin embargo podemos mencionar en el Cusco el puente Combapata, en Arequipa el puente Grau y el puente Bolognesi. Por otra parte podemos mencionar otros trabajos en los puentes históricos que fueron dirigidos para poder acoplarse a las necesidades actuales perdiéndose en muchos casos el valor histórico y arquitectónico con el cual fueron construidos en sus inicios, de esta manera podemos mencionar el puente Trujillo en Lima - Perú, ubicado en el centro histórico de la ciudad de Lima.

La PUCP tiene algunos trabajos sobre intervención de monumentos históricos, como indica la Tesis realizada por el Ing. Romer Lovón (2006) y otros diversos trabajos, pero todas están dirigidas a edificaciones de mampostería de barro o adobe como material primordial en los monumentos históricos.

Para entender y crearse un marco teórico de los conocimientos de restauración, conservación, reconstrucción e intervención estructural en monumentos históricos se repasará algunas cartas, guías y publicaciones locales e internacionales de conservación.

2.2 Restauración

2.2.1 Conceptos y Definiciones

La Carta de Venecia lo establece de la siguiente forma:

"La restauración es una operación que debe tener un carácter excepcional. Tiene como fin conservar y revelar los valores estéticos e históricos del monumento y se fundamenta en el respeto a la esencia antigua y a los documentos auténticos. Su límite está allí donde comienza la hipótesis: en el plano de las reconstituciones basadas en conjeturas, todo trabajo de complemento reconocido como indispensable por razones estéticas o técnicas aflora de la composición arquitectónica y llevará la marca de nuestro tiempo. La restauración estará siempre precedida y acompañada de un estudio arqueológico e histórico del monumento"

2.2.2 Los Principios Teóricos de la Restauración

José Terán considera cuatro principios, en su publicación "Consideraciones que se deben tener en cuenta para la restauración arquitectónica", las cuales son:

1. Respetar la historia de la obra

Refiriéndose a respetar las diferentes etapas constructivas de la edificación y sus espacios originales a lo largo de su historia. Así como también de las ampliaciones y remodelaciones de importancia que no impliquen un cambio sustancial en perjuicio de la obra.

2. No Falsificación

Está dirigido cuando la intervención requiera integrar, completar o reproducir algún elemento arquitectónico perdido. El restaurador Paul Philippot manifiesta que cada monumento cuenta con un único archivo histórico y no debería ser repetido sin falsificarlo. Si la edificación necesitara un reemplazo o la renovación de cualquier elemento arquitectónico en su conservación, ya sea con o sin el uso de materiales tradicionales similares a la constitución de la obra, dicha intervención debe conseguir integrarse visualmente y ser identificable en la estructura, pero no debe resaltar.

3. Conservación in situ

Refiriéndose a no desligar a la estructura ni a sus elementos del lugar de origen. La Carta de Venecia en su artículo 8º indica: "Los elementos de escultura, pintura o decoración que forman parte integrante de un monumento, no podrán ser separados del mismo". Sin embargo, si algún elemento se desprendió de su lugar original por causa de un movimiento sísmico, éste debe ser repuesto en su sitio.

4. Reversibilidad

Refiriéndose a la selección de "... aquellas técnicas, instrumentos y materiales que permitan la fácil anulación de sus efectos, para recuperar el estado del monumento previo a la intervención, si con una nueva aportación de datos, enfoques o criterios, ésta se juzga inútil, inadecuada o nociva al monumento."

2.2.3 Consideraciones para la Restauración

José García de Miguel en su publicación *Ingeniería y Territorio, Restauración de la Obra Pública*, nos indica algunas recomendaciones:

- Cualquier obra de restauración debe empezar con un estudio minucioso de los daños que presenta la estructura histórica y que es necesario enmendarlos a sus condiciones iniciales.
- Cuando se agrega algún elemento nuevo para sustituir a los dañados, debemos tener muy presente el carácter estético de la estructura histórica que se va a restaurar, es decir para conservar cualquier obra se necesita trabajos de restauración.
- El reforzamiento en general a ser incluido en cualquier obra histórica para su restauración o continuidad de servicio deber de ser creativa, y así evitar cualquier alteración a la notable estética de la obra.

Además, la carta de Atenas, 1931, que fue el primer documento internacional acerca de la conservación del patrimonio arquitectónico, aprobó para la restauración el uso de todos los recursos técnicos modernos posibles y especialmente del concreto armado, especificando que los dispositivos de consolidación o refuerzo deberían ser ocultados en lo posible para no alterar el aspecto del monumento restaurado.

Posteriormente la carta de Venecia, 1964, reconoce que el fin último de la conservación de todo tipo de patrimonio arquitectónico estriba en la preservación de su autenticidad en sus dimensiones tanto materiales como inmateriales, podemos agregar las siguientes recomendaciones que cita dicho documento:

"Los elementos destinados a reemplazar las partes inexistentes deben integrarse armoniosamente en el conjunto, distinguiéndose claramente de las originales, a fin de que la restauración no falsifique el documento artístico o histórico.

Así mismo el Dr. José Terán nos señala en su publicación *Consideraciones que se deben tener en cuenta para la restauración arquitectónica*, que: El restaurador deberá apoyarse y asesorarse con los conocimientos de diferentes profesionales como son: químicos, físicos, biólogos, geólogos, ingenieros especialistas en estructuras históricas y en mecánica de suelos, especialistas en ciencias de los materiales y en mineralogía, restauradores y arqueólogos, historiadores e historiadores del arte, profesionales inmersos en la restauración de obras históricas y que sus asesorías, diagnósticos, pronósticos y/o intervenciones sobre el patrimonio arquitectónico *"... no sean contrarias a los principios de la restauración, para que sus acciones tomen en cuenta el contexto de*

los trabajos de restauración en que están incluidos y para que no se produzcan por sus acciones alteraciones y deterioros en los inmuebles”.

2.3 Conservación

2.3.1 Definición

Acorde a José Terán es:

La conservación consiste en la aplicación de los procedimientos técnicos cuya finalidad es la de detener los mecanismos de alteración o impedir que surjan nuevos deterioros en un edificio histórico. Su objetivo es garantizar la permanencia de dicho patrimonio arquitectónico.

Así mismo, la carta de Cracovia señala que: la conservación es el conjunto de actitudes de una comunidad dirigidas a hacer que el patrimonio y sus monumentos perduren. La conservación es llevada a cabo con respecto al significado de la identidad del monumento y de sus valores asociados.

Además la *Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico 1975* señala: La conservación del patrimonio arquitectónico depende en gran medida de su integración en el marco de la vida de los ciudadanos y de su consideración en los planes de ordenación del territorio y de urbanismo.

2.3.2 Principios y Objetivos de la conservación

Al respecto, la Carta de Cracovia del 2000 manifiesta:

"El Patrimonio arquitectónico, urbano y paisajístico, así como los elementos que lo componen, son el resultado de una identificación con varios momentos asociados a la historia y a sus contextos socioculturales. La conservación de este patrimonio es nuestro objetivo".

Por otro lado, la Carta de Washington, 1987, señala objetivos y principios de la conservación, los cuales son: Los valores a conservar son el carácter histórico de la población o del área urbana y todos aquellos elementos materiales y espirituales que determinan su imagen, especialmente:

- La forma urbana definida por la trama y el parcelario; la relación entre los diversos espacios urbanos, edificios, espacios verdes y libres;
- La forma y el aspecto de los edificios (interior y exterior), definidos a través de su estructura, volumen, estilo, escala, materiales, color y decoración;
- Las relaciones entre población o área urbana y su entorno, bien sea natural o creado por el hombre;

- Las diversas funciones adquiridas por la población o el área urbana en el curso de la historia.

Cualquier intento de cambio a estos valores se vería seriamente comprometido la autenticidad de la población o área urbana histórica. Así mismo, esta carta señala que los habitantes juegan un papel fundamental en la conservación, cuando indica: La participación y el compromiso de los habitantes son imprescindibles para conseguir la conservación de la población o área urbana histórica y deben ser estimulados. No se debe olvidar que dicha conservación concierne en primer lugar a sus habitantes.

2.3.3 Instrumentos para la conservación

1. Plan de Conservación

La carta de Washington nos recomienda ciertos ítems para la elaborar un plan de conservación, los cuales se indica a continuación:

- La planificación de la conservación de las poblaciones y áreas urbanas históricas debe ser precedida por estudios multidisciplinares.
- *"El plan de conservación debe comprender un análisis de datos, particularmente arqueológicos, históricas, arquitectónicos, técnicos, sociológicos y económicos".*
- *"El plan de conservación debe definir la principal orientación y modalidad de las acciones que han de llevarse a cabo en el plano jurídico, administrativo y financiero".*
- *"El plan de conservación tratará de lograr una relación armónica entré, el área urbana histórica y el conjunto de la población".*
- *"El plan de conservación determinará los edificios o grupos de edificios que deben protegerse totalmente, conservar en ciertas condiciones, o los que, en circunstancias excepcionales, pueden destruirse"*
- Antes de realizar cualquier intervención se levantará un acta, rigurosamente documentada, de las condiciones del área.
- El plan debe contar con la adhesión de los habitantes.

Esta misma carta nos sugiere un plan de conservación, si en caso no existiese un plan de conservación:

"En caso de que se careciera de un plan de conservación o éste estuviera en estudio, antes de la adopción del plan todas las actividades necesarias para la conservación deberán ajustarse a los principios y métodos de la presente Carta y de la de Venecia"

Así mismo, Daniel Torrealva y Julio Vargas, adicionan al plan de conservación lo siguiente:

"Debe incluir las acciones administrativas, legales y financieras, que los gobiernos ejecutarán con el apoyo de un marco de dispositivos legales, basados en la concentración de las entidades sectoriales y financieras del país. Para ello, como en el caso de los habitantes, es necesario motivar y comprometer a estos agentes, en la conservación de las ciudades históricas"

De la misma forma la carta de Cracovia, 2000, nos señala:

"El mantenimiento y la reparación son una parte fundamental del proceso de conservación del patrimonio. Estas acciones tienen que ser organizadas con una investigación sistemática, inspección, control, seguimiento y pruebas. Hay que informar y prever el posible deterioro, y tomar las adecuadas medidas preventivas"

2. Responsables de la Conservación

Los propios habitantes son los principales responsables en una conservación de la arquitectura de monumentos históricos, así como lo indican las siguientes Cartas:

La Carta de Venecia 1964, indica lo siguiente:

"Las obras monumentales de los pueblos, portadoras de un mensaje espiritual del pasado, representan en la vida actual el testimonio vivo de sus tradiciones seculares. La humanidad, que cada día toma conciencia de los valores humanos, las considera patrimonio común reconociéndose responsable de su salvaguardia (conservar) frente a las generaciones futuras. Estima que es su deber transmitir las en su completa autenticidad".

La Carta de Cracovia, 2000:

"Las técnicas de conservación o protección deben estar estrictamente vinculadas a la investigación pluridisciplinaria científica sobre materiales y tecnologías usadas para la construcción, reparación y/o restauración del patrimonio edificado".

La Carta de Washington, 1987:

"La participación y el compromiso de los habitantes son imprescindibles para conseguir la conservación de la población o área urbana histórica y deben ser estimulados. No se debe olvidar que dicha conservación concierne en primer lugar a sus habitantes"

Asimismo Daniel Torrealva y Julio Vargas, señalan:

"La conservación de los Cascos Monumentales, no es solo un problema a resolver por un equipo interdisciplinario de arqueólogos, historiadores, arquitectos e ingenieros, sino que deben también incluir sociólogos, abogados, economistas, especialistas financieros, etc., y lo principal que planteen proyectos o planes de conservación que puedan ser recogidos por los niveles políticos locales y/o centrales del país"

2.3.4 Cambios en las Edificaciones Históricas

Identificar una intervención que modificara una obra histórica, esto debe partir de un conocimiento profundo de las características propias de la estructura. De esta manera es indispensable que se tenga conocimientos de aspecto cuantitativo y cualitativo, ya que esto desplegara una visión más amplia e integradora en las intervenciones de restauración.

Además, tener muy presente que en un proceso de conservación las tecnologías contemporáneas mal empleadas modifican las estructuras antiguas. Para evitar esta modificación brusca se debe realizar una conservación integradora, tal como nos sugiere la Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico:

"La conservación integrada es el resultado de la acción conjunta de las técnicas de la restauración e investigación de las funciones apropiadas".

Y también añade que:

"Conviene resaltar que esta conservación integrada no excluye la arquitectura contemporánea en los barrios antiguos, sino que ella deberá tener muy en cuenta el marco existente, respetar las proporciones, la forma y la disposición de los volúmenes, así como los materiales tradicionales".

2.3.5 Relación Entre Conservación y Restauración

La Carta de Cracovia manifiesta el siguiente concepto en su documento:

"La conservación del patrimonio edificado es llevada a cabo según el proyecto de restauración, que incluye la estrategia para su conservación a largo plazo. Este "proyecto de restauración" debería basarse en una gama de opciones técnicas apropiadas y preparadas en un proceso cognitivo que integre la recogida de información y el conocimiento profundo del edificio y/o del emplazamiento. Este proceso incluye el estudio estructural, análisis gráficos y de magnitudes y la identificación del significado histórico, artístico y sociocultural. En el proyecto de restauración deben participar todas las disciplinas pertinentes y la coordinación deberá ser llevada a cabo por una persona calificada y bien formada en la conservación y restauración".

También podemos citar el artículo 6: "la intención de la conservación de edificios históricos y monumentos, estén estos en contextos rurales o urbanos, es mantener su autenticidad e integridad, incluyendo los espacios internos, mobiliario y decoración de acuerdo con su conformación original. Semejante conservación requiere un apropiado proyecto de restauración que defina los métodos y los objetivos. En muchos casos, esto además requiere un uso apropiado, compatible con el espacio y significado existente. Las

obras en edificios históricos deben prestar una atención total a todos los períodos históricos presentes".

Además, señala en su artículo 10: "las técnicas de conservación o protección deben estar estrictamente vinculadas a la investigación pluridisciplinar científica sobre materiales y tecnologías usadas para la construcción, reparación y/o restauración del patrimonio edificado".

2.4 Preservación

2.4.1 Definiciones

José Terán lo define como sigue:

La *preservación* constituye el conjunto de medidas cuyo objetivo es prevenir del deterioro a los inmuebles. Es una acción que antecede a las intervenciones de Conservación y/o Restauración, procurando que, con estas actividades, las alteraciones se retarden lo más posible, e implica el realizar operaciones continuas que buscan mantener al monumento en buenas condiciones.

En el Documento de Narra sobre la Autenticidad *"Preservación: todos los esfuerzos encaminados a comprender el patrimonio cultural, a conocer su historia y su significado, a garantizar su salvaguardia material y, cuando corresponda, su presentación, restauración y mejora. (En la definición de patrimonio cultural se entiende que se incluyen los monumentos, y los grupos de edificios y emplazamientos con valor cultural)."*

2.5 Reconstrucción

2.5.1 Definición

Acorde a José A. Terán, en su trabajo de investigación manifiesta:

"Es la intervención que tiene por objeto volver a construir partes desaparecidas o perdidas de un monumento. La reconstrucción supone el empleo de materiales nuevos y no la reutilización de elementos pertenecientes a la construcción original ya perdida."

Esta intervención se refiere a las labores que se realizan en el monumento a nivel estructural; debe fundamentarse en el respeto al inmueble y será efectuada de tal manera que sea reconocible.

2.5.2 ¿Cuándo es adecuada una reconstrucción?

"La reconstrucción es apropiada solamente cuando un sitio está incompleto debido a daño o alteración, y siempre que haya suficiente evidencia para reproducir un estado anterior de la fábrica. En raros casos, la reconstrucción puede también ser apropiada como parte de un uso ó una práctica que preserve la significación cultural del sitio"

"La reconstrucción debe ser identificable ante una inspección detallada o mediante interpretación adicional".

2.5.3 ¿Realizar o no realizar una reconstrucción?

La carta de Venecia, 1964 se refiere al respecto:

"Los añadidos no deben ser tolerados en tanto que no respeten todas las partes interesantes del edificio, su trazado tradicional, el equilibrio de su composición y sus relaciones con el medio ambiente.

En la necesidad de que la reconstrucción se deba realizar, la Carta de Washington, 1987 manifiesta también:

"En el caso de ser necesaria la transformación de los edificios o la construcción de otros nuevos, toda agregación deberá respetar la organización espacial existente, particularmente su parcelario, volumen y escala, así como el carácter general impuesto por la calidad y el valor del conjunto de construcciones existentes. La introducción de elementos de carácter contemporáneo, siempre que no perturben la armonía del conjunto, puede contribuir a su enriquecimiento".

2.5.4 ¿Que se tiene que evitar en una reconstrucción?

Al respecto la Carta de Cracovia, 2000, indica:

"Debe evitarse la reconstrucción en "el estilo del edificio" de partes enteras del mismo. La reconstrucción de partes muy limitadas con un significado arquitectónico puede ser excepcionalmente aceptada a condición de que esta se base en documentación precisa e indiscutible. Si se necesita, para el adecuado uso del edificio, la incorporación de partes espaciales y funcionales más extensas debe reflejarse en ellas el lenguaje de la arquitectura actual. La reconstrucción de un edificio en su totalidad, destruido por un conflicto armado o por desastres naturales, es solo aceptable si existen motivos sociales o culturales excepcionales que están relacionados con la identidad de la comunidad entera".

2.6 Incompatibilidad y Restricciones con las Normas Actuales de Diseño y Construcción

Los Ingenieros Daniel Torrealva y Antonio Blanco, consideran que uno de los problemas que se presenta en una Intervención estructural de edificios históricos es el siguiente:

"Cómo compatibilizar los requisitos de seguridad que se especifican en los códigos vigentes de diseño y construcción de edificaciones, con los criterios de conservación para edificaciones consideradas patrimonio cultural".

Así mismo J. M. García de Miguel at all, con respecto a esto indica lo siguiente:

Los métodos y las normas convencionales principalmente orientadas al diseño de estructuras modernas pueden resultar muy inadecuadamente aplicados a las estructuras antiguas, dando lugar a operaciones de consolidación o refuerzo muy deficientes. Los métodos y normas convencionales pueden resultar inadecuados, en particular, para la descripción del comportamiento resistente real y para la evaluación del nivel de fiabilidad realmente presente en una estructura antigua. Ello es así debido, entre otros, a los siguientes motivos:

- En general, en una construcción histórica, se dispondrá de información demasiado limitada sobre la morfología interna de los elementos y de las propiedades mecánicas y resistentes de los materiales. En general, existirá un nivel de incertidumbre elevado con relación a las características de la estructura. Los métodos convencionales sin embargo parten del supuesto de un conocimiento cuantitativo detallado de estos aspectos.
- Los modelos de análisis convencionales, principalmente orientados al análisis de estructuras de hormigón metálico y acero, no alcanzan a representar aceptablemente el comportamiento real de las fábricas de ladrillo y piedra. Estas requieren, de hecho, de modelos específicos sensiblemente más sofisticados.
- Los métodos convencionales no permiten integrar información de carácter cualitativo que si estará frecuentemente disponible en el caso de construcciones históricas. La evidencia cualitativa puede provenir de fuentes de información alternativas tales como la inspección, la investigación histórica o el análisis comparativo con edificios similares.

2.7 Características de las Obras Históricas para una Evaluación Estructural

Para realizar una intervención estructural de una antigua obra histórica, se requiere de profesionales formados, con conocimientos, comprensión y experiencia. Sin embargo, actualmente existe una carencia de diversos conocimientos teóricos y prácticos que hicieron posible la construcción de muchas de estas obras, ya que al pasar de los años la tecnología de estas fue desapareciendo, así como también la transmisión de conocimientos en los diversos locales de formación, tanto técnica como práctica. En el XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, 2003 se hace referencia al siguiente párrafo:

“Las edificaciones históricas representan un reto muy particular para la Ingeniería actual. Mientras que para las edificaciones modernas, el proceso de evaluación y posterior reforzamiento cuenta con procedimientos tecnológicos comprobados analítica y experimentalmente; aunque no en todos los casos, en las edificaciones históricas buena parte de estos procesos se encuentran todavía en una fase de exploración o de empirismo. En muchos casos, la condición de patrimonio monumental de estos edificios limita la intervención ingenieril con los métodos comunes a los edificios modernos. Actualmente, la posibilidad de plantear métodos modernos de intervención estructural debe tomar en cuenta la necesidad de un control posterior del desempeño estructural, la compatibilidad entre los materiales existentes y los nuevos, así como la reversibilidad de la intervención es decir, debe considerarse el posible cambio de la intervención por otra mejor, de acuerdo al avance tecnológico y del conocimiento”

Para intervenir los monumentos históricos es de suma importancia saber analizar, evaluar e interpretar su comportamiento y funcionamiento de los diferentes elementos estructurales que la conforman. Para reducir estos problemas la Tesis de Romer Lovón, PUCP 2006, indica considerar lo siguiente:

✓ **En Información**

“Un aspecto importante a tomar en cuenta es la falta de información sobre las construcciones existentes. En algunos casos existen planos de arquitectura, o de replanteo. En general, los planos estructurales no existen. Tanto el replanteo geométrico como estructural se hace necesario, para llevar a cabo la evaluación de las edificaciones. También se debe hacer notar la poca información acerca del comportamiento de las edificaciones en eventos sísmicos, asimismo sobre los daños causados por estos eventos. Posibles evidencias de daños causados por estos eventos habrían sido cubiertas por reforzamientos estructurales o por simples pintados o tarrajeos que por lo general no son reportados.

✓ **En Los Materiales de Construcción**

En general los materiales de construcción indican de alguna forma el periodo de construcción así como la localidad donde se ubica la edificación. Se puede encontrar una gran variedad de materiales estructurales en una sola edificación, no solo en construcciones de la misma época, sino también en modificaciones posteriores a la edificación inicial. El conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales como las relaciones de esfuerzo deformación, flujo plástico, rango de esfuerzos admisibles, etc. es escaso. Las labores de auscultación para la extracción de muestras son importantes para una asignación adecuada de las propiedades mecánicas de estos

✓ **En Las Conexiones Estructurales**

Un aspecto importante son las conexiones de los elementos estructurales en especial cuando se trata de distintos materiales. Se pueden encontrar columnas de acero apoyadas sobre muros de albañilería, vigas de acero apoyados en columnas de mampostería, entramados de madera apoyadas sobre muros sin viga collar. En cuanto a la cimentación, se puede encontrar algunas veces que están apoyadas sobre estructuras de construcciones anteriores, con sótanos de muros gruesos de piedra u otro material, con sistemas de alcantarillado, así como posible existencia de catacumbas.

✓ **En el Análisis y Reforzamiento**

El análisis y en general el modelamiento juega un rol importante en la evaluación de estas edificaciones. Algunas particularidades y sobretodo la complejidad de algunas conexiones y propiedades de los materiales conllevan a una dificultad en el modelamiento de las estructuras. Por ejemplo: definición de conexiones rígidas o semirígidas, excentricidad de las conexiones, conexiones entre elementos de distinto material, elementos con materiales con baja o nula capacidad a la tracción, y condiciones de apoyo como el grado de empotramiento. En cuanto a la interpretación de los resultados, es importante el conocimiento de los rangos de deformabilidad en función a los daños posibles en los conjuntos estructurales así como del comportamiento estructural de toda la edificación.

✓ **En los Procedimientos de Reforzamiento**

Un aspecto importante se refiere a los procedimientos de reforzamiento en caso de ser necesario. La condición de patrimonio histórico reduce las alternativas, limitando la intervención ingenieril sobre todo en los elementos que se consideran con un mayor valor cultural o histórico. Estas limitaciones a su vez representan un reto a la ingeniería que implica la exploración de otras opciones que permitan reducir la vulnerabilidad de las edificaciones históricas

2.8 Consideraciones Antes de Intervenir un Puente Histórico

La intervención de una antigua obra pública requiere de profesionales formados, con conocimiento, sensibilidad, experiencia y además han tenido la grandeza de compartir sus conocimientos con los aficionados a los monumentos, en especial de los puentes de piedra. Podemos afirmar que los puentes de piedra y las obras monumentales en general, nos fueron heredadas por nuestros antepasados, y tenemos la forzosa obligación de transmitir las por lo menos en las mismas condiciones en que las recibimos, hacer lo contrario podemos estar destruyendo nuestro patrimonio.

Lo más deseable es que el mantenimiento prevalezca sobre la intervención. El mantenimiento siempre facilitara la reparación preventiva y su falta puede derivar en daños que exigen costosas obras de restauración o reconstrucción. Afortunadamente ya existen sistemas de gestión integral de conservación de monumentos históricos por diversos organismos, así mismo se aprecia en el ámbito de intervenciones una creciente necesidad de recuperar antiguos conocimientos, prácticas y experiencias, para transmitirlos a las siguientes generaciones.

Conforme al Consejo de Europa y otros autores, podemos estudiar, catalogar y analizar el puente sobre el que vamos a trabajar, siguiendo los principios y categorías fundamentales, las cuales son: Valor científico del puente, valor estético, valor histórico, valor simbólico y un valor de uso. Este análisis no está lejos de un sentido común elemental, y que nos permitirá determinar el grado de manipulación que admite nuestro puente, evitando llegar a algún interés político.

Y si después de esta primera etapa de estudios imprescindible, no queda más remedio que intervenir nuestro antiguo puente de piedra, hagámoslo con la mayor delicadeza posible. Y efectuemos complementariamente la investigación necesaria que nos permita asegurar que la estructura de nuestro puente va a responder con su nueva geometría y conocer los esfuerzos que se van a introducir en la mampostería. Somos conocedores de que los ingenieros han efectuado intervenciones a ciegas en infinidad de puentes de mampostería sin problemas, puesto que esta tipología de puentes rara vez presenta problemas de resistencia; sin embargo nuestra obligación es la de realizar los cálculos necesarios para asegurarnos de que todo va a ir bien, aunque sean simples y sencillos.

2.8.1 Perspectiva y Clasificación de las intervenciones

Acorde a la bibliografía de Leonardo Fernández, “Tierra sobre el agua: visión histórica universal de los puentes”, las intervenciones en los puentes históricos pueden tener dos perspectivas diferentes:

- a) Como actividad actual de la ingeniería, porque es necesario intervenir en muchos puentes históricos para que sigan cumpliendo su función, y se mantengan con la seguridad que se exige a los puentes en el momento actual.
- b) Para conservar o recuperar los valores monumentales de los puentes, como parte del patrimonio histórico-artístico de la humanidad.

En la mayoría de las intervenciones, ambos trabajos son simultáneos y deben complementarse para conseguir ambos objetivos, que algunas veces pueden llegar a ser incompatibles.

A primera vista, las intervenciones más adecuadas en una obra histórica parece que son aquellas destinadas exclusivamente a su reparación o restauración. Las obras de rehabilitación o las de reconstrucción son más difíciles de interpretar y de aceptar, ya que éstas originan en ocasiones fuertes controversias en la sociedad, debido por una parte a la modernidad de la propuesta, y por otra a la no adecuación de los materiales empleados.

Así mismo diversos autores clasifican a las intervenciones de la siguiente manera:

Inmediatas: prevenir un posible daño a las personas.

Urgentes: como prevención ante un deterioro acelerado.

Necesarios: mantenimiento del edificio en condición segura a prueba de agentes externos como sismos, agua y viento.

Deseables: rehabilitación o mejoramiento del edificio, incluyendo su desempeño sísmico.

De Observación: con el fin de obtener mayor información y fijar un diagnóstico correcto.

2.8.2 Fases de la intervención

La bibliografía especializada de intervención a los monumentos históricos exige que para intervenir una obra histórica se realice en fases similares a las aplicables a un paciente en un tratamiento médico, esto debido a las características propias que poseen:

1. Anamnesia, es la reunión de datos relativos a un paciente, que comprenden antecedentes.
2. Diagnóstico, es el procedimiento por el cual se identifica una enfermedad y sus causas.
3. Terapia, es el conjunto de medios de cualquier clase cuya finalidad es la curación o el alivio de las enfermedades.
4. Control, es el proceso de monitorear al paciente.

De esta manera para la intervención estructural se establece la siguiente analogía con las fases de un tratamiento médico dirigida a un paciente como lo permite la Carta Internacional:

1. *"Búsqueda de datos reveladores e información;*
2. *"Determinación de las causas de deterioro y degradación;*
3. *"Elección de las medidas correctoras, y*
4. *"Control de la eficacia de las intervenciones".*

CAPITULO III

LOS PUENTES DE MAMPOSTERIA DE PIEDRA CON BÓVEDA DE ARCO

3.1 Los Puentes en la Historia, Evolución y Desarrollo de los puentes de piedra en Arco

3.1.1 Los puentes en la Historia

Los puentes a través de su historia siempre han cumplido una función simple que es continuar un camino cuando exista un obstáculo o esta se desprenda del suelo. Cabe hacer mención de varios autores, que los puentes evolucionaron principalmente debido a la evolución del camino y al desarrollo de conocimientos técnicos.

A finales del S. XVIII los puentes eran desarrollados por Ingenieros, sin embargo hubo quienes se interesaron por un lado en el desarrollo del conocimiento sobre el comportamiento resistente de las estructuras y por otro lado en el sentido artístico que debería mantener estas obras, esto causo que existieran Ingenieros y Arquitectos, coincidiendo este hecho con la revolución industrial. Para los puentes esto fue determinante, ya que de edificar puentes de piedra y de madera se pasó a edificar los puentes metálicos y de concreto.

A lo largo de la historia constructiva de puentes se han usado distintos materiales y tipos de estructura para construirlos. Es así que podemos enfocarlos según el tipo de estructura y el material. Según el tipo de estructura empleada podemos mencionar: los puentes viga, los puentes arco, los puentes colgantes y los puentes atirantados. Según el material empleado para construirlos tenemos cuatro materiales básicos los cuales son: la madera, la piedra, el hierro y el concreto. Y otros materiales como la fibra natural muy usado antiguamente en América del Sur, el ladrillo de arcilla cocida y el aluminio, empleados con regular frecuencia para construir puentes o parte de ellos.

Los puentes de mampostería de piedra dominaron gran parte de la historia constructiva, con la técnica de la bóveda con dovelas yuxtapuestas, ver figura N° 3.1, y que permaneció prácticamente invariable desde los romanos hasta el siglo XIX, es por eso que la mayoría de autores consideran al puente de arcos de piedra como el puente histórico por excelencia.

Actualmente estos puentes de piedra en arco solo son construidos en algún parque o jardín, donde se requiere resaltar un ambiente de antigüedad ficticio, o valorar la piedra como material natural. Sin embargo, son muchos los que quedan en pie y la gran mayoría de ellos en servicio, esta permanencia se ha conseguido en muchos casos de forma casi definitiva, porque no sólo han resistido al paso del tiempo, sino que también han resistido el aumento de las cargas que circulan por ellos, por ejemplo la mayoría de ellos fueron

diseñados para el paso de las carretas tirados por animales y no para los grandes vehículos que actualmente existen.



Figura N° 3.1: Técnica de dovelas yuxtapuestas.

http://www.ediciona.com/acueducto_romano-dirpi-49306.htm

3.1.2 Evolución y desarrollo de los puentes de piedra con bóveda de Arco

Los puentes de piedra con bóveda de arco como toda obra humana tuvieron su desarrollo, su gran apogeo y un desuso posterior. Se puede afirmar que los puentes de piedra con arcos de dovelas se iniciaron y se desarrollaron con los romanos, produciéndose en el siglo XVIII grandes cambios con respecto a su diseño y proyección; utilizándose éstos últimos conceptos hasta el primer cuarto del siglo XX.

Leonardo Fernández en su libro Tierra sobre el agua: visión histórica universal de los puentes, nos indica que los puentes de piedra con bóveda de arco se realizaron tanto en Oriente y Occidente, dándose una gran evolución y desarrollo en la cultura occidental, el cual se describe a continuación:

Puentes Orientales:

En china existen puentes de piedra de todas las épocas, por ejemplo el puente Zhaozhou, construido en el S. VII, con una luz de 35 metros y poseyendo tímpanos (muros por encima de la bóveda) aligerados mediante arquillos, siendo una característica muy usada en la Edad Media y difundida en Europa en los inicios del S. XVIII. Este tipo de puentes poseían de ciertas características que se mencionan a continuación:

- Los muros tímpanos aligerados por encima de la bóveda del arco.
- El conocido “lomo de camello”, por la presencia de dos vertientes, debido a la rasante elevada en el centro para pasar sobre la clave del arco.
- Ejemplo: puente Cinturón de Jade, el puente Zhaozhou y el Fong-Huan en China.

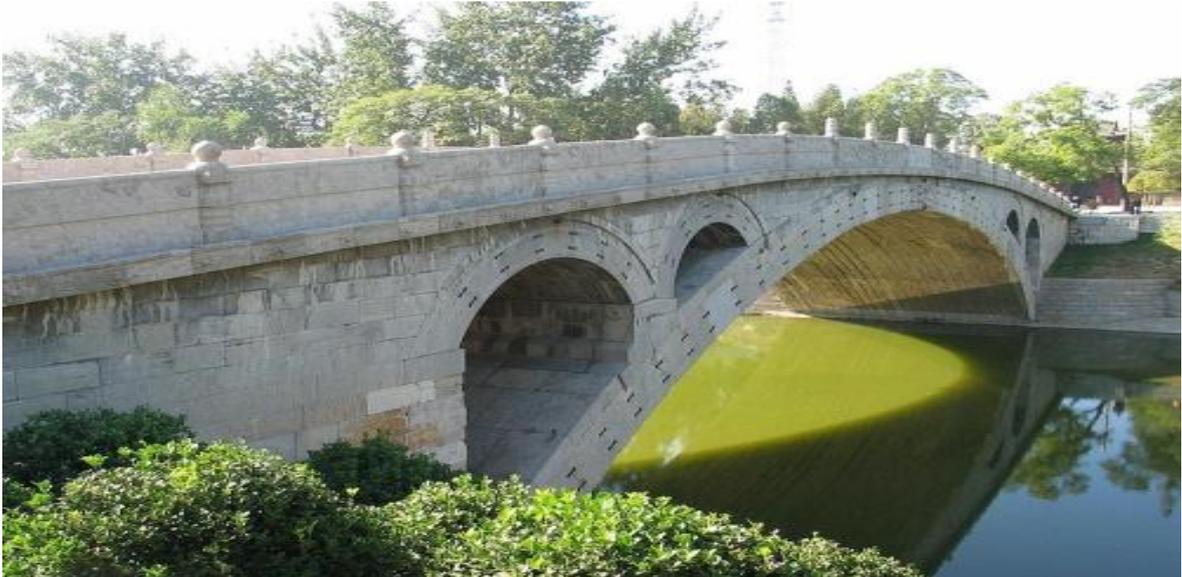


Figura N° 3.2: Puente Zhaozhou con una luz de 35 m., China siglo VII.

<http://perso.wanadoo.es/tecno21/puentes/augusto.html>

Puentes Romanos:

Los romanos son los iniciadores de los puentes de piedra en arco y llegaron a dominarlo y perfeccionarlo. Fue tal su maestría que esta concepción se mantuvo sin muchos cambios importantes hasta el siglo XVIII. Los romanos construyeron muchos puentes de piedra y que actualmente muchos de ellos no conservan su fisonomía original, debido quizás a agentes externos naturales o por tratar de arreglarlos y adaptarlos a condiciones de servicios actuales.

En estos puentes el rebajamiento, que es la relación *flecha/Luz* del arco, es de $\frac{1}{2}$ por el uso del arco de medio punto; en los arcos peraltados esta relación será mayor y en los arcos rebajados será menor. La relación *ancho de pila/luz del arco* en ciertos casos llegaba a ser 1, es decir el pilar era igual de ancha que la luz del arco, teniendo como valor promedio $\frac{1}{3}$ y excepcionalmente esta relación era $\frac{1}{4.3}$ en algunos puentes.

Algunos puentes romanos presentan arquillos de aligeramiento ya sea sobre los muros tímpano o sobre los pilares, con el fin de discurrir los caudales máximos de los ríos para disminuir el empuje del agua y por otra para aligerar la gran masa del conjunto tímpano y pilar. Así mismo poseían tajamares pequeños de poca altura ya sean triangulares y circulares, estos solo se construían hasta el arranque del arco.

Los puentes romanos poseen ciertas características y particularidades las cuales se pueden mencionar:

- La geometría del arco romano es perfecta debido a que sus dovelas son iguales en su mayoría, desde los arranques hasta la clave y en todo el ancho de la bóveda.
- Tienen en su configuración el arco de medio punto, su directriz describe la circunferencia con exactitud.
- Ej. puente de Alcántara, puente de Mérida, etc.



Figura N° 3.3: Puente de Alcántara sobre el río Tago con 194 m. de luz, hecho a base de sillares de roca granítica, construido entre los años 104 y 106 d.c.

http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Alc%C3%A1ntara



Figura N° 3.4: Puente de Mérida con una luz de 790 m., construido entre los años 98 y 117 d.c., forma parte del conjunto arqueológico de Mérida en España.

http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_romano_%28M%C3%A9rida%29

Puentes Medievales:

El estilo románico y gótico prevaleció en la Edad Media, haciendo por lo general que los puentes sean más esbeltos que los puentes romanos y caracterizados esencialmente por el dominio en la bóveda. Se construyeron arcos de todo tipo, como el medio punto, apuntados y rebajados; se conservan aún puentes góticos con arcos apuntados y tajamares que suben hasta la plataforma de rodadura, creando una especie de miradores o balcones en la plataforma del puente. A diferencia de los romanos que construían arcos de triunfo al centro o a los extremos del puente, en esta época se cambiaron por torres de defensa y control. Esto se debe a que en la Edad Media los puentes eran elementos estratégicos en una guerra y debían ser defendidos de ataques o como cierre para una posible invasión.

La relación *ancho de pila/luz del arco* en estos puentes llegaba a valores excepcionales como $1/6.5$ y teniendo $1/5$ como valor promedio. Una clara diferencia con respecto a los puentes romanos que excepcionalmente llegaban al valor de $1/4.3$.

Otro punto para mencionar es que a finales de la Edad Media era muy común que los puentes tuvieran edificaciones (viviendas) sobre sus plataformas y era evidente la dificultad en el paso, pero estas edificaciones se evitaron con diversos edictos de la época, considerando estos edificios poco viables sobre los puentes y los que existían tenían que ser demolidos. Quizás el único puente que mantiene esta peculiaridad es el puente Vecchio en Florencia.

Los puentes medievales nos muestran ciertas características y particularidades las cuales se pueden mencionar:

- La presencia de perfil en lomo de asno, con dos vertientes, cuyo vértice está situado sobre el arco principal.
- Poseían torres de defensa y balcones como una terminación de sus tajamares.
- Ejemplo el puente del diablo, puente vella de Ourense, etc.

En el artículo presentado por Manuel Duran al III Congreso Nacional de la Construcción en España, nos indica que para proyectar un puente en el Medievo, los maestros constructores de obras acostumbraban principalmente a definir las relaciones geométricas del puente, el lugar de construcción, tipo de cimentación según el terreno y la manera de construirla.



Fotografía N° 3.4: Puente Vecchio con una luz de 67 m. sobre el río Arno, construido entre los años 1335 y 1345, Florencia – Italia.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ponte_Vecchio_Firenze.jpg



Figura N° 3.5: Puente Vella de Ourense sobre el río Miño, reconstruido en el siglo XIII sobre las bases de un puente romano del siglo I, su arco principal mide 38 m.

http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_Medieval_de_Orense

Puentes Renacentistas:

El renacimiento represento en los puentes volver a los modelos clásicos, que en este caso era volver al estilo romano. Esto hizo que en esta época los puentes tengan una mezcla arquitectónica de lo clásico con lo moderno.

Una de las características principales de los puentes de esta época fue el cambio de luces en los arcos, variándolos desde el centro hacia los extremos del puente, lo que en algunos casos daba lugar al perfil regularmente en lomo de asno. Pero una de las formas en que mantenían una rasante horizontal consistía en elevar gradualmente el arranque de los arcos de tal manera que la clave de los arcos terminara a la misma altura.

Acorde al artículo de Santiago Huerta sobre el desarrollo histórico de la teoría del arco de mampostería nos indica que **Leonardo Da Vinci** (1452-1519) fue el primero en intentar un estudio mecánico de los arcos. En particular el Códice de Madrid muestra numerosos dibujos de experimentos ideados para comprender la forma en que empujan los arcos y resisten sus estribos. Leonardo desconocía, sin embargo, la herramienta fundamental para estudiar el equilibrio de cualquier estructura: la ley del paralelogramo de fuerzas. De hecho, sus análisis se ven seriamente condicionados por confusas ideas de la mecánica medieval, que ni siquiera dominaba. No obstante, el talento extraordinario de Leonardo se manifiesta con claridad en los ingeniosos ensayos para determinar el empuje de los arcos o para conocer el equilibrio de las dovelas. También le corresponde a él el descubrimiento del mecanismo correcto de colapso de los arcos por formación de articulaciones. Los manuscritos de Leonardo no fueron publicados hasta el siglo XIX y su influencia fue nula en todo el desarrollo posterior.

Por otra parte en el artículo escrito por Manuel Durán y presentado en el III Congreso Nacional de la Construcción en España, nos indica: durante el Renacimiento se publicaron múltiples tratados donde existen recomendaciones acerca de la disposición y construcción de puentes, enfocados sobre todo en su arquitectura, ya que por aquellos tiempos las obras públicas pertenecían al ámbito de la arquitectura. Uno de los autores más representativos podemos mencionar al arquitecto Italiano **León Battista Alberti**, (1404-1472) y su tratado *De ReAedificatoria*, donde en el Capítulo VI del Libro IV nos indica algunas pautas sobre ubicación, composición y construcción de los puentes, del cual podemos citar a continuación:

- Recomienda su construcción en lugares convenientes y factibles que no origine un gasto enorme y se garantice su construcción de por vida. Esto indicaba que debía buscarse vados no tan profundos, ni orillas inseguras, ni suelos inestables, que sean nivelados y firmes.
- La zona elegida en el río no debe presentar remolinos, ni ubicarse en una curva donde se acumulen distintos residuos sólidos y malezas que fueron arrancados de los campos en temporada de lluvias. Esto con el fin de evitar obstruir los arcos y dar un libre flujo del agua, ya que el río puede levantar su nivel y ejercer una presión que afecte al puente.

- La cantidad de arcos presentes en un puente sería impar y por tanto los pilares serían pares, de esta manera se evitaría construir en el centro del río y no afectaríamos su estabilidad. Además no se modificaría el flujo del agua en su cauce central donde discurre más rápido y con más fuerza,
- Los pilares deben construirse con piedras grandes y de muy buena calidad, proveer a los pilares de una altura apropiada para que la parte frontal este por encima del nivel de crecidas.
- Plantea reglas de diseño donde involucra el ancho del pilar y la luz del arco, relacionando la altura del puente y el espesor de las dovelas del arco abovedado (arcadas). Así tendríamos que el espesor del arco sería $1/10$ de su luz y, la luz del arco estaría comprendido entre 4 y 6 veces el espesor del pilar y este pilar $1/4$ de su altura.
- Insiste también en la necesidad de diferenciar el esqueleto resistente o estructura del resto de la edificación. Además advierte sobre la conveniencia de cargar adecuadamente la bóveda para lograr aumentar considerablemente su estabilidad.
- Admite la posibilidad de utilizar un arco rebajado cuando la situación lo permita, siempre en cuando se refuerce adecuadamente los estribos o pilares.

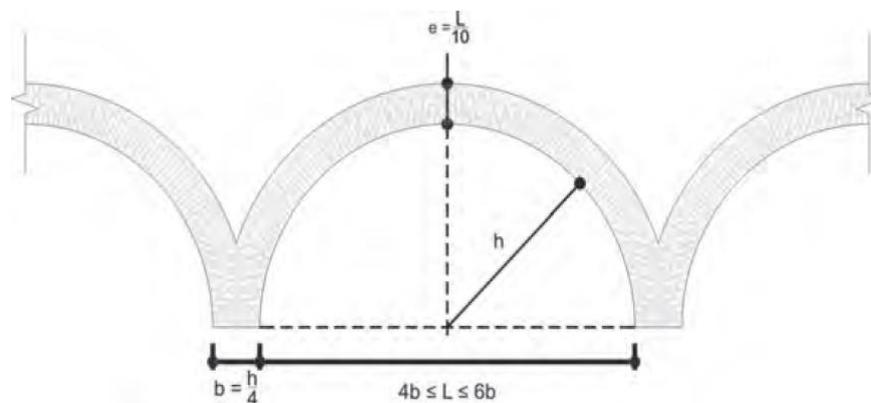


Figura N° 3.6: Relaciones dimensionales en un puente arco según Alberti.

Fuente: Puentes de Arco de Ladrillo en la región del alto Cauca-Colombia. Jorge Galindo y Jairo Paredes.

Estas recomendaciones fueron ampliamente usadas hasta finales del S. XVII, ya sea igualmente o con pequeñas variaciones. En la transición del S. XVII y el S. XVIII se generó un fuerte desarrollo en las vías de comunicación de los países europeos y esto incluía la construcción de varios puentes, en este tiempo la técnica francesa era la más adelantada y se empezó a tomar como modelo a seguir en los demás países europeos.

Así es como en el año 1714 aparece un primer tratado dirigido acerca de la construcción de puentes, escrito por el francés **Henri Gautier** titulado expresamente *Traité des ponts*. En su capítulo IV describe que los proyectos deben empezar con la elaboración de los planos de planta y alzado, indicando el lugar de construcción, sus orillas y sus accesos o calles que llegan al puente. El dibujo del puente sería planteado con su eje longitudinal ortogonal a la corriente del río, para evitar un posible esviaje en planta que hagan dificultoso el corte y la talla de las piedras para construir el puente. Posteriormente se continuaría con el estudio de la solidez del terreno mediante adecuados sondeos de penetración con taladros metálicos o pilotes de madera, para desarrollar el plano de cimentación y elegir un tipo de cimentación adecuado.

Recopilar información de las mayores inundaciones de las que se tuviese registro, informados sobre el caudal del río en temporada de lluvias fuertes, sugiere realizar arcos lo suficientemente grandes para poder discurrirlas, para lograr esto indica que debe haber tres pies libres entre la clave del intradós de las bóvedas y la cota de la mayor avenida. También se siguió usando el arco de medio punto pero cada vez más frecuente el arco carpanel y el escarzano, aunque éste último en menor medida y solo se haría más utilizado empezando la segunda mitad del siglo XVIII.



Figura N° 3.7: Puente de la santa trinidad (Puente de la Trinitá) del siglo XVI, sobre el río Arno en Florencia, sus dos arcos laterales miden 29 m. y el central mide 32 m., es el puente elíptico más antiguo.

http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_Santa_Trinidad



Figura N° 3.8: Puente Nuevo (Puente Neuf) del siglo XVI sobre el río Sena, con una longitud de 232 m. repartido en dos tramos por una isla que cruza., fue el primer puente de piedra construido en París.

http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_Nuevo_%28Par%C3%ADs%29

Siglo XVIII:

A principios del siglo XVIII la ingeniería y la arquitectura seguían siendo un mismo oficio, pero en este siglo estas dos profesiones empiezan a separarse, empezándose sobre todo en Francia, donde se creó en 1716 el cuerpo de ingenieros de Ponts et Chaussés y en 1747 se fundó la escuela del mismo nombre. Aquí la ingeniería y con ella la técnica constructiva se desliga de las tendencias clásicas imperantes de la arquitectura; siguiendo esta corriente los demás países europeos. Además que esta escuela contribuyó en forma destacada a sistematizar el análisis de experiencias y la transmisión de conocimientos adquiridos ya sean por investigaciones experimentales y teóricas. Si bien este siglo es conocido como el siglo de las luces debido al gran desarrollo de conocimientos, es de vital importancia para la ingeniería porque es en este siglo donde se va a poner las bases de la Resistencia de Materiales y Elasticidad.

En la primera mitad del siglo XVIII los primeros ingenieros franceses construyeron una serie de grandes puentes de piedra perfectamente compuestos y bien proyectados, estos representaron un claro avance formal y técnico sobre los puentes de los siglos anteriores. Un paso importante en el ámbito de la estructuras abovedadas lo constituyen dos trabajos de **Philippe de la Hire**, quien en un primer trabajo logró exponer el mecanismo que mantiene en su sitio cada una de las dovelas del arco y en su segundo trabajo desarrolló una explicación para establecer el tamaño de los estribos encargados de soportar el peso de las mismas.

En la segunda mitad del siglo XVIII, el ingeniero francés de ascendencia Suiza **Jean Rodolphe Perronet**, 1708 – 1794, planteo y sugirió una serie de innovaciones en la proyección y construcción de los puentes de piedra. Fue fundador del *L'Ecole Ponts et Chaussés* la primera escuela de ingeniería del mundo, además sus aportaciones teóricas al cálculo de las bóvedas fueron importantes en su momento. Perronet innovo en el diseño de los pilares y el rebajamiento de los arcos. Disminuyo el ancho de los pilares desde $1/5$ hasta $1/10$ de la luz y con ello consiguió que el obstáculo que todo puente supone en el cauce del río se reduzca en gran parte, así como también el peligro de socavación que era la causa del colapso de algunos puentes, pero esta disminución hizo que la construcción de todos los arcos sea simultánea.



Figura N° 3.9: Puente de la concordia (Le Pont de la Concorde) con 153 m. de luz, construido entre los años 1787-1791. Diseñado y construido por Perronet, al inicio se llamaba Luis XVI, luego puente de la revolución y finalmente de la concordia.

http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_la_Concordia_%28Par%C3%ADs%29

Siglos XIX y XX:

En el siglo XIX los puentes de piedra perdieron cierto protagonismo ganado siglos antes, esto debido a la aparición de nuevos materiales. Además no solo fue la aparición de los nuevos materiales como el hierro y el concreto armado, sino que los ingenieros fueron dominando el cálculo teórico de las estructuras mediante la resistencia de los materiales y la teoría de estructuras, el cual hizo conocer mejor su comportamiento.

La aparición del ferrocarril en el siglo XIX, da lugar a los puentes como los grandes viaductos romanos de gran altura y longitud, volviéndose a usar soluciones muy parecidas e incluso copiarlas a los puentes y viaductos romanos. Ya que el trazado ferroviario es más rígido que los carreteros, y requieren pendientes máximas del 3% y curvas con radios grandes.

El último de los grandes ingenieros constructores y estudiosos de los puentes de piedra fue el francés **Paul Sejourné** (1851 – 1939), construyó gran cantidad de puentes con luces importantes y de todas las formas posibles tales como: grandes arcos, viaductos de ferrocarril de gran altura, arcos rebajados múltiples, etc. El más original y quizás el más conocido de los puentes de Sejourné es el viaducto de Fontpedrouse,



Figura N° 3.10: Viaducto de Fontpedrouse, cruza el río Tet, posee arcos de 17 metros de luz y un arco ojival de 30 m. de luz, terminándose de construir en 1908.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pont_sejourne_avec_train.jpg

3.2 Criterios de Diseño de los Puentes de Mampostería en Arco: siglos XVII, XVIII, XIX.

Los primeros ingenieros en edificar puentes concebían a éstos principalmente por el tipo de estructura, el material y la tecnología casi invariable para construirlos de forma duradera, como son los puentes de piedra. A finales del siglo XVII e inicios del siglo XVIII surgen una serie de teorías matemáticas, que se supone un gran impulso para todas las ciencias. Los puentes arco de mampostería no fueron ajenos a estos cambios y sufrieron grandes innovaciones en su proyección y construcción durante el siglo XVIII, se desarrollaron tratados analíticos y se experimentaba con modelos reales o a escala; y fruto de estos esfuerzos fueron la teoría plástica y elástica.

Durante los siglos XVIII y XIX aparecieron en la literatura ingenieril una gran cantidad de fórmulas que permitían predimensionar las bóvedas de mampostería de forma sencilla. Casi la totalidad de los grandes ingenieros de la época tenían su propia propuesta en forma de fórmula para obtener una aproximación de las dimensiones de la estructura. Estas reglas de proyecto formuladas en la observación de estructuras existentes y de la propia experiencia de los autores fueron utilizadas para predimensionar un gran número de estructuras, que a partir del siglo XIX eran comprobados mediante la

teoría de estabilidad de bóvedas primero y, la teoría de la resistencia de materiales después. Entonces por aquel tiempo quizás la única manera de trabajar en los puentes consistía simplemente desarrollar dos pasos, el primero consistía en predimensionar la bóveda (directriz y espesor de bóveda), cimentaciones, pilares y estribos, y el segundo en comprobar el diseño mediante alguna de las teorías existentes

3.2.1 Hooke y la Catenaria Invertida

Acorde a la tesis doctoral de Santiago Huerta; a finales del siglo XVII Robert Hooke y Philippe de la Hire de manera muy independiente empezaron a trabajar en sus investigaciones para dar respuesta a la interrogante que se planteaba de ¿cuál sería la forma que debe tener un arco?, en Inglaterra es Robert Hooke quien por el año 1670, plantea por primera vez en términos científicos el problema del arco. Unos años más tarde da la respuesta y propone la catenaria como figura ideal: “Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, se sostendrá el arco rígido pero invertido”, esto lo escribió en forma de anagrama al final de uno de sus libros para mantenerlo encriptado. La idea de Hooke de entender el comportamiento de los arcos por analogía con el comportamiento de los cables colgantes es una de las más geniales de la historia. Años después en 1697, Gregory añadió, la forma ideal de un arco sería en efecto la de una catenaria invertida y si el resto de arcos se sostienen es porque hay una catenaria en su interior.

Este concepto permite calcular arcos utilizando modelos colgantes sencillos y fue aplicado por los ingenieros ingleses del siglo XVIII en la construcción de puentes y recogido por Thomas Young en 1845 en su *Course of lectures on natural philosophy and mechanical arts*. En Europa continental tuvo menos difusión aunque se cita en tratados de varios autores franceses y alemanes.

Fotografía de la catenaria de Hooke,

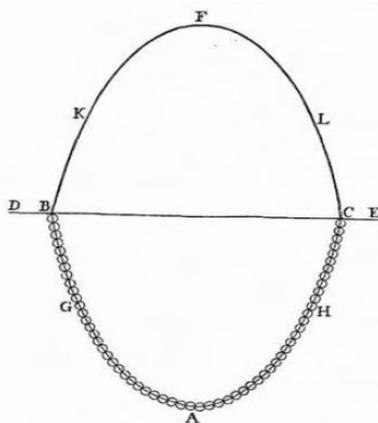


Figura N° 3.11: El principio de la catenaria invertida de Hooke.

Fuente: Arco, Bóvedas y Cúpulas de Santiago Huerta.

3.2.2 Philippe de La Hire y la Teoría de la Cuña

Así mismo Santiago Huerta nos indica, que en Francia, Philippe de la Hire emplea un enfoque distinto para tratar de entender la mecánica del arco de dovelas. Utiliza la teoría de la cuña, imaginando que las dovelas no presentan rozamiento entre sí. En su *Tratado de Mecánica*, aborda el problema del cuál ha de ser el peso de las dovelas para que la estabilidad sea posible, para hallar la relación entre sus pesos emplea el polígono funicular. Sin embargo, la hipótesis de ausencia de rozamiento entre las dovelas lleva a resultados absurdos, como que un arco semicircular para ser estable precisaría de una carga infinita en sus arranques. La Hire era consciente de ello y afirma: "(...) no es necesario guardar la proporción que se acaba de determinar en todo su rigor, basta con tenerla en cuenta".

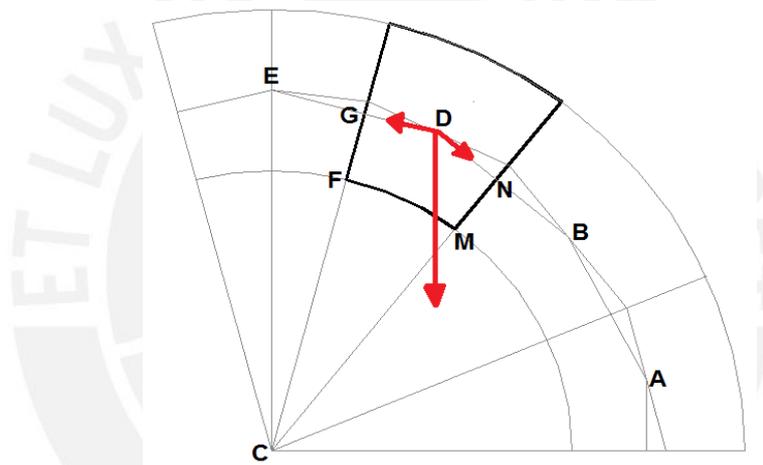


Figura N° 3.12: Equilibrio de un arco formado por dovelas infinitamente pulidas, La Hire 1695.

Fuente: *Actas de II Congreso de la Historia de la Construcción 1998*, Santiago Huerta.

Su siguiente trabajo es el más importante, publicado en 1712 en su memoria sobre "*La Construcción de las Bóvedas en los Edificios*", donde establece por primera vez un procedimiento para calcular los estribos de los arcos. Observa que cuando los estribos son insuficientes el arco o bóveda se rompe hacia la mitad entre la clave y los arranques; supone entonces que la mitad superior del semiarco MLEF en la figura N°3.13 actúa como una cuña que se desliza sin rozamiento sobre el plano LM. Esto produce una fuerza en L que tiende a volcar el estribo IBHS del que forma parte también la parte inferior de la bóveda por debajo de la junta de rotura y el problema que se plantea es el de calcular el espesor de arco HS. La Hire descompone el empuje en dos fuerzas que actúan en la dirección LH, que no afecta a la estabilidad y otra en dirección perpendicular LD que es la que tiende a volcar al estribo. El procedimiento de análisis es lo que hoy

llamaríamos “límite” o “a rotura”; imagina un modo de colapso y establece el equilibrio entre las partes. El modo de colapso es incorrecto (no tiene en cuenta el rozamiento entre las dovelas) pero los resultados van casi siempre a favor de la seguridad.

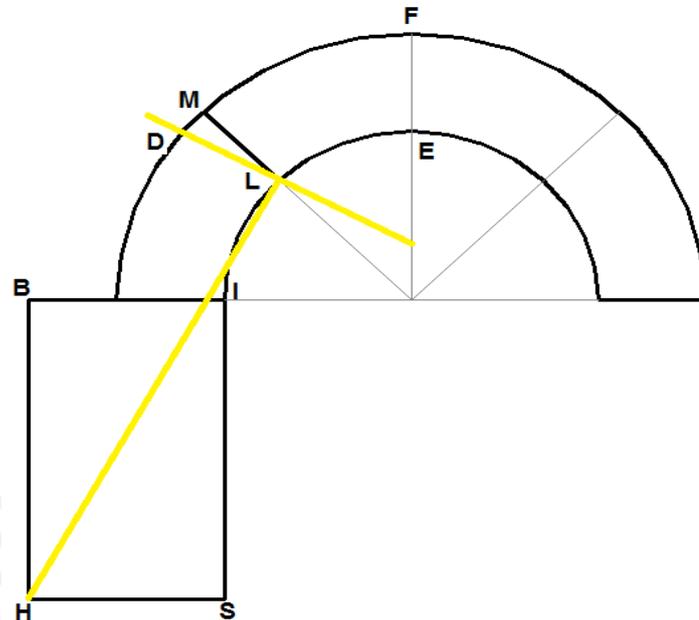


Figura N° 3.13 Cálculo de los estribos por el método de la cuña, para un arco de medio punto, La Hire 1712.

Fuente: Actas de II Congreso de la Historia de la Construcción 1998, Santiago Huerta.

No obstante, aunque la hipótesis de La Hire daba muy buenos resultados prácticos, era evidente que el colapso de los arcos no se producía por deslizamiento, sino por vuelco, como lo demostraban la ruina de algunas bóvedas y los ensayos sobre modelos. Los buenos resultados prácticos y la sencillez del modelo matemático hicieron que las hipótesis de ausencia de rozamiento y de la cuña se usaran casi un siglo.

3.2.3 Jean Rodolphe Perronet

Leonardo Fernández en su libro tierra sobre el agua nos indica, que el francés J. R. Perronet fue el ingeniero más trascendental del siglo XVIII, autor de algunas obras públicas más importantes de su época, como el Puente de Neully. Su técnica de construcción ejerció una corriente fuerte sobre la evolución del diseño en los puentes del siglo XVIII y la primera mitad del siglo XIX.

Entre sus innovaciones más significativas que modificó la fisonomía de los puentes podemos mencionar los siguientes:

- Disminuyo el ancho de las pilas desde $1/5$ de la luz del arco hasta $1/10$, en algunos puentes cambio la forma tradicional de las pilas, formadas por un tabique del mismo ancho de la bóveda y las sustituyo por columnas aisladas.
- Aumento considerablemente el rebajamiento de los arcos, llegando al valor de $1/15$ de la luz.
- Utilizo en sus puentes los arcos escarzanos (de un solo centro) y con esta forma se rompe la continuidad entre pila y arco, distinguiendo claramente ambos elementos, al diferenciar un quiebre entre la directriz del arco y el paramento (muro) vertical de los pilares. Ya que normalmente se utilizaban los arcos rebajados como eran los carpaneles (de varios centros) o elípticos.

La innovación de reducir considerablemente el ancho de los pilares a través de la compensación de los empujes de los dos arcos que llegan a cada una de ellas, de forma que si estos dos arcos son iguales, la resultante del peso propio sobre el pilar es vertical. Por tanto solo existirá descompensación de empujes para las cargas de tráfico asimétricas, es decir cuando un arco está cargado y otro no, la inclinación de la resultante de esta fuerza es muy pequeña, debido a la relación entre el peso propio y la carga de tráfico en los arcos de piedra.

Compensar en los pilares los empujes de peso propio de los arcos plantea dos problemas: en primer lugar es necesario construirlos simultáneamente para evitar una descompensación de empujes durante la construcción y en segundo lugar si se hunde un arco arrastra a todos los demás ya que no tiene la capacidad para soportar el empuje descompensado de uno de los arcos sin el contraresto del contiguo. La solución que Perronet dio a este problema, consistió en crear dos tipos de pilares, cada cierto número de pilares estrechos se construiría un pilar grueso y de esta manera sirviera de freno al hundimiento sucesivo de los arcos y solo se limitaría a los comprendidos entre los pilares gruesos.

Posteriormente en 1879 **Castigliano**, supuso una revolución en el cálculo de arcos bajo la visión de la teoría elástica, desarrollando los teoremas energéticos de la mínima energía y aplicándolos al cálculo de la línea de presiones. Sus cálculos seguían respetando los principios de la teoría elástica, pero introduciendo la variante de la no linealidad, esta no linealidad deriva de que sus cálculos se basaban en un método iterativo en el que, para cada posición calculada de la línea de presiones, de cada sección se descontaba la parte traccionada de la misma (cálculo no lineal), hasta llegar a una línea de empujes que estuviera totalmente contenida en el tercio central de todas las secciones modificadas.

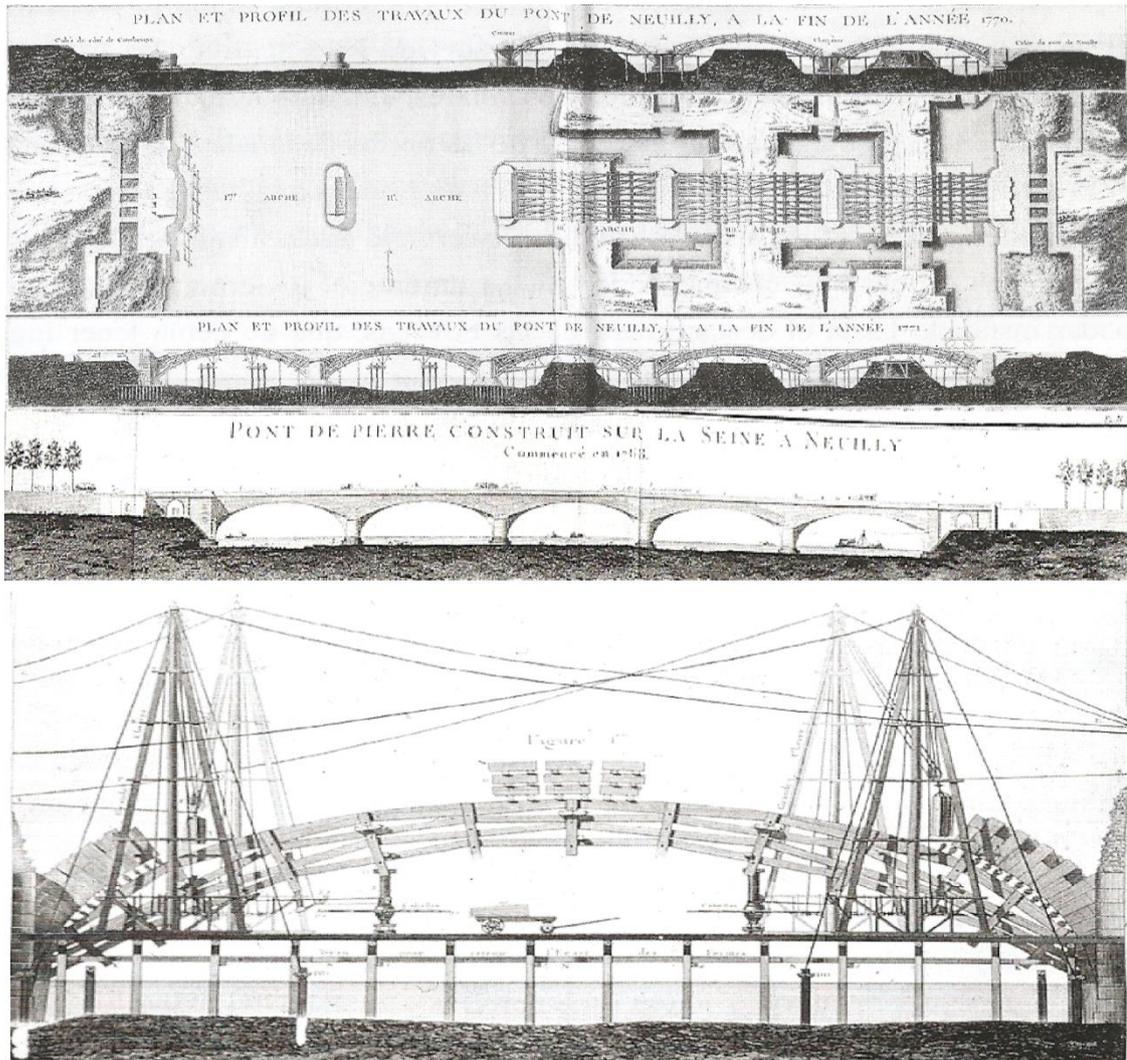


Figura N° 3.14 Proceso constructivo del Puente de Neuilly de Perronet, así también el detalle de las máquinas utilizadas y la colocación de las piedras. El descimbrado simultáneo se hizo 1772 en presencia del rey de Francia.

Fuente: La construcción de puentes en el siglo XVIII, J.R. Perronet.

3.3 Elementos de los Puentes de Mampostería de Piedra en Arco

3.3.1 Elementos Componentes de los Puentes de Mampostería

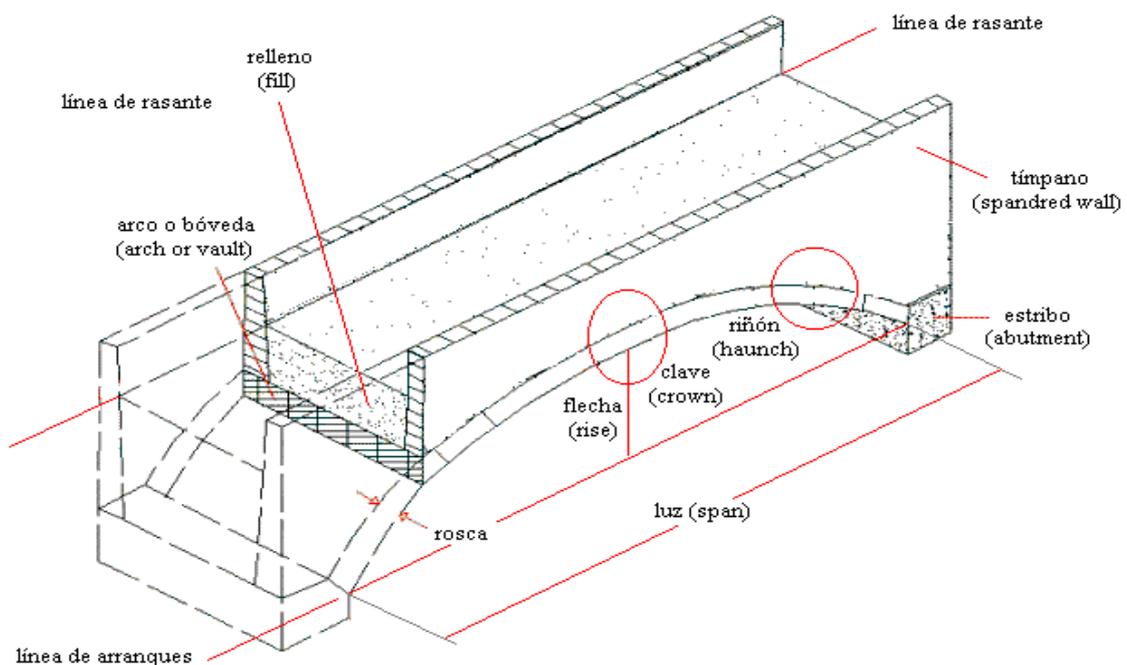
Los dos componentes básicos en un puente con bóveda de arco son: el arco o bóveda y el relleno. El arco es el elemento resistente y el relleno tiene como función principal la de proporcionar la altura de tierras suficiente para materializar una superficie horizontal (calzada) por donde ha de transcurrir el tráfico.

El **arco** o **bóveda** puede realizarse colocando bloques de piedra regulares llamados dovelas o, mediante una o varias hileras de ladrillos concéntricos. La **clave** (Keystone) es la dovela central que ayuda a la disposición simétrica en el caso de arcos conformados por dovelas, normalmente suele ser la de mayor tamaño y provee cierta estabilidad al

arco. En algunos casos el espesor (canto) de la rosca en estos arcos es variable, ya sea con respecto a sus arranques y en el ancho de bóveda. El bloque en cada **estribo** sobre el que descansa la última dovela o ladrillo en el extremo del arco se denomina **salmer** (skew-back). La superficie del salmer desde la que parte el arco se llama **arranque** (springing) y las líneas inferior y superior del contorno del arco se denominan **intradós** y **extradós** respectivamente.

La **clave** (Crown) es el sitio más elevado en un arco y, las zonas más bajas del arco dificultosamente delimitadas se denominan **riñones** (haunches). La línea horizontal imaginaria que une los dos extremos del arco se llama línea de arranque, siendo la **flecha** (rise) la altura libre máxima de un arco o bóveda, medida entre la línea de arranque y la clave. A su vez, la longitud de la línea de arranque, es decir la distancia horizontal entre los arranques de un arco o bóveda, es la **luz** (span) del arco.

Las paredes que retienen el relleno sobre el extradós del arco hasta el nivel de calzada se denominan paredes de enjuta o **tímpanos** (spandrell walls). Estas paredes pueden pasar a convertirse en **aletas** (wing walls) en la zona de apoyos. Las aletas son los muros de contención del terraplén en la zona de estribos. La dirección en planta de las aletas no ha de ser necesariamente paralela al eje de la vía, sino que puede ser oblicua o incluso normal a este eje. Por encima de las paredes de enjuta se levantan los **pretilos** (parapets), que constituyen un elemento de protección para los caminantes y frente a posibles colisiones de los vehículos. Por debajo de las paredes de enjuta, no es necesario mencionar la relevancia de las **pilas** como elementos de soporte en los puentes de varios arcos.



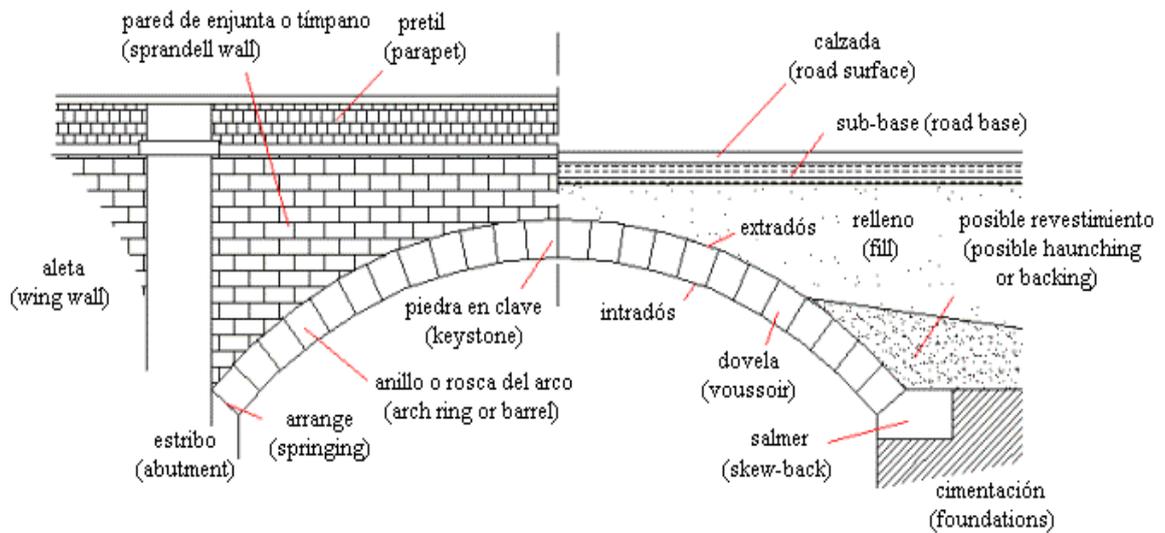


Figura N° 3.15: Partes Principales y geometría de un puente abovedado en arco.

Fuente: Ensayo hasta rotura de un puente arco de obra de fábrica construido en laboratorio. German de Marco

Las **cimentaciones** en los puentes abovedados en arco presentan un gran número de tipologías y materiales de construcción. Pueden ser superficiales, profundas, sobre roca, sobre emparillado de madera y cama de grava, etc. Conocer la tipología y materiales con los que la cimentación está construida, así como su estado y las propiedades geotécnicas del terreno, resultan imprescindibles para el análisis del puente, y puede ser una causa importante de incertidumbre.

Normalmente, la parte exterior de la bóveda sobre la que apoyan los tímpanos se resalta del resto disponiendo una mampostería de mejor acabado y de mayores dimensiones que la de la verdadera bóveda. Esta zona se denomina **boquilla** y sus dimensiones no deben ser confundidas con las de la bóveda estructural. Esta posible confusión ha supuesto un problema en ensayos de puentes reales in situ, en los que la única parte donde el espesor de la bóveda es visible es precisamente en la boquilla, lo que impide conocer, al menos de antemano, el verdadero espesor de la rosca del arco que desempeña la función resistente.

Aunque no tiene una acepción clara, el término **relleno** (fill) engloba todo el material que se encuentra situado entre la bóveda del arco, tímpanos, estribos y superficie de rodadura. Por lo tanto, bajo este término se engloba una gran diversidad de materiales en estado y condición variable. No sólo es importante conocer el tipo y propiedades de los materiales que conforman el relleno, sino también el estado en el que se encuentran (su grado de compactación, saturación y confinamiento). El desconocimiento del relleno ha

provocado, en ocasiones, que la contribución del mismo se olvide de evaluar la capacidad portante de los puentes abovedados en arco.

Frecuentemente existe una parte del puente adicional entre el arco y el relleno. Ésta puede estar en forma de anillos de fábrica de menor calidad sobre el arco o, más habitualmente, en forma de **revestimiento** (relleno sólido, haunching or backing) sobre los riñones y estribos, en la zona de arranque de la bóveda. Suele tratarse de material menos competente, pero cimentado, que proporciona soporte adicional por detrás de la estructura. Este tipo de relleno sólido puede alcanzar una rigidez muy parecida a la de la propia bóveda.

Cuando los puentes han de salvar luces importantes (superiores a doce metros), su estructura interna se suele ejecutar a base de tímpanos internos formando un costillaje de fábrica sobre la bóveda. De este modo se aligera y al mismo tiempo se rigidiza la estructura. Además, este tipo de construcción reduce las presiones que el relleno ejerce sobre los tímpanos exteriores. En la Figura N° 3.16, se muestran las dos posibles estructuras internas más habituales. Las paredes suelen ser de 45 cm de grueso y acostumbran a estar separadas cada 60 cm, de manera que se puedan cubrir con losas de piedra sobre las cuales descansa la calzada.

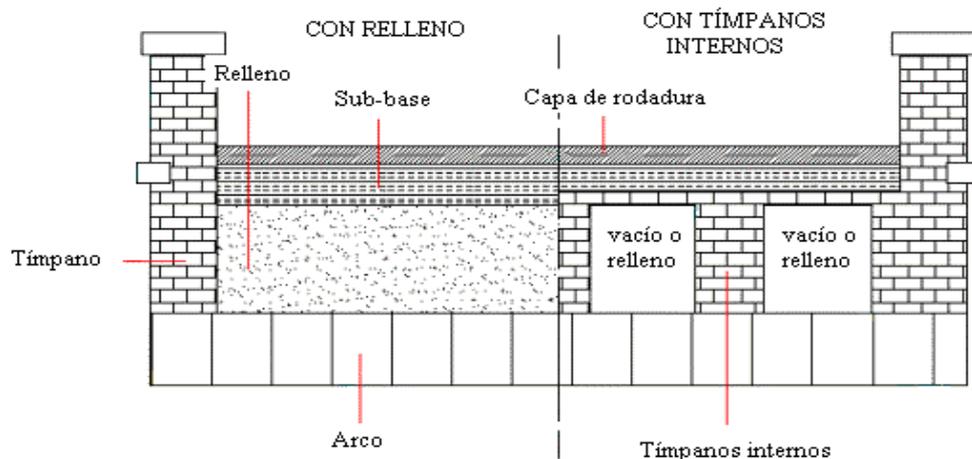


Figura N° 3.16: Sección transversal típica de un puente con bóveda de arco.

Fuente: Ensayo hasta rotura de un puente arco de obra de fábrica construido en laboratorio. German de Marco

Con lo descrito anteriormente, podemos ver que una de las características diferenciadoras de los puentes con bóveda de arco frente al resto de tipologías, es la gran diversidad de materiales que se utilizan en la estructura y la variabilidad de los mismos, incluso dentro de un mismo elemento estructural.

3.3.2 Materiales Constituyentes en los Puentes de Mampostería

Básicamente los materiales empleados en un puente de piedra son la mampostería y el material de relleno. Teniendo en claro que la mampostería está compuesto por la piedra, con dimensiones más o menos regulares acorde a una disposición geométrica, y unidos entre sí por un mortero de pega o argamasa, constituido esencialmente por una mezcla de arena y cal en proporciones variables. Aparte de la piedra, se ha utilizado también materiales como el ladrillo o el concreto en masa para la construcción de los puentes arco, el ladrillo es un pequeño sillar que se usa para edificar arcos de dovelas yuxtapuestas; poseyendo una morfología similar los puentes de ladrillo y piedra.

La Piedra

La piedra es un material natural más común que ha sido usado desde la antigüedad, tanto en la construcción como en otras áreas, en especial con aquellas obras de significado histórico que marcaría un testimonio de la época, no obstante constituye un material estructural para la construcción de elementos monolíticos o formado por bloques o sillares sobrepuestos.

La durabilidad en una estructura ha sido siempre un problema, debido a las características del material constituido o las malas condiciones de mantenimiento, en nuestro caso el material es la piedra con que están hechos los arcos, tímpanos y pilares de un puente con bóveda de arco. La durabilidad y la facilidad de ser trabajadas han sido dos propiedades importantes para el tipo de piedra a usar en los elementos estructurales de una obra, y más aún las piedras que existieran en el entorno de la obra. Además fue la durabilidad un factor considerado más importante que la resistencia, aunque las dos propiedades estén relacionadas por la densidad del material, éste no fue un factor predominante para la elección como si lo tuvo la capacidad de resistir los efectos de intemperismo (ciclos de hielo y deshielo), meteorización (alta contaminación especialmente en zonas urbanas) y la erosión tanto del viento como del agua. En la actualidad la protección de la piedra tiene la finalidad de proveer a la superficie expuesta a la intemperie una capa hidrorrepelente.

El mortero

Se llama mortero o argamasa al elemento que se dispone entre las piedras o ladrillos, tratando de proporcionar cierta adherencia y continuidad entre ellas. Los romanos llegaron a fabricar morteros de gran calidad e inventaron el mortero hidráulico que fragua en ausencia de aire, añadiendo polvo de puzolana, esto es un material fino de origen volcánico que reacciona directamente con la cal, esto da lugar a un endurecimiento

mucho más rápido y a un importante aumento de resistencia e impermeabilidad y durabilidad, esto facilitó el desarrollo del primer concreto.

Las mamposterías de los edificios antiguos están generalmente unidas con morteros de cal y arena, lo que les confiere ciertas propiedades particulares. La cal adquiere resistencia por un proceso de carbonatación que se da por el contacto con el aire. El mortero es el elemento más débil de la mampostería o el menos rígido, se requieren de varios años para que un mortero de cal, en el interior de un elemento masivo, fragüe totalmente. Esta situación confiere a los elementos estructurales cierta capacidad de deformarse y adaptarse a cambios de forma. Por eso la deformación de retracción por secado que experimenta la mampostería se debe al mortero.

Según la tesis doctoral de José Martín-Caro, el mortero tiene 3 misiones dentro de la mampostería:

- ✓ Rellenar las juntas impidiendo el paso del agua.
- ✓ Regularizar el asiento entre bloques y repartir uniformemente las cargas.
- ✓ Colaborar en su caso, a conducir las solicitaciones horizontales hasta la cimentación.

El Material de Relleno

En la gran mayoría, el relleno se encuentra situado entre la bóveda de la mampostería, tímpanos, estribos y superficie de rodadura. Por lo general el relleno estaba conformado por cualquier material que se encontrara a mano en el lugar y momento de la construcción del puente, por lo general está era del terreno extraído durante la excavación de las cimentaciones y conformado por la composición de suelo negro, piedra de canto rodado y cascajo. La constitución y calidad de los materiales del relleno oscila mucho y no están muy seleccionadas. La posibilidad que el relleno presente una resistencia elevada como resultado no sólo de su composición, sino también por el alto grado de compactación que puede alcanzar con los años.

Los rellenos pueden presentarse entre un relleno cementado o sólido y un relleno suelto compactado, el cambio entre uno y otro no se efectúa de forma gradual. El relleno cementado suele encontrarse en la zona de unión entre bóveda y pilar o bóveda y estribo, salvo algunas excepciones este tipo de relleno está presente a todo lo largo y ancho de la estructura, como por ejemplo en la mayoría de los puentes romanos en forma de revestimiento sobre la zona cercana a los arranques de la bóveda, lo conocemos como el concreto ciclópeo cementado o el llamado concreto romano. El relleno suelto compactado, es aquel formado por terrenos más o menos granulares (arenas o arcillas) que se sitúan en zonas cercanas hacia la clave de la bóveda. Teniendo el primero un comportamiento muy cercano a los materiales utilizados en la mampostería

Para evaluar el estado del material del relleno y la relación que pueda existir con los otros elementos estructurales, se debe tener en cuenta tres variables principales:

- ✓ *Grado de saturación:* la presencia de agua en el relleno modifica, por una parte, el peso del mismo y por tanto el valor de la carga gravitatoria; y por otra parte, el conjunto de presiones que se movilizan sobre el arco (el trasdós del arco) cuando éste se deforma. Además la presencia y circulación de agua es el peor enemigo considerado para la durabilidad de estas estructuras, ya que provoca el lavado de sus juntas y el crecimiento de vegetaciones.
- ✓ *Grado de compactación:* sobretudo en el caso de rellenos sueltos, este parámetro es de suma importancia al momento de evaluar el reparto de cargas y los empujes movilizados sobre la bóveda (el trasdós de la bóveda).
- ✓ *Grado de confinamiento:* el confinamiento es la restricción a la deformación transversal del relleno. Para que el terreno pueda efectuar un adecuado reparto de las cargas, llegue a movilizar los empujes activos y pasivos que estabilizan la bóveda, y proporcione una superficie de paso estable, es necesaria la restricción de la deformación lateral del relleno. Esta función de contención deberán realizarla los tímpanos o muros de enjuta, de forma que se asegure un grado de confinamiento apropiado.

La Mampostería

La combinación de piedras con el mortero, da lugar a la mampostería, en donde el mortero cumple múltiples funciones, como llenar los huecos entre las piedras, propiciar una mejor y más uniforme transmisión de cargas en el elemento constructivo y permitir el posicionamiento deseado de las piedras.

Sin embargo, sus propiedades estructurales dependen fuertemente de los materiales componentes, además de las características mecánicas que posean. La principal división es entre la mampostería organizada o con aparejo, y la mampostería irregular, en que las piedras se colocan sin labrar o casi distribuidas en forma irregular en una matriz de mortero. Son comunes también los elementos en que las caras aparentes tienen un aparejo regular y el interior es de ciclópeo, esos tipos de mampostería son difíciles de identificar a simple observación y se requieren de sondeos para determinar su composición.

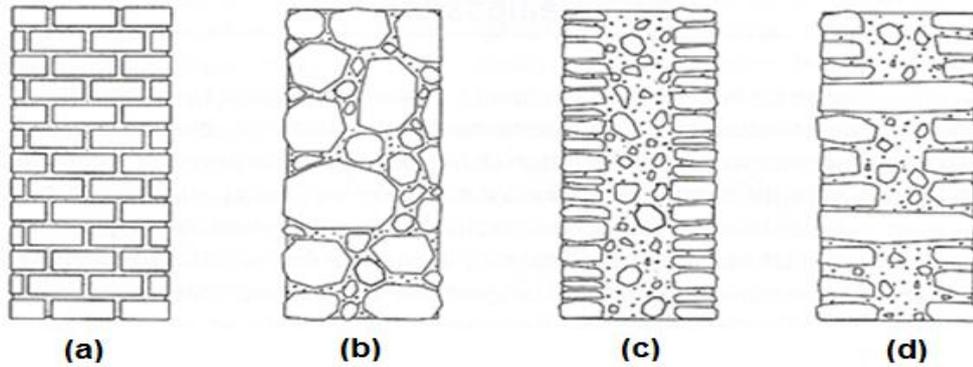


Figura N° 3.17: Algunas Modalidades de Mampostería, a) Mampostería de ladrillo, b) Mampostería de piedra irregular, c) Con paramento regular, desconectado del interior, y d) Con piedras de amarre.

Fuente: Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos, Roberto Meli.

3.3.3 Elementos Estructurales de los Puentes de Mampostería

El Arco

El arco o bóveda es el principal elemento resistente del puente, que gracias a su forma geométrica resiste las cargas que actúan sobre él, mediante un mecanismo resistente donde predominan las compresiones, es por tanto la estructura más adecuada para materiales aptos que resisten compresiones, porque las tracciones se pueden evitar o reducir al mínimo.

Los arcos de piedra están confeccionados con sillares o bloques de piedra con juntas de pequeño espesor, mientras que los arcos de ladrillo incluyen una gran diversidad de piezas y ligantes. Estos dos materiales dieron lugar a diferentes tipos de aparejos a la hora de ejecutar la bóveda o el arco, como lo muestra la figura N° 3.18

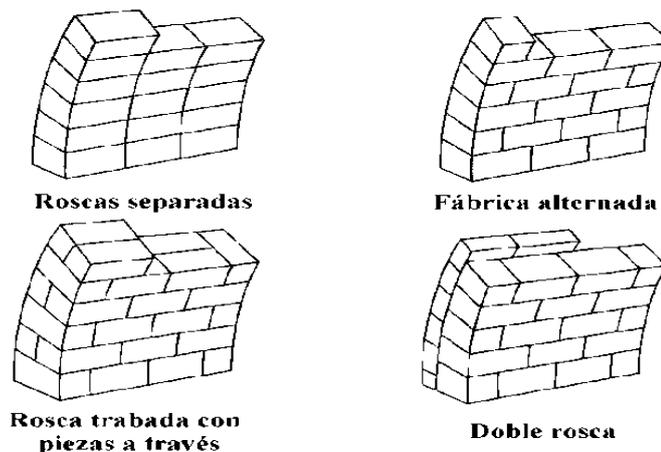


Figura N° 3.18: Tipos de aparejos en bóvedas de puentes de mampostería.

Fuente: Estudio del comportamiento estructural de dos puentes de fábrica, Sergio Espejo.

Según la geometría de la rosca del puente, los tipos de arcos más comunes y representativos tendremos:

- Arco de medio punto o semicircular: arco donde la relación flecha y luz es de un medio ($1/2$). La gran mayoría de los arcos romanos son semicirculares.
- Arco escarzano o rebajado: arco formado por un segmento circular menor que la semicircunferencia.
- Arco apuntado: arco compuesto por dos arcos de circunferencia de igual radio, no son tangentes en la clave y son menores que $1/4$ de circunferencia. Es la forma habitual presentada entre los puentes medievales.
- Arco elíptico: arco cuya directriz forma una semielipse con el eje mayor horizontal.
- Arco parabólico: arco cuya directriz es una parábola.

Acorde a la forma que presenta el intradós de la bóveda se distinguen diversas tipologías. Por la forma de la generatriz del arco se tiene: las bóvedas de cañón que son originados a partir de una generatriz de un arco de medio punto con forma cilíndrica, las bóvedas rebajadas surgen a partir de una generatriz rebajada (arco elíptico o similar), la bóveda apuntada surge a partir de un arco apuntado. La cúpula es un tipo de especial de bóveda que surge a partir de la rotación de un arco sobre un eje y que forma una semiesfera.

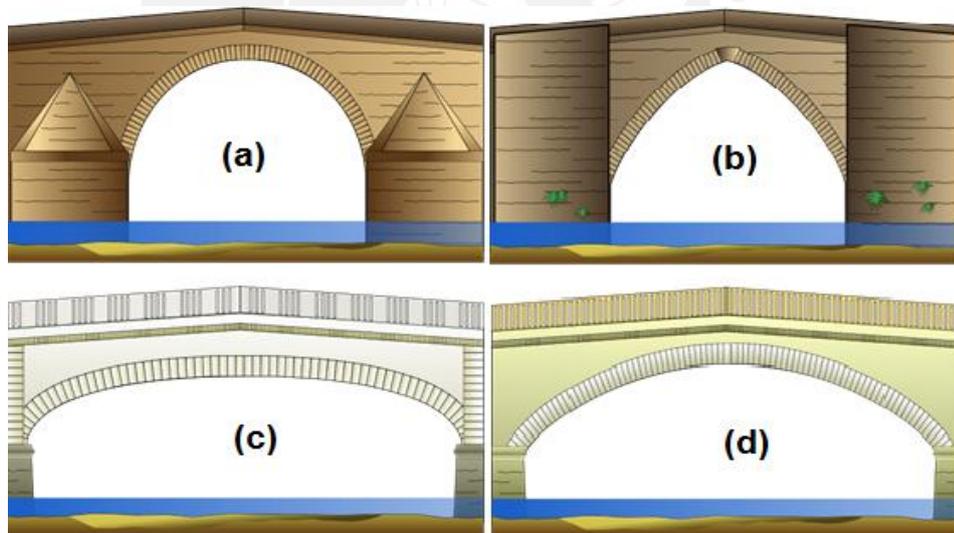


Figura N° 3.19: Tipos de Arcos usado en los puentes de mampostería. Arco de medio punto (a), arco apuntado (b), arco elíptico (c) y arco rebajado (d)

http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_f%C3%A1brica

El Relleno

El relleno general empleado en los puentes de mampostería, cumplen un papel importante ya que afecta de modo significativo el comportamiento del conjunto por dos

razones: el peso propio favorece a su estabilidad estructural y la masa ayuda a distribuir las cargas concentradas sobre la superficie de rodamiento.

Los dos tipos de rellenos que pueden presentarse en los puentes de mampostería, tanto el suelto como el cementado difieren en su comportamiento, el cual mencionaremos a continuación:

Relleno Suelto.- Su comportamiento estructural se puede separar en tres funciones, todas ellas de gran importancia para la resistencia del puente en su conjunto; éstas se suman a su función formal de proporcionar una superficie horizontal de su rasante.

La primera función estructural, es la de gravitar sobre la bóveda como carga muerta. De este modo el peso del relleno genera una precompresión centrada en el arco, de modo que se compensan hasta cierto punto las posibles tracciones que tienden a generar las sobrecargas concentradas, que alejan la forma de la bóveda de la antifunicularidad ante las cargas aplicadas. Sin embargo a medida que la luz del puente crece y la carga permanente gana dominancia entre el resto de acciones, esta función pierde relevancia hasta el punto que en puentes de gran luz la precompresión que genera el relleno es excesiva y se descentra, de modo que se busca aligerar su carga introduciendo vacíos sobre la zona de arranques y riñones del arco, o bien, mediante el uso de tímpanos internos.

La segunda función que se tiene es la de transmitir y repartir las cargas aplicadas en la superficie de rodadura hasta el trasdós de la bóveda atenuando el efecto local de las cargas. El nivel de compactación del relleno influirá directamente en el reparto de las cargas que se presenten haciendo que cualquier carga puntual o carga uniforme en la superficie se convierta en una carga trapezoidal aplicada en el trasdós de la bóveda.

Y la tercera función que presenta es que debido a la deformación y al movimiento del conjunto relleno-bóveda se produce un estado de esfuerzos normales y tangenciales que aparecen en el trasdós de la bóveda. La interfaz entre la bóveda y el relleno debe de ser capaz de absorber las tensiones que aparecen en ambos elementos, sin la presencia del relleno o su buen acondicionamiento no se aseguraría la continuidad de ambos elementos y por consecuencia la estabilidad de la estructura. En otro caso se produce el deslizamiento entre ambos.

Relleno Cementado.- El efecto estructural de este relleno recibe un tratamiento diferente al del relleno suelto. La presencia de una mayor rigidez en los arranques modifica sustancialmente el comportamiento del puente arco. Esta zona más cementada y más rígida tiene unas propiedades mecánicas semejantes a las del arco, del pilar o del estribo. Por ello, a efectos de valorar su contribución estructural, se considerará como un

elemento portante rígido, realizándose en él comprobaciones similares a las que se realizan en arco, pilares y estribos.

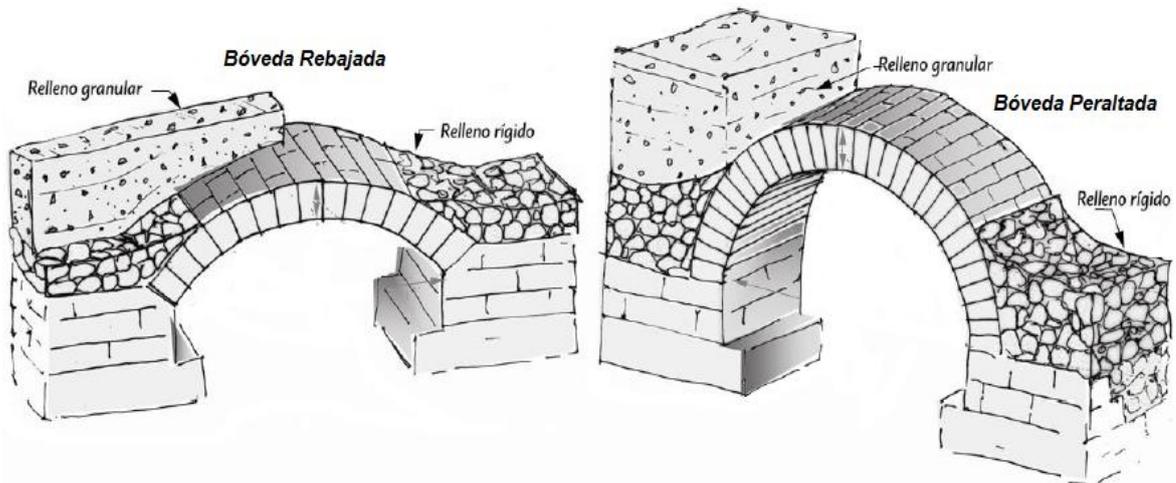


Figura N° 3.20: Esquema de la composición de los rellenos en un puente de mampostería con bóveda de arco.

Fuente: Estudio del comportamiento estructural de dos puentes de fábrica, Sergio Espejo.

Los tímpanos o muros de enjuta

Los tímpanos son los elementos verticales que se disponen lateralmente y están apoyados sobre las dovelas de los arcos. En algunos casos son macizos y su función principal es la de contener y confinar lateralmente el relleno a modo de estructura de contención de tierras. En cuanto a su forma, la cara exterior de los tímpanos es plana y totalmente vertical, y su cara interna puede presentar un ligero talud o estar escalonada, de forma que aumenta el espesor del tímpano, de arriba hacia abajo, muy similar a la de un muro de contención de tierras, ya que obedece a la ley de empujes del relleno. La altura de los tímpanos en la clave está condicionada por el sobre espesor de relleno en este punto, no siendo generalmente menor de 0.50 m., siendo esta altura adicional en la clave, beneficiosa en cierta forma, pero si su valor es muy alto puede llegar a provocar el fallo de la unión del tímpano y el arco.

Los tímpanos pueden presentarse aligerados transversal y longitudinalmente con el fin de aliviar la carga muerta sobre la bóveda, en caso de presentar aligeramientos transversales, su función ya no es la de contención lateral del terreno, sino la de transmitir la carga desde la superficie de rodadura a la bóveda mediante tabiques o montantes. En estructuras de gran luz, los tímpanos suelen presentar aligeramientos transversales en la zona de arranques, que facilitan la mayor capacidad de desagüe (caudal del río) y alivian la carga total, y en otras ocasiones se dispone de aligeramientos

longitudinales dentro del relleno de la estructura, dejando a los tímpanos sin la misión de contención de tierras.

La función prevista para los tímpanos macizos es la de contener lateralmente las tierras de los rellenos granulares. Esta contención y confinamiento lateral posibilita al relleno, desarrollar la tarea estructural que se le ha encomendado. Si los tímpanos no confinan lateralmente el relleno, no se podrá contar con la acción estabilizadora de los empujes desarrollados por el relleno en el extradós del arco. Además, si se asegura la conexión de estos con el arco, pueden aportar rigidez longitudinal a la estructura.

Estos tímpanos macizos pueden ser considerados, como vigas de gran espesor, si bien es cierto que este trabajo queda imposibilitado por la hipótesis que supone que la mampostería no resiste esfuerzos de tracción. Sin embargo, según el tipo de aparejo y los materiales del tímpano, se puede suponer que resisten esfuerzos de flexión. Esta unión es uno de los puntos débiles de estas estructuras. La diferente rigidez entre ambos elementos, los cambios de condiciones de explotación con el tiempo (trenes de carga, velocidad), junto con lo delicado de la propia unión, hacen que sólo se pueda contar con esta rigidización adicional bajo las cargas de servicio y habiendo comprobado previamente el estado de la unión. En situaciones próximas al agotamiento, la separación entre ambos elementos siempre ha sido clara.

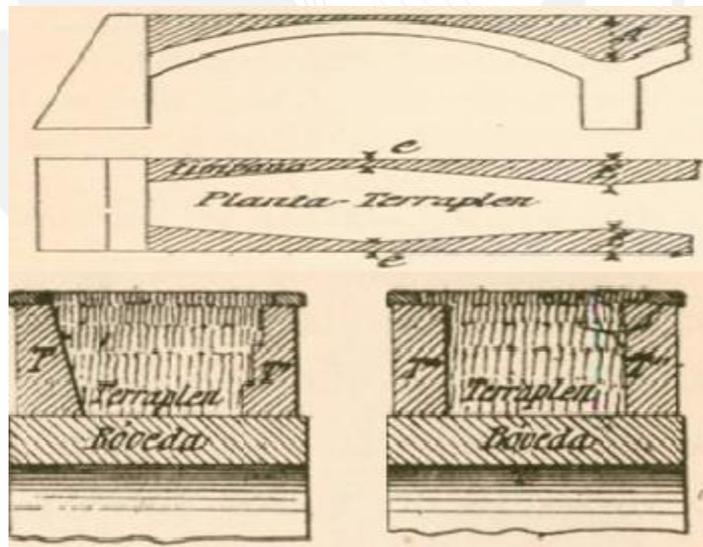


Figura N° 3.21: Elevación, planta y secciones transversales típicas de los tímpanos que eran construidos.

Fuente: Puentes de fábrica y hormigón armado Tomo III, José Ribera.

Los Pilares

Los pilares son los elementos estructurales que han estado sujetos a más cambios en sus dimensiones a lo largo de la historia. Existen razones constructivas e incluso

estratégicas que explican las diferentes geometrías adoptadas en los pilares durante los últimos 22 siglos. La función primordial de los pilares, dentro de un puente con bóveda de arco es de conducir la carga transmitida por el arco hasta los cimientos. Además deben ser capaces de soportar también las acciones que inciden sobre ellas, como viento, crecidas de los ríos, etc.

Del mismo modo que en los arcos, el comportamiento estructural de los pilares se puede caracterizar a través de unos pocos parámetros geométricos y del tipo de sección de la misma. La altura total del pilar h_p es el primer parámetro definitorio de su comportamiento, y en función de este valor se opta por dar talud longitudinal y transversal al pilar. El talud longitudinal obedece a la ley de momentos provocada por el desequilibrio en el empuje horizontal en la cabeza del pilar por la acción de la sobrecarga, el objetivo que se persigue es que la línea de presiones del arco no salga del tercio central del pilar. El talud transversal tiene su razón de ser en la importancia que cobran los esfuerzos de viento a partir de cierta altura.

Otros parámetros geométricos que definen al pilar son las relaciones *anchura del pilar/luz libre del arco* (bp/L) y *anchura del pilar/altura del pilar* (bp/h_p); el valor de estos dos parámetros condiciona el comportamiento de estas estructuras, bien como puentes multiarco, donde se produce interacción entre los diferentes arcos y los pilares que forman la estructura; o bien como estructuras monoarco, donde el comportamiento de los arcos se produce de forma independiente dentro de la estructura, en este último caso el pilar puede ser considerado como pilar estribo.

Los pilares pueden ser macizos o mixtos en función de los materiales utilizados en su construcción. Los pilares macizos son ejecutados con el mismo tipo del arco, mientras los mixtos, que son las más habituales, están formados por una carcasa de sillería bien labrada y pulimentada, que contiene en su interior desde una mampostería hasta un concreto ciclópeo a base de cal y cantos cementados de menor resistencia.

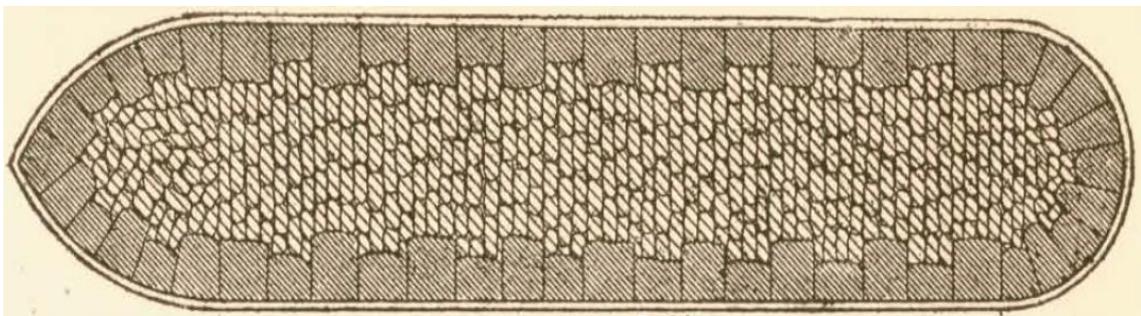


Figura N° 3.22: Corte típico en planta de un pilar con dos materiales distintos, un relleno confinado por una capa de mampostería.

Fuente: *Puentes de fábrica y hormigón armado Tomo III, José Ribera.*

Los Estribos

Los estribos son los elementos encargados de resistir por gravedad los empujes horizontales que provienen del arco. Y aunque suelen presentar un buen acabado en los puentes en arco, al trabajar por gravedad, normalmente se rellenaban con un material poco seleccionado o un concreto ciclópeo.

La Cimentación

La cimentación es el elemento resistente menos conocido y el más débil de los elementos estructurales del puente arco. Es el elemento más débil porque el proyecto de la cimentación descansaba en el escaso conocimiento que siempre se ha tenido de las propiedades geotécnicas del terreno sobre el que ésta apoyaba. La elección de una cimentación superficial o profunda dependía de dichas propiedades geotécnicas, casi desconocidas hasta el siglo XIX. Esto ha provocado en muchas ocasiones cimentaciones poco adecuadas que han provocado daños y, en el peor de los casos, el colapso de la estructura. Además, la cimentación está sometida al peor enemigo de estas estructuras: las grandes avenidas.

Las **cimentaciones superficiales** mediante zapatas han sido ejecutadas en su mayor parte con sillería, aunque en algunas ocasiones (s. XIX) pueden presentarse protegidas con concreto, la losa de cimentación como solución alternativa, es mucho menos común y aparece en el s. XVII para tratar de evitar el grave problema de la socavación.

Para la **cimentación profunda** se tiene más variedad. La primera cimentación profunda que se conoce es la realizada mediante pilotes de madera, con una longitud máxima de 10 metros, coronados por un encepado realizado mediante un emparrillado de madera con relleno de arena o áridos más o menos cementados, este tipo de cimentaciones ya eran usadas en la época romana. Además, para evitar la socavación, se disponía de escolleras de protección alrededor de los pilares. Existe una variante para este tipo de cimentación que consiste en que, además de presentar un recinto exterior de pilotes más o menos largos, presente en su interior un número indeterminado de pilotes de menor longitud. En algunas ocasiones se aprovechaba el recinto establecido para la construcción en seco de la cimentación en situación definitiva. Este recinto ejecutado por medio de tablestacas, reforzadas en ocasiones con pilotes para conferir mayor rigidez al conjunto, se rellenaba posteriormente con materiales más o menos cementados, para después en el s. XIX se rellenase con concreto.

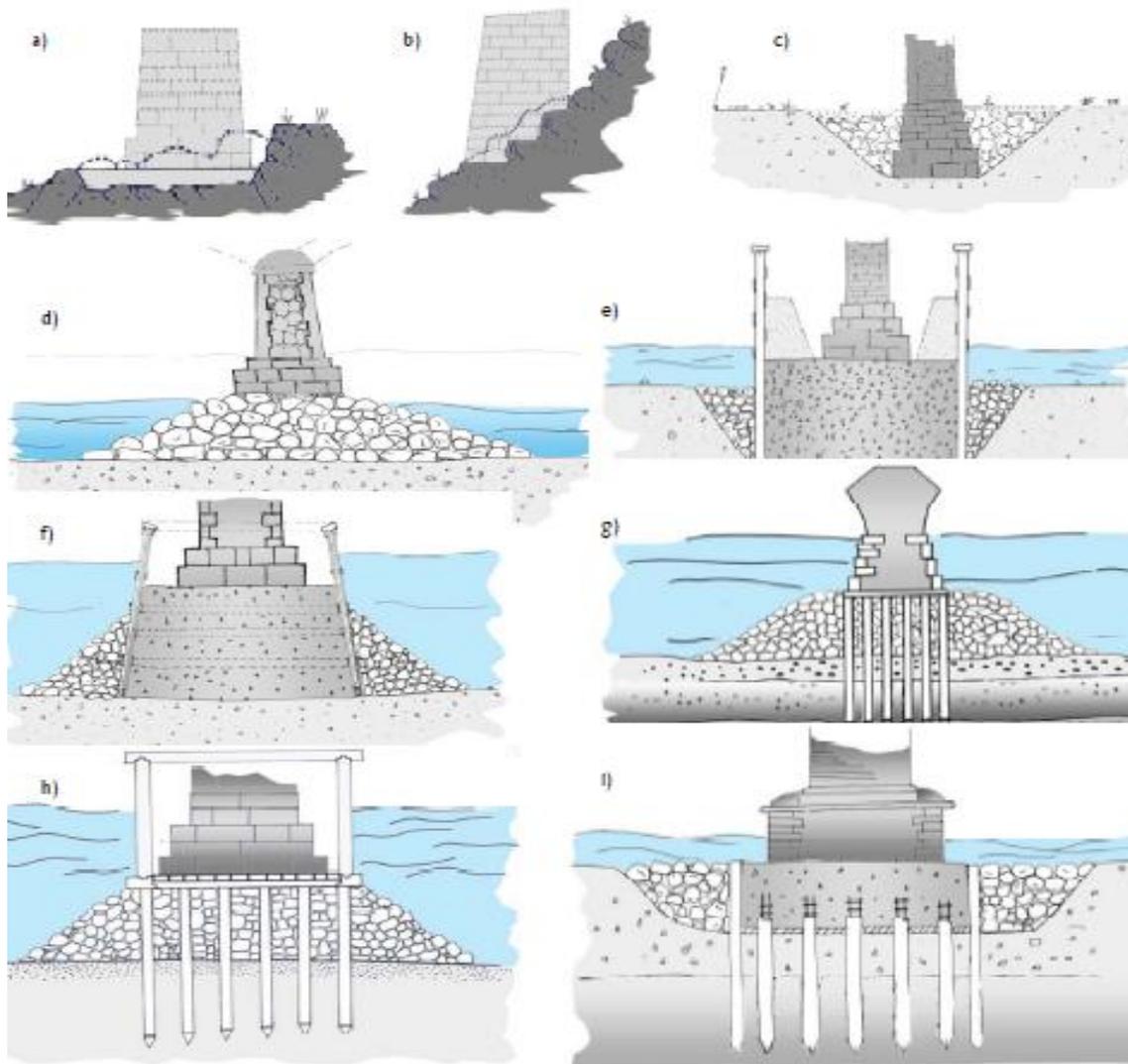


Figura N° 3.23: Tipos de Cimentación en puentes de mampostería. a) Cimentación directa en roca con excavación horizontal, b) cimentación directa en roca con excavación escalonada, c) cimentación directa sobre terrenos flojos, d) cimentación directa sobre escollera, e) cimentación directa con concreto sumergido y recinto de pilotes de madera, f) cimentación directa con concreto sumergido y cajones sin fondo, g, h) cimentación profunda con pilotes de madera, i) cimentación profunda con pilotes de concreto armado.

Fuente: Estudio del comportamiento estructural de dos puentes de fábrica, Sergio Espejo.

3.4 Funcionamiento Estructural de los Puentes de Arco de Mampostería

3.4.1 Polígono Funicular

El nombre de polígono funicular proviene del latín funiculum que significa cordel o cuerda pequeña, referido a la forma que adoptaría un cordel al suspender de él un conjunto de fuerzas o diferentes pesos, acorde su magnitud y al punto de aplicación de dicha fuerza. Un polígono funicular permite encontrar en un sistema de fuerzas el punto

de aplicación de su fuerza resultante y las reacciones con las que se mantiene el equilibrio del mismo.

La línea antifunicular es la inversa de la línea funicular, forma que adopta un hilo flexible cuando se le aplica un sistema de fuerzas. Por ello para cada sistema de fuerzas, existirán infinitas líneas funiculares, una por cada longitud diferente del hilo. Teniendo un conjunto de fuerzas en un plano, el polígono funicular de sistema de fuerzas es una línea poligonal (no necesariamente cerrada), donde sus vértices recaen sobre las líneas de acción de las fuerzas, con un punto de origen comúnmente llamado polo; la magnitud de la fuerza influirá en los ángulos formados en cada vértice del polígono funicular, ver Figura N° 3.24. Se suman el sistema de fuerzas que salen de un punto común llamado polo y se tendrá el valor del esfuerzo resultante, que es la suma de los segmentos de línea que representan las fuerzas F_1 a F_5 que pasan a conformar una línea más grande. Cada lado del polígono formado indica el esfuerzo del cable en una zona del mismo. El mayor esfuerzo sobre el cable, será donde este el lado mayor del polígono.

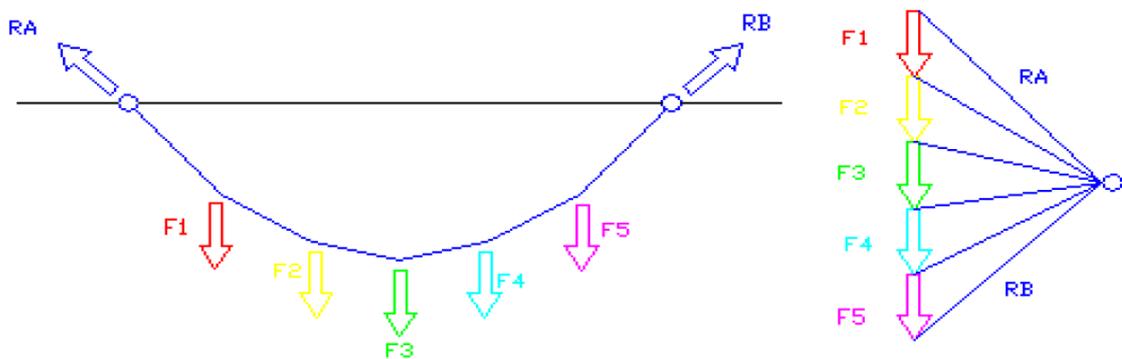


Figura N° 3.24: Polígono funicular de un sistema de fuerzas.

Fuente: *Tierra sobre el agua: visión histórica universal de los puentes*, Leonardo Fernández.

3.4.2 Arco Funicular

Si se incrementa el número de cargas, el polígono funicular del sistema toma un número gradual de lados más pequeños y se aproxima a una curva. Cuando la cantidad de fuerzas tienden a infinito, la poligonal tiende a formar una curva. La curva funicular es la que forman los cables por el efecto de su propio peso. Las formas inversas de los cables colgantes, corresponden a las formas comprimidas, que con igual longitud soportarían las mismas cargas, dando lugar propiamente a los arcos funiculares, como lo muestra la Figura N° 3.25

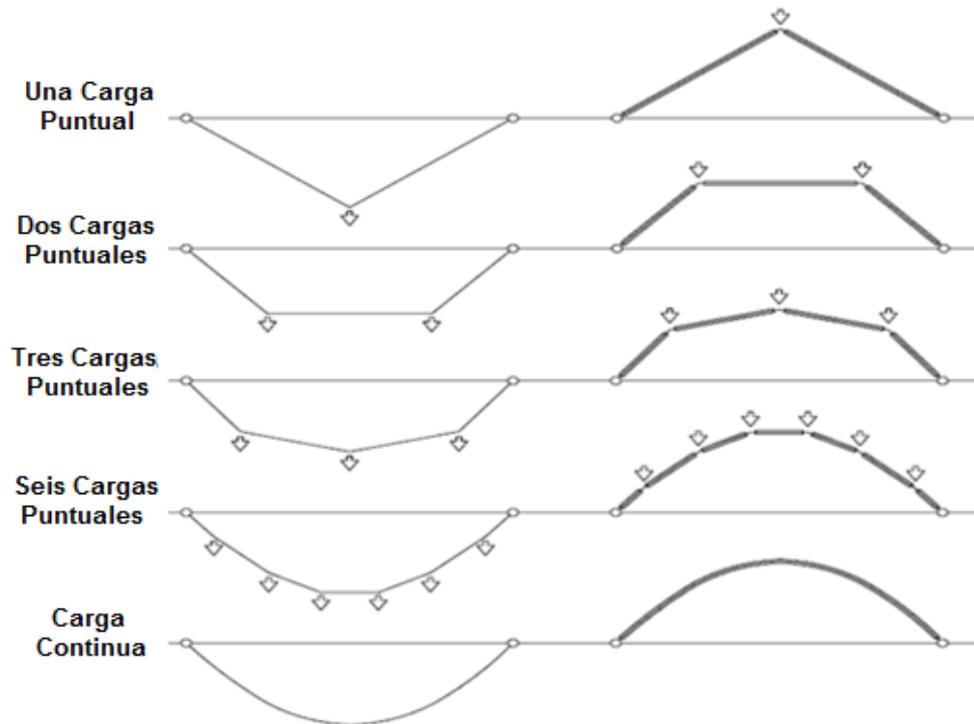


Figura N° 3.25: Relación entre Polígono Funicular y Arco Funicular.

Fuente: *Geometría de equilibrio de estructuras en Arco*, Emilio Cortés.

Los extremos del arco por condiciones de equilibrio deben ser inclinados y por tanto las fuerzas que se transmiten a los apoyos son igualmente inclinadas. Esto quiere decir que no solo los apoyos del arco deben coaccionarlo verticalmente como se requiere en una viga, sino que se necesitan también una coacción horizontal, condición básica para que el efecto arco se produzca. Si no existe una reacción horizontal se tendrá una viga curva más no, un arco.

Analicemos la variación de los esfuerzos en un arco ayudándonos de la figura N° 3.26, si mantenemos el valor de la fuerza (P) y la distancia entre los puntos de apoyo (l) como un valor constante y tan solo variamos la altura del arco, observaremos que para ambos casos la componente vertical de la reacción se mantiene constante: $RA_v = RB_v = F/2$, mientras que el valor de la componente horizontal RA_h aumenta a medida que disminuye la altura (h). Por lo tanto el valor del empuje horizontal es inversamente proporcional a la altura que posea.

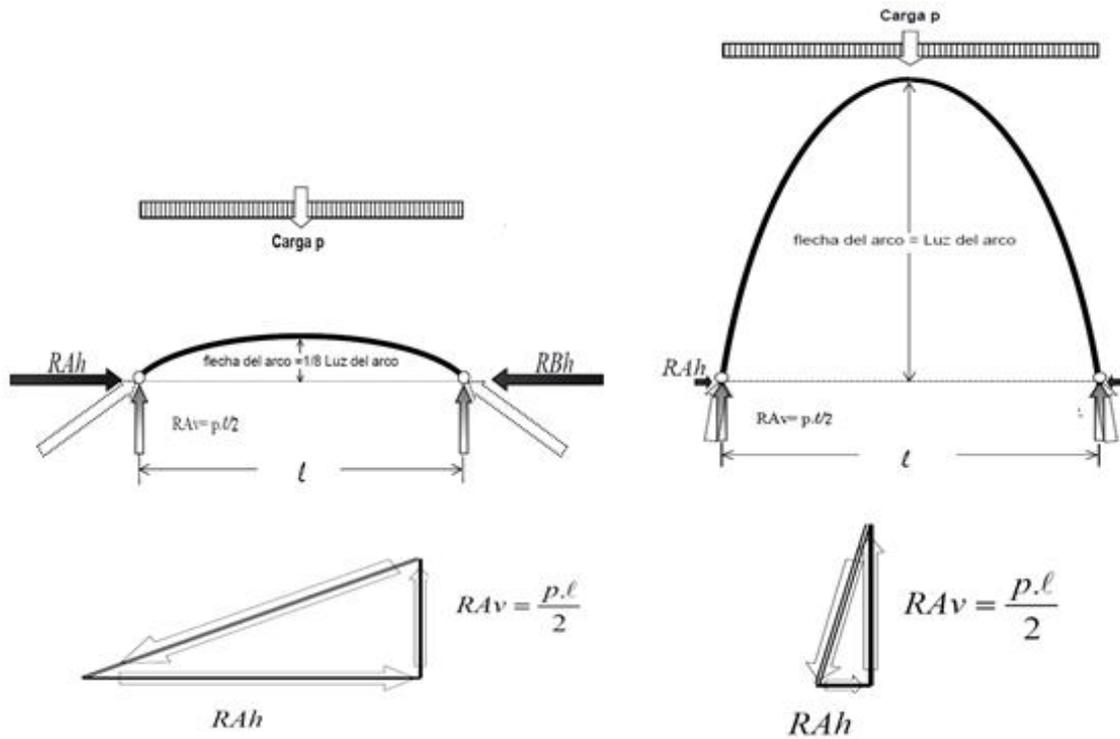


Figura N° 3.26: Relación entre Polígono Funicular y Arco Funicular.

Fuente: *Geometría de equilibrio de estructuras en Arco*, Emilio Cortés.

3.4.3 Comportamiento de un Puente Arco de Mampostería

Un puente arco de mampostería tiene un comportamiento estructural complejo. Los elementos de la mampostería interactúan entre sí, conjuntamente con el relleno y las cargas aplicadas.

El ingeniero Colin O'Connor nos indica que existen tres aspectos fundamentales en el comportamiento resistente de estas estructuras:

- ✓ Son estructuras masivas que trabajan fundamentalmente por forma. El elemento resistente principal, que no el único, es el arco y el esfuerzo predominante es, en principio, el esfuerzo axial. Esta primacía del axial puede perderse en función de la importancia que adquiera la sobrecarga con respecto a la carga permanente, y en lo adecuado de la directriz adoptada para el arco.
- ✓ Están constituidas por materiales heterogéneos, anisótropos e incluso discontinuos, es decir, que no es capaz de soportar tensiones de tracción debido a la mampostería
- ✓ Los elementos estructurales que las forman son de diferente naturaleza y su acción estructural es también diferente (arco, relleno, tímpanos, etc.); estos elementos estructurales han sido descritos en el apartado anterior.

En la Figura N° 3.27 se trata de mostrar cuál es el mecanismo resistente desarrollado por uno de estos puentes para transmitir las cargas hasta los estribos y

cimientos, frente a la acción de su propio peso y de una carga muerta asociado con una sobrecarga puntual aplicada en la zona crítica, comprendida entre $1/3$ y $1/5$ de la luz.

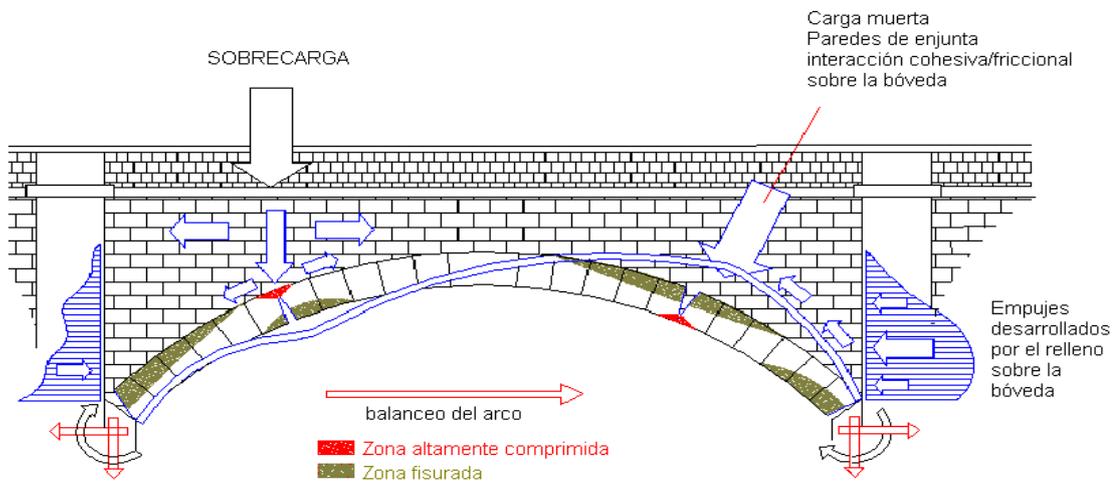


Figura N° 3.27: Comportamiento de un puente arco de mampostería a una sobrecarga aplicada.

Fuente: Ensayo hasta rotura de un puente arco de obra de fábrica construido en laboratorio. German de Marco.

La carga permanente (peso propio y carga muerta) gravita directamente sobre la estructura del arco, generando un estado de esfuerzos de compresión en la bóveda (curva funicular de cargas). Por otro lado, las sobrecargas (puntuales o uniformes) se transmiten desde la superficie de rodadura hasta la bóveda a través del relleno suelto o granular como agente repartidor de la carga, transformando sobrecargas de carácter puntual en cargas repartidas sobre el trasdós de la bóveda.

La importancia del efecto repartidor de carga, se explica al recordar que los puentes en arco trabajan por forma, buscando con su directriz una antifunicularidad de la carga que aproxime todos los esfuerzos presentes sobre la bóveda hacia la compresión simple. Las cargas concentradas en especial aquellas aplicadas sobre la zona de riñones del arco, son las que más tienden a alejar la geometría de la bóveda de la antifunicularidad para la nueva configuración de cargas. Y recordemos que si una bóveda de mampostería pierde este equilibrio, tenderá a generar tracciones, lo que la mampostería no puede absorber. De ahí la importancia del relleno granular para el efecto de reparto de la carga, y que reduce en gran medida la concentración de cargas sobre zonas puntuales del arco, cuanto mayor sea la amplitud en el cono de reparto, será menos el efecto que la carga puntual tenga en el comportamiento de la bóveda, es de suma importancia evaluar correctamente la magnitud de la carga puntual.

El relleno ejerce una distribución de cargas horizontales sobre los tímpanos y bóveda, que no resultan nada despreciables, debido a que si fallaran los tímpanos el relleno queda expuesto y sin ningún confinamiento. Así, la bóveda recibe un empuje horizontal longitudinal por parte de las tierras que contiene, y las paredes de enjuta a su vez actúan como estructuras de contención transversal del relleno. El efecto del empuje de tierras sobre la bóveda es beneficioso estructuralmente, puesto que tiende a contrarrestar el efecto de cargas no centradas longitudinalmente y estabilizar la estructura, pero el relleno granular debe tener el suficiente grado de confinamiento este empuje funcione de una manera correcta.

La magnitud de este empuje sobre el trasdós de la bóveda va a depender básicamente de los movimientos relativos que puedan existir entre la bóveda y los tímpanos. Bajo las acciones comunes de carga estos movimientos son pequeños, y el empuje del relleno puede estimarse a partir del empuje de las tierras al reposo. Sin embargo, en situaciones próximas al colapso, en las que se forman los posibles mecanismos plásticos en estas estructuras, se pueden dar grandes movimientos y deformaciones. Si esto sucede se movilizará el empuje pasivo en las zonas en que los movimientos tiendan a acercarse el arco al relleno, y el empuje activo en las zonas donde los movimientos sean de separación entre ambos. Como se ha dicho anteriormente, al darse esta separación tan clara entre arco y paredes de enjuta en situaciones cercanas al colapso, la rigidez adicional que los tímpanos pueden conferir al puente trabajando como vigas de gran espesor se suele despreciar.

Por otro lado los tímpanos deben soportar el empuje lateral que el relleno ejerce sobre ellos, como se puede apreciar en la Figura N° 3.28. Si el nivel de confinamiento del relleno es el adecuado, dicho empuje supondrá una elevada fuerza lateral que las paredes de enjuta deberán resistir.

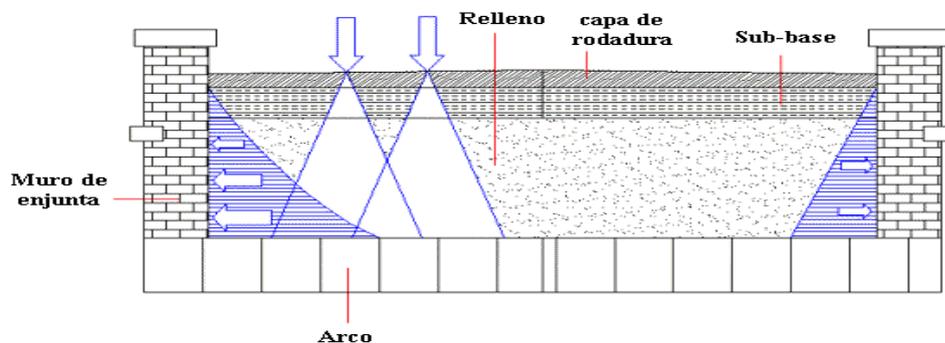


Figura N° 3.28: Sección transversal de un puente de mampostería en arco, con efecto de cargas.

Fuente: Ensayo hasta rotura de un puente arco de obra de fábrica construido en laboratorio. German de Marco.

Una vez que las cargas lleguen al arco, éste se encarga de transmitir las hasta la cimentación. El análisis de este mecanismo se puede realizar desde dos perspectivas diferentes.

La primera opción que se tiene para analizar la resistencia de la bóveda es a partir de las ecuaciones de la estática, pero estableciendo ciertas limitaciones. Se trata de ubicar el lugar geométrico de los puntos de paso de la resultante en cada una de las secciones del arco que se encuentra en equilibrio con las cargas externas, es decir se trata de hallar la línea de presiones. La Figura N°3.29 muestra lo que podría ser la línea de presiones aproximada para una situación de carga crítica.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que al tratarse de una estructura hiperestática, las posibles soluciones para la línea de presión son infinitas. Por lo tanto, para llegar a una solución única hay que realizar hipótesis adicionales que permitan salvar esta indeterminación, o bien aplicar los teoremas del límite superior (condición de compatibilidad) e inferior (condición de equilibrio) para los mecanismos de colapso que proporciona la teoría de la plasticidad.

Una segunda opción para entender cómo se realiza esta transmisión de cargas, es estudiando el comportamiento del arco bajo la teoría clásica de estructuras, esto nos indica que podemos utilizar las ecuaciones de equilibrio, de compatibilidad y las ecuaciones constitutivas de los materiales. Este método también proporcionaría una solución más rigurosa y sin la necesidad de hipótesis y teoremas adicionales, pero la mampostería presenta un comportamiento demasiado complejo como para poder ser plasmado a través de unas ecuaciones relativamente sencillas.

La línea de presiones indica la posición de la resultante de las tensiones interiores de la bóveda en cada sección. En el caso ideal en que toda la carga estuviese perfectamente repartida de tal forma que la geometría del arco siguiese la curva antifunicular de las acciones, la línea de presiones pasaría siempre por el centro del anillo del arco, esto es, por el centro de gravedad de cada sección. De esta manera, todo el arco trabajaría a compresión simple, ya que sin la excentricidad de paso de la resultante no se desarrollan momentos flectores en ninguna sección.

Si hubiera el caso de la aparición de sobrecargas que varíen la posición de la resultante dando lugar a esfuerzos de flexión sobre la bóveda. En consecuencia, a medida que la línea de presiones se aleje del centro de gravedad de la sección (esto pasara cuando se incremente el valor de la sobrecarga), la parte de la sección más alejada de la resultante se ira descomprimiendo. En el momento en que la línea de presiones se sale del núcleo central la zona descomprimida pasa a esta traccionada, y como la

mampostería no resiste tracciones la sección pierde rigidez efectiva y se produce una redistribución de tensiones. Esta excentricidad indica la relación entre el esfuerzo y el momento flector en cada sección.

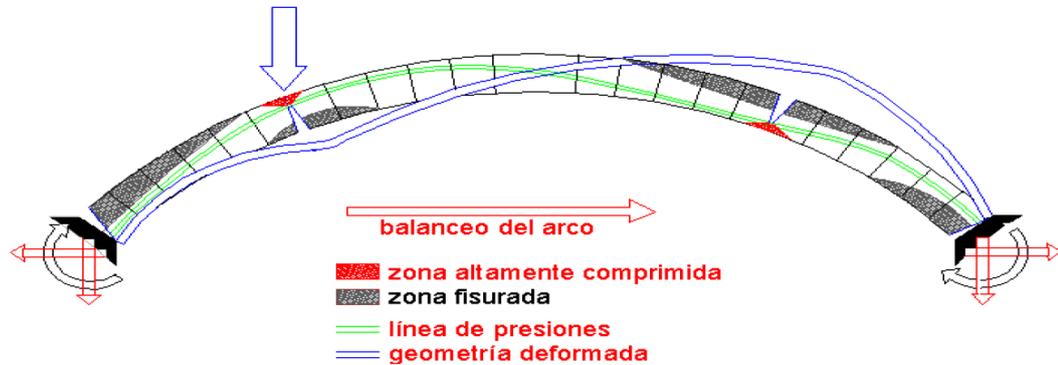


Figura N° 3.29: Esquema aproximado de colapso en un arco de mampostería.

Fuente: Ensayo hasta rotura de un puente arco de obra de fábrica construido en laboratorio. German de Marco.

En situaciones próximas al colapso, la línea de presiones se aproxima al intradós o al extradós del arco, es decir alcanza excentricidades tan grandes, que genera puntos de tangencia con el arco. En estos puntos el momento existente es tan elevado al no poder absorber tracciones que se produce una fisuración total de la sección. En consecuencia, la sección efectiva que debe albergar toda la compresión se va reduciendo y las tensiones se disparan hasta alcanzar la resistencia a compresión de la mampostería. Esta situación supone el límite de resistencia de la sección y la consiguiente formación de una rótula plástica. La sucesiva formación de rótulas ira reduciendo el grado de hiperestatismo de la estructura hasta la formación de un mecanismo que provoque el colapso de la estructura. En la Figura N° 3.30, se muestran los diagramas de esfuerzos y deformaciones correspondientes a una sección del arco de mampostería.

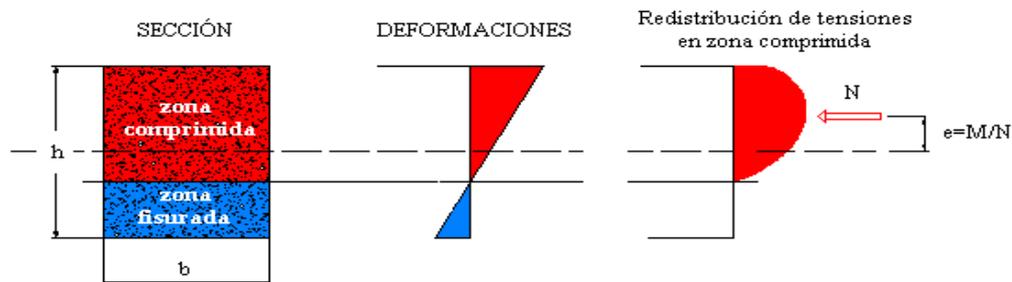


Figura N° 3.30: Diagrama de esfuerzos y deformaciones.

Fuente: Ensayo hasta rotura de un puente arco de obra de fábrica construido en laboratorio. German de Marco.

Las condiciones de contorno del arco influyen en gran medida al desarrollo de la línea de presiones, tanto en lo referente a la definición geométrica del mismo como a sus condiciones de apoyo. La definición geométrica del arranque real del arco y su unión con la cimentación es también condicionante en el comportamiento de estas estructuras. En ocasiones, la zona cercana a los arranques del arco está ejecutada con relleno cementado o sólido, y esto conlleva a la consideración de un arco biempotrado. En tales condiciones en el arranque real se desarrolla una terna de esfuerzos formada por una fuerza horizontal, una fuerza vertical y un momento flector. El empotramiento perfecto del arco puede no estar presente o al menos tener cierto recelo de su existencia, existen algunas condiciones que deberían llevarnos a no considerarlo, tales como, la no presencia de un relleno cementado en la zona de riñones, configuraciones de arco biarticulado o triarticulado a causas de descensos en la clave por el descimbrado, fallos en la cimentaciones debido a acciones accidentales que provocan la formación de rotulas en los arranques del arco.

3.4.4 Funcionamiento de los Puentes Esviados

En los puentes de mampostería el esviaje debe de estar directamente relacionado con el aparejo empleado en la bóveda. En puentes esviados, debido a su configuración propia conlleva a que los pilares estén solicitados a esfuerzos combinados de axial y flexión según las tres direcciones del espacio.

La figura N° 3.31, muestra como la carga vertical transmitida por las bóvedas adyacentes al pilar, lleva consigo por una parte una fuerza axial vertical, como resultante de las cargas aplicadas y, por otra parte una flexión en el plano del pilar si las cargas transmitidas por dichas bóvedas no son iguales. Es el caso de que en una bóveda esté aplicada el tren de cargas y que la siguiente sólo este solicitada bajo la acción de cargas permanentes. Además el problema habitual del funcionamiento de los puentes esviados es la tendencia a trabajar en la dirección corta, lo que provoca una torsión del eje vertical en el pilar, al tener la resultante de la reacción horizontal que la bóveda ejerce sobre el pilar en puntos de aplicación diferentes.

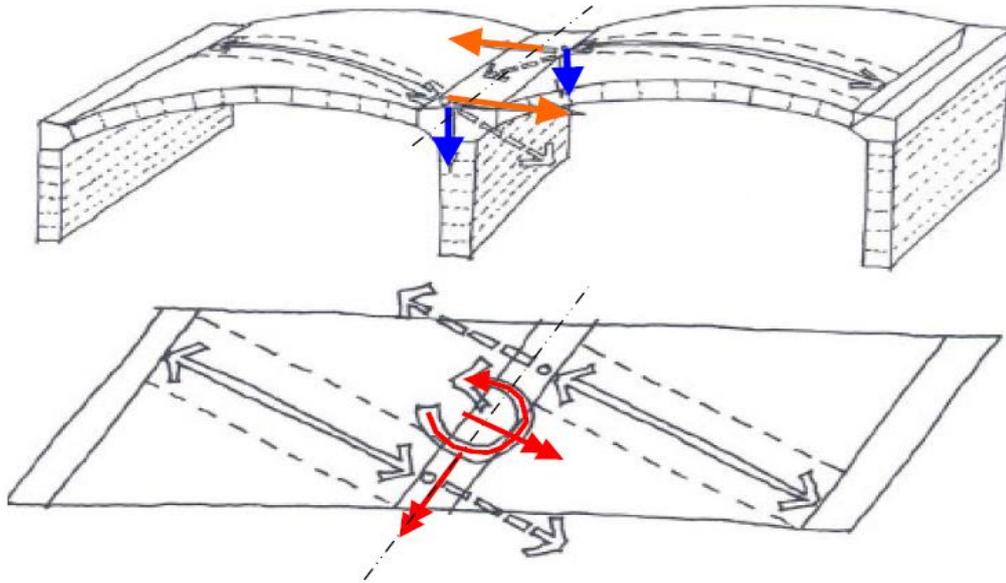


Figura N° 3.31: Esquema de funcionamiento de los puentes esviados de mampostería

Fuente: Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados. Sergio Espejo.

3.4.5 Formas de Colapso en un Puente Arco de Mampostería

El modo de fallo o rotura en los puentes de mampostería en arco indica la capacidad última y la ductilidad de la estructura. Se define el comportamiento en agotamiento de la misma y constituye el elemento de referencia a la hora de realizar las comprobaciones en estado límite último. La probabilidad o frecuencia de los diferentes modos de fallo varía en función de la tipología del puente, ya sean estos por ejemplo de bóvedas rebajadas, bóvedas esbeltas, bóvedas de medio punto, bóvedas apuntadas, etc. Los modos de fallo más relevantes hasta la fecha, bien en ensayos realizados o bien en colapsos de estas estructuras, se describe a continuación:

- **Formación de un Mecanismo de Colapso**

La formación de este mecanismo de colapso es quizás el fallo más común que se presenta y, normalmente asociado a la aparición de rótulas plásticas que sean necesarias como para que la estructura hiperestática genere su colapso.

Así tenemos por ejemplo que para un arco simple con una carga no centrada, se necesita contar con cuatro rótulas, mientras que si una carga está centrada o repartida simétricamente las rotulas que formaran el mecanismo serán cinco; este tipo de mecanismo puede darse ante una acción directa o bien una acción indirecta, que por lo general es una sobrecarga puntual o es un fallo en la cimentación. Para un puente arco de dos vanos son necesarias siete rótulas plásticas para colapsar la estructura mediante la formación de un mecanismo de flexión. Este último modo de fallo o rotura se produce

cuando la esbeltez del pilar es suficiente como para que el mecanismo englobe dos tramos de la estructura.

Si nuestro puente de mampostería en arco posee un dimensionamiento adecuado, su línea de empujes bajo la acción de peso propio estaría regularmente centrada en la directriz del arco; sin embargo bajo sobrecargas graduales dichos momentos en las secciones crecerían, provocando de esta manera una excentricidad en la línea de empujes, hasta que ésta se salga del núcleo central y comiencen a aparecer fisuras asociadas a las tracciones en la sección que desarrollara rótulas. Para el caso de un puente monoarco, una vez aparezca la cuarta rótula, la estructura pasa a ser un mecanismo de tres barras articuladas y, por ende colapsaría.

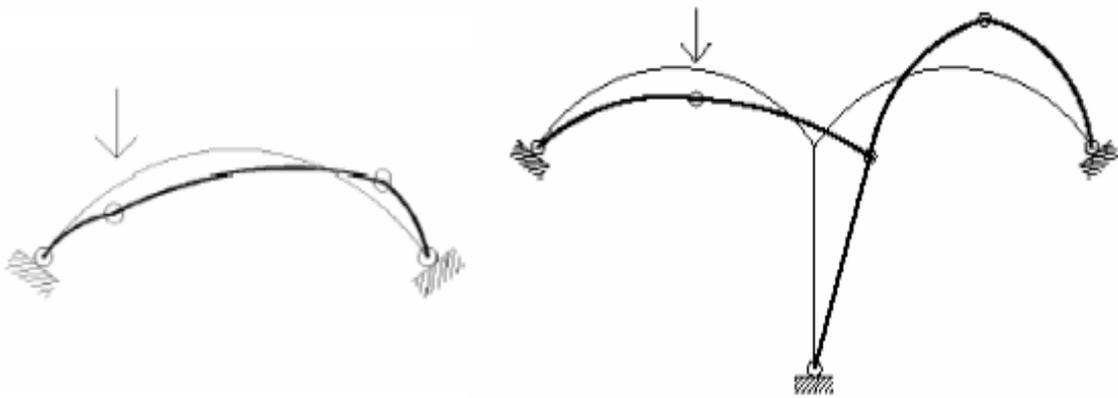


Figura N° 3.31: Mecanismos de colapso en puentes monoarco y multiarco

Fuente: Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados. Sergio Espejo.

- **Colapso por separación de roscas**

Este tipo de fallo es muy inusual, y cuando aparece suele hacerlo en combinación con la formación de rotulas debidas a la flexión en la bóveda. Este fallo está directamente relacionado con el tipo de aparejo dispuesto en la bóveda y asociado a la mala conservación del puente, trayendo consigo la pérdida del mortero, ya sea entre las dovelas de los arcos de piedra y entre las roscas o hiladas de ladrillo en arcos de varios anillos concéntricos. Esto hace posible que en algunas juntas se produzca un fallo tangencial por falta de adherencia, la aparición de este modo de falla en ciertas zonas de la bóveda acelera el agotamiento de la estructura y finalmente se produce un colapso por una falla combinada de mecanismo y separación de roscas.

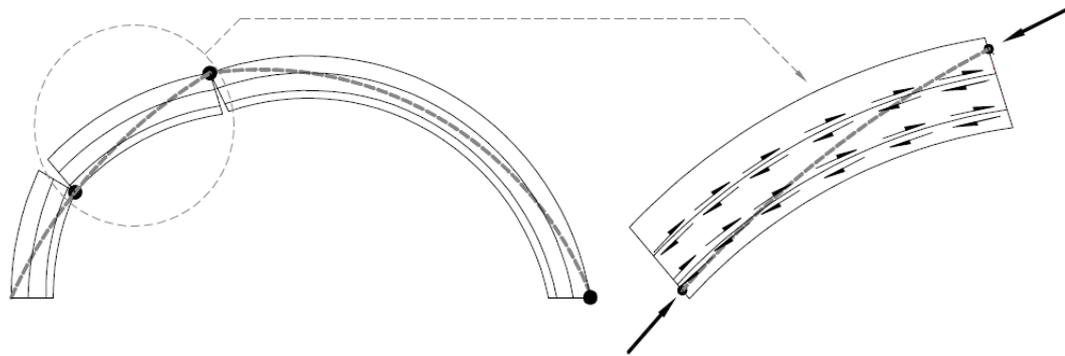


Figura N° 3.32: Tensiones tangenciales en una bóveda de varias roscas.

Fuente: Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados. Sergio Espejo.

- **Colapso por deslizamiento o rotura por corte**

Ante sollicitaciones de corte y compresión moderada se produce el fallo de la interfaz al desencadenarse un movimiento excesivo entre las piezas y las juntas de mortero.

La fisuración se da en las juntas del mortero ya sea en línea o en escalera, sin mucho efecto en las piezas. Las tensiones normales se mantienen en niveles muy inferiores a la resistencia a la compresión simple, y las tensiones tangenciales son relativamente importantes, por eso la rotura se alcanza precisamente cuando éstas alcanzan un nivel crítico.

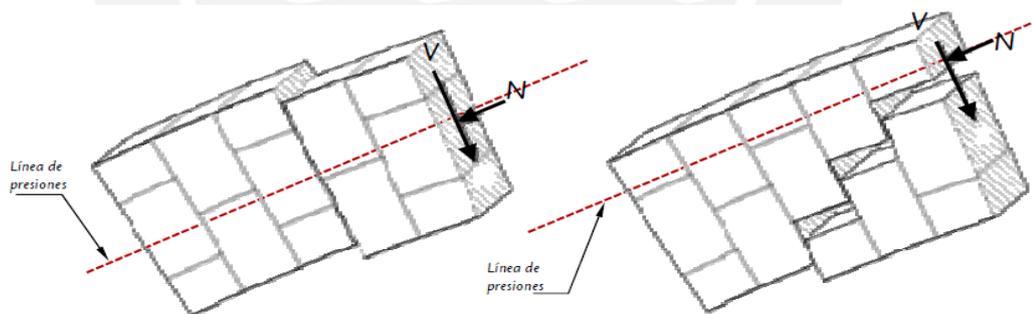


Figura N° 3.33: Fallo por deslizamiento y corte para compresión moderada centrada y excéntrica.

Fuente: Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados. Sergio Espejo.

- **Colapso por Aplastamiento de la Mampostería a compresión (crushing)**

A pesar de que generalmente el nivel tensional de trabajo en las bóvedas de mampostería es bajo con respecto al valor de su resistencia, en ocasiones una carga excepcional o un fallo en la cimentación puede exceder la resistencia última en alguna sección, esto provocaría fisuras en la mampostería y el fallo inmediato. Este modo de

fallo se presenta en puentes de luces cortas y bóvedas esbeltas con rosca maciza, donde la línea de empujes tiende a formar una dirección hacia los apoyos.

El agotamiento del material en el arco producirá su colapso ya que alcanza su resistencia última a compresión, esto es característica de arcos rebajados y esbeltos ejecutados con mampostería de baja resistencia, en donde los tímpanos ejercen una gran rigidización de la estructura que retrasa la formación del mecanismo. El hecho de que a menudo exista una práctica separación entre bóveda y paredes de enjuta reduce, por lo tanto, la frecuencia de este modo de fallo.

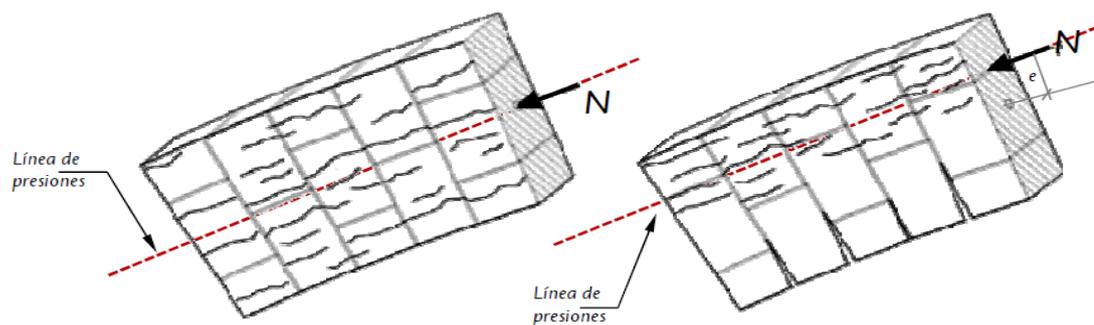


Figura N° 3.33: Agotamiento de la mampostería a compresión de una resultante de carga axial centrada y excéntrica.

Fuente: Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados. Sergio Espejo.

- **Colapso por Inestabilidad Geométrica de Origen no lineal**

Se trata de un fallo debido a una inestabilidad por pérdida de forma en bóvedas y arcos rebajados donde: se produzca axiales de compresión elevada, los estribos se desplacen horizontalmente y en arcos de gran esbeltez. El comportamiento inicial del puente sigue el esquema de rotura por formación de un mecanismo, verificándose un principio de generación de rótulas plásticas. Sin embargo, en lugar de aparecer la última rótula, se origina un violento cambio en la geometría del arco, en especial sobre la sección de bóveda sujeto a carga, llevando a colapsar la estructura ante sollicitaciones menores a las necesarias para la formación completa del mecanismo. Para darse este tipo de fallo es necesario, que la mampostería sea más resistente que rígida (relación f/E alta), y que la bóveda cuente con una elevada contribución resistente de los tímpanos y el relleno.

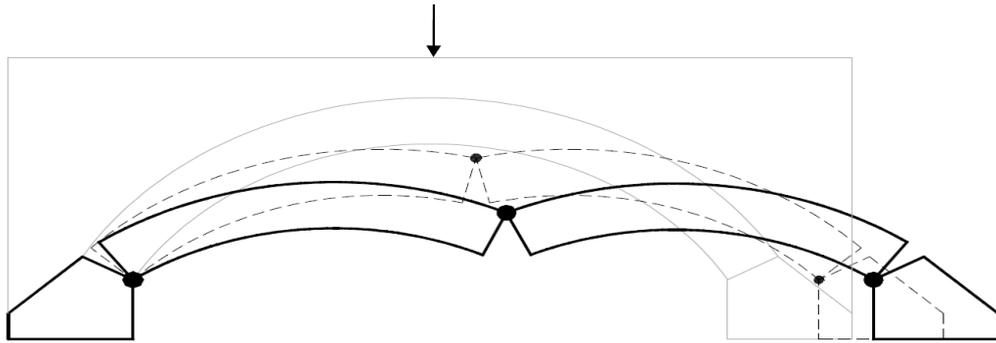


Figura N° 3.34: Falla por inestabilidad por pérdida de forma.

Fuente: Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados. Sergio Espejo

3.5 Patologías en los Puentes de Mampostería con Bóveda de Arco

El transcurrir de los años ha dejado su marca sobre la totalidad de los puentes históricos que aún perduran gracias a que son obras de ingeniería de gran utilidad en su entorno. En muchos es común el deterioro progresivo de sus partes por las condiciones ambientales, e incluso daños por algunas intervenciones realizadas para su continuo funcionamiento y estabilidad, que no han sido capaces de minimizar su riesgo ante el colapso.

Nombraremos algunas de las patologías comúnmente presentadas en estas estructuras y que varios autores las consideran fundamentales como para permitir identificar los diversos factores externos e internos que más los afectan y donde se localizan las zonas vulnerables, además nos permitirá crearnos una idea del grado de conservación que posean.

3.5.1 La Socavación

Quizás el problema más presente en los puentes sea la socavación producida en la base de los pilares y los estribos, el cual se explica en un proceso de erosión provocado por la filtración de agua que arrastra su lecho, dándose en ciertas ocasiones un fenómeno complejo debido a la combinación de factores naturales tanto hidráulico y geotécnico.

En general no es un hecho fácil de detectar, ya que su intensidad aumenta con el incremento del caudal que dificulta el acceso visual a las fundaciones y hace que las cavidades formadas se rellenen con material aluvial de baja capacidad de carga.

En la Tesis desarrollada por Jorge Galindo nos indica que la socavación total se produce por la conjugación simultánea de tres componentes que son: la degradación del lecho del río a largo plazo en la ubicación del puente, la socavación generalizada en una sección del puente y la socavación local junto a los pilares.



Figura N° 3.34: Socavación en un pilar del puente de Alcántara.

Fuente: Ingeniería y Territorio: Restauración de la obra pública, José García.

3.5.2 Movimiento en los Apoyos.

Debido al efecto de socavación en los pilares o estribos, aparecen asentamientos diferenciales del suelo y generando movimientos en los apoyos, situación que en cualquier hiperestática conduce a una necesaria redistribución de los esfuerzos, y los que a su vez producen agrietamientos visibles o formación de rotulas plásticas no deseadas. Es probable que esta patología se presente durante los primeros años de servicio del puente, debido al impacto que esta pueda tener en el suelo donde se ubica la estructura.



Figura N° 3.35: Movimiento en uno de los pilares de un puente.

Fuente: Stone Arch Bridges County MD Presentation for the County Engineers of Washington

3.5.3 Degradación de los Materiales.

Otra de las patologías presentes es la degradación de los materiales constituyentes, y está relacionado con la impermeabilización de la superficie de rodadura para proteger los materiales de la mampostería y los rellenos de la acción del agua. La

existencia de saturación de humedad en el interior de la mampostería favorece la formación de capas de vegetación, y desintegra los componentes de estos últimos por lavado de los más finos e hincha los suelos de relleno, contribuyendo a la degradación de la piedra y los morteros y en consecuencia afectando la estabilidad de la estructura. Además, la presencia de infiltración de agua también puede ser origen a la aparición de eflorescencias.

El crecimiento de vegetación en la propia estructura puede causar acciones mecánicas importantes a medida que van penetrando en las juntas y hendiduras, contribuyendo a acelerar la degradación de los materiales y por ende de la estructura en conjunto. Quizás la vegetación rastrera no tiene efectos nocivos importantes, pero las que desarrollan raíces con predominio de penetrar por entre las juntas de la mampostería puede producir daños considerables a mediano plazo.



Figura N° 3.36: Degradación del material presentado en los puentes de mampostería.

Fuente: Ingeniería y Territorio: Restauración de la obra pública, José García

3.6 Intervenciones en los Puentes Históricos

El gran número de puentes históricos que se conservaron, poseen intervenciones exclusivamente dirigidas para dar continuidad a la función que cumplen en su entorno, sin duda la principal función requerida fue la necesidad creciente de tráfico, y esto produjo

que muchos puentes modifiquen su rasante o en el peor de los casos ensanchen su plataforma.

Para intervenir un puente histórico queda imprescindible saber analizar y leer el comportamiento y funcionamiento de los distintos elementos que forman su estructura, si nos ponemos a fijar detenidamente su mampostería es un montón de piedras colocadas de una forma determinada que le permite ser estable bajo una simple acción de la gravedad y de las sobrecargas.

Es importante contar con una visión amplia y polifacética, que integre evidencia tanto cuantitativa como cualitativa a lo largo de todo el estudio, y la amplíe en particular a las fases del diagnóstico, de la verificación resistente y del diseño de las posibles intervenciones de restauración. Justamente cuando los diseños, y los materiales antiguos y modernos están perfectamente compatibilizados, se da una notable intervención, consiguiendo un resultado de gran calidad formal y estético.

En el libro de Leonardo Fernández, especifica tres grupos claramente definidos de trabajos de intervención en los puentes históricos, las cuales se menciona y las describiremos a continuación:

- a) Intervenciones de adaptación hacia las nuevas necesidades funcionales.
- b) Las reparaciones, reconstrucciones o restauraciones.
- c) Sustituirlos por nuevos puentes cuando les es imposible sostener su tráfico.

3.6.1 Intervenciones de Adaptación

Referidas a las intervenciones originadas por las nuevas necesidades funcionales del tráfico que varía a lo largo de su vida útil, de tal modo que son exigencias nuevas para el puente. Intervenciones de esta naturaleza se han desarrollado en todas las épocas, mayormente en los siglos XIX y XX, produciéndose muchas transformaciones en estos medios de transporte y algunas veces modificaciones irreversibles.

Las adaptaciones más frecuentes en los puentes históricos están dirigidas a modificar la geometría del puente, en muchos casos modificando la planta y el alzado del puente. El trabajo más usual es ensanchar la plataforma y para ello existen distintas maneras y, los indicamos del menos al más apropiado:

a) Ensanche mediante vigas adosadas al puente original.

Solución frecuentemente utilizada en innumerables ocasiones, queda claro que con esto se intenta resolver el problema de la forma más fácil posible, olvidándose completamente que hay que adecuarse a la presencia de una obra existente. Habitualmente las vigas nuevas están apoyadas sobre los tajamares del puente o en

pilares construidos de concreto unidos a los originales. En general el puente original es recuperable desmontando las vigas y suprimiendo los apoyos adicionales.



Figura N° 3.37: Puente ensanchado con vigas de perfil metálico.

b) Ensanche de los arcos mediante bóvedas de concreto adosadas.

Es otra solución utilizada con frecuencia e implica el poco respeto que se tiene hacia el puente existente, ya que desfigura su morfología y su recuperación no es fácil, ya que si se desea eliminar la bóveda de concreto adosada podríamos dañar la original. La ventaja que posee es que normalmente se ensancha por un lado y por lo tanto se conserva uno de los dos paramentos originales del puente.



Figura N° 3.38: Ensanche con bóvedas de concreto adosadas.

Fuente: Ingeniería y Territorio: Restauración de la obra pública, José García

c) Ensanche de los arcos realizando una nueva bóveda con el intradós por encima del trasdós de la primitiva.

Con esta solución el arco original queda a la vista bajo el arco nuevo, existe un intento por conservar y respetar el puente original. Evidentemente el arco primitivo se ve, pero la composición resultante desfigura el puente original, si bien es cierto que algunas veces el puente resultante queda bien.



Figura N° 3.39: Ensanche con bóvedas de concreto encima de la bóveda original.

Fuente: Rehabilitation of Masonry Arch Bridges

d) Ensanche mediante voladizos laterales.

Tal vez sea el proceder más utilizado y se tiene una diversidad de voladizos como: la losa de concreto, diafragmas que forman ménsulas teniendo una losa entre ellas o puntales metálicos con una losa delgada entre ellas. Esta solución se empleó con frecuencia a principios del siglo XX, en los comienzos del concreto armado, y actualmente en algunos casos esto se encuentra en peor estado que el puente histórico.

Esta intervención afectara al puente dependiendo del tamaño del voladizo, pero así sea el caso se introduce un elemento extraño a la obra original que no se integra al puente. Tiene la ventaja de ser fácilmente reversible, porque es fácil de demoler o desmontar los voladizos añadidos.



Figura N° 3.38: Ensanche con voladizos laterales.

Fuente: Ingeniería y Territorio: Restauración de la obra pública, José García

e) Ensanche mediante traslación paralela de uno de los paramentos.

Esta solución consiste en realizar el desmontaje en uno de los paramentos o muro vertical de la estructura, posteriormente se amplía la cimentación y se construye el nuevo paramento para obtener finalmente el ancho de calzada demandado. Las bóvedas se ensanchan internamente, ya sea con la misma piedra que es lo mejor o en el peor caso con concreto.

Dentro de las posibles soluciones esta última opción resulta ser un poco más agradable a los principios conservacionistas, aunque en algunos puentes podría resultar extraño un ancho tan grande. Quizás el único inconveniente es que es difícilmente reversible. En cuanto al costo resulta ser más caro, debido a la obligación de desmontar cuidadosamente el paramento y las dovelas frontales de los arcos, además de tener que enumerar todos los sillares o piedras para volver a colocarlos.



Figura N° 3.38: Ensanche mediante traslación del paramento.

Fuente: Ingeniería y Territorio: Restauración de la obra pública, José García

3.6.2 Reparaciones, reconstrucciones y restauraciones.

Hemos visto que los puentes históricos se han intervenido con frecuencia para que sigan cumpliendo su función. Estos trabajos se hacían en la mayoría de ellos, con el objetivo de evitar mayores deterioros que los pusieran en peligro de ruina, o restaurar el paso sobre ellos si habían sufrido alguna rotura, el resultado final no siempre ha sido satisfactorio, porque en muchos puentes reparados existe un mal contraste entre la parte nueva y la parte vieja como ya lo vimos en el acápite anterior. Sin embargo en algunos se han restaurado para conservar o recuperar sus valores monumentales y ello se puede hacer aun cuando no haya necesidad de reparación o reconstrucción.

La mayoría de las intervenciones deberán participar de dos planteamientos en mayor o menor medida: restaurar significa intervenir el puente como monumento histórico-artístico con los criterios adecuados para ello; y reparar, reconstruir o reforzar según los casos significa aplicar las técnicas adecuadas para conseguir dejar el puente en las condiciones de seguridad y funcionamiento requeridas.

Cuando un puente sufría una rotura parcial o total normalmente se procedía a su reconstrucción, las causas que pueden obligar a intervenir un puente para repararlo pueden ser muy diversas, dependiendo de los materiales y tipos de estructuras de los diferentes puentes.

Los problemas debidos al material o materiales que componen el puente son fundamentalmente de durabilidad, la atmosfera agresiva que presentan algunas ciudades provocan una meteorización que agrava la situación de muchos puentes, así como también la erosión eólica, la erosión del agua y la heladicidad.

Los problemas debidos a las estructura de los puentes de piedra pueden ser muy diversos, pero la causa generalmente de colapso de puentes ha sido su inapropiada cimentación frente a los máximos caudales del río. Por lo general los pilotes a base de madera no proveían suficiente estabilidad y la presencia de socavación en el lecho del río los dejaba sin capacidad resistente y consecuentemente se hundían por la inestabilidad presente en el conjunto cimiento-pilar. Otra causa que han producido problemas esta en las bóvedas de los arcos por el pequeño hundimiento de estas, muchas veces el hundimiento se ha debido a deformaciones o malformaciones de origen de las propias bóvedas. Otro motivo por el cual muchos puentes de piedra colapsaron es que sus muros tímpanos cedieron ante el empuje del relleno, dejando fácilmente expuesto sus arcos.

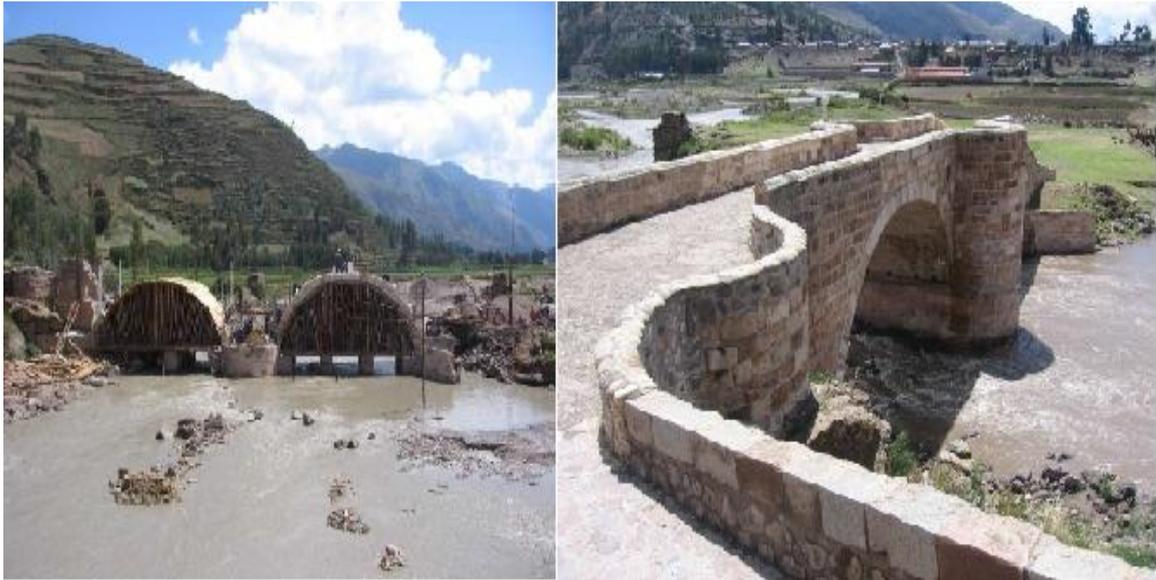


Figura N° 3.38: Reconstrucción de un puente en el Cuzco - Perú.

Fuente: Reforzamiento estructural en obras de restauración, Expo PUCP 2009.

3.6.3 Sustitución de los puentes históricos.

En algunos casos el puente histórico se ve insuficiente por alguna de las razones mencionadas anteriormente, cabe la solución de sustituirla por uno nuevo. La forma más radical de hacer esta sustitución es derribándolo y construyendo en su lugar uno nuevo. Esta solución algunas veces es inevitable y de ello son ejemplo muchos puentes urbanos excesivamente estrechos o limitados de carga, que no permiten hacer uno nuevo en otro lugar porque la vía de tráfico a la que pertenecen no se puede desplazar, en estos casos no cabe más que sustituirlos. Ejemplos de sustituciones hay en todas las grandes ciudades con ríos importantes: París, Londres, Santiago de Chile, etc.; pero desgraciadamente esta solución se ha aplicado en muchas ocasiones sin que resultara necesaria. La solución más correcta es realizar una variante de la carretera y situar el nuevo puente en un lugar diferente, conservando el antiguo a ser posible con un tráfico secundario.

La sustitución de un puente no es propiamente una intervención en él, pero altera significativamente su función y su entorno, por ello en el proyecto de la variante y el nuevo puente se debe tener en cuenta la alteración que va a causar al que se sustituye y el estado en que va quedar.

Así mismo Leonardo Fernández nos menciona dos problemas fundamentales para sustituir un puente de esta naturaleza:

- Primeramente debido a la ubicación relativa entre los dos puentes, regularmente la ubicación del nuevo puente ha sido casi juntamente al antiguo puente,

consecuentemente estorbándose y ahogándose. Es por que al estudiar la variante del camino se debe tener presente este problema, porque si están demasiado cerca puede ser desfavorable o potenciarse favorablemente si están a una distancia adecuada.

- El segundo es el entorno de los puentes históricos cuando estos pierden su función, entonces pierden cierto abandono de instituciones públicas o cualquier otra entidad, de tal manera que se va deshaciendo progresivamente hasta desaparecer.

Es de suma importancia que los puentes mantengan cierta función en su entorno, aunque sea secundaria, y ésta puede ser diferente según los casos. En algunos se podrá mantener un tráfico total, en otros un tráfico peatonal y como última opción crear un área de parada como interés turístico.



Figura N° 3.38: Antiguo Puente de Calicanto en Santiago de Chile en 1888, posteriormente demolido. Actualmente se encuentra la estación calicanto del metro en dicha ciudad.

http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Calicanto

3.7 El Puente de Mampostería de Piedra como Patrimonio Cultural

La idea de patrimonio se deriva del concepto de monumento, cuyo origen se puede ubicar desde el siglo XV y que se desarrolla más extensamente en el siglo XVIII. Monumento es una palabra derivada del latín monumentum, que engloba el concepto de memoria o recuerdo. En un inicio se consideraba monumento a toda obra arquitectónica, con un testimonio histórico y artístico, las cuales aún están ligadas al concepto de patrimonio.

Las estructuras históricas tienen un valor cultural y patrimonial en sí mismas por lo que deben ser conservadas como parte del patrimonio y no solamente como soporte del resto del material histórico cultural que contiene la edificación. El valor cultural de las estructuras viene reforzado por la autenticidad de sus caracteres distintivos, los cuales

deben ser respetados y en su caso restaurados en coherencia con los principios de conservación. No obstante, el concepto de conservación del patrimonio arquitectónico y cultural adquirió mayor influencia cuando apareció la carta de Atenas en 1931, primer documento sobre conservación de patrimonio arquitectónico, y posteriormente se fue desarrollando académica y técnicamente hasta llegar a 1972, donde la UNESCO crea la Convención de Patrimonio Mundial, donde resaltan que el fin último de la conservación de cualquier tipo de patrimonio arquitectónico consiste en preservar su autenticidad en sus dimensiones, tanto materiales como inmateriales

Los puentes en general son parte de la infraestructura de los medios de transporte de un país y por tanto forman parte del patrimonio de las obras públicas. Sin embargo, el problema más grave que se ha planteado en la mayoría de obras de ingeniería, en especial los puentes de mampostería de arco, es la falta de valoración y su falta de protección ante cualquier situación crítica debido a dos factores negativos, así por un lado tendremos el abandono de la obra cuando queda fuera de uso, y por otro lado las intervenciones negativas en los puentes para adaptarlos a las necesidades actuales de tráfico.

Actualmente se están haciendo diversos intentos para corregir esta triste situación del patrimonio histórico de las obras de ingeniería; se empieza a valorar como patrimonio cultural y se están creando diversas organizaciones dedicadas a su estudio y protección, y por tanto la concepción de monumento ha enmarcado lugares o hechos naturales que posean un especial valor y estas obras representen un interés científico, técnico o social.

CAPITULO IV

LOS PUENTES HISTORICOS EN EL PERU

4.1 Los Puentes Antiguos en el Perú

La proyección y construcción de puentes de mampostería de piedra en arco fue una tecnología propiamente de Europa, a pesar que se contaba casi con los mismos materiales como la piedra y la madera, aquí en Perú los Incas poseían varias formas de proyectar y construir un puente. Usaban puentes de madera muy similares a los construidos en Europa, así como también usaban las piedras con forma de laja para cruzar ríos con caudales moderados haciendo un puente de varios ojos o aberturas, y la forma de construcción quizás más desarrollada que tuvieron los Incas fue el de los puentes colgantes a base de fibra natural.

El puente colgante incaico, fue una tecnología novedosa y sorprendente para los primeros españoles, quienes se quedaron pasmados de como unas aparentes cuerdas delgadas eran tan resistentes para soportar el paso de personas y animales de carga. Sin embargo, esta tesis está dirigida solamente a los puentes de mampostería de piedra con bóveda en arco, pero merece una pequeña mención la tecnología que se empleó en esta parte del mundo para construir puentes.



Figura N° 4.1: El puente de piedra Inca Huarautambo, ubicado en Yanahuanca, provincia de Pasco.



Figura N° 4.2: Vista del puente colgante Q'eswachaka ubicado sobre el río Apurímac en el Cuzco, cada año los pobladores renuevan sus fibras en un acto culto.

<http://www.larepublica.pe/11-01-2012/revalorando-el-camino-inca>

4.2 Los Puentes de Mampostería de Piedra con Bóveda de Arco en el Perú

La tecnología de los puentes de mampostería con bóveda de arco en el Perú fue traído por los españoles, cuando éstos llegaron y conquistaron el Perú en 1532. Como ya vimos la tecnología de los puentes en arco no fue una técnica propiamente de los antiguos peruanos y por eso no se tenga que estudiarlos, tal vez debido al significado de poder español que representó en su época. Sin embargo, el esfuerzo masivo que pusieron nuestros antepasados para su proyección y construcción, la mano de obra y los materiales usados propios de nuestro suelo, las hacen parte de nuestra historia y tengan un alto significado de importancia histórico y cultural. Además como ya se indicó en el capítulo anterior la concepción de estos puentes representó un gran desarrollo en el conocimiento y construcción en la ingeniería estructural, y en especial de los puentes.

El Perú a través de su Instituto Nacional de Cultura protege y vela los monumentos históricos en nuestro territorio nacional, contando para esto con su sede nacional y sus sedes descentralizadas en las capitales de los departamentos. Según el registro de la sede nacional, nuestro país tiene registrado 37 puentes históricos repartidos en trece Departamentos, ver figura N° 4.3, entendiéndose por puente histórico no solo a los de piedra, sino también al de otros materiales (madera, hierro fundido, fibra natural). Cabe indicar también que por falta de desconocimiento de protección y conservación de estos monumentos, aún existen algunos puentes de piedra en arco sin registro.



Figura N° 4.3: Presencia de puentes históricos por Departamento en el mapa de Perú, según el registro del INC.

El puente Trujillo

Construido entre 1608-1610, ubicado en el centro histórico de la ciudad de Lima, fue edificado durante el virreinato de Juan de Mendoza y Luna, Marqués de Montesclaros; y construido por el maestro mayor Juan del Corral. Actualmente la vía es exclusivamente peatonal, por debajo del lecho del río Rímac se está construyendo la vía parque Rímac, obra proyectada por parte de la Municipalidad Provincial de Lima, para atenuar el alto tránsito que sostiene la vía de evitamiento. Este puente ha sufrido muchas transformaciones a lo largo de su vida, los cuales serán descritos más adelante.



Figura N° 4.4: (Arriba) Vista panorámica del puente. (Abajo) Vista del puente desde la margen izquierda del río Rímac. En ambas vistas vemos aún el paso de vehículos menores.

<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1025577&page=19>,
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Puentes_Trujillo_o_Puentes_de_Piedra_construido_en_1610.jpg



Figura N° 4.5: (Arriba) Vista aguas arriba del río Rímac. (Abajo) Vista aguas abajo del río Rímac, nótese los primeros trabajos de la obra vía parque Rímac.

El puente Balta

Es un puente donde no esnetamente de piedra, ya que sus pilares y estribos están hechos en base a una mampostería de piedra, pero sus arcos son de hierro fundido así como sus barandales. Ubicado en el centro histórico de la ciudad de Lima y edificado durante el gobierno de José Balta entre los años 1870 a 1872. Tiene una longitud aproximada de 109 m., un ancho variable de 12.5 a 13 m., dos veredas de 2.55 m. y sección carrozable de 7.05 m. Cuenta con dos estribos laterales a cada lado de las riberas del río de 3.00 m c/u, y dos pilares intermedios de 2.50 m. Presenta tres arcos de 26 m. de longitud, dos arcos de medio punto de 10 m de longitud cada uno en los lados laterales. En marzo del 2009 debido a la crecida del rio Rímac se dañó gravemente uno de los pilares, actualmente la vía es exclusivamente peatonal.



Figura N° 4.6: Puente Balta con un pilar afectado y el ornamento de su arco dañado, debido a la gran crecida que tuvo el río y al poco mantenimiento.

<http://elcomercio.pe/lima/259049/noticia-puente-balta-queda-su-principal-columna-rota>



Figura N° 4.7: Trabajos de reconstrucción en el pilar dañado, así como también la recuperación del ornamento de su arco.

El puente Bolognesi

Ubicado en la ciudad de Arequipa sobre el río Chili, construido inicialmente por el maestro alarife Bernardino de Ávila, tiene una luz de 80 m. y un ancho de calzada de 5.10 m. y veredas de 1.40 m., cuenta con dos pequeños miradores que son terminaciones de dos pilares centrales, el material predominante en este puente es el sillar. Acorde a la tesis de Rocío Villaverde, este puente no fue proyectado y por eso esta obra, además de no contar con un financiamiento seguro para su construcción, no tuvo un plan de

mantenimiento para los problemas que afrontaría desde su entrega. La obra se inició en 1558, sufriendo un fuerte colapso en 1582 debido a un terremoto que afectó gran parte de la ciudad, culminándose después de cinco décadas en 1608. Actualmente tiene un tránsito de vehículos menores y su calle te lleva directamente a la Plaza de Armas de Arequipa.

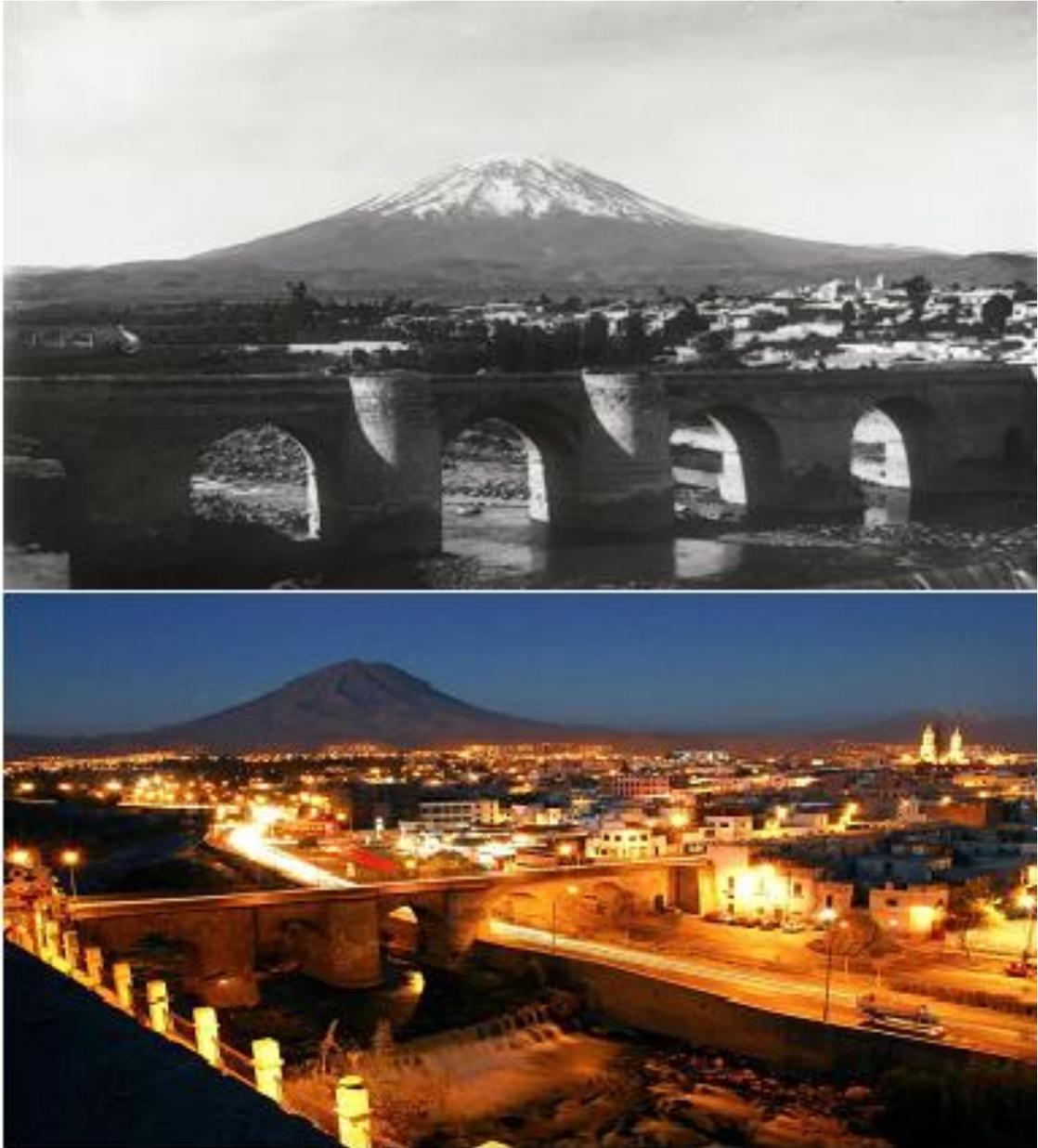


Figura N° 4.8: (Arriba) En esta vista observamos los pretilos de sillar y sin la presencia de la avenida La Marina. (Abajo) Una vista nocturna actual del puente.

<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=561873&page=90>



Figura Nº 4.9: Vista actual del puente Bolognesi, nótese los tajamares de concreto en un trabajo de prevención contra las crecidas del río. Además la presencia de la avenida La Marina.

El puente Grau

Ubicado en la ciudad de Arequipa, el proyecto fue realizado en el año de 1884, pero debido a la guerra del pacífico se empezó a construir en 1898. Fue diseñado por el Arq. Italiano Juan Albertazzo y posteriormente la construcción fue dirigida por los arquitectos Juan Rodríguez y Manuel H. Prado. Tiene una longitud total aproximada de 40 m., con calzada de 5.30 m. y 1.40 m de veredas con el pretil, cruza el río Chili y está ubicado a un kilómetro aguas arriba del puente Bolognesi, cuenta con dos estribos laterales y dos pilares intermedios, hecho a base de bloques de sillar. Presenta tres arcos de medio punto de 6 m. de longitud aproximadamente, en la década de los 70's se abrió un cuarto arco (margen izquierda del río), por la construcción de la avenida La Marina. Se encuentra en servicio con un tránsito vehicular menor.



Figura N° 4.10: Puente Grau sobre el río Chili en la ciudad de Arequipa, con sus tres arcos de medio punto, y el cuarto arco construido en los 70's.



Figura N° 4.11: Podemos observar el espesor que presenta aparentemente la bóveda del arco, notamos además los candelabros que son muy similares a los que presenta el puente Trujillo de Lima.

El Puente Calicanto

Ubicado en la ciudad de Huánuco, se empezó a construir en 1879, culminándose después de cinco años, fue diseñado por Santos Benedetti, Santos Lázaro y Víctor Alvertini. Tiene una longitud total aproximada de 60 m., el ancho total es de 7 m. incluyendo los pretiles, cuenta con dos estribos laterales y dos pilares intermedios que terminan en balcones semicirculares. Presenta tres arcos rebajados de aproximadamente

14 m de longitud, el puente está hecho en base a una mampostería de piedra y argamasa de cal. En este puente solo se está permitido el tránsito peatonal.



Figura N° 4.12: El puente Calicanto sobre el río Huallaga en la ciudad de Huánuco, presenta tres arcos escarzanos (rebajados). Podemos notar claramente el espesor de la bóveda de los arcos.



Figura N° 4.13: Observamos el paso peatonal de este puente, en un plan de restringir su paso vehicular, además notamos el pretil de piedra que conserva y sus amplios miradores circulares.

A continuación se da un repaso fotográfico de otros puentes de piedra ubicados en diversas ciudades de nuestro Perú.

Puente de Chincha, ubicado en el distrito de Pampachiri, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac. Patrimonio declarado ante el Instituto Nacional de Cultura.



Figura N° 4.14: Vista del puente de Chincha.

Fuente: Héctor Claudio.

Puente Izcuchaca, ubicado en el Distrito de Huancavelica, Provincia de Huancavelica, Departamento de Huancavelica. Patrimonio declarado ante el Instituto Nacional de Cultura.



Figura N° 4.15: Vista del puente Izcuchaca.

Fuente: Alexander Gálvez.

Puente San Gerónimo, ubicado en el distrito de Huaraz, provincia de Huaraz, Departamento de Ancash. Patrimonio declarado ante el Instituto Nacional de Cultura.



Figura N° 4.16: Vista del puente San Gerónimo.

<http://acoracrino.blogspot.com/>

Puente Cáceres, ubicado en el distrito de La Unión, provincia de Dos de Mayo, departamento de Huánuco. Patrimonio declarado ante el Instituto Nacional de Cultura.



Figura N° 4.17: Vista del puente Cáceres.

Puente de Taricay, ubicado en el distrito de Llata, provincia de Huamaliés, departamento de Huánuco. Patrimonio no declarado ante el Instituto Nacional de Cultura.

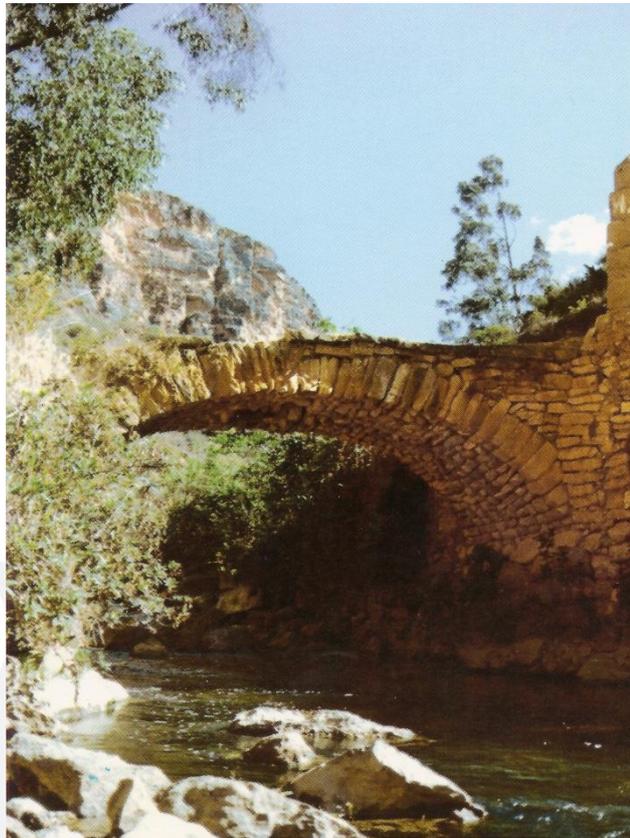


Figura N° 4.18: Vista del puente de Taricay.

Fuente: José Peña.

CAPITULO V

CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

5.1 Criterio General

El criterio general para evaluar estos puentes de piedra estará basado en el comportamiento estructural y, su principal objetivo es el de facilitar su evaluación. Además, teniendo la consigna que sea un material útil y práctico, el cual nos permita dar respuesta a las interrogantes que una evaluación de este tipo se plantea a continuación:

Determinar el nivel de seguridad de la estructura, teniendo en cuenta los datos que se dispone y atendiendo los posibles modos de fallo en situaciones cercanas al agotamiento.

Conocer el comportamiento estructural de la estructura y de sus elementos estructurales en condiciones de servicio, para adoptar medidas de un mantenimiento adecuado y que considere un aspecto estructural.

Analizar las patologías presentes y cuantificar la importancia de los daños desde el punto de vista estructural, y así diagnosticar las vicisitudes que tuvo en su larga vida. La mayoría casi no siempre presenta su características tal y como fueron proyectados y construidos. Por tanto es importante conocer el origen y causa de ciertos daños y cambios para poder intervenir en su evolución en el tiempo.

Por ultimo tener referencia de las cartas internacionales sobre las acciones de reparación, refuerzo o ampliación de estas estructuras, con el propósito de actuar con criterio objetivo en las medidas que se tomen para estos puentes.

5.2 Documentación de Información Disponible

La búsqueda de información es quizás la etapa más larga y en muchos casos casi insuficiente, si para una estructura de edificación o un puente moderno que se disponga del proyecto original resulta un tanto difícil de conseguirla, para una estructura construida hace al menos cien años atrás, que ha atravesado por infinitas circunstancias estructurales como socavaciones, voladuras, accidentes, reparaciones que no siempre fueron satisfactorias, suele ser mucho más difícil. Pero a todo ello solo nos queda inspeccionar in situ el puente, aunque para hacerla resulte difícil y a veces costosa, debido a los accesos complicados y la necesidad de mantener el servicio.

Ante este cuadro de información sólo nos queda por empezar a conseguir por lo más accesible hasta lo menos accesible que se tenga. Entre las principales actividades que pueden contribuir al estudio y a la caracterización de una estructura histórica están la investigación histórica, la inspección, la instrumentación y el análisis estructural.

5.2.1 Geometría

Es de lo menos que se puede empezar: una colección de planos donde se indique:

- ✓ Planta y alzado generales.
- ✓ Detalles de luces, anchos de pilas, espesores de roscas, anchos de bóvedas.
- ✓ Sección transversal (siquiera estimada).

Si, en efecto, se carece de planos originales, estos datos pudieran provenir en parte del resultado de las inspecciones realizadas in situ.

5.2.2 Características de los materiales

Es posible caracterizar el comportamiento mecánico de la mampostería de forma aproximada, sin necesidad de acudir a ensayos; tan sólo es necesaria una observación cualitativa de los materiales, de su disposición y de sus dimensiones.

Conocer la naturaleza de los materiales por medio de ensayos suele ser considerado una necesidad imperiosa de precisión en el conocimiento de ciertas variables mecánicas condicionantes en ciertas tipologías. Esos trabajos sólo tendrían mayor justificación si realizado un primer análisis, nos lleva a la conclusión de que es necesario contar con datos experimentales sobre los parámetros mecánicos de la mampostería, que permitan afinar y contrastar los datos estimados en el primer intento. Por el contrario sí resulta indispensable conocer al menos:

- ✓ Tipo de mampostería: Mampostería de ladrillo, de sillería o de concreto en masa.
- ✓ Aparejo utilizado: a tizón o de varias roscas.
- ✓ Tipo de pieza: tipo de ladrillo y sillar.
- ✓ Espesor y tipo de mortero utilizado –cemento o cal–.
- ✓ Densidad de fábrica y relleno.
- ✓ Estado: humedad, meteorización, etc.

5.2.3 Naturaleza y estado del puente

Es de vital importancia conocer cómo se encuentra la estructura, ayudándonos quizás de vistas fotográficas y del resultado de una simple inspección. De esta manera podremos conocer la tipología del puente y de la mampostería, el estado de las cimentaciones y las eventuales patologías presentes.

Así como también una particular importancia a las fisuraciones en las bóvedas, despegue de tímpanos, deformadas en la rasante, juntas en bóvedas que hagan sospechar de la formación de rótulas, giro de cimentaciones y, por consiguiente, de las pilares, con movimientos horizontales inducidos, etc.

Si fuera el caso de un deterioro importante en las inspecciones previas, o se decida una ampliación que sea necesario el paso de un transporte especial, es muy conveniente realizar una visita personal del equipo profesional especializado.

5.2.4 Caracterización estructural – Clasificación tipológica

Conforme a lo señalado en el ítem anterior, la documentación es necesaria para llevar a cabo una evaluación estructural. Así pues la caracterización estructural lleva consigo el estudio de las dimensiones y relaciones geométricas de los elementos de la estructura, de los materiales utilizados en los diferentes elementos estructurales y, por último, de los daños o patologías presentes en el puente.

La caracterización estructural es el primer acercamiento al comportamiento de estas estructuras y constituye el primer paso para la evaluación de las mismas.

Para establecer un primer diagnóstico del estado de puente será necesario realizar un análisis comparativo de las variables mencionadas de la estructura (geometría, materiales y daños) con otras estructuras de tipologías similares y con normas de proyecto existentes en el momento de construcción.

5.2.5 Caracterización geométrica

A continuación se resumen los datos necesarios para el estudio y análisis geométrico de estas estructuras.

Bóveda: Luz libre (L), el valor del espesor o canto en la clave (c), la relación entre el valor del canto en arranques y en la clave (λ), la flecha (f), la directriz y el valor del sobreespesor en clave (h_o).

Tímpano: espesor en la sección inferior (b_t)

Pilar: altura total (h_p) y anchura del pilar (b_p).

Estribo: altura total (h_e) y anchura de estribo (b_e)

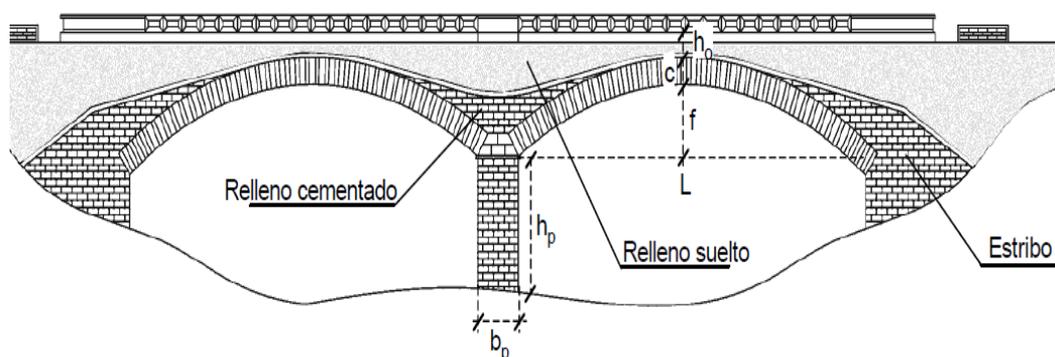


Figura N° 5.1: Datos necesarios para la evaluación de un puente de mampostería.

Fuente: Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados. Sergio Espejo

Los valores de las variables indicadas deben de ser comparados, como ya se ha mencionado anteriormente, con los valores habituales para cada tipología y con las reglas de proyecto propuestas por los ingenieros de la época.

La selección presentada a continuación, refleja las tendencias de proyecto en puentes carreteros y ferroviarios para directrices rebajadas y peraltadas durante estos siglos. Como se puede comprobar, existen diferentes niveles de *sofisticación* en las propuestas, desde aquellas donde el canto en clave de la bóveda depende exclusivamente de la luz libre de la bóveda, a otras donde se tiene en cuenta el material con el que está confeccionada la bóveda, el nivel de peralte, el tipo de tráfico, la luz libre, etc.

a. Espesor de Bóveda en la clave

Bóvedas Semicirculares, ver fig. 3.19

Gautier, mampostería de piedra dura $L \geq 10.0$ m: $c = \frac{1}{18} L$

Mampostería de piedra blanda: $c = 0.32 + \frac{1}{15} L$

Perronet: $c = 0.325 + 0.0347L$

Lesguillier: $c = 0.10 + 0.20\sqrt{L}$

Dupuit: $c = 0.20L^{1/2}$

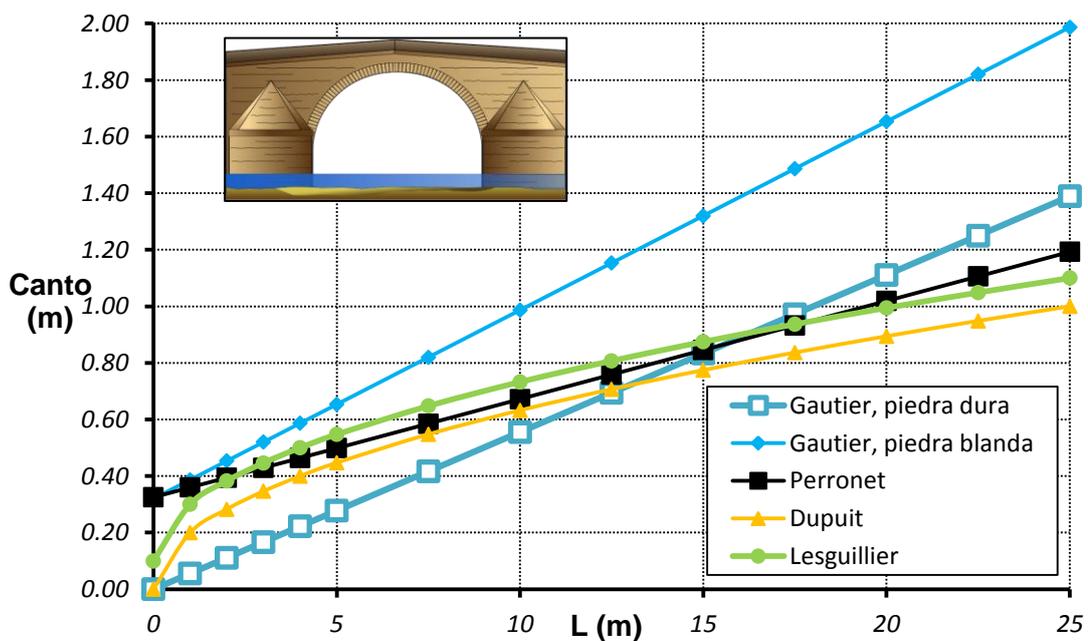


Figura N° 5.2: Representación gráfica de los valores para el espesor (canto) de bóvedas semicirculares.

Salvo las curvas propuestas por Gautier para piedra blanda, el resto de los valores son bastante similares, en especial cuando se tiene luces menores de 15,00 m. El valor que se obtiene con las fórmulas de Gautier, Perronet y Lesguillier aumenta linealmente con la luz, pero para Dupuit este aumento no es lineal.

Bóvedas Circulares (Escarzanas), ver fig. 3.19

Perronet: $c = 0.325 + 0.0347L$

Lesguillier: $c = 0.10 + 0.20\sqrt{L}$

LÉveille: $c = 0.33 + 0.033L$

Gauthey: Si $L < 2$, $c = 0.33$
 Si $2 < L < 16$, $c = 0.33 + \frac{1}{48}L$
 Si $16 < L < 32$, $c = \frac{1}{24}L$
 Si $L > 32$, $c = 0.33 + \frac{1}{48}(L - 32)$

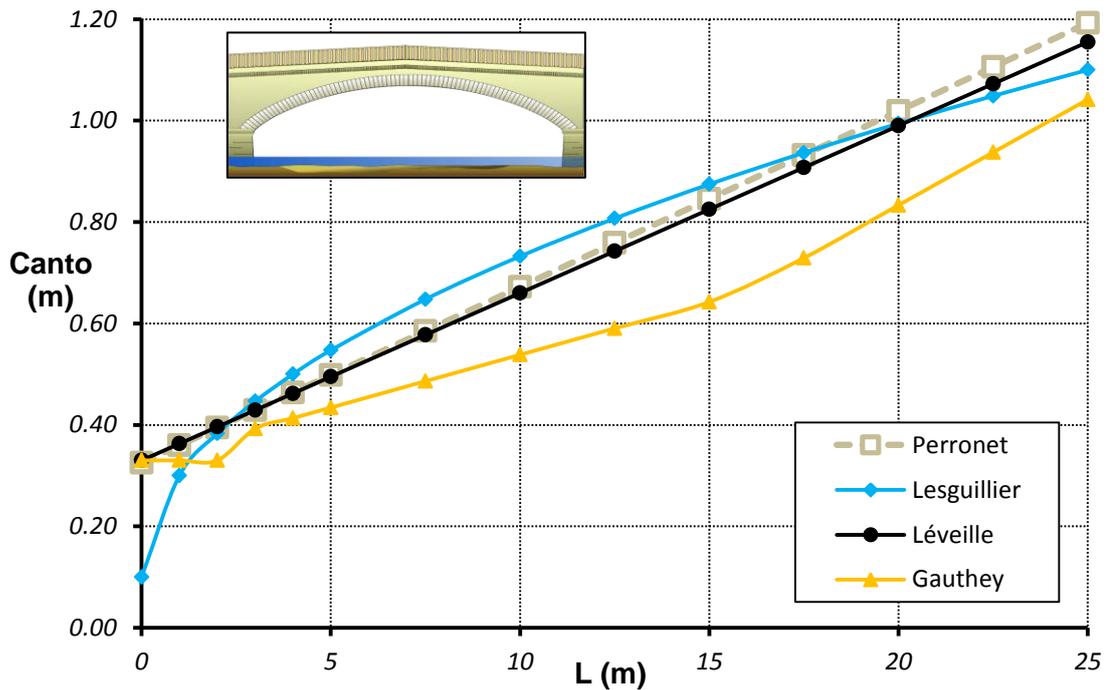


Figura N° 5.3: Representación gráfica de los valores para el espesor (canto) de bóvedas circulares.

También tenemos lo que Sejourné propuso, entre otros quizás la propuesta más exitosa, pero tomando ciertas consideraciones según el tipo de tráfico y la directriz.

Valor del espesor: $c = \alpha(1 + \sqrt{L})\mu$

Teniendo valores de α :

$$\alpha = 0.15, \text{ para bóvedas de carretera}$$

$$\alpha = 0.17, \text{ para bóvedas de vías estrechas}$$

$$\alpha = 0.19, \text{ para bóvedas de vías anchas}$$

El coeficiente μ depende de la relación flecha luz del puente (f/L):

Bóvedas semicirculares: $\mu = 1$

Bóvedas elípticas:
$$\mu = \frac{4}{3 + 2 \frac{f}{L}}$$

Bóvedas circulares (escarzanas):
$$\mu = \frac{4}{3} \left(1 - \frac{f}{L} + \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right)$$

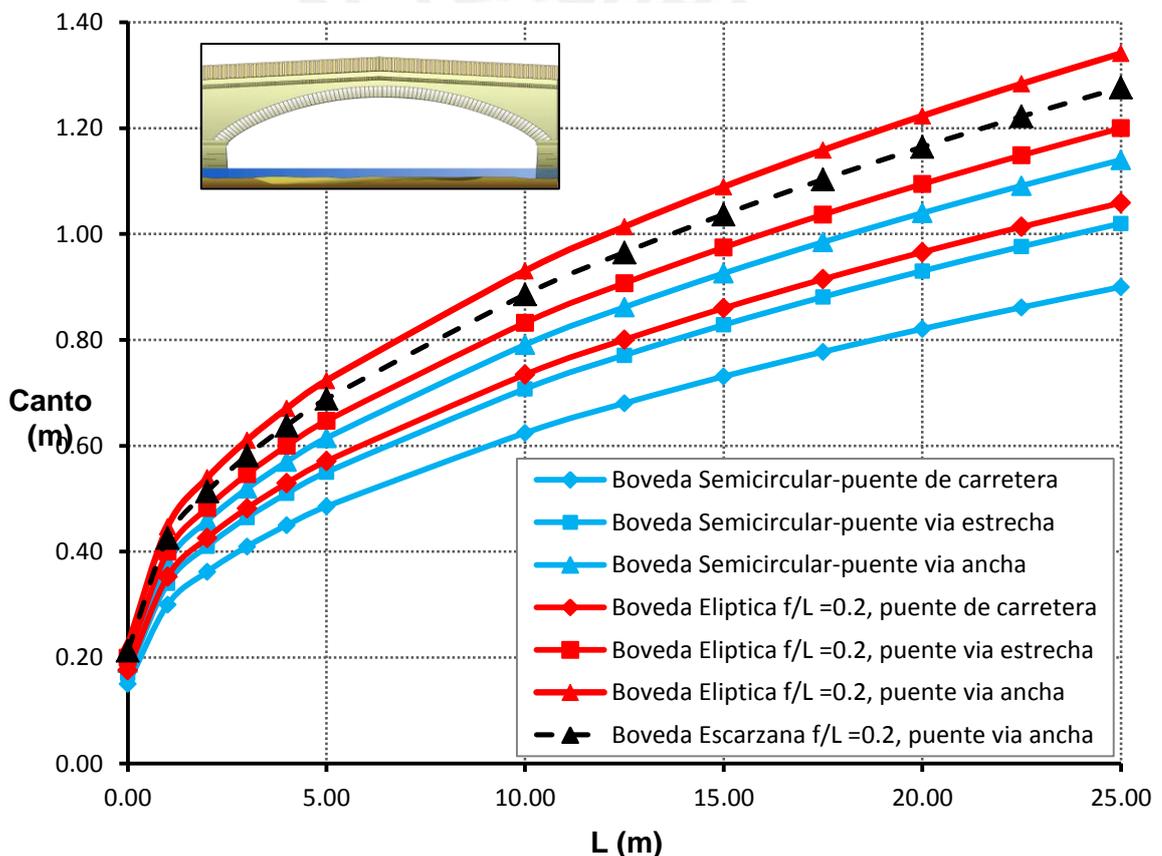


Figura N° 5.4: Representación gráfica de los valores para el espesor (canto) de bóvedas según Sejourné.

b. Pilares y Estribos.

Los pilares sufrieron muchos cambios con respecto a su dimensión, tal es así que en la época romana la anchura del pilar (b_p) fue aproximadamente 1/3 o 1/5 de la luz del pilar, en los siglos medievales se retrocedió y se ensancharon, para luego volver a reducirse en los siguientes siglos.

Presentamos algunas de las fórmulas más fáciles y representativas que se usaron:

Perronet: $b_p = 2.25c$

Sejourné: $b_p = 0.4 + 0.15h_p$

h_p : Altura del pilar en metros.

Otras propuestas:	Si $L < 10$ m	$b_p = 2.5c$
	Si $L > 10$ m	$b_p = 3.5c$

5.2.6 Caracterización mecánica

Los puentes de mampostería presentan una serie de peculiaridades que las diferencian de otras tipologías y que afectan directa o indirectamente al comportamiento mecánico de las mismas. A continuación presentaremos algunas variables necesarias para realizar una caracterización mecánica de la mampostería empleada en la ejecución de los diferentes elementos estructurales.

a. La piedra

Resistencia a Compresión

Acorde al libro de Roberto Meli, las rocas ígneas formadas por consolidación del magma fundido, son las más duras y por tanto las más difíciles de trabajar, de modo que su uso fue restringido a los grandes bloques ya las formas simples. El granito y el basalto son los más representativos de estos materiales.

Las rocas sedimentarias, producidas por la descomposición y sucesiva reconsolidación de las ígneas, son mucho más trabajables y han tenido mayor y más amplia utilización en la construcción, por la facilidad de cortarlas y labrarlas en las formas deseadas. Las areniscas y las calizas son las más comunes entre las rocas de este tipo, por haber sido depositadas en capas sucesivas, son más débiles en la dirección perpendicular a la del lecho de depósito.

Las rocas metamórficas derivan de las anteriores por transformaciones químicas o por calor o por presión. De ellas los mármoles son los que han tenido mayor empleo en la construcción de los grandes monumentos. Sus propiedades son similares a las que tienen las más duras entre las rocas sedimentarias.

La resistencia a la compresión de las piedras en la construcción varía entre 100 y 1000 kg/cm², el siguiente cuadro nos muestra valores de compresión de algunas rocas según la norma DIN 1053.

Cuadro N° 5.1 Resistencia Mínima a Compresión de ciertas rocas (según Norma DIN 1053)

Grupo	Tipo de rocas	Resist. Min a compresión (kg/cm ²)
A	Caliza, travertino, tobas volcánicas	200
B	Areniscas blandas y calizas arcillosas	300
C	Calizas compactadas, dolomitas, mármol, basalto	500
D	Areniscas cuarzosas (con cemento silíceo)	800
E	Granito, sienita, diorita, pórfido, diabasa, basalto (rocas ígneas en general)	1200

Fuente: Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos, Roberto Meli.

Resistencia a Tracción

Acorde al libro de Roberto Meli, la resistencia a la tracción de las piedras es considerablemente menor que la resistencia a compresión, viene a ser por lo general la décima parte de la resistencia a compresión. Esta diferencia tan marcada hace que la resistencia a tracción se considere nula en el análisis de este tipo de estructuras.

Cuadro N° 5.2 Resistencias Mecánicas de ciertas piedras

Tipo de roca	Resist. tracc. (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Tiza	1-15	20-100
Caliza ordinaria	5-50	50-300
Caliza compacta	40-150	300-600
Esquistos	10-100	70-500
Granito	60-150	150-700
Cuarzita	70-200	250-800

Fuente: Diseño estructural de arco, bóvedas y cúpulas en España.

Módulo de Young

Los valores del módulo de Young aparecen así en la tabla anterior, estos valores son orientativos, ya que el módulo de elasticidad de las piedras varía con la tensión de trabajo e incluso, el comportamiento es distinto para distintas piedras de la misma cantera.

b. El mortero

Resistencia a Compresión

Los morteros de cal y arena alcanzan típicamente resistencias a compresión, que oscilan entre 5 y 20 kg/cm². También son afectados por el intemperismo debido a que su relativa porosidad permite la penetración de humedad con sales que atacan el cementante.

La introducción del cemento Portland data de fines del siglo XIX, de ahí que su presencia en los edificios antiguos es producto comúnmente de reparaciones o modificaciones recientes. El mortero de cemento además de alcanzar altas resistencias y mucho mayor módulo de elasticidad, impone mayor rigidez a las obras de mampostería y esto tiende a producir concentraciones de esfuerzos.

Resistencia a Tracción

Los morteros, como los concretos, los ladrillos y las piedras tienen una muy buena capacidad para absorber esfuerzos de compresión, pero su resistencia en tensión es muy baja, normalmente es el décimo de la de compresión.

c. La mampostería

Las propiedades mecánicas de la mampostería presentan múltiples variaciones debido a la calidad de la piedra y del mortero, sin embargo la interacción va a depender mucho del tipo de aparejo o de la distribución interna, y del deterioro que estas tengan. Para comprender el comportamiento mecánico de la mampostería, conviene examinar el modelo simple de piedra-mortero en capas superpuestas al ser sometido a un estado de esfuerzos de compresión, el conjunto va a tener un acortamiento en la dirección de los esfuerzos aplicados y un alargamiento en la dirección transversal (efecto de Poisson). El mortero habitualmente es menos rígido que la piedra, y tiene deformaciones mayores, tanto en la dirección aplicada de los esfuerzos de compresión, como en la transversal. Por ello la interacción entre los dos produce una contracción transversal del mortero y una expansión de la piedra. Esto indica la aparición de esfuerzos de compresión en el mortero y de tensión en la piedra, estos esfuerzos de tensión transversal producen un agrietamiento que crece a medida que la carga aumenta, y que maneja la capacidad de la mampostería para resistir cargas axiales. Debido al poco espesor que presenta el mortero su capacidad en compresión no suele ser crítica debido a que queda confinado entre las piedras. Por lo detallado anteriormente la resistencia de la mampostería es significativamente menor que la de la piedra, pero puede ser muy superior a la del mortero.

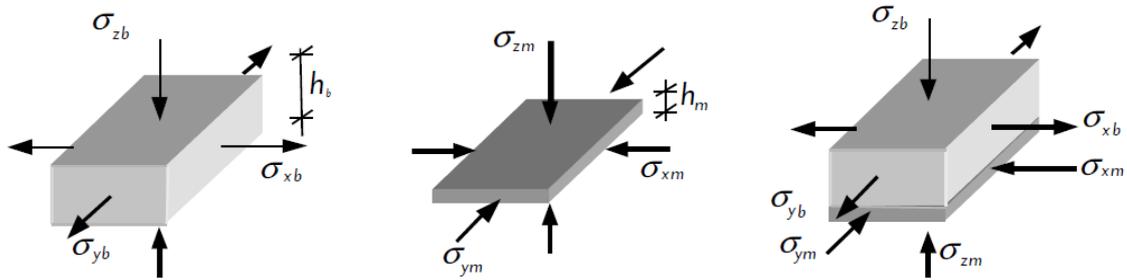


Figura N°5.5: Estado tensional en la pieza y en el mortero de la mampostería sometida a esfuerzos de compresión.

Fuente: Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados. Sergio Espejo

Cuadro N° 5.3 Propiedades Mecánicas de algunos tipos de Mampostería de Edificios Históricos.

Material	Peso Volumétrico (x 10 ⁻³ kg/cm ³)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (x 10 ³ kg/cm ²)
Adobe	1.8	2 – 5	3.0
Bloques de tepetate con mortero de Cal	1.8	5 – 10	5.0
Ladrillo con mortero de lodo	1.6	5 – 10	5.0
Ladrillo con mortero de cal	1.6	15 – 20	10.0
Mampostería de piedra irregular con mortero de cal	2.0	10 – 15	5.0
Mampostería de piedra de buena calidad	2.0	30	200.0

Fuente: Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos, Roberto Meli.

Según Roberto Melí, los valores de resistencia en compresión de esta mampostería suele ser muy baja y puede variar entre 5 y 50 kg/cm², en parte debido a la gran variedad de los mismos que hace difícil precisar este valor. La resistencia en tensión de la mampostería es muy baja y esto depende mucho de la adherencia que exista entre el mortero y las piedras, puede alcanzar valores de 1 a 2 kg/cm². El módulo de elasticidad de la mampostería varía en intervalos sumamente amplios, teniendo valores de 5000 kg/cm² para mampostería irregular con alto contenido de mortero, hasta 200 000 kg/cm² para mampostería de bloques de piedra de buena calidad con juntas de mortero muy delgadas. En una misma construcción se pueden presentar variaciones de los módulos

de elasticidad de los materiales que la conforman, influyendo en la distribución de cargas entre los elementos.

5.3 Comportamiento Estructural por el Método de Elementos Finitos

Como hemos descrito los puentes de mampostería en arco no son necesariamente estructuras tan sencillas como se pensaba en el siglo XVIII, sino que gozan de un grado de complejidad cuyo análisis de comportamiento necesita involucrar, cuando menos la interacción entre la mampostería, el material de relleno, la superficie de rodamiento y el suelo de fundación, cada uno de los cuales puede responder de manera no lineal ante las cargas vivas y de peso propio. La forma estructural del puente, que incluye bóvedas y tímpano, implica significativas respuestas tridimensionales cuyos efectos, si bien han sido notados, poco se han tenido en cuenta en la valoración global de este tipo de estructuras. Para elaborar un análisis mucho más preciso y completo de los puentes de arco parece necesario el uso de modelos tridimensionales basados en el método de elementos finitos que permiten considerar la geometría y las propiedades mecánicas de cada una de sus partes constitutivas con el fin de obtener un modelo numérico representativo, así como lo presentan los diferentes trabajos realizados en conservación de monumentos históricos. Sin embargo, Sergio Espejo en su tesis lista ciertas consideraciones para este método, el cual citamos a continuación.

Parámetros principales.

- ✓ Geometría del arco.
- ✓ Estado inicial de tensiones, densidades de la mampostería y del relleno.
- ✓ Parámetros de resistencia y la deformación del relleno.
- ✓ Resistencia a compresión de la mampostería (en algunos modelos).
- ✓ Resistencia a la tracción de la mampostería y el estado plástico o de ablandamiento de la curva tensión deformación.

Aplicabilidad

- ✓ Este método proporciona resultados en el comportamiento en servicio de la estructura. Como tal, puede ser empleado para analizar defectos existentes, su origen y relevancia en la seguridad estructural.
- ✓ Del mismo modo puede utilizarse para evaluar el efecto de los refuerzos y las reparaciones, teniendo en cuenta no solo la repercusión en la capacidad estructural, sino también el desempeño de la estructura y sus componentes. Este método posibilita hacer más consideraciones con respecto al comportamiento de la estructura, y de ahí, analizar efectos a largo plazo de los métodos empleados en las intervenciones.

Ventajas

- ✓ Puede resultar extremadamente versátil y permitir cualquier tipo de sofisticación requerida por el diseño.
- ✓ Esta versatilidad se traduce en el análisis e investigación de diferentes alternativas de refuerzo.

Desventajas

- ✓ La predicción del comportamiento en servicio puede ser bastante sensible a las condiciones de contorno y al estado inicial de tensiones, los cuales son muy difíciles de determinar.
- ✓ La carencia de sistemas o paquetes de cálculo personalizados implica la preparación de modelos que pueden consumir bastante tiempo.
- ✓ Con el incremento de la complejidad de los modelos, se incrementa el tiempo requerido para obtener resultados. Debido a que los estudios paramétricos son esenciales, esta alternativa puede resultar bastante costosa.
- ✓ Los resultados son sensibles a la dificultad para determinar los parámetros de entrada, tales como las propiedades del relleno, la resistencia de la fábrica, las interfaces entre diferentes elementos estructurales

5.4 Diagnóstico de evaluación

El diagnóstico tiene como finalidad identificar las causas de los daños y caracterizar el estado de conservación de la estructura. En particular, el diseño de la intervención debe basarse en una consideración estricta de las conclusiones derivadas del diagnóstico y de la verificación de la capacidad portante para determinar la aceptabilidad de los niveles de seguridad estructural.

Un buen diagnóstico es esencial para determinar el tratamiento correcto que aplicar y establecer un pronóstico. El diagnóstico se debe basar en un conocimiento suficiente, tanto de los datos históricos sobre construcción original e intervenciones anteriores como de los materiales y procesos de degradación que el elemento patrimonial ha sufrido o se encuentra sufriendo. Es básico para ello el estudio documental junto con la inspección detallada de la obra acompañada de los ensayos y análisis oportunos.

Otro ejemplo es de cómo un diagnóstico orienta el tratamiento correcto y su ausencia lleva a actuaciones inútiles. Conviene recordar al respecto que el devenir de los tiempos conlleva la imposición de usos y servidumbres para los que originalmente las estructuras históricas no estaban diseñadas.

5.5 Propuesta de Conservación e Intervención

Una característica fundamental en la conservación e intervención de estructuras antiguas, es mantener la originalidad de un monumento histórico, teniendo como premisa este concepto nuestro análisis desarrollado está enfocado en recuperar la característica constructiva del puente con la que fue puesta en servicio. Nuestros viejos puentes monumentales merecen el mayor de los respetos, por eso la intervención más conservadora y recomendable, es realizarlo con materiales que permitan una identificación nítida y clara, sin que esto altere su fisonomía formal, y en lo posible que los trabajos sean reversibles, puesto que si nos equivocamos al hacerlo, nuestras siguientes generaciones puedan corregirlo.

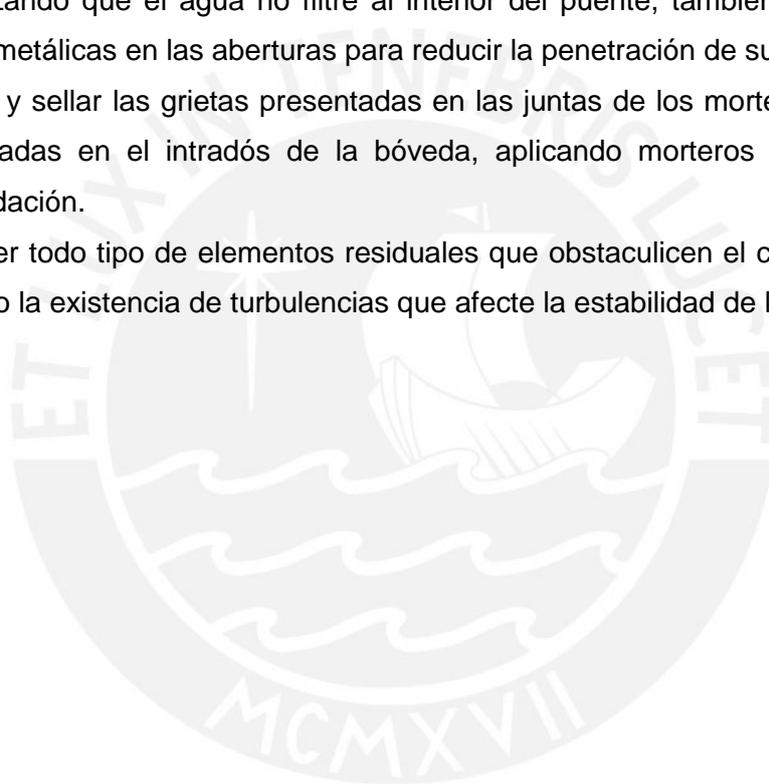
Podemos citar una lista de trabajos que se pueden hacer en un puente. Además, las intervenciones que se realicen tienen el propósito de asegurar la veracidad de la estructura:

- ✓ Restaurar su integridad con el uso auténtico de materiales locales y sistema de construcción.
- ✓ Manejo de un plan de mantenimiento (como parte del plan de control global para el centro histórico de su entorno)
- ✓ Incrementar la estabilidad estática, y compactar en su totalidad las partes del puente. Limpiar las juntas del intradós del puente de piedra en arco, con la remoción de sus piedras inestables y agrietadas en un estado de deterioro.
- ✓ Reparación urgente para la protección de sus elementos estructurales: reparar columnas fracturadas, reforzar y reparar las barandillas, la reparación global del puente de piedra. Podría darse la inyección de un material adecuado con el fin de consolidar el núcleo conector, y prevenir el mayor crecimiento de vegetación, así como también prevenir un mayor ensanche de las grietas, a través de secciones reconstruidas posiblemente insertando mortero apropiado.
- ✓ La mampostería trabaja sobre los puentes de piedra en arco, entonces se considera incluir algunas intervenciones específicas como: el rejuntado de la clave en el arco del puente de piedra, los muros de piedra dañados deben de ser limpiados de los residuos de mortero y vegetación que presenten, y reemplazar individualmente algunas piedras por uno nuevo, de una forma exacta de los muros de la estructura.
- ✓ Incorporar elementos de huellas de pasos antideslizantes que no desmejore el valor de la apariencia original de la estructura.

Desarrollar un plan de mantenimiento rutinario reduce problemas futuros y asegura la viabilidad y conservación del puente. La actividad más importante que debería contemplar este plan, sería el de impedir que el agua filtre por la mampostería, sin duda

es de vital importancia un mantenimiento adecuado y en buen estado del sistema de drenaje. Además, de la no presencia de agujeros y si las hubiera, repararlas rápidamente para limitar la infiltración del agua. A continuación podemos citar algunas acciones para un adecuado mantenimiento rutinario y que puede ser tomado como modelo:

- ✓ Limpieza general de las partes visibles del puente y la eliminación de vegetación existente, para evitar la presencia de humedad y agentes nocivos causantes de un deterioro en la mampostería. La limpieza de vegetación de los maderos se debe realizar con cuidado para no desprender las juntas y sea causante de posibles fallas.
- ✓ Limpieza de los sistemas de drenaje existentes para eliminar los residuos acumulados, garantizando que el agua no filtre al interior del puente, también se pueden instalar mallas metálicas en las aberturas para reducir la penetración de suciedades.
- ✓ Limpiar y sellar las grietas presentadas en las juntas de los maderos, en especial las presentadas en el intradós de la bóveda, aplicando maderos apropiados para su consolidación.
- ✓ Remover todo tipo de elementos residuales que obstaculicen el cauce normal del río, evitando la existencia de turbulencias que afecte la estabilidad de los pilares.



CAPITULO VI

CASO APLICATIVO: PUENTE TRUJILLO, LIMA –PERÚ

Se eligió este puente para su estudio, por lo que representó en su momento para la comunicación con las ciudades del norte del país y el desarrollo de las ciudades que la integraban. A pesar de esto el puente no ha tenido el más respeto que debería haber tenido para su conservación, tanto históricamente como constructivamente, ya que su vista actual presenta diversos cambios con respecto a su diseño original, quizás estos cambios se debieron a múltiples acciones, ya sea por parte del hombre o por parte de la naturaleza. Actualmente se encuentra protegido por el Instituto Nacional de Cultura.

6.1 Búsqueda de Información

6.1.1 Ubicación

El puente Trujillo ubicado sobre el río Rímac, y cruza este río a la altura de la primera cuadra del Jirón de la Unión en el cercado de Lima y el Jirón Trujillo en el Rímac, forma parte del Centro Histórico de la ciudad de Lima, capital del Perú. En coordenadas UTM está ubicado al oeste del meridiano de Greenwich a 77°01'85" y al sur del paralelo del Ecuador a 12°02'85".

6.1.2 Condición de Patrimonio

El puente Trujillo fue declarado como patrimonio de la nación por el Instituto Nacional de Cultura mediante Resolución Suprema No. 2900-1972-ED de fecha 28 de Diciembre de 1972.

6.1.3 Antigüedad

El puente Trujillo tiene aproximadamente cuatro siglos de existencia, construido entre 1608 y 1610 por el maestro mayor Juan del Corral durante el mandato del virrey Juan de Mendoza y Luna, Marqués de Montesclaros, fue el primer puente construido en la capital del Perú y sobre el río Rímac, antes de este puente existían puentes de mimbre, de madera y de cantería pero por los embates del río éstos fueron arrasados. Permaneció como único nexo en una lima amurallada hasta 1870, cuando la muralla fue derribada y se empezó a construir el puente Balta. Además fue determinante para el desarrollo del Norte y Sur del País, así como para el acceso de los limeños hacia la alameda de los descalzos y hacia las Pampas de Amancaes, dos importantes centros atractivos de la época colonial.

6.1.4 Reseña Cronológica del Puente Trujillo

1608: el 13 de Febrero se realizó un concierto notarial entre el alcalde Don Joseph de Rivera y el maestro alarife Juan del Corral, nombrándolo Maestro Mayor de la obra del puente, y se encargaba de la dirección de todos los trabajos de todos los trabajos.

1610: se concluyeron las obras del puente, siendo inaugurado por el Virrey Don Juan de Mendoza y Luna, Marques de Montesclaros.



Figura N° 6.1: Ilustración del siglo XVIII, observamos lima y el puente Trujillo vistos desde el Rímac.

<http://www.facebook.com/limantigua>

1746: se derriba el arco de ladrillo que daba entrada al puente por un fuerte terremoto, cayendo por tierra la estatua ecuestre del rey Felipe V, que ocho años antes se había colocado.

1766: el virrey Manuel de Amat ordena restablecer el suelo de los pilares con pedrones y mezcla, con una profundidad de tres varas (2.50 m.); ese mismo año se coloca un reloj en el frontispicio del arco de entrada, en lugar donde se veneraba la imagen de nuestra señora de Belén.

1868: Después de sufrir varias refacciones el arco de entrada, el gobierno de Don José Balta manda reparar totalmente y colocar en el ángulo superior un escudo del Perú y, sustituye el rotulo "Dios y el Rey" por "Dios y la Patria"

1879: El 5 de abril se produce un incendio cercano al arco de entrada, destruyéndolo gran parte de su estructura, posteriormente fue demolido definitivamente.



Figura N° 6.2: (Arriba) vista del puente con su arco de entrada imagen tomada en 1865, (abajo izq.) Arco que daba acceso al puente trujillo, (abajo der.) en 1818 se colocan unos hitos y cadenas de fierro para dar margen entre la vereda y la calzada.

Fuente: Biblioteca de la Municipalidad de Lima.



Figura N° 6.3: Vista del puente en 1890, desde donde hoy se conoce la alameda Chabuca Granda, observamos que posee sus seis arcos, y la vía del ferrocarril que va hacia el callao.

Fuente: Biblioteca de la Municipalidad de Lima.



Figura N° 6.4: Vista del puente y la continuación del jirón Trujillo en 1890, observamos que posee sus pretilos (parapetos o antepechos) de piedra y sus balcones como miradores.

Fuente: Biblioteca de la Municipalidad de Lima.

1901: Se realiza el ensanchamiento de la calzada y veredas, se reemplazan los pretilos de piedra por barandas de fierro fundido traídos de Bruselas-Bélgica.



Figura N° 6.5: Se aprecia los nuevos barandales. Al fondo se aprecia la antigua iglesia de Los Desamparados, el cual sufrió serios daños con el terremoto de 1940, luego fue totalmente destruida. Más al fondo se aprecia las torres de la Catedral de Lima.

Fuente: Biblioteca de la Municipalidad de Lima.

1985-86: se realiza un reforzamiento en las bases del puente, posteriormente se demuele el arco situado a la orilla del Rímac, para poner un puente de concreto postensado para dar paso a la vía de evitamiento.

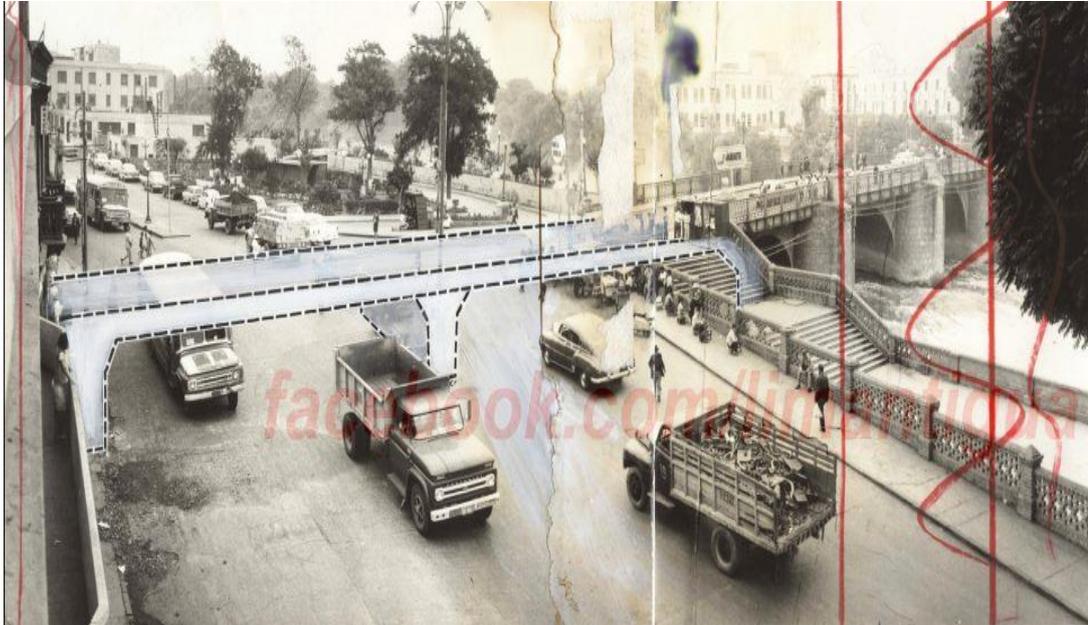


Figura N° 6.6: Imagen difundida por el diario la Prensa en los años 60, vemos la planificación y proyección del puente para dar paso a la vía de evitamiento.

<http://www.facebook.com/limantigua>



Figura N° 6.7: Se observa el puente postensado colocado conjuntamente al puente Trujillo, imagen difundida también por el diario La Prensa en los años 60.

<http://www.facebook.com/limantigua>

Los Años 90

El puente no sufrió grandes cambios en estos años, pero se empezaron esfuerzos por tratar de conservarlo, y se desarrollaron proyectos para desarrollar trabajos de mantenimiento y su puesta en valor.

Inicios del año 2000

En el 2004 se realizaron trabajos de repintado y limpieza de los elementos de fierro fundido, y pequeños retoques en la estructura.

En el 2009 se renueva la estructura postensada colocada anteriormente, y se coloca losas prefabricadas. Este trabajo sirvió más para aumentar la altura libre de la vía de evitamiento en el cruce con el puente, de 4.20 m. a 5.20 m., aunque este último trabajo actuaría indirectamente.



Figura N° 6.8: Trabajos de colocación de losas prefabricadas en el puente Trujillo, realizados en Mayo del 2009 para dar más altura libre en este punto de la vía de evitamiento.

<http://peru21.pe/noticia/280943/50-avanza-instalacion-nueva-plataforma-puente-trujillo>



Figura N° 6.9: Vista actual del puente Trujillo desde el parque de la muralla, no se tiene un registro exacto de cuando fue quitado el arco que estaba del lado del mercado de Lima, por donde pasa la vía del ferrocarril.

6.1.5 Naturaleza y estado del puente

Como hemos podido notar el puente ha tenido múltiples cambios desde su puesta en servicio hasta nuestros días, sin duda estos cambios ya sea con un acertado o poco criterio modificaron la fisonomía del puente de piedra. El puente al ser una estructura de inicios del siglo XVII fue concebido por un estilo propio de la época o, más expresamente como lo deseaba construir el maestro Juan del Corral como un estilo gótico-isabelino, que era frecuentemente usado para construir monasterios y catedrales en España.

Si identificamos entre los cambios que sufrió el puente, por parte del hombre y otra por la acción de la naturaleza, definitivamente los realizados por el hombre son más notorios debido al cambio brusco que tuvo. Entre los cambios más notorios o destacables que desarrollo el hombre en su afán de mantenerlo en uso podemos mencionar, el cambio de los pretilos de piedra por barandales de fierro fundido para aumentar el ancho carrozable del puente, justamente las exigencias del tráfico hicieron cambios radicales al puente, ya que no solo se demolieron los pretilos de piedra sino que también se colocaron perfiles de acero para sostener una estructura voladiza entre los pilares (ver figura N° 6.10) y podemos notar como este elemento desvirtúa la fisonomía del puente al combinar materiales diferentes; sumado a esto también está la demolición de los arcos extremos, una para el paso del ferrocarril y la otra para la vía de evitamiento, colocando no solo materiales de comportamiento totalmente distintas sino también de característica

constructiva totalmente distinta al puente (ver fig. N° 6.11); y por último esta la acción negligente para provocar incendios y dañar algunos elementos del puente. No cabe duda que estos trabajos y hechos modificaron en gran parte sus características originales y propias del puente Trujillo.

Mientras tanto la acción de la naturaleza frente al puente fue principalmente debido a los sismos y a las crecidas del río, provocando ciertas acciones para mantenerlo y conservarlo. Entre tanto los trabajos realizados para mitigar estos daños, quizás el más relevante fue el enrocado del lecho del río para evitar el asentamiento de los apoyos, este enrocado ubicado en los pilares del puente y se pudo apreciar hasta antes del inicio de la obra vía parque Rímac (Abril del 2012). Y los trabajos para mitigar los efectos sísmicos fueron dirigidos a zonas no estructurales, como el arco de entrada que poseía, que constantemente era la estructura más perjudicaba debido a lo poco resistente que era, posteriormente debido a un incendio se optó por una total demolición de esta estructura.

El puente además presenta un tarrajeo general de concreto, diferenciando un tarrajeo simple en las bóvedas y un tarrajeo simulando una mampostería de sillar en los pilares, este tarrajeo si bien esta hecho de concreto, en este caso sirvió para proteger los materiales conformantes del puente frente a los efectos ambientales como el clima, meteorización, humedad, etc.



Figura N° 6.10: Se observa el perfil metálico que posee el puente apoyado sobre los pilares. Además se puede ver los barandales de fierro fundido.



Figura 6.11: (Izq.) Se demolió el arco que estaba del lado del Rímac. (Der.) Igualmente se demolió el arco del lado del Centro de Lima.

6.1.6 Caracterización estructural – Clasificación tipológica

Caracterización geométrica

Según el concierto de obra realizado para la obra del puente se especifican ciertas medidas para su construcción:

“La planta y obra de dicho puente había de tener según la traza trescientos setenta y ocho pies, con seis pilares en el río y dos arcos a los extremos. En total siete arcos, uno se formaría sobre el mismo terreno, a la entrada por la calle de las casas reales, apoyándose en el muro de cantería del tajamar. La calzada sería de 33 pies de longitud con dos parapetos o antepechos de dos pies de grueso cada uno; los pilares de 22 pies de ancho y de largo 59 incluyéndose en esta medida el ángulo de la rompiente agua arriba. La traza se especifica textualmente, había de ser respetada inviolablemente”

Según el párrafo anterior el puente debe de tener 7 arcos, 6 visibles y uno por debajo de las casas reales, lo que hoy es el patio trasero de palacio de gobierno, este séptimo arco quedó soterrado a medio siglo XVII, Torres Saldamando en su obra Libro Primero de Cabildos de Lima nos relata: “su descubrimiento se hizo a fines del siglo XIX, al momento de remover los cimientos del arco de entrada incendiado se reconoció que descansaba otro arco que continuaba del puente.”

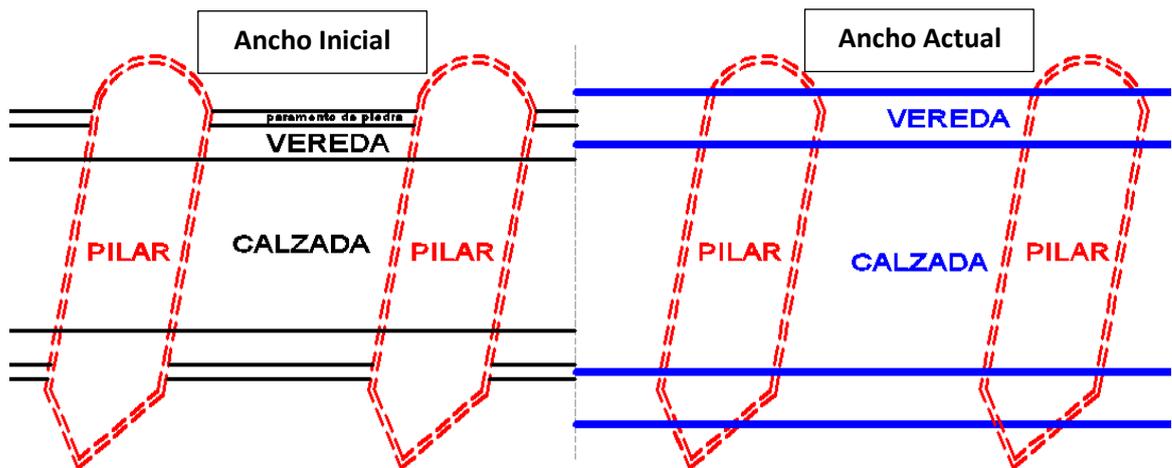


Figura N° 6.12: Vista donde se muestra el ancho inicial y el ancho actual.

Cuadro N° 6.1: Variación del ancho que tuvo el puente Trujillo.

	Ancho Inicial (m)	Ancho Actual (m)
Calzada	7.25	9.60 m
Vereda	1.40	2.20 m
Muro Parapeto (Pretil o antepecho)	0.60 (0.30 c/u)	----

Un detalle que indicó el maestro mayor Juan del Corral con respecto a la construcción de los pilares fue: “todos estos pilares han de subir con el grueso que tuvieron hasta lo alto de la calle”. En la literatura revisada vimos que los pilares eran construidos usualmente hasta el arranque de las bóvedas y, de ahí rellenos para poder alcanzar el nivel de la rasante de la calzada, en este caso no se desarrolló de esta manera, sin lugar a duda el maestro Juan del Corral eligió levantar los pilares hasta la superficie de la calle o calzada superior del puente, para que estos funcionaran como verdaderos contrafuertes laterales entre las bóvedas. Sumado a este detalle constructivo podemos añadir que la geometría de los pilares tiene una particularidad esviación en planta, además de presentar sus espolones (tajamares) en punta aguas arriba para romper la corriente del río y semicircular por la parte aguas abajo.

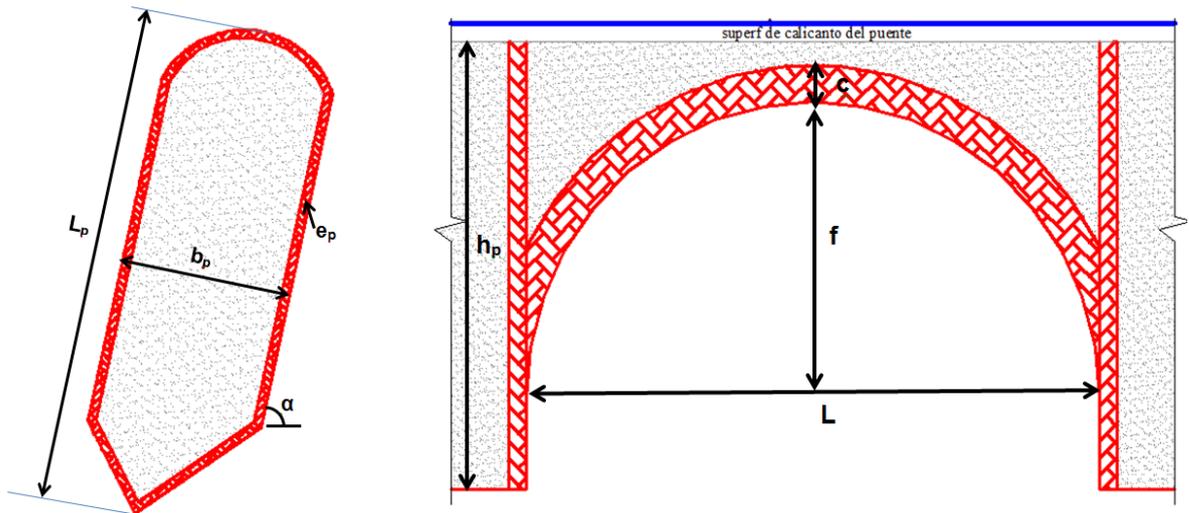


Figura N° 6.13: Geometría del Pilar en planta y del arco en elevación.

Cuadro N° 6.2: Características geométricas que presenta el puente Trujillo.

Elemento	Notación		Valor obtenido
Bóveda	Luz del arco	L	9.80 m (*)
	Flecha del arco	f	4.90 m
	Canto de bóveda	c	0.60 m
Pilar	Largo del pilar	L_p	17.80 m
	Ancho del pilar	b_p	6.00 m
	Altura del pilar	h_p	7.50 m
	Espesor del muro en el pilar	e_p	0.28 m
	Angulo de esviación	α	78°

(*) Es un valor promedio, ya que oscilaba entre 9.70 y 10.10 m

Podemos observar en el cuadro anterior que el valor del canto de la bóveda, se encuentra adecuadamente dentro del rango de valores comúnmente usados para esta tipología de puentes con bóvedas semicirculares, tal como lo muestran las figuras N° 5.2 y 5.4

Característica y Caracterización mecánica de los materiales

Las características de la mampostería están establecidas en el concierto de obra, ahí se describe el modo de asentar las hiladas de las piedras externas que habían de ser desbastadas a picón, señalan el número y sus dimensiones; también añade el concierto de obra que, los macizos se rellenaran de hormigón bien hecho y atestado de piedra tosca tomando ligazones en el asiento, se tenían que fabricar las bóvedas con anillos de piedra y con roscas de ladrillo, teniendo cada una dos hiladas de ladrillo y medio, de

manera que la rosca sea incorporada y trabada una con otra de tal manera que el grueso de todo sea tres ladrillo de alto.

De acuerdo a lo indicado en el concierto de obra se cuenta con una mampostería de dos materiales, teniendo a la piedra como un amarre de las hiladas de ladrillos. En la figura N° 6.14, podemos ver parte de la mampostería que presentan los pilares.



Figura N° 6.14: Piedras y ladrillos usados en la mampostería del pilar, además podemos notar un tarrajeo de concreto que simula a una mampostería de sillería regular.

El concierto de obra también indica que las piedras requeridas para la mampostería del puente procederían de las canteras de Surco, así como también el mismo maestro Juan del Corral ordenaba que tallaran las piedras en la misma cantera para luego ser llevados a obra. Por otra parte esta obra necesito desarrollar ciertos cambios de último momento en su construcción tal como lo señala el maestro Juan del Corral en su testamento, añadió dos tajamares que están hechos a un lado y al otro lado, y los antepechos de ladrillo debieron ser construidos de piedra, ya que los ladrillos por parecer poco durable se cambiaron por muto acuerdo entre los involucrados a dicha obra. Así también el maestro Juan del Corral se compromete en asegurar la duración del puente por un tiempo de treinta años desde su puesta en servicio, claro esto estaba enmarcado solamente a defectos en la construcción mas no a agentes externos, garantía que nunca se pudo cumplir porque el maestro murió a los dos años de entregada la obra.

Al no contar con ensayos de los materiales para la obtención de propiedades mecánicas, se tomó como referencia los valores indicados en los cuadros mencionados en el capítulo anterior, y comparándolos con algunos estudios de mampostería similares realizadas en el Perú.

Cuadro N° 6.3: Características mecánicas elegidas para los materiales del puente.

Tipo de material	Característica Mecánica	Simbología	Valor asumido	
Mampostería (muros de piedra)	Módulo de Elasticidad	E_{muro}	0.5 E+03 ó 2.0 E+03 MPa	5.0 E+03 ó 20.0 E+03 Kg/cm ²
		E_{arco}	20.0 E+03 MPa	2.0 E+05 kg/cm ²
	Módulo de Poisson	ν	0.25	0.25
	Peso específico	γ	20.0 a 30.0 kN/m ³	2.0 a 3.0 gr/cm ³
	Esfuerzos	σ_{tracc}	1.5 MPa	15 kg/cm ²
		σ_{comp}	3.0 MPa	30 kg/cm ²
Relleno Granular	Módulo de Elasticidad	E_{rg}	0.34 E+03 MPa	3.48 E+03 kg/cm ²
	Módulo de Poisson	ν	0.33	0.33
	Peso específico	γ_{rg}	17.60 KNm ³	1.76 gr/cm ³
Relleno Rígido	Módulo de Elasticidad	E_{rr}	0.5 E+03 ó 2.0 E+03 MPa	5.0 E+03 ó 20.0 E+03 Kg/cm ²
	Módulo de Poisson	ν	0.25	0.25
	Peso específico	γ_{rr}	20.0 a 30.0 kN/m ³	2.0 a 3.0 gr/cm ³

6.2 Comportamiento estructural del puente mediante MEF

Esta etapa del proceso de modelación tiene como fin, permitir observar el comportamiento de algunas de sus partes y de la totalidad de la estructura en condiciones particulares de carga o alteraciones dinámicas, el análisis mediante el Método de Elementos Finitos se decidió desarrollarlo en el software sap2000 v.14, ayudándonos con el elemento tipo solid. Se prosiguió con un procedimiento sencillo para desarrollar el modelo tal cual fue, primeramente se definió la geometría del puente en Autocad en base a planos conseguidos del MNC y corroborando ciertas medidas con visitas de campo. Luego se desarrolló el modelo con su respectiva malla de elementos finitos y sus restricciones, posteriormente se asignó las propiedades mecánicas de los materiales que la constituyen y sus respectivas cargas para conseguir una solución final del modelo.

Principalmente para el desarrollo del modelo se tuvo en cuenta los elementos principales que lo conforman, es decir las partes estructurales como: bóvedas, muros tímpanos, pilares y el material de relleno

6.2.1 Análisis preliminar

Se realizaron 18 modelos preliminares de un solo arco, analizándolos a su peso propio con el fin de aproximar, por un lado los valores de las propiedades mecánicas de

sus materiales y por otro la existencia de un relleno rígido. Se consideraron dos grupos principales diferenciados por el módulo de elasticidad E , un único valor E del arco de bóveda ya que la bibliografía revisada nos indica que este elemento debería de ser de muy buena resistencia y un único valor tanto para la mampostería del muro del pilar y del relleno rígido. Los valores de los pesos específicos variaron en 20.0, 26.0 y 30.0 kN/m^3 , según sea el caso para el arco, muro pilar y relleno rígido. En cuanto al relleno granular sus condiciones son invariables en todos los casos.

A.) $E_{\text{arco}} = 20.0 \text{ E}+03 \text{ Mpa}$, E_{rr} , $E_{\text{m}} = 0.5 \text{ E}+03 \text{ MPa}$

B.) $E_{\text{arco}} = 20.0 \text{ E}+03 \text{ MPa}$, E_{rr} , $E_{\text{m}} = 2.0 \text{ E}+03 \text{ MPa}$

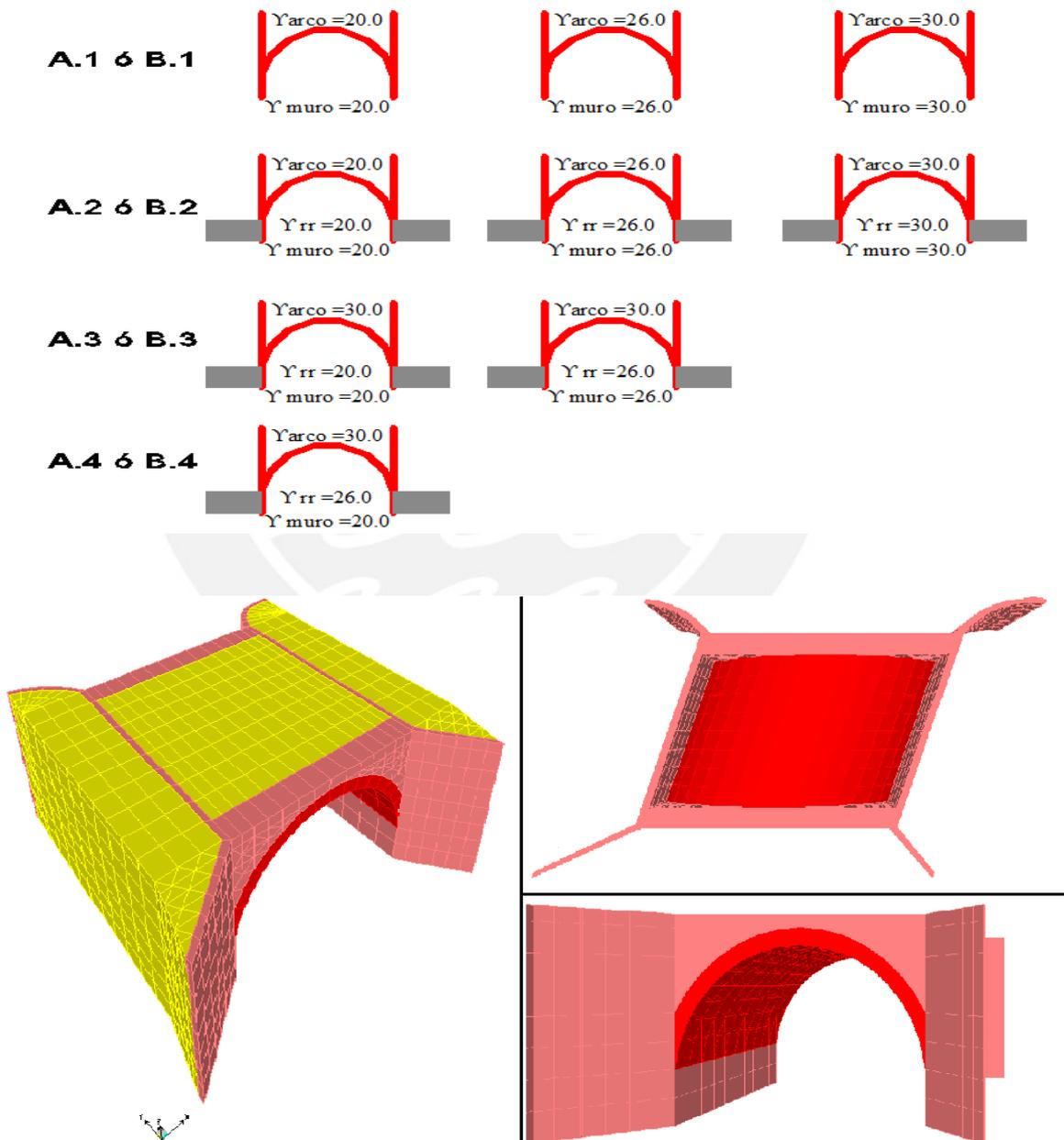


Figura N° 6.15: Modelo de elementos finitos de una bóveda del puente, (izq.) Vista en Isometría; (der. arriba) vista en planta; (der. abajo) vista en elevación.

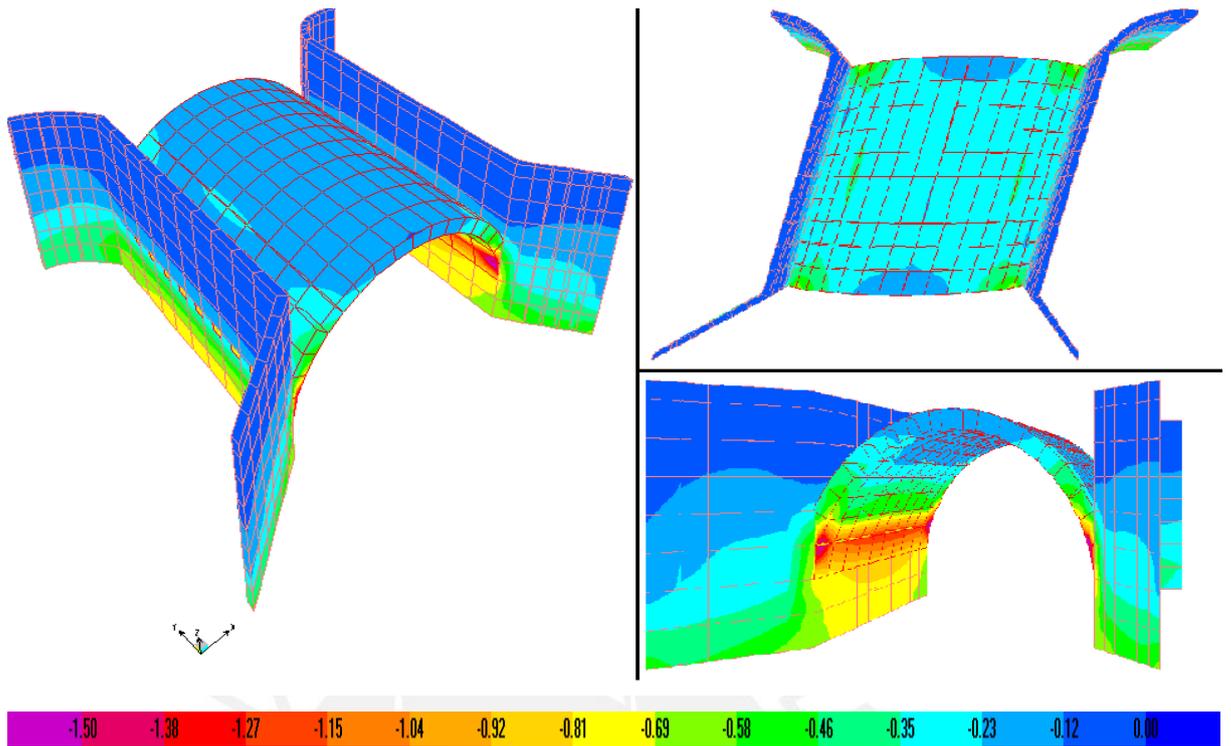


Figura N° 6.16: Esfuerzos máximos de compresión en el tramo analizado (izq.) Vista en Isometría; (der. arriba) vista en planta; (der. abajo) vista en elevación.

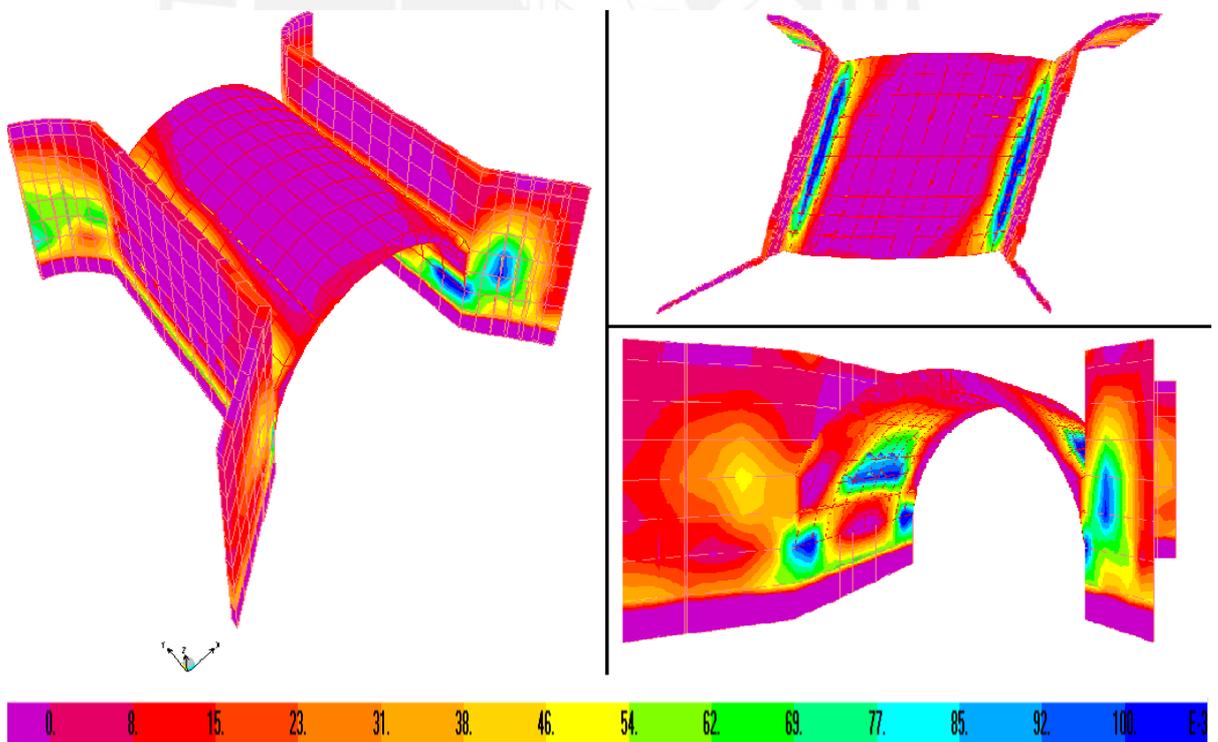


Figura N° 6.17: Esfuerzos máximos de Tracción en el tramo analizado; (izq.) Vista en Isometría; (der. arriba) vista en planta; (der. abajo) vista en elevación.

Para los diferentes modelos desarrollados la configuración de esfuerzos son muy similares, solo varia en sus valores, por eso que las figuras N° 6.16 y N° 6.17 son representativas.

Para los esfuerzos máximos de compresión, estos se desarrollan muy cercanos a los apoyos de la bóveda, en lo que se denomina riñones del arco; por el contrario los esfuerzos máximos de tracción se presentan por un lado en los apoyos de la bóveda y por otro sobre los riñones de la bóveda; los esfuerzos de compresión varían mucho más cuando el E de la mampostería y del relleno tiene un valor alto, que cuando este E es bastante bajo, casi no es mucho la diferencia; para los esfuerzos de tracción sin duda el relleno rígido ayuda a bajar las tracciones, pero se nota un mejor resultado cuando el valor de E de la mampostería y del relleno rígido es un valor alto, no olvidemos que el valor de E de la bóveda de arco es invariable. Podríamos afirmar que el muro de mampostería y el relleno rígido tendrían módulos de elasticidad muy similares, pero los pesos específicos podrían variar. A continuación se muestra los gráficos donde se muestra la comparación de esfuerzos de los distintos modelos realizados.

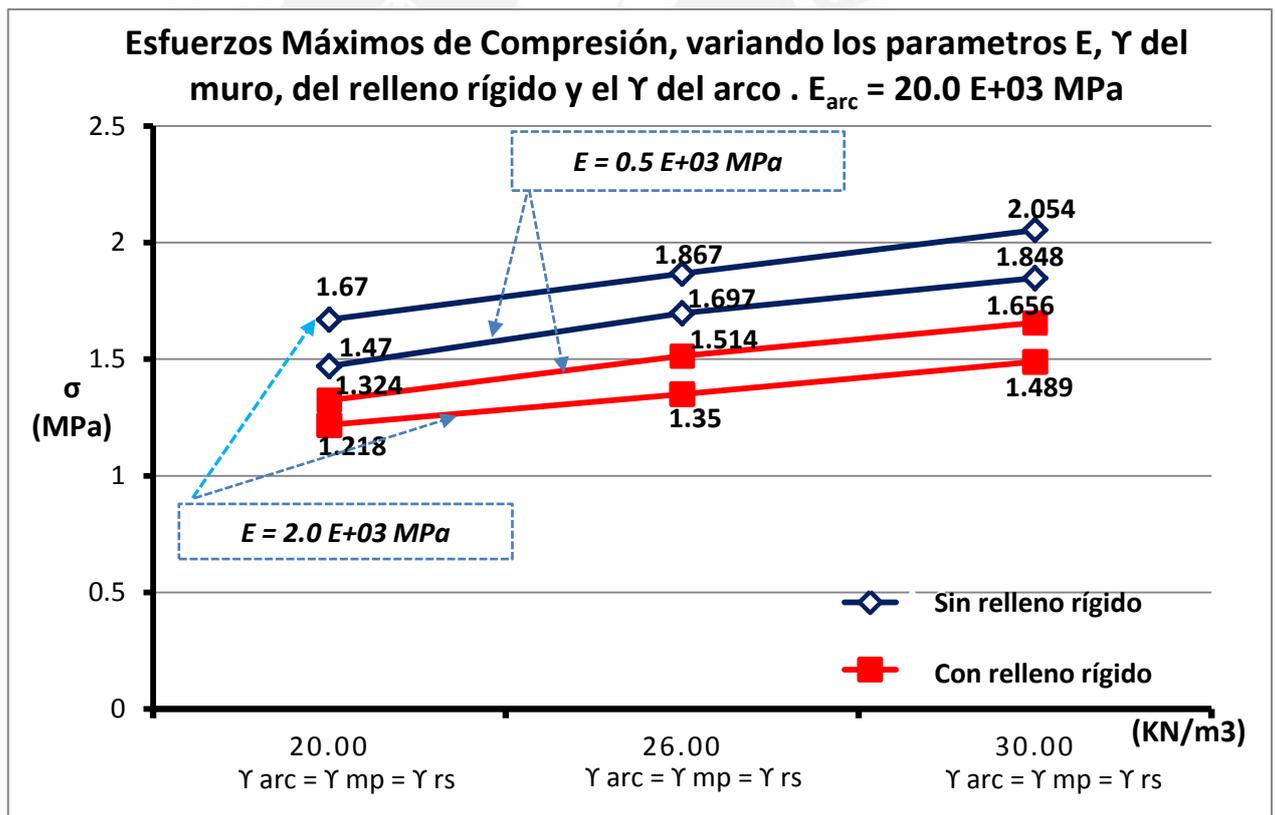


Figura N° 6.18: Esfuerzos máximos de Compresión del modelo simplificado, para los casos sin y con relleno rígido.

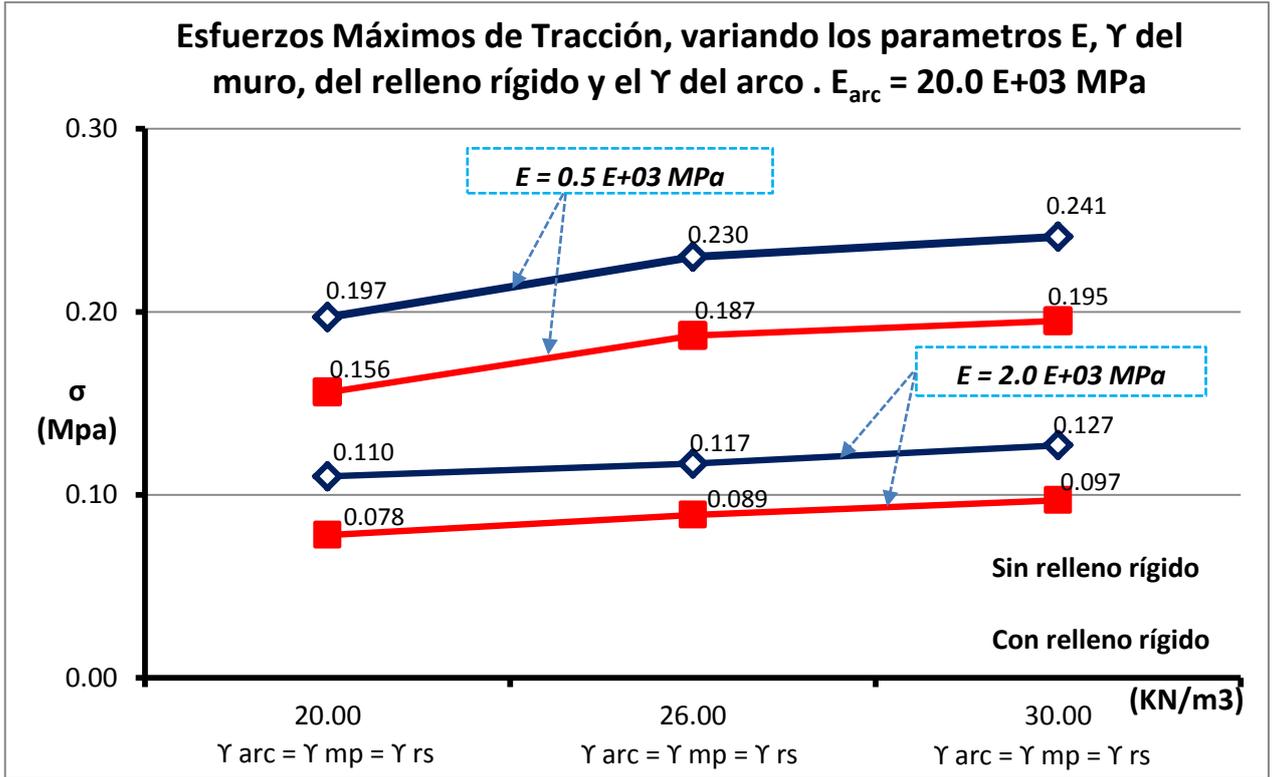


Figura N° 6.19: Esfuerzos máximos de tracción del modelo simplificado, para los casos sin y con relleno rígido.

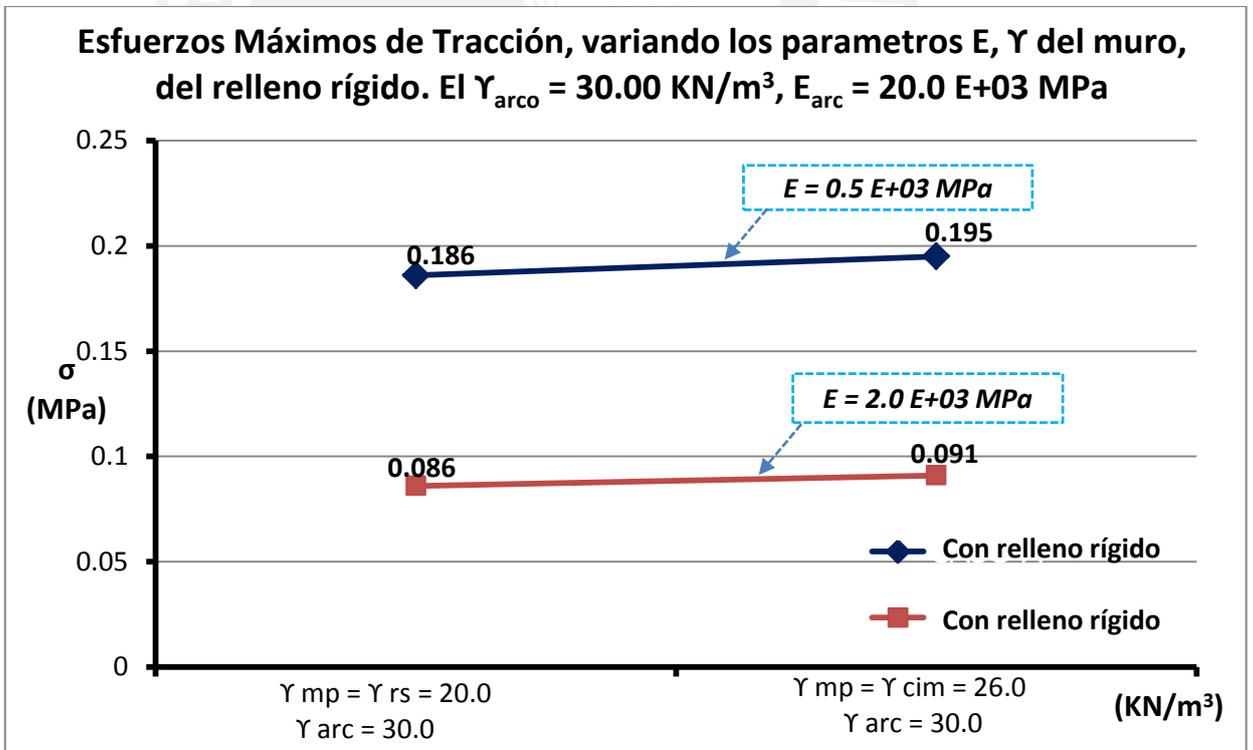


Figura N° 6.20: Esfuerzos máximos de tracción del modelo simplificado, para el caso con relleno rígido.

6.2.2 Análisis estructural del Puente Trujillo

Visto el análisis preliminar del puente, en un tramo de éste, ahora veremos el comportamiento global del puente. Se optó por modelar el puente cuando contaba con sus seis arcos originales, es decir el puente original pero sin su arco de entrada a la ciudad de Lima que poseía hasta 1879, y sin que se coloque las barandas de fierro fundido en 1901.

Desarrollaremos básicamente tres análisis básicos en el puente, un análisis lineal elástico (peso propio), un análisis modal y finalmente un análisis sísmico lineal, también se desarrollara el efecto que tiene una sobrecarga vehicular. Ya que la estructura generaría esfuerzos con una baja magnitud, se consideró que el material de la mampostería se comporte elásticamente.

Análisis Lineal Elástico.

Se desarrolló el modelo en 3D acorde a la geometría del puente, en este primer análisis se consideró el valor de la carga muerta y se establecieron las siguientes condiciones de frontera: por la presencia del confinamiento longitudinal la cara vertical en los extremos de la dirección del eje principal existe desplazamientos nulos, y también hay la libertad de desplazarse sobre su eje vertical. Todos los apoyos inferiores fueron restringidos a desplazamientos y con un resorte se representó la forma de contacto con el terreno contiguo en los estribos.

Análisis del Comportamiento Estructural de la Bóveda

La figura N° 6.21, nos permite observar los esfuerzos en dirección longitudinal o eje X, se aprecia que cada bóveda del puente está sujeto a esfuerzos de compresión alcanzando un valor máximo de 0.31 MPa (3.11 kg/cm²). Así también, se concentran pequeñas tracciones a media altura de los pilares sobre la parte curva, llegando a un valor de 0.05 MPa (0.50 kg/cm²).

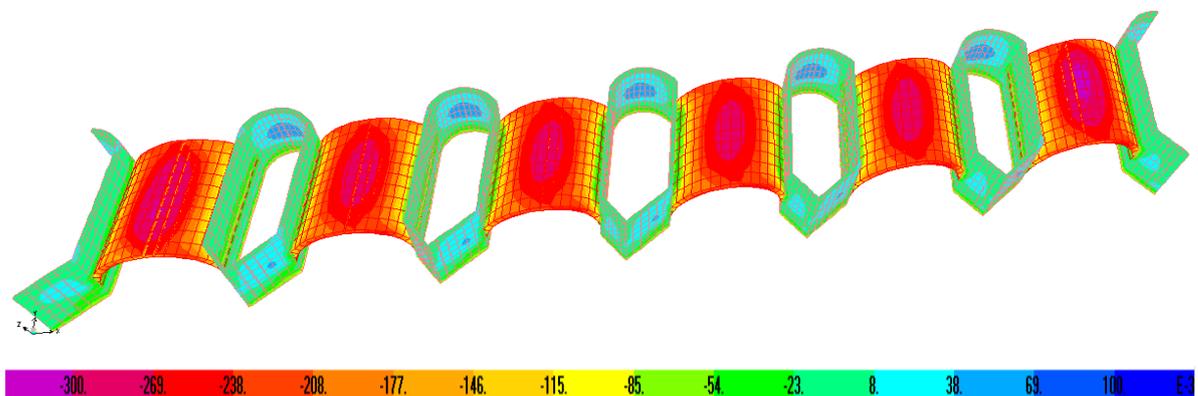


Figura N° 6.21: Distribución de esfuerzos dirección longitudinal o eje X, en la mampostería.

En la figura N° 6.22, nos permite ver los esfuerzos producidos en el sentido transversal o eje Y, donde los mayores esfuerzos de tracción se concentran sobre la zona baja de los arcos en el extradós de la bóveda (riñones de la bóveda), con un valor máximo de 0.13 MPa (1.31 kg/cm^2) y pequeños esfuerzos de tracción en los apoyos extremos del arco (0.05 MPa ó 0.55 kg/cm^2). Además, si comparamos con valores que Thunnissen indica estamos muy por debajo, ya que para una bóveda hecho de ladrillos y cal la tracción permitida sería 0.7 MPa , mientras que para los de piedra natural las tracciones varían entre $0.7 - 2.0 \text{ MPa}$, de todas manera es importante considerar la vulnerabilidad en estas áreas, ya que puede ver afectado su rigidez en caso de un sismo o una fuerza horizontal. Así también se concentran esfuerzos de compresión en los arranques de la bóveda con un valor máximo de 0.12 MPa (1.24 kg/cm^2), y en el trasdós de la bóveda con un valor de 0.04 MPa (0.43 kg/cm^2)

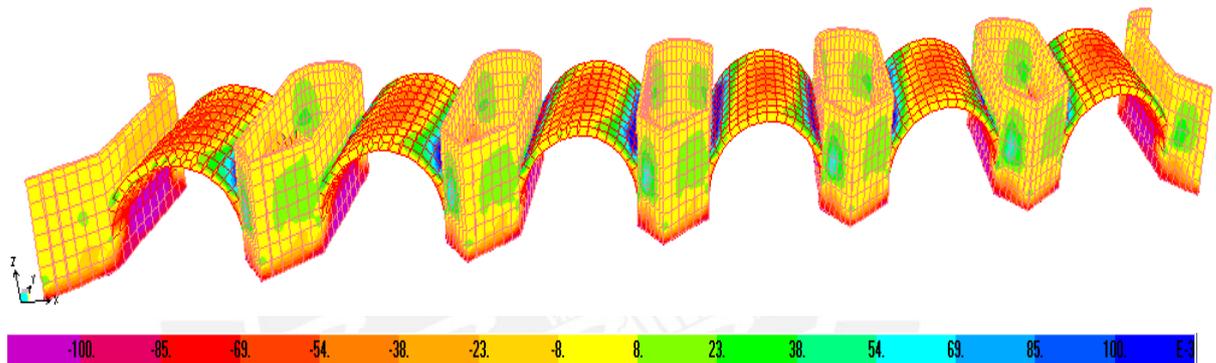


Figura N° 6.22: Distribución de esfuerzos dirección transversal o eje Y, en la mampostería.

En la figura N° 6.23, nos permite ver los esfuerzos en el eje Z, de esta forma los mayores esfuerzos de compresión se agrupan en los arranques de las bóvedas y tienen un valor aproximado de 1.45 MPa (14.50 kg/cm^2), la bóveda se encuentra sometida netamente a esfuerzos de compresión. La presencia de esfuerzos de tracción es nula.

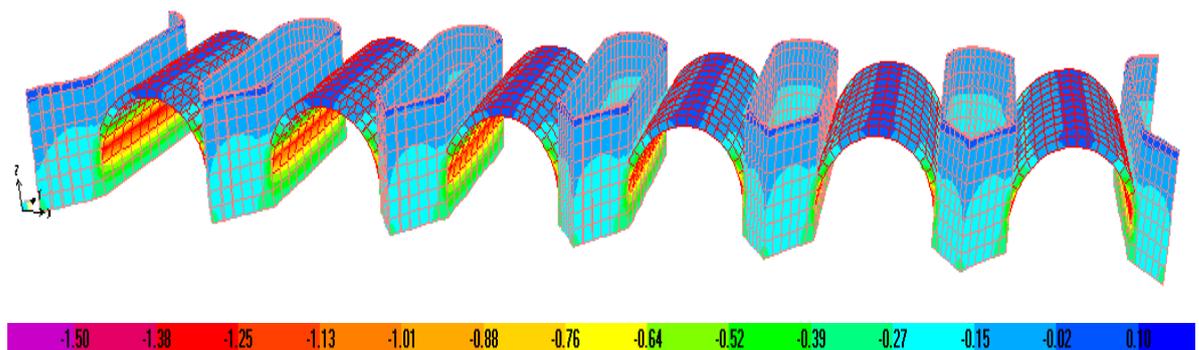


Figura N° 6.23: Distribución de esfuerzos en dirección vertical o eje Z, en la mampostería.

Análisis del Comportamiento Estructural del Material del Relleno.

Las siguientes figuras mostradas, nos ayuda a reconocer que el material de relleno distribuye los esfuerzos de arriba hacia abajo, es decir pequeñas tracciones en la parte superior y valores altos de compresión en la parte inferior. La figura N° 6.24, nos muestra los esfuerzos en el eje Z, produciéndose esfuerzos de compresión en la zona baja del relleno del pilar con un valor de 0.35 MPa (3.54 kg/cm²), además en la parte superior se producen pequeños esfuerzos de tracción del orden de 0.01 MPa (0.10 kg/cm²).

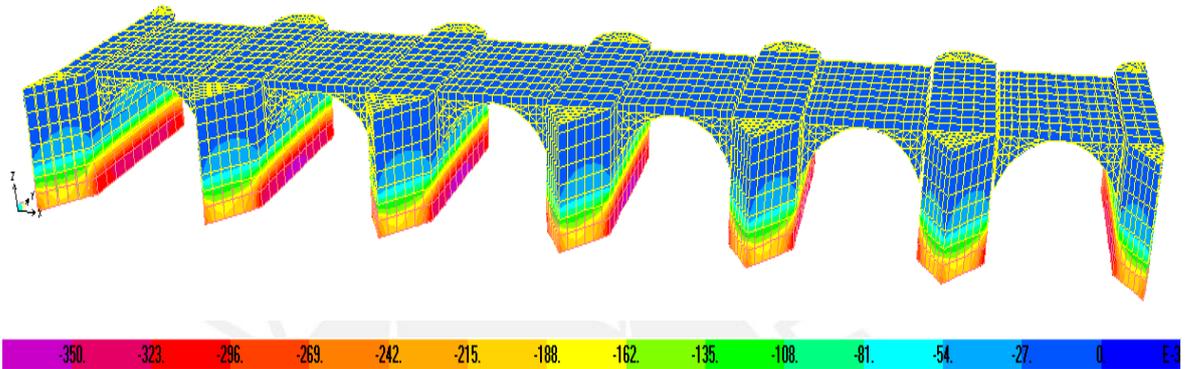


Figura N° 6.24: Esfuerzos producidos en dirección vertical o eje Z, en el material de relleno.

La figura N° 6.25, nos muestra los esfuerzos en dirección longitudinal o eje X, igualmente la compresión mayor se concentra en la parte inferior, tanto del relleno sobre la bóveda y del relleno en los pilares. Los esfuerzos de compresión se concentran en los senos de la bóveda alcanzando un valor de 0.04 MPa (0.42 kg/cm²) y en la base de los pilares de 0.08 MPa (0.83 kg/cm²), siendo menores al valor máximo de 0.35 MPa (3.54 kg/cm²), del sentido vertical o eje Z.

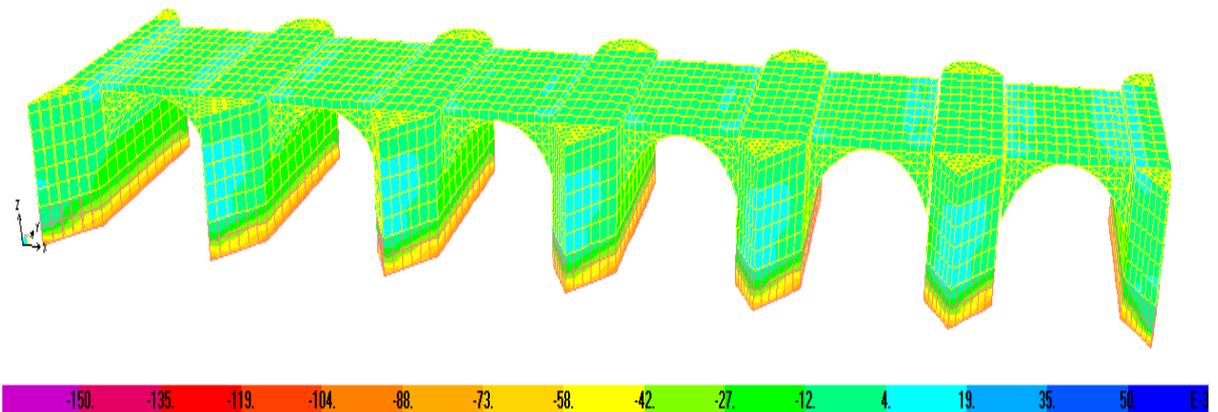


Figura N° 6.25: Esfuerzos producidos en dirección longitudinal o eje X, en el material de relleno del puente.

En la figura N° 6.26, nos permite ver que el material de relleno se comporta similarmente al sentido transversal o eje Y. Las mayores compresiones se producen en las bases del relleno de los pilares del puente con un valor de 0.11 MPa (1.10 kg/cm²) y en el relleno sobre la bóveda con un valor de 0.01 MPa (0.11 kg/cm²).

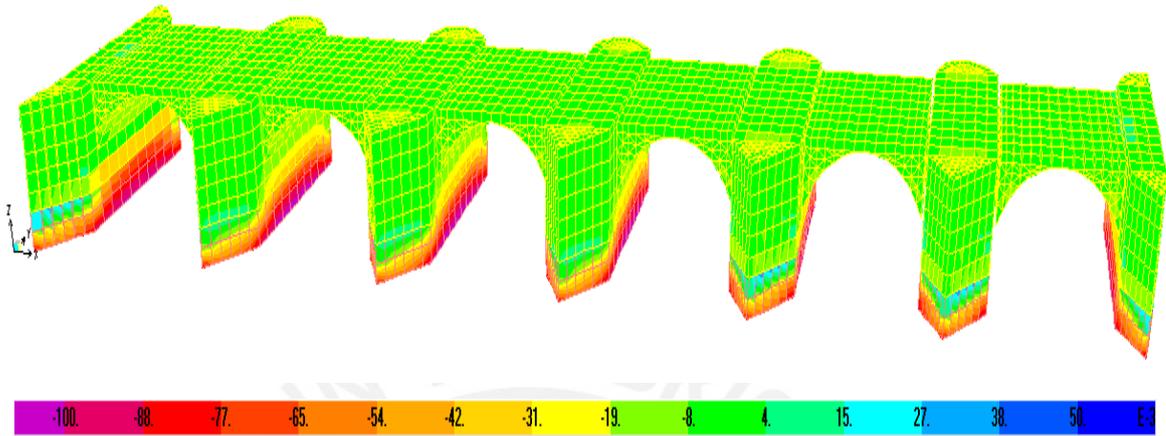


Figura N° 6.27: Esfuerzos producidos en dirección transversal o eje Y, en el material de relleno del puente.

Análisis del Comportamiento Estructural Global del puente.

La figura N° 6.28, nos ilustra los esfuerzos máximos de compresión. Además, nos indica que el puente se encuentra netamente bajo esfuerzos de compresión, agrupándose estos esfuerzos en los arranques de la bóveda, alcanzando un valor máximo de 1.58 MPa (15.80 Kg/cm²), también podemos notar pequeñísimas tracciones en la superficie del puente, acorde a los colores del rango de valores.

La figura N° 6.29, nos muestra los esfuerzos máximos de tracción que se producen en el puente, concentrándose en los apoyos extremos de la bóveda del arco, llegando a un valor de 0.1 MPa (0.97 kg/cm²), representando el 5.82% del esfuerzo de compresión máximo, y si comparamos con el rango de 0.7 – 2.0 MPa estaría muy por debajo. Así también podemos notar que la base de los pilares y la bóveda se encuentran netamente comprimidas.

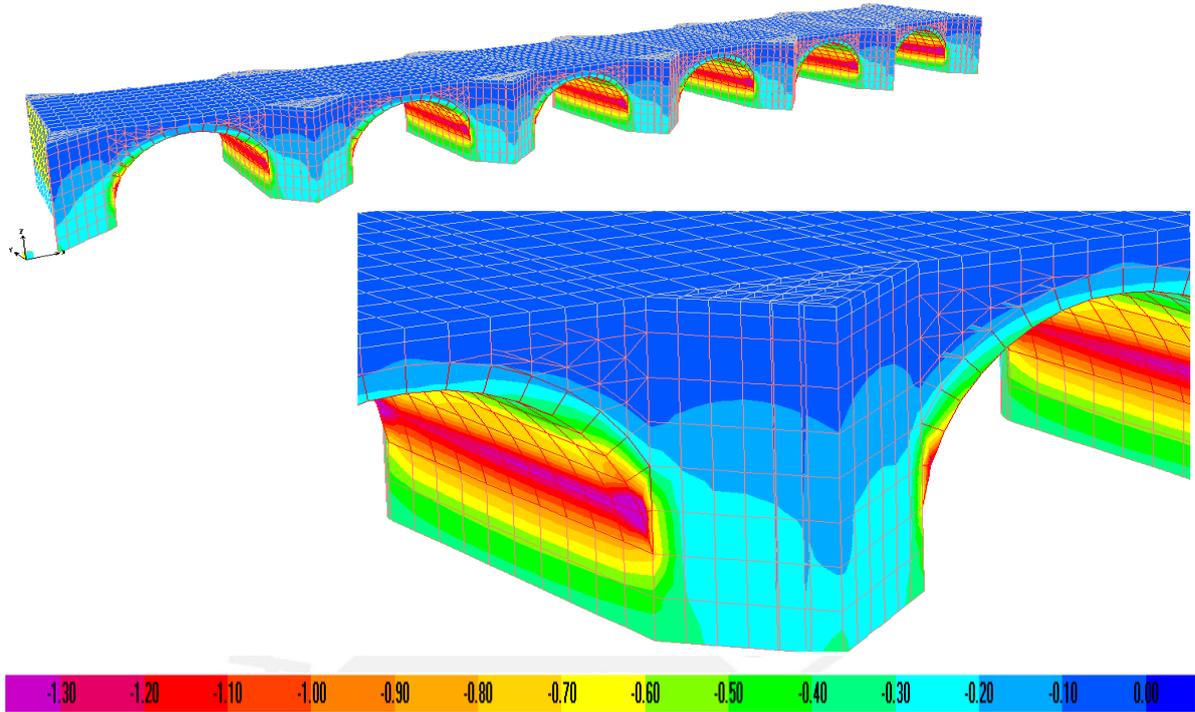


Figura N° 6.28: Esfuerzos Máximos de Compresión producidos en el puente Trujillo.

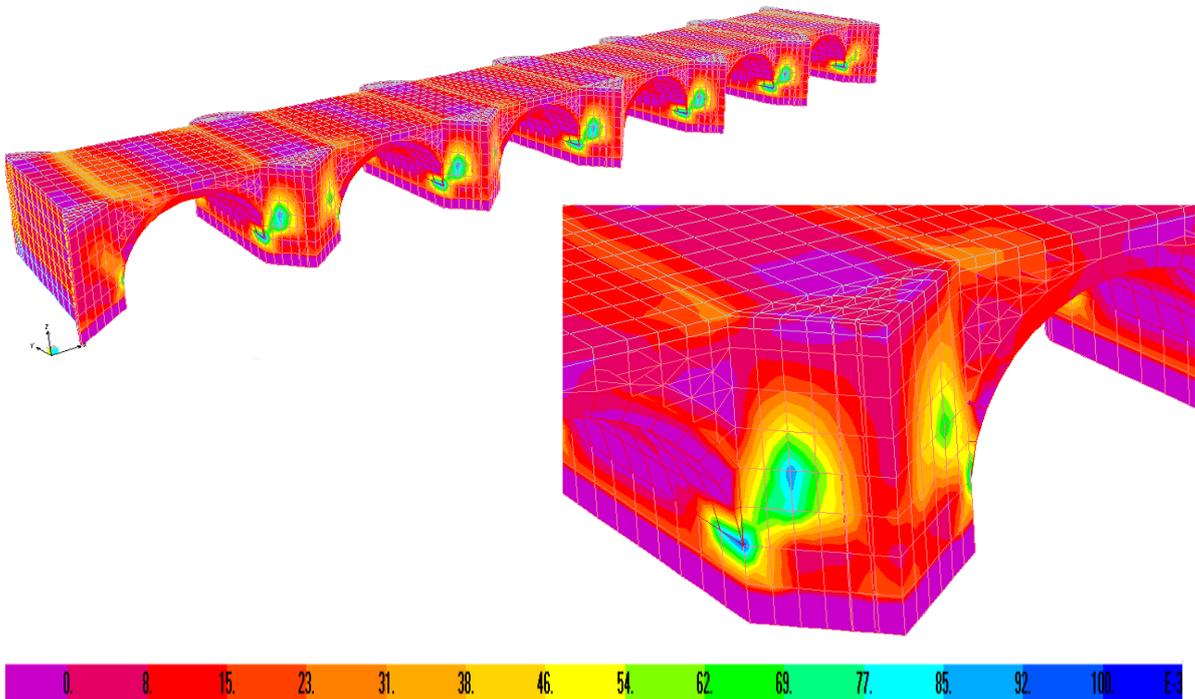


Figura N° 6.29: Esfuerzos Máximos de Tracción producidos en el puente Trujillo.

Análisis Modal.

Este análisis modal realizado para este sistema estructural lineal tuvo como objetivo primordial de identificar las frecuencias naturales y las formas modales del sistema o

estructura durante una vibración libre, el cual es útil para entender el movimiento dinámico básico de la estructura. Los valores propios y vectores propios que vienen de la solución de un sistema de n ecuaciones desacopladas que describen la dinámica del sistema, representan las frecuencias y modos de vibrar, así como también obtener la contribución de cada forma modal a la respuesta local. A menudo las frecuencias menores son las más aceptadas porque pueden ser los modos predominantes en la vibración del sistema.

El cuadro N° 6.4, muestra los modos de vibración del puente Trujillo, así como también las frecuencias y las formas modales son presentadas entre las figuras N° 6.30 al N° 6.33.

Cuadro N° 6.4: Periodo, Frecuencia y Masa participante de los modos de vibrar del puente.

Modos de Vibración	Periodo (seg)	Frecuencia modal (Ciclo/seg)	Porcentaje de Masa Participante (%)		
			UX	UY	RZ
1	0.1171	8.5364	0.5509	0.0692	0.1171
2	0.1021	9.7908	0.0000	0.0000	0.0426
3	0.0936	10.6800	0.0399	0.0035	0.0002
4	0.0925	10.8130	0.0409	0.6247	0.4443
5	0.0897	11.1430	0.0000	0.0013	0.0427
6	0.0887	11.2700	0.0000	0.0004	0.0445
7	0.0835	11.9810	0.0002	0.0273	0.0204
8	0.0803	12.4500	0.0556	0.0063	0.0001
9	0.0769	13.0070	0.0032	0.0006	0.0084

Del cuadro anterior podemos mencionar que el primer modo de la estructura presenta un periodo de 0.117 seg., además en este modo existe un 55.09 % de masa participante en dirección longitudinal del puente (dirección XX).

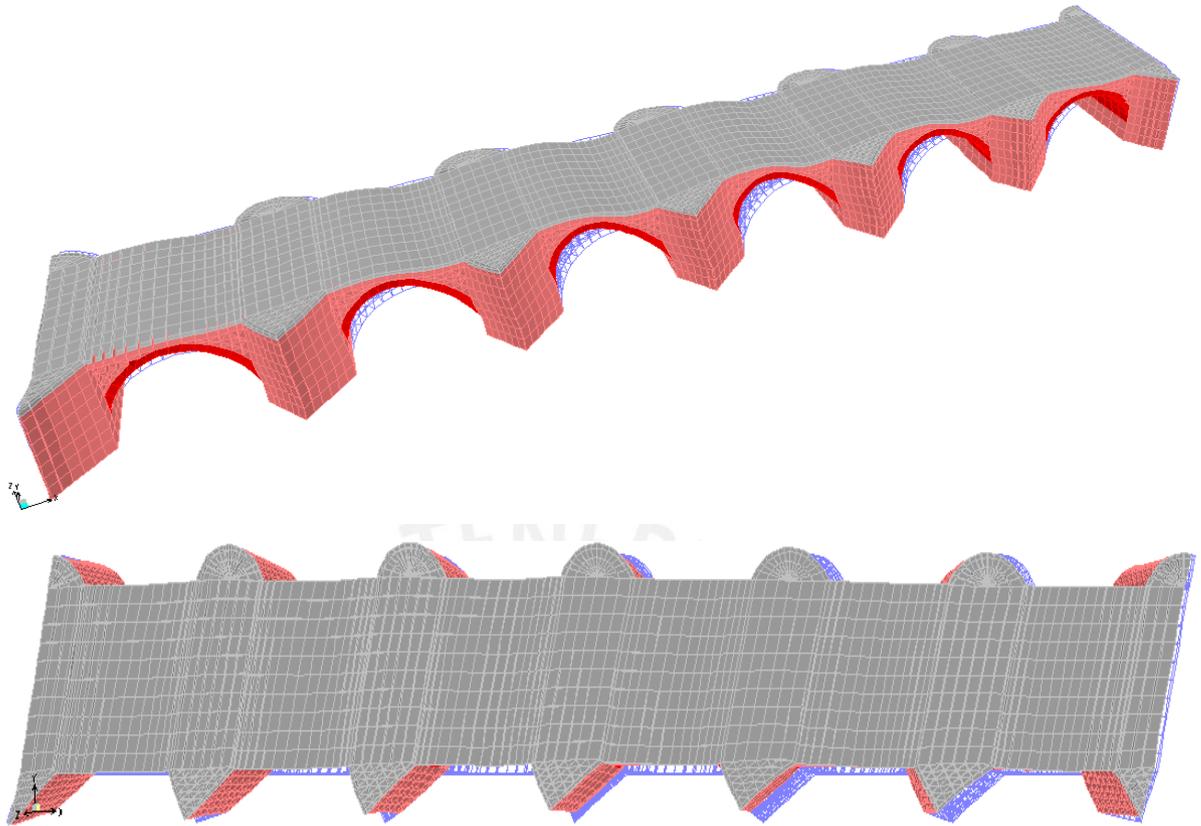


Figura N° 6.30: Primer modo de vibrar ($T_1=0.1171$ seg.)

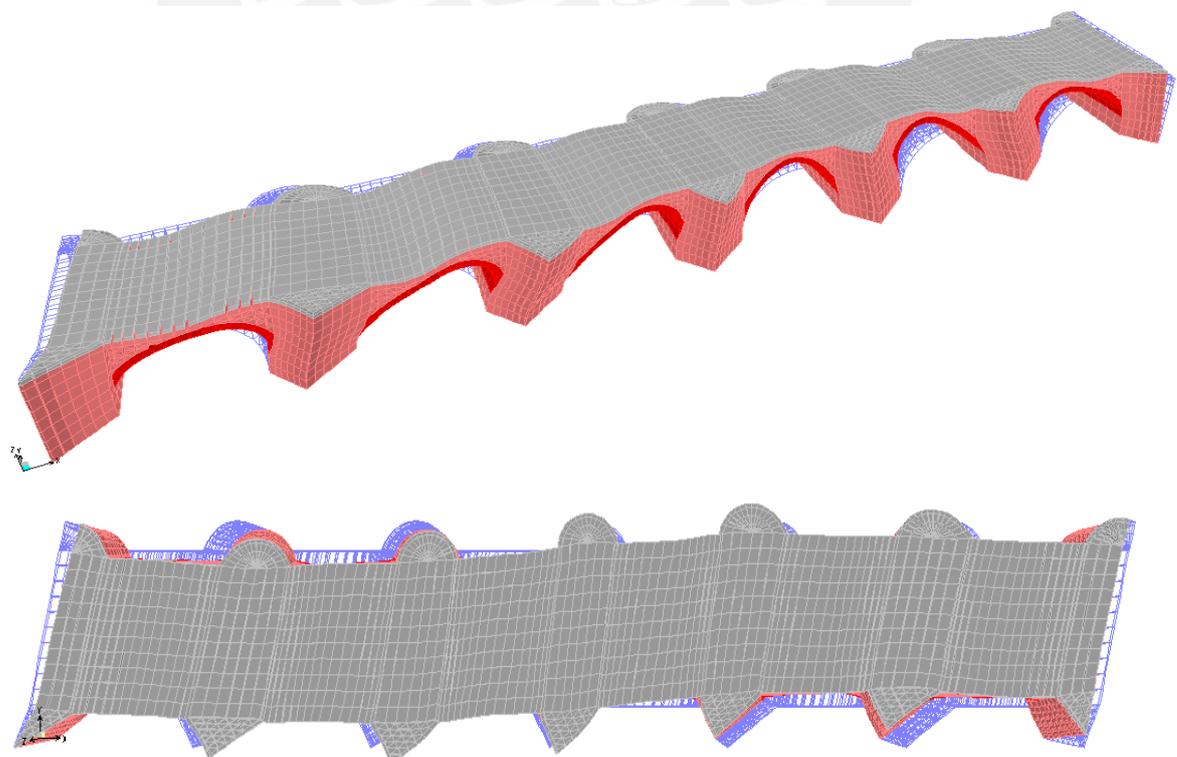


Figura N° 6.31: Segundo modo de vibrar ($T_2=0.1021$ seg.)

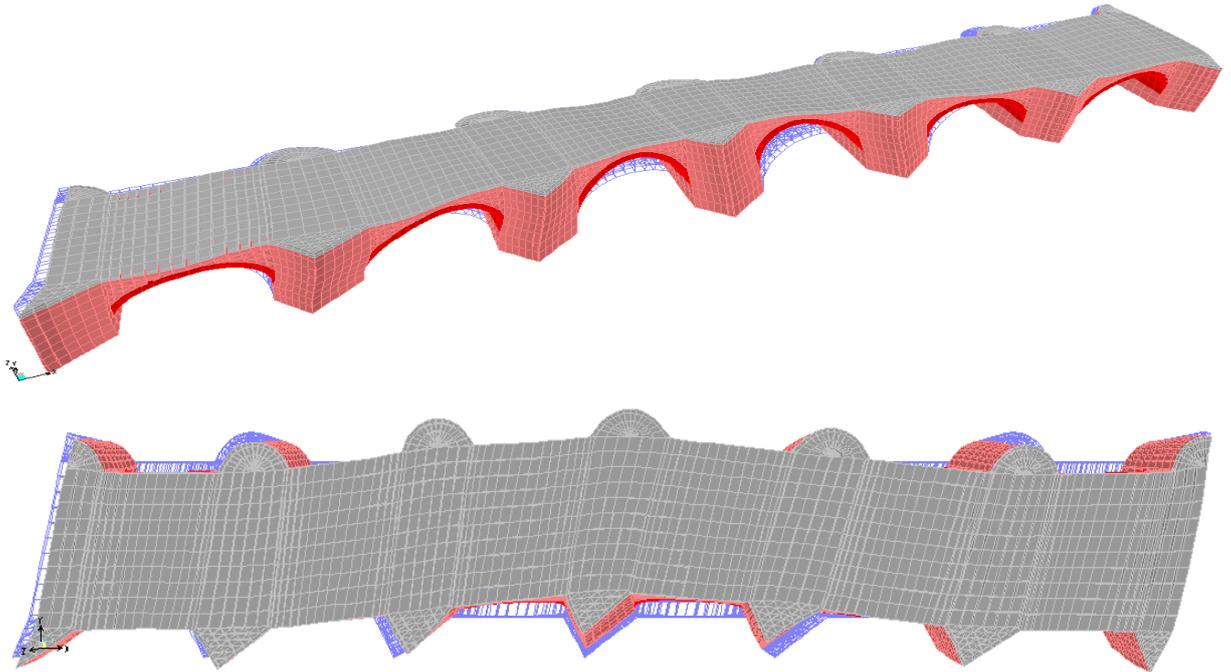


Figura N° 6.32: Tercer modo de vibrar ($T_3=0.0936$ seg.)

Análisis Sísmico Lineal.

Se sabe que la norma de diseño sísmico no contempla ciertos parámetros para analizar esta particular estructura, sin embargo se desarrolló un análisis sísmico estático, tomándose un valor conservador del factor de reducción $R=1$, es decir no tendrá respuesta inelástica debido a la baja fricción entre sus elementos y la escasa disipación de energía que pueda darse por las fisuras que se presenten, además se consideró un coeficiente sísmico de $0.20g$, que implica un diseño para sismos frecuentes. Ver Cuadro N° 6.5

En las figura N° 6.33 al N° 6.36 se muestran los resultados del análisis sísmico, tanto en dirección longitudinal (eje X) y en dirección transversal (eje Y). La fuerza sísmica en dirección X, produce esfuerzos máximos de compresión en la bóveda entre el extradós y el intradós, con un valor máximo de 0.41 MPa (4.10 Kg/cm²) en el extradós y un valor de 0.84 MPa (8.40 kg/cm²) en el intradós, los esfuerzos máximos de tracción con un valor de 0.46 MPa (4.60 kg/cm²) en el extradós y un valor de 0.85 MPa (8.50 kg/cm²) en el intradós. La fuerza sísmica en dirección Y produce esfuerzos máximos de compresión en la bóveda entre el extradós y el intradós, con un valor máximo de 0.24 MPa (2.35 Kg/cm²) en el extradós y un valor de 0.83 MPa (8.30 kg/cm²) en el intradós, los esfuerzos máximos de tracción con un valor de 0.24 MPa (2.40 kg/cm²) en el extradós y un valor de 0.8 MPa (8.00 kg/cm²) en el intradós. Para ambos casos el relleno granular del puente presenta netamente esfuerzos de compresión pequeños (0.27 kg/cm² en promedio).

Cuadro N° 6.5: Sismos de diseño para la costa del Perú.

Sismo de Diseño	Aceleración asociada, para la costa del Perú (g)	Comportamiento Estructural
Sismos frecuentes	0.20	Perfectamente elástico
Sismos ocasionales	0.25	Prácticamente elástico
Sismos raros	0.40	Importantes incursiones elásticas, perdida de resistencia y rigidez
Sismos muy raros	0.50	Severas incursiones elásticas, perdida casi total de resistencia y rigidez

Fuente: Allauca L. y Takuma Oe, 2006, *Desempeño Sísmico de un Edificio Aporticado Diseñado con las normas peruanas*, Tesis PUCP.

Cuadro N° 6.6: Esfuerzos de Compresión y Tracción en la Bóveda.

	Compresión Máxima en la bóveda (MPa)		Tracción Máxima en la bóveda (MPa)	
	Extradós	Intradós	Extradós	Intradós
Sx	0.41	0.84	0.46	0.85
Sy	0.24	0.83	0.24	0.80

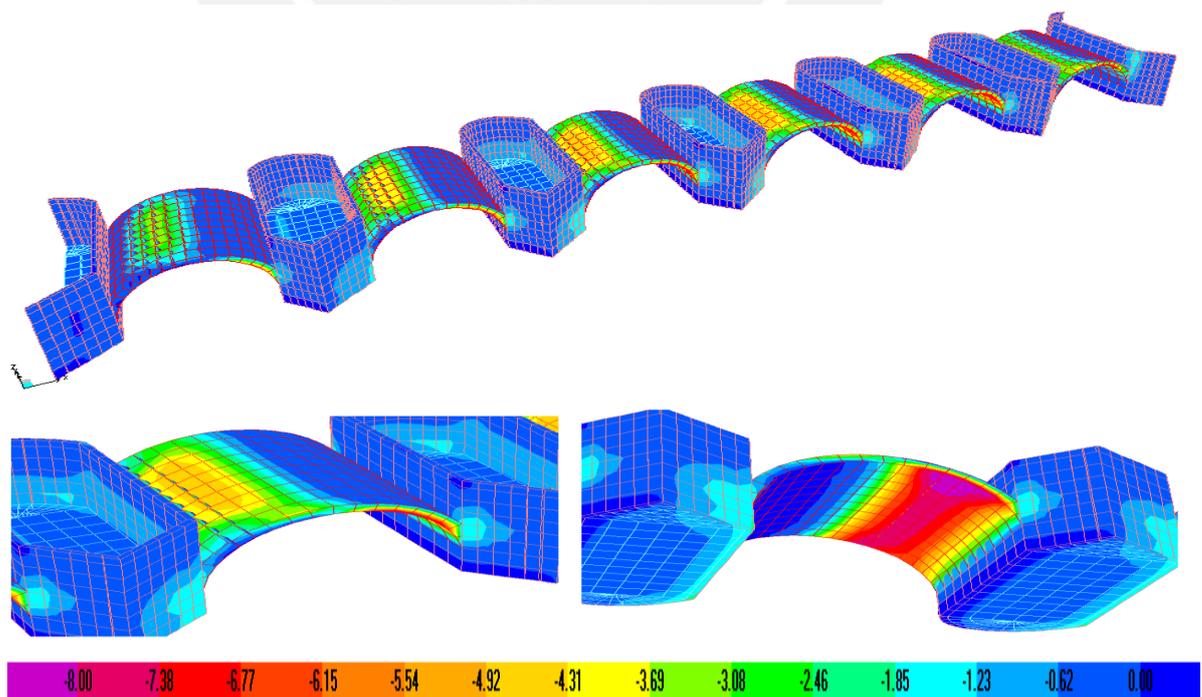


Figura N° 6.33: Esfuerzos máximos de compresión, análisis sísmico en dirección X.

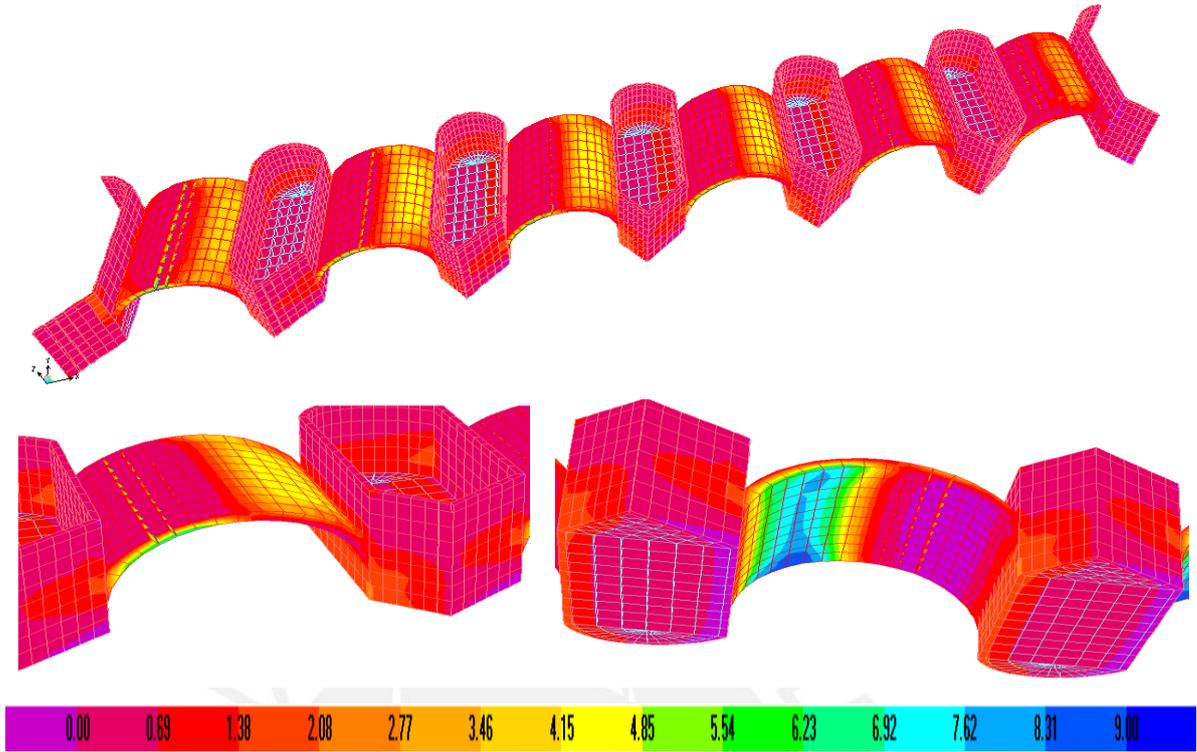


Figura N° 6.34: Esfuerzos máximos de tracción, análisis sísmico en dirección X.

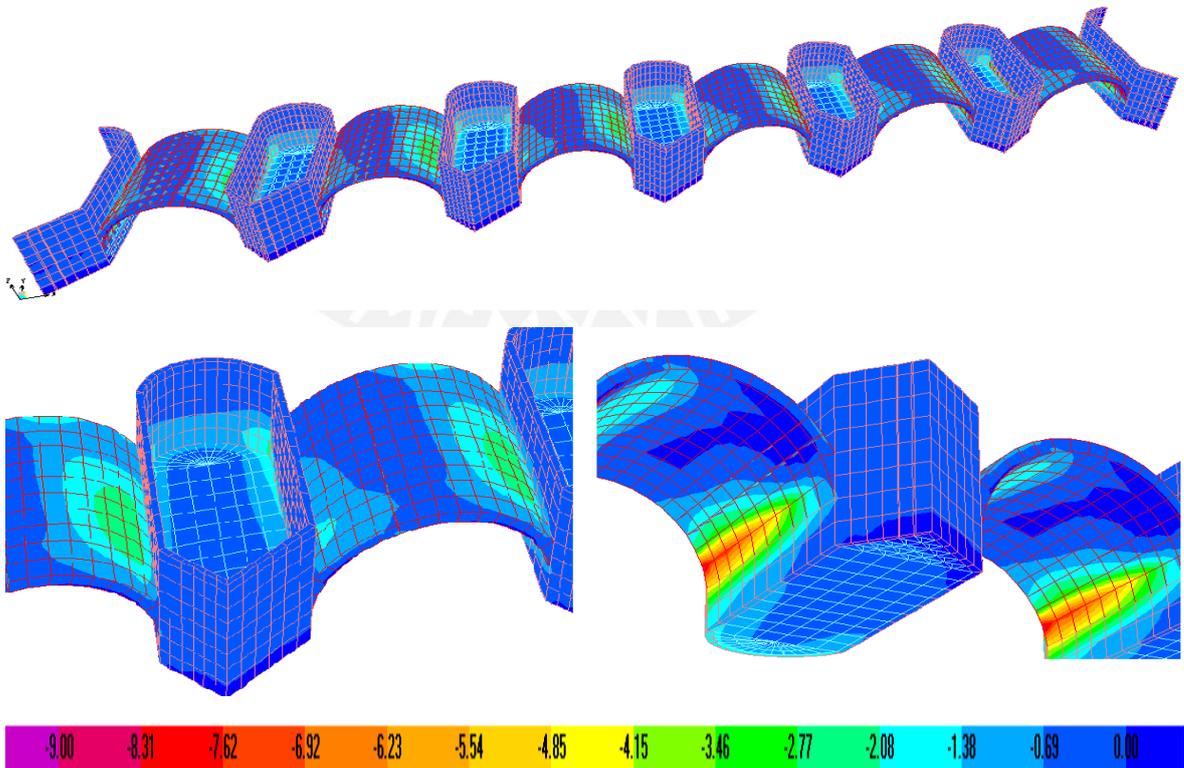


Figura N° 6.35: Esfuerzos máximos de compresión, análisis sísmico en dirección Y.

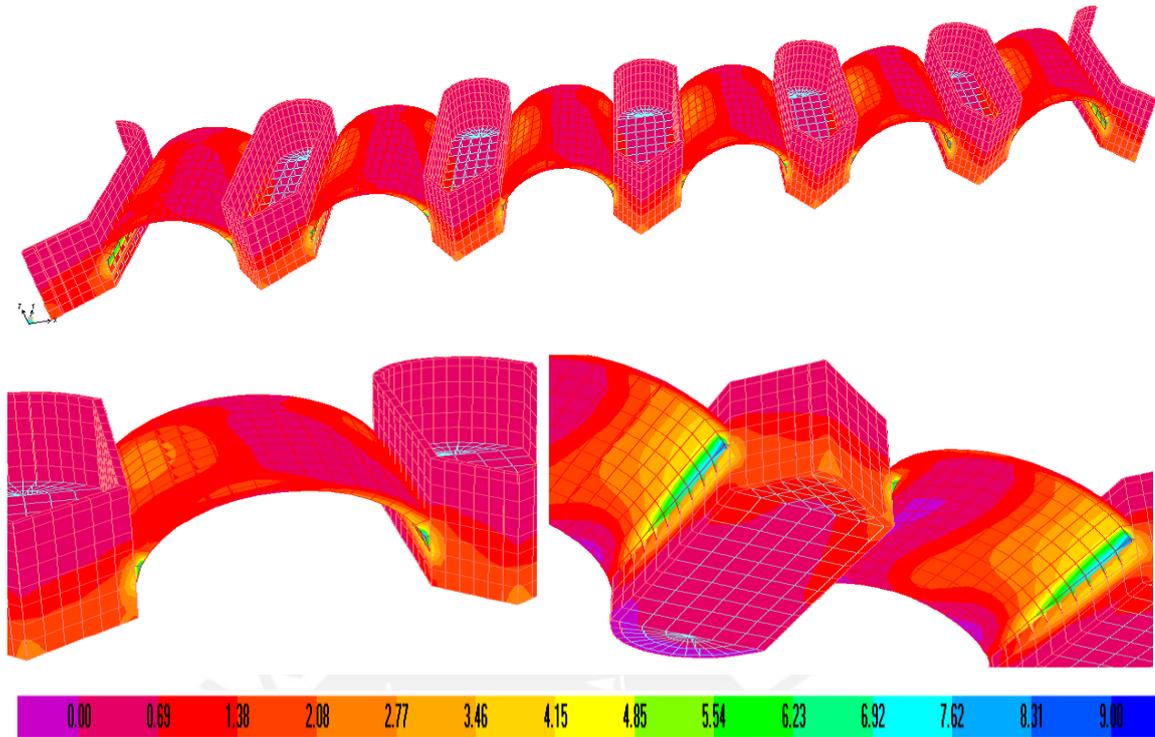


Figura N° 6.36: Esfuerzos máximos de tracción, análisis sísmico en dirección Y.

La figura N° 6.37 muestra el desplazamiento que tiene el puente en el eje X o dirección longitudinal, los arcos centrales son los que más desplazamiento experimentan con relación a los extremos, alcanzando un valor de 1.12 mm. Así también la figura N° 6.38, muestra el desplazamiento del puente en el eje Y ó dirección transversal alcanzando un desplazamiento de 0.66 mm

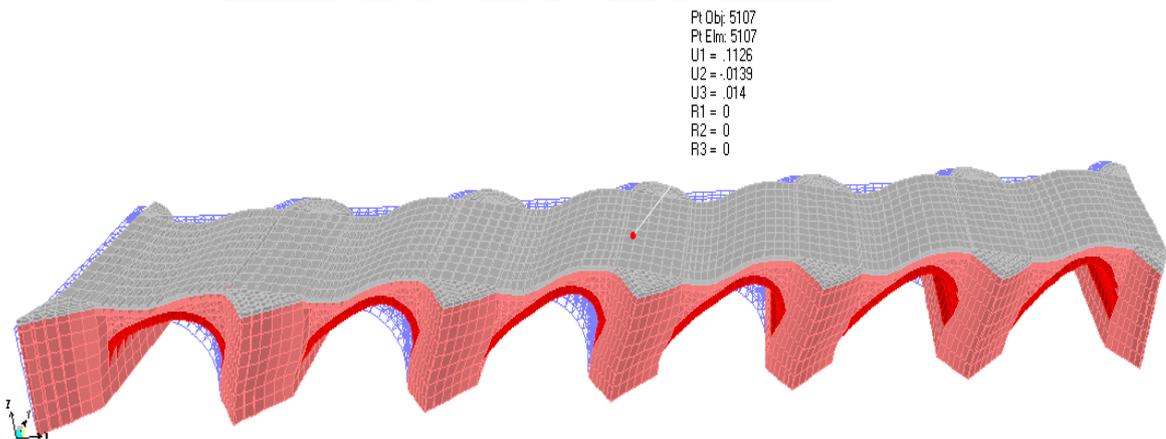


Figura N° 6.37: Desplazamiento producido en dirección longitudinal o eje X.

Pt. Obj: 20122
Pt. Elm: 20122
U1 = -.0128
U2 = -.0663
U3 = -.0113
R1 = 0
R2 = 0
R3 = 0

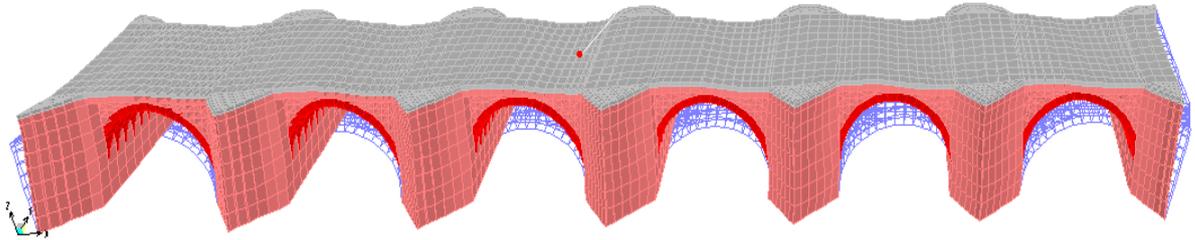


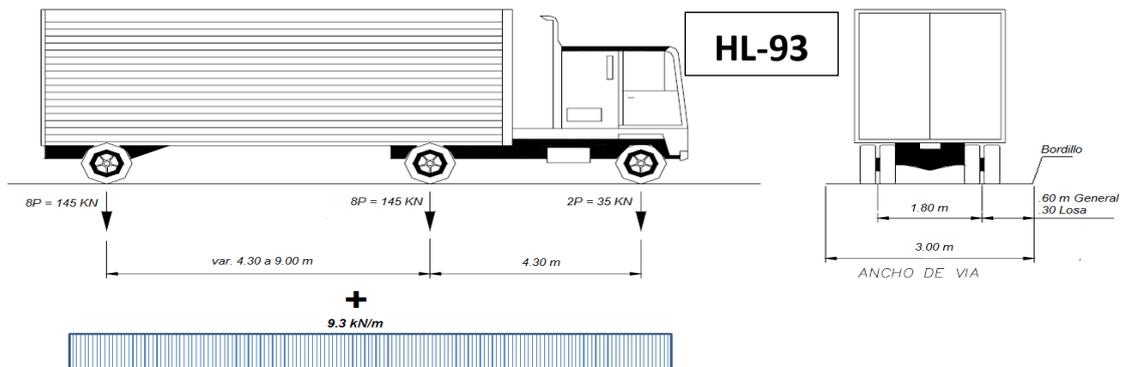
Figura N° 6.38: Desplazamiento producido en dirección transversal o eje Y.

Análisis Ante Sobrecarga Vehicular.

Algunos puentes de piedra aún resisten cargas mucho mayores de las que circulaban por ellos cuando fueron construidos, esto gracias por un lado al gran funcionamiento del arco y, por otra al valor grande que tiene la relación peso propio/carga de tráfico debido a que son bien pesados.

No cabe duda que el peso de los vehículos ha aumentado con el correr de los años, pese a esto algunos puentes de piedra siguen cumpliendo la función de transitabilidad, en nuestro caso el puente Trujillo fue restringido el tránsito vehicular, sin embargo realizaremos un análisis ante sobrecarga vehicular como lo indica el manual de diseño de puentes. Además recordemos que la mayoría de intervenciones en estos puentes fueron más para mejorar sus dimensiones o geometría, lo que llevaron a transformarlos o a sustituirlos, que su misma capacidad resistente, esto debido en gran parte además a la durabilidad del material que la conforma.

El manual de diseño de puentes en su numeral 2.4.3.2 indica la sobrecarga viva vehicular de diseño HL-93, así como también la norma AASHTO. Además desarrollaremos un análisis con la sobrecarga vehicular de diseño HS-20, la figura N° 6.39 indica las características de ambas sobrecargas.



Acción Simultánea: Camión + Sobrecarga distribuida

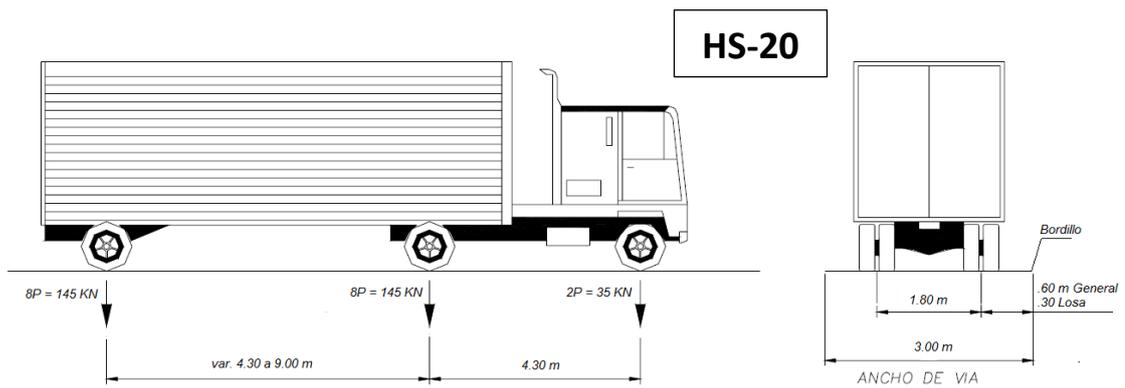


Figura N° 6.39: Sobrecarga vehicular HL-93 y HS-20, según el AASHTO.

Las figura N° 6.40 y N° 6.41, nos muestra los esfuerzos que se producen por la sobrecarga vehicular HL-93, tanto en dirección longitudinal o eje X, como en dirección transversal o eje Y. Podemos ver que en el eje X los esfuerzos de tracción se producen en el intradós de la bóveda teniendo como valor máximo 0.32 MPa (3.17 kg/cm^2), siendo un valor muy parecido al esfuerzo máximo de compresión de la bóveda, el cual se encuentra netamente comprimida. Así mismo el eje Y nos permite observar que también existen esfuerzos de tracción en el intradós de la bóveda, donde el valor máximo es de 0.20 MPa (2.04 kg/cm^2), representando el 64% del valor del esfuerzo máximo en compresión de la bóveda.

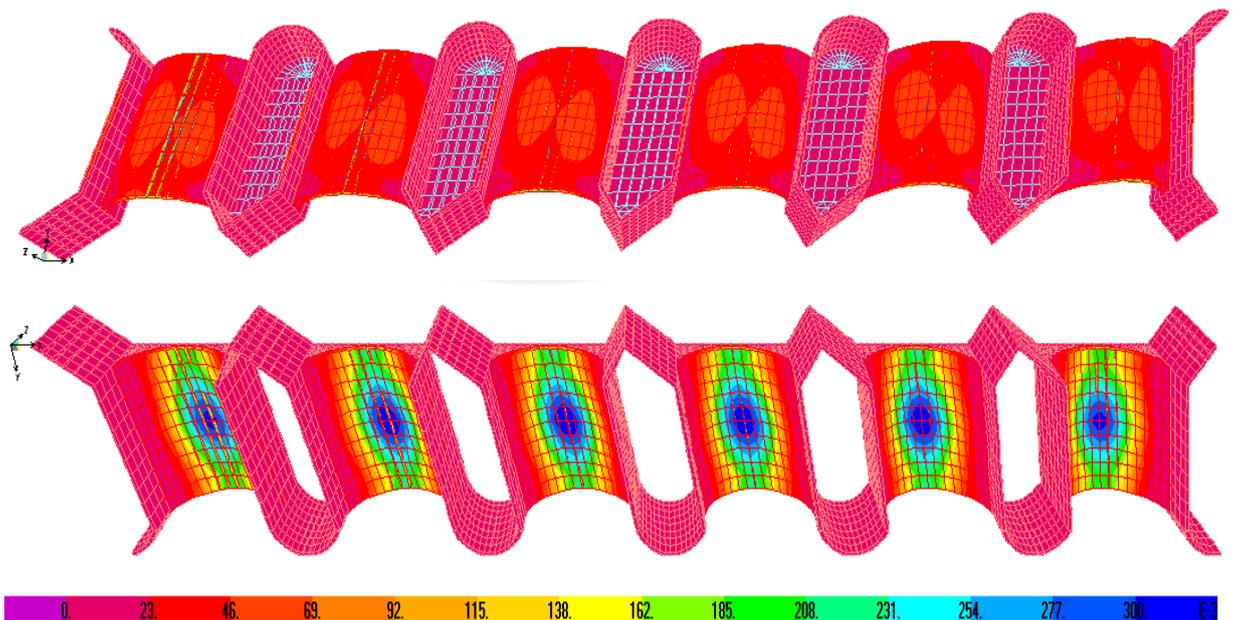


Figura N° 6.40: Esfuerzos producidos en el extradós e intradós de la bóveda en dirección longitudinal o eje X. Sobrecarga HL-93.

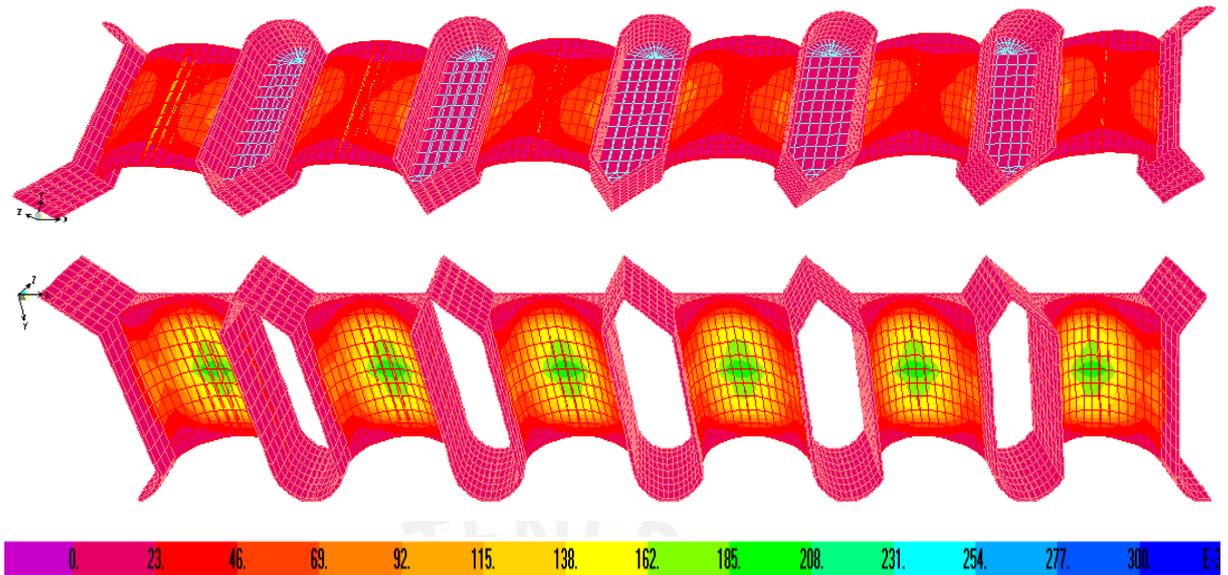


Figura N° 6.41: Esfuerzos producidos en el extradós e intradós de la bóveda en dirección transversal o eje Y. Sobrecarga HL-93.

Así mismo la sobrecarga vehicular HS-20 produce la misma forma de esfuerzos, pero con valores menores, tanto en dirección longitudinal o eje X como dirección transversal o eje Y. En el eje X el esfuerzo de tracción en el intradós de la bóveda tiene un valor máximo 0.19 MPa (1.98 kg/cm²), siendo el 61% del esfuerzo máximo de compresión en la bóveda. Así mismo en el eje Y el esfuerzo de tracción en el intradós de la bóveda, tiene un valor máximo de 0.11 MPa (1.14 kg/cm²), representando el 35% del esfuerzo máximo en compresión de la bóveda.

6.3 Diagnóstico de Análisis

Según la evidencia de los archivos históricos, el puente Trujillo fue construido a inicios del siglo XVII, en época donde el Perú era colonia española, es decir el puente tiene cuatro siglos de existencia, donde ha soportado diversas vicisitudes a lo largo de su vida como incendios y movimientos telúricos. El puente en general presenta dos grandes cambios muy saltantes a simple vista en cuanto a su fisonomía original; el primero, con el fin de ampliar el ancho de su calzada, se demolieron los pretiles de piedra y se colocaron barandales de hierro fundido, además de colocar perfiles metálicos que sirve de soporte para la actual vereda; y segundo, con el objetivo de aumentar la altura libre para el tránsito vehicular debajo del puente, se demolieron dos arcos extremos para colocar estructuras totalmente rígidas y de características distintas. Definitivamente estos cambios contravinieron con su fisonomía y majestuosidad con la que fue diseñado y construido, sin mencionar la pérdida total del arco de entrada que ostentaba.

La fachada del puente en general presenta una capa de concreto a modo de tarrajeo, simulando una mampostería regular de sillar, ocultando de alguna forma posibles agrietamientos en la verdadera mampostería que posee y por otra algunos trabajos de refacción y resanes pasados en ciertas zonas del puente, sin embargo este tarrajeo sirvió de protección a la mampostería contra agentes externos que puedan afectar su durabilidad. Existen algunas zonas con desmoronamiento del tarrajeo, sobretodo en los pilares, en donde se puede notar la mampostería original que posee.

Conforme al análisis estructural idealizado del diseño original del puente podemos indicar que nuestro modelo es un tanto conservador, obviamente el modelo nos representó un comportamiento aceptable ante cargas de servicio, ya que está sujeto netamente a esfuerzos de compresión, concentrándose los máximos esfuerzos en los arranques de la bóveda y en las bases de los pilares. También se notó la concentración de pequeños esfuerzos de tracción, desarrollándose los máximos esfuerzos sobre el extradós de las bóvedas a la altura de los riñones del arco y en los puntos extremos del arranque de la bóveda; estos esfuerzos de tracción pueden ser tolerables por la mampostería, sin embargo podría presentarse como zonas vulnerables. Así mismo, ante una sobrecarga móvil el comportamiento del puente es netamente en tracción, pudiendo notar que con las exigencias actuales de sobrecarga, refiriéndonos al HL-93, el puente presenta tracciones que quizás la mampostería no pueda soportarlo; sin embargo muy por el contrario sucede con la sobrecarga móvil HS-20, en donde las tracciones son menores y por ende la mampostería puede soportarlo. Con referencia al análisis sísmico, se pudo notar que el mayor desplazamiento del puente ocurre en la dirección longitudinal, y este desplazamiento se da en el tramo central del puente, así como las tracciones presentes representan más del 50% del valor de su compresión.

Finalmente en líneas generales el puente Trujillo no poseerá la importancia y majestuosidad que tenía antes, pero lo que queda de él se ha mantenido y conservado con el correr de los años, quizás no se le dio el debido respeto para con su tipología y solamente se pensó en ello con un único fin para el que son construidos todos los puentes, que es el de dar continuidad a un camino.

6.4 Propuesta de Intervención Estructural

6.4.1 Trabajos Preliminares.

Dentro de los trabajos previos a la intervención mencionaríamos la eliminación de los materiales que no forman parte de la tipología del puente, del cual podemos hacer una lista:

- ✓ Eliminar los barandales de hierro fundido.

- ✓ Eliminar los perfiles metálicos que se encuentran apoyados en los pilares y que dan soporte a la vereda actual, así como también la eliminación de esta vereda.
- ✓ Eliminar el tarrajeo de concreto que tiene la fachada del puente, y que emula a una mampostería regular de sillar.

6.4.2 En la Superestructura.

- ✓ Reconstrucción de los pretilos de piedra y de los miradores con sus asientos conjuntamente de piedra, con anclaje a las conformaciones externas y superiores de los estribos y los arcos del puente. En su parte exterior, la conformación de la piedra seguirá la expresión de forma de los estribos en sus zonas de pilares y tajamares, y en su parte interior con piedras cortadas como sillar; buscando que ambas caras queden trabadas por el mortero cal, cemento, arena y emboquillado.

Se ejecutara con piezas monolíticas de granito gris oscuro, proveniente de canteras con bajo o nulo contenido de sales, sulfatos y carbonatos de sodio. Las piezas tendrán una dimensión cercana a 25x50x80 cm (espesor, ancho y largo), el corte de las rocas será del tipo natural, libre de tierra y partículas extrañas, para favorecer la adherencia con el mortero de asiento. La colocación de los cabezales estará directamente sobre la superficie formada por los muros paralelos del pretil y el núcleo central ligado y sujetado, con una mezcla de cal, cemento, arena y confitillo. La superficie de las piezas expresara un acabado en grano fino, pero sin pulir, sino obtenido por un esmerilado grueso, este trabajo se aplicara a toda la superficie visible y en los cantos de empalme.

- ✓ Reconstruir la calzada inicial del puente, para recuperar la calzada se eliminara la capa de asfalto, la capa de concreto simple y la capa de relleno simple que cubren la calzada antigua del puente. Se recuperara las piedras de la calzada que se encuentren en buen estado, posteriormente se completara la calzada con piedras adoquinadas para completar tramos faltantes.

6.4.3 En la Subestructura.

- ✓ Reconformar la base de los pilares donde se haya producido erosión, esto con el fin de no permitir movimientos de asentamientos de los apoyos y el consecuente desacomodo de la mampostería de los pilares y del arco. Se usaran rocas graníticas cortadas irregularmente y se emboquillara mediante mortero de cal, arena y confite de canto rodado. Este procedimiento se iniciara desde la base de los pilares hasta los arranques de los arcos de piedra.

- ✓ Reconstruir las zonas donde la mampostería de los pilares presente grietas y escasez de las juntas de mortero, remover las juntas y las piezas inestables para luego consolidarlos y sellarlos con mortero de cal y arena. El tamaño de las piezas estará conforme a las dimensiones de los materiales de su entorno para no desentonar el aparejo de la mampostería. Así mismo las piezas serán tratadas para protegerlas de efectos ambientales.
- ✓ Restaurar las zonas donde las bóvedas presente deterioro e inestabilidad de materiales conformantes, así como también considerar las zonas donde según el análisis se presente fuertes tracciones, se reemboquillaran con mortero de cal y arena las juntas entre los ladrillos y a manera de confite de piedra las juntas más anchas y profundas. Todas las piezas expuestas serán lavadas químicamente y saturadas para protegerlas de la degradación por intemperismo. El conjunto de arcos de la mampostería que conforman las bóvedas serán tratadas íntegramente, solo si fuese necesario se instalaran tirantes externos a lo largo de la luz del arco, para garantizar la estabilidad de las bóvedas.

Dentro de un trabajo de intervención que enmarque la revaloración total del puente, estaría contemplada la recuperación de los dos arcos extremos, construyéndolos con materiales adecuados a la tipología del puente. Sin embargo recuperar el arco de la margen izquierda (orilla del Centro de Lima) resulta al parecer menos complicado que recuperar el arco de la margen derecha (orilla del distrito de Rímac), esto debido a que en la margen izquierda no se presenta muchos inconvenientes más que la presencia del paso del ferrocarril; mientras a la margen derecha se encuentra la vía de evitamiento y justamente el alto tráfico en esta vía importante haría que se evalué otras alternativas para su adecuada solución.

Cabe indicar que esta propuesta de intervención estará sujeto a algunos cambios, debido a que quedan diversos trabajos pendientes de exploración más detallada de los componentes internos del puente, esto será de mucha utilidad para orientar la intervención y afirmar ciertas partes que fueron omitidas en los documentos históricos archivados sobre el puente.

CONCLUSIONES

- Los puentes históricos, como toda estructura histórica, poseen un valor cultural que está dado por la autenticidad de sus caracteres que lo distinguen, los cuales deben ser respetados e intervenidos en coherencia con los principios de conservación y restauración en monumentos históricos.
- Existe una clara diferencia de estas estructuras con las estructuras actuales, por lo que para su análisis resulta necesario definir completamente la geometría externa e interna de la estructura, además de una correcta caracterización de las propiedades de los materiales que la conforman.
- Los europeos desarrollaron un gran conocimiento y dominaron a la perfección la técnica de los puentes de mampostería con bóveda de arco. Tal y como los incas dominaron la construcción de puentes colgantes hechos de fibra vegetal, aunque no se tengan archivos de su proyección y construcción.

Conclusiones del puente estudiado.

- La proyección y construcción del puente Trujillo tuvo gran importancia, ya que por un lado represento un medio de entrada triunfal para una Lima colonial amurallada y por otra fue una de las primeras obras puentearías de esta tipología.
- El puente Trujillo a lo largo de su vida fue tratado como una simple infraestructura puentearía, teniendo como única función el permitir el paso sobre el río Rímac y esto fue lo que no le permitió conservar su tipología original.
- El análisis del puente mediante un modelo de elementos finitos respondió de manera aceptable, segura y fiable. Sin embargo, debemos tener cuidado en el ingreso de datos y la modelización en su etapa inicial, ya que si se ingresa erróneamente algún dato de entrada puede acarrear errores en la exactitud de los resultados. Así mismo, el modelo simplificado fue de gran utilidad, porque fue capaz de predecir fiablemente resultados seguros y exactos, ahorrando tiempo en el análisis y una fácil accesibilidad para modificar la malla de los elementos finitos.
- Ya sea variando las propiedades de sus materiales y considerando la posible presencia del relleno sólido, el modelo preliminar de un tramo del puente mostró un comportamiento estructural esperado. Debido a que en este tipo de estructuras las tracciones deben ser mínimas, y en nuestro modelo estas tracciones están en un rango de $0.19 - 0.24 \text{ N/mm}^2$, para el caso más desfavorable. Y según algunos autores indican un rango de $0.7 - 2.0 \text{ N/mm}^2$.
- Del análisis lineal estático del modelo estructural global del puente, podemos mencionar que el puente se encuentra netamente en compresión ante cargas de

servicio, presentando en la mampostería una compresión máxima de 1.58 MPa (15.80 kg/cm²), con presencia en los arranques de las bóvedas. Y una tracción máxima de 0.10 MPa (0.98 kg/cm²) representando el 6% de su compresión, con presencia en los apoyos extremos de la bóveda y sobre los riñones del extradós de la bóveda.

- Así mismo, del análisis sísmico estático realizado para un sismo frecuente el puente se comportó elásticamente. Ya que la bóveda desarrolló en el extradós un esfuerzo de compresión máxima de 0.41 MPa (4.10 kg/cm²) y un esfuerzo de tracción máxima de 0.46 MPa (4.60 kg/cm²), y en el intradós un esfuerzo de compresión máxima de 0.84 MPa (8.40 kg/cm²) y un esfuerzo de tracción máxima de 0.85 MPa (8.50 kg/cm²). Siendo estos los mayores esfuerzos en compresión y en tracción sobre la bóveda obtenidos del análisis sísmico en dirección longitudinal o eje X.
- El análisis modal nos mostró el comportamiento dinámico fundamental del puente, teniendo en el primer modo un periodo $T=0.117$ seg. y en el noveno modo 0.076 seg., mostrando en el primer modo un movimiento longitudinal recomendable y en los siguientes modos una forma ondulada.
- El análisis frente a una sobrecarga vehicular nos indica que para la norma actual ASSHTO HL-93 el puente estaría comprometido a su estabilidad, mientras que para la norma ASSHTO HS-20 el puente no se vería tan afectado, razón por la cual se justifica el tránsito ligero en algunos puentes existentes.
- La geometría presente de los pilares y las bóvedas nos indica que el procedimiento constructivo utilizado en el puente fue el de construir inicialmente los pilares y posteriormente las bóvedas de cañón, es decir obedece a criterios de construcción de su época, ya que las bóvedas construidas simultáneamente propuesta por Perronet aparecieron un siglo después.

RECOMENDACIONES

- Desarrollar una intervención o restauración en un puente histórico requerirá la interrelación entre la ingeniería estructural y la arquitectura especializada de conservación, con el fin de garantizar la originalidad del monumento, evitando trabajos que modifiquen y pongan en peligro su valor desde una perspectiva arquitectónica e histórica.
- Recomendar este trabajo como punto de partida para ampliar el conocimiento de los diversos puentes de mampostería que aún existen en diversas regiones del Perú, y que además pueda servir de modelo para estructuras similares.
- Recomendar trabajos de mediciones in situ y pruebas a los materiales del puente Trujillo, con el propósito de tener un mejor conocimiento de su composición y el estado de sus materiales.
- Realizar trabajos de investigación que impliquen realizar ensayos a muretes similares a los usados en la mampostería de los puentes, con el propósito de conocer su compatibilidad con el material que conforma el puente.
- Realizar ensayos de modelos a escala de puentes de mampostería ante diversas solicitaciones de carga, con el fin de observar y comprender su comportamiento y a la vez corroborar con un modelo matemático.
- Recomendar a las instituciones involucradas con los puentes históricos de desarrollar y contar con un plan de mantenimiento para estas estructuras, con el fin de conservarlas y transmitir las a las siguientes generaciones.

BIBLIOGRAFIA

- ✓ Arenas Juan José, 2002, “Caminos en el Aire”, Colegio de Ingenieros de Caminos y Puertos, Madrid – España.
- ✓ Bromley Juan, 1945, “Evolución Urbana de la ciudad de Lima/José Barbagelata”, Lumen S.A., Consejo Provincial de Lima – Perú.
- ✓ De marco German, 2002, “Ensayo Hasta Rotura de Un Puente Arco de Obra de Fábrica Construido en Laboratorio”, Universidad Politécnica de Catalunya Departamento de la Ingeniería de la Construcción, Barcelona – España.
<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/6226>
- ✓ Duran Manuel, 2001, “La construcción de puentes en la antigua Gallaecia Romana”, Tesis doctoral Universidad de A Coruña Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, España.
- ✓ Espejo Sergio, 2007, “Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados hasta rotura”, Universidad Politécnica de Madrid Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Madrid-España.
- ✓ Fernández Leonardo, 1999, “Tierra sobre el agua: visión histórica universal de los puentes”, Colegio de Ingenieros de Caminos y Puertos, Madrid - España.
- ✓ Galindo Jorge, 1996, “El conocimiento constructivo de los ingenieros militares del siglo XVIII”, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Catalunya.
- ✓ Galindo Jorge y Paredes Jairo, 2007, “Puentes de Arco de Ladrillo en la región del alto Cauca-Colombia”, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Bogotá, D.C. Colombia.
- ✓ García de Miguel José. et al, 2011, “Ingeniería y Territorio, Restauración de la Obra Pública”, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona-España.
- ✓ Harth Emilio y Marquez Alberto, 1960, “El Puente de Piedra de Lima”, GIL S. A. Zarate, Lima – Perú.
- ✓ Huerta Santiago, 2004, “Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica”, Instituto Juan de Herrera Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid – España.
- ✓ Lovón R., 2006, “Intervención Estructural en un Monumento Histórico de Adobe”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Perú.
- ✓ Mack Robert, 1995, Hunterdon County Historic Stone Arch Culvert Report, Protection and Enhancement of the Cultural Environment.
<http://www.co.hunterdon.nj.us/planning/historicbridges/stone%20arch%20report.pdf>

- ✓ Martín-Caro José, 2001, “Análisis estructural de puentes arco de fábrica. Criterios de comprobación”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, España.
- ✓ Melí Roberto, 1998, “Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos”, fundación ICA, primera edición, México D.F.
- ✓ O’Connor Colin, 1993, “Roman Bridges”, Cambridge University Press, Cambridge, New York – USA.
- ✓ Perronet Jean-Rodolphe, 2005, “La Construcción de Puentes en el Siglo XVIII”, Instituto Juan de Herrera – CEHOPU, Madrid - España.
- ✓ Ribera José, 1929, “Puentes de Fabrica y Hormigón Armado/Tomo III”, Escuela de Caminos de Madrid, España.
- ✓ San Cristóbal Antonio, 2005, “Obras Civiles Durante el Siglo XVII”, Universidad Nacional de Ingeniería – Instituto General de Investigación, Lima – Perú.
- ✓ Skelly and Loy Inc. y DMJM Harris Horsham, 2007, “Stone Arch Bridge Maintenance Manual”, Penndot, Pennsylvania USA. <http://www.pastonearch.org/>
- ✓ Timoshenko Stephen, 1965, “Theory of structures”, McGraw-Hill, New York.
- ✓ Thunnissen Henri, 2012, “Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura”, Instituto Juan de Herrera – Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid - España.
- ✓ Vlad Apreutesei, 2005, “Stregthening of Stone Masonry Arch Bridges Three Leaf Masonry Walls-state of the Art”, Universidade do Minho Escola de engenharia Guimaraes, Portugal.
- ✓ Archivos del Ministerio de Cultura. <http://www.mcultura.gob.pe/>
- ✓ Archivos de la Biblioteca Municipal de Lima.

Cartas Internacionales de Conservación y Restauración.

- ✓ Carta de Atenas, 1931.
- ✓ Carta de Venecia 1964.
- ✓ Carta de Ámsterdam o Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico, 1975.
- ✓ Carta de Cracovia 2000.
- ✓ ICOMOS. (2003). Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del Patrimonio Arquitectónico. www.esicomos.org

Otros Artículos.

- ✓ Manuel Duran, 1998, “Análisis de la capacidad de Desagüe de varios puentes de Gallaecia”, III Congreso de la Historia de la Construcción, Madrid – España.

- ✓ Stephen Garrity, 2010, “The Rehabilitation of Short Span Masonry Arch Highway Bridges Using Near-Surface Reinforcement”, 8th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Niagara Falls, Canada.
- ✓ Michael Lahti y Leo Fernandez, 2010, “Rehabilitation of Masonry Arch Bridges”, Structures Congress 2010 ASCE, Orlando Florida – USA.
- ✓ Santiago Huerta y Rafael Hernando, 1998, “La teoría de bóvedas en el siglo XVIII: la contribución de Philippe de La Hire”, Actas del II Congreso Nacional de Historia de la Construcción, A Coruña - España.
- ✓ Santiago Huerta, 2000, “Estática y geometría: el proyecto de puentes de fábrica en los siglos XV al XVII”, actas del III congreso nacional de historia de la construcción, Sevilla – España.
- ✓ Francisco de Asís Ramirez, 2000, “La técnica de cimentación de puentes hasta el siglo XVIII”, actas del III congreso nacional de historia de la construcción, Sevilla – España.
- ✓ Yesid Mauricio, Jairo Paredes y Jorge Galindo, 2009, “Comportamiento de un puente histórico de arco de albañilería ante cargas dinámicas”, Revista de Ingeniería e Investigación vol 29 No. 3, 2009.
- ✓ Bögöly, Gy., Diagnostic of stone masonry arch bridges, conference of junior researchers in civil engineering.
- ✓ Manuel duran, 2006, “Estudio sobre las bóvedas de los puentes romanos”, III congreso de las obras publicas romanas.
- ✓ Scott Hobbs y John Latimer, 2009, Stone Arch Bridges of Washington County MD, Presentation for the cunty engineers Association of Maryland (CEAM).
- ✓ Amir Causevic, 2012, Sustainable Rehabilitation, Preservation and protection of access arch stone bridge at the entrance to the Medieval old Town Korcula”, Structural Analysis of Historical Constructions, Polonia.
- ✓ Lukasz Bednarz, 2012, “Conservation Renovations of the Bridges in the Muskau Park”, Structural Analysis of Historical Constructions, Polonia.
- ✓ Benedito Tadeu de Oliveira, 2012, Restoration of the Bridges of Ouro Preto MG Brazil, Structural Analysis of Historical Constructions, Polonia.
- ✓ Cha Geun Chang, 2012, Structural Behavior Characteristics of Arched Stone Bridge according to Foundation and Filler Type, Structural Analysis of Historical Constructions, Polonia.