

**EL ARCO DE MEDIO PUNTO ARTICULADO EN LA
OBRA DE FRAY DOMINGO DE PETRÉS UN EJEMPLO
PARA LA ENSEÑANZA DE LA ESTÁTICA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
LICENCIADO**

EN FÍSICA

AUTOR:

JORGE ORLANDO RODRÍGUEZ PEÑA

DIRECTOR:

JUAN CARLOS OROZCO CRUZ

**LÍNEA 1 DE PROFUNDIZACIÓN, ENSEÑANZA DE LAS
CIENCIAS DESDE UNA PERSPECTIVA CULTURAL**

**LICENCIATURA EN FÍSICA FACULTAD DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL**

BOGOTÁ 2023

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de Ilustraciones	iii
Tabla de Ecuaciones	iii
Tablas de Definiciones.....	iii
DEDICATORIAS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
1. Problema de Investigación.....	1
Contexto de Investigación.....	2
2. Pregunta Problema	7
3. Objetivos	7
Objetivo General.....	7
Objetivos Específicos.....	7
4. Antecedentes	8
Primera Categoría:	8
4.2. Segunda Categoría:	9
4.3. Tercera categoría:.....	20
Ayala María Mercedes, Rodríguez Luz Dary, Romero Ángel.....	21
5. MARCO TEÓRICO.....	25
El arco de medio punto en la arquitectura: una breve presentación de su uso a. Estructuras:	29
6. El estudio de las fuerzas existentes en un arco de medio punto articulado: alusión a los estudios de Young y Huygens, conceptos relacionados con la estática del arco de medio punto, entre otros.	33
6.1. Definición de fábrica.....	33
6.2. Módulo de Elasticidad de Young.....	34
6.3. Catenaria	37
6.4. Resistencia de Materiales en Construcciones de Fabrica.....	39
7. Metodología	39
7.1. Enfoque	39
7.2. Diseño	40
8. Elaboración arco de medio punto:.....	45
9. Implementación.....	48
9.1. Implementación grado sexto.	48
9.2. Implementación grado décimo.....	50
9.3. Implementación grado once	51
10. Análisis estructural de un arco de medio punto.	53
Referencias.....	57

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Dintel y Columnas en Roca.....	3
Ilustración 2. Arco de zapatas o falso Arquitectura Maya	3
Ilustración 3. Arco de medio punto Romano.....	4
Ilustración 4. Arco apuntado arquitectura Gótica.....	5
Ilustración 5. Razones entre fuerza y altura	5
Ilustración 6. Arco de Gateway en San Luis	6
Ilustración 7. Catedral de Zipaquirá, autoría propia.....	25
Ilustración 8. Catedral Primada de Colombia.....	26
Ilustración 9. Gráfica del esfuerzo versus la deformación para un material.	35
Ilustración 10. Catenaria.....	38
Ilustración 11. Catenaria con vértice en el origen	38
Ilustración 12. Autoría propia.....	44
Ilustración 13. Autoría propia	44
Ilustración 14. Autoría propia	44
Ilustración 15. Descomposición del vector peso Autoría propia.....	45
Ilustración 16. Autoría propia.....	46
Ilustración 17 Autoría propia	46
Ilustración 18. Autoría propia.....	46
Ilustración 20 Autoría propia	46

Tabla de Ecuaciones

Ecuación 1: Módulo de Elasticidad de Young:.....	37
Ecuación 2: Ecuación de la catenaria tomando su mínimo en el punto (0, h) es:	37
Ecuación 3: Catenaria con vértice en el punto (0, a)	38
Ecuación 4: Ecuación resistencia de materiales en construcciones de fábrica	39

Tablas de Definiciones

Tabla 1. Características Arco Romano 1.....	33
--	----

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mi esposa Mary Luz Quintana Barrera a mis tres hijos María Isabel, Paula Carolina y Jorge Andrés Rodríguez Quintana, por el apoyo incondicional que me brindaron durante el proceso de formación como docente, a la memoria de mi padre Jorge Arturo Rodríguez Ballesteros por sus concejos y conocimientos, un ejemplo de vida y de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios todo poderoso el haberme regalado la vida, salud, sabiduría y fortaleza en este proceso , a la Universidad Pedagógica Nacional por brindarme la oportunidad de estudiar y obtener el título de licenciado en física, a mi asesor el profesor Juan Carlos Orozco Cruz por sus enseñanzas y el apoyo constante en la elaboración de este trabajo, a todos los profesores del departamento de física y otras facultades que uno a uno me fueron formando como docente, a todo el personal administrativo del departamento por su colaboración, a mi esposa e hijos, a mis amigos y compañeros María Paula Clavijo Gómez y Angelica María Villanueva Basto y demás compañeros y amigos que por su gentileza y solidaridad me hicieron más llevadero el camino de mi formación como docente en física.

1. Problema de Investigación

El proyecto de trabajo de grado se centra en el estudio de los principios físicos que permiten comprender la funcionalidad de estructuras arquitectónicas como el arco de mediopunto. Para los efectos, se acude a la obra de Fray Domingo de Petrés en El Nuevo Reino de Granada, franciscano lego que llegó a Colombia a finales del siglo XVIII y que con su obra aportó gran desarrollo a las comunicaciones e infraestructura de la época en Colombia en especial en Bogotá y municipios aledaños. Teniendo como base su obra se pretende estudiar el comportamiento de las fuerzas y esfuerzos existentes en los arcos de medio punto articulados y las estructuras a las cuales pertenecen, logrando explicar de forma didáctica por medio de la geometría los pares de fuerzas existentes, y analizando estos sistemas comprender el funcionamiento de las variantes e invariantes involucradas llegando a una posible respuesta del ¿Por qué son tan funcionales y eficientes hasta nuestros días?

¿Qué hace que las estructuras edificadas durante La Colonia, como las catedrales de Bogotá y Zipaquirá, resulten tan estables? ¿Cuáles son los principios físicos que permiten explicar esta estabilidad? ¿Por qué es relevante el trabajo de Fray Domingo de Petrés en relación con estos desarrollos? ¿Es posible realizar una aproximación al estudio de la mecánica a partir del análisis de estas estructuras? ¿Qué diferencia estas construcciones de las actuales?

La mecánica estática del arco de medio punto articulado y las formas que se han adoptado a través de los siglos como arcos de medio punto (catenaria, en forma de herradura, gótico, compuesto) no han perdido vigencia en su aplicación, debido a que junto con el triángulo poseen por su geometría la particularidad de ser figuras

indeformables; el desconocimiento de los principios que rigen la estática de los arcos de medio punto articulado en construcciones llevan a colapsar estructuras realizadas bajo estos principios.

Contexto de Investigación

Es el interés de abordar el estudio de la estática a partir de la indagación en torno a las posibilidades que brinda el uso de la técnica del arco de medio punto en la construcción de obras civiles y religiosas en la época de La Colonia en el altiplano cundiboyacense. En particular realizando una aproximación a la obra de Fray Domingo de Petrés.

Serway (1993). De todas las estructuras construidas con fines utilitarios, los puentes y sus componentes estructurales son los más visibles. Los componentes de la estructura principal que se encarga de soportar la carga pueden ser entendidos fácilmente; los cables de soportes de un puente colgante están bajo una tensión inducida por el peso y cargas en el puente.

El arco de piedra es una de las estructuras más antiguas que se conocen, se encuentran en edificios, paredes y puentes. Otros materiales tales como la madera se habían utilizado antes de la piedra, pero ninguno de estos arcos permanece debido a incendios, guerras y procesos de descomposición natural. Aunque los arcos de piedra fueron construidos antes del Imperio Romano, los latinos construyeron algunos de los más grandes y duraderos arcos de piedra. (pág. 330).



Ilustración 1. *Dintel y Columnas en Roca*

Recuperado de (Enciclopedia concepto(2023)

Serway (1993) Antes del desarrollo del arco, el principal método para atravesar un espacio fue la construcción simple de poste y viga (figura 1), en la cual una viga horizontal se soporta por dos columnas. Este tipo de construcción se utilizó en los grandes templos griegos. Las columnas de estos templos tienen muy poca separación debido a la limitación en el largo de las rocas disponibles. Actualmente se pueden lograr mayores expansiones de espacio con vigas de acero, pero la expansión está limitada ya que las vigas tienden a pandearse bajo grandes cargas.

El arco de zapatas (o arco falso) es otro tipo de estructura primitiva, es solo una mejora sobre la estructura de Poste y de viga la estabilidad del arco falso depende de la proyección horizontal de una piedra sobre otra y del peso hacia abajo de las rocas de arriba. (pág. 330).

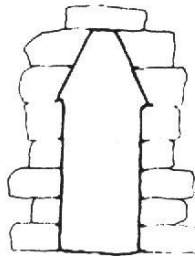


Ilustración 2. *Arco de zapatas o falso Arquitectura Maya*

recuperado de REVISTA AMÉRICA (2021)

Serway (1993) El arco semicircular desarrollado por los romanos fue un gran adelanto en el diseño arquitectónico. La estabilidad de este arco verdadero (o arco de piedra) depende de la compresión entre las piedras con forma de cuña. (Esto es, las piedras son forzadas a apretarse unas contra otras). Esto da como resultado fuerzas horizontales hacia afuera en la línea de arranque del arco (donde empieza a curvarse), la cual debe ser soportada por la cimentación (refuerzo) en la pared de piedra en los lados del arco. (pág. 330)



Ilustración 3. *Arco de medio punto Romano*

Recuperado de MUDETRAD (2020)

Serway (1993) Es común usar paredes pesadas (contrafuerte) en cada lado del arco para darle estabilidad horizontal. Si la base del arco se debe mover, las fuerzas de compresión entre las cuñas de piedra pueden disminuir hasta el punto en que el arco colapsa. Las superficies de las piedras que utilizaron en los arcos semi circulares los romanos fueron cortadas o “preparadas” para hacer una unión muy ajustada generalmente no se utilizaba mortero en las uniones. La resistencia al deslizamiento entre las piedras se lograba por fuerzas de compresión y fricción entre las caras de las piedras.

Otra innovación arquitectónica fue el arco gótico, se utilizó en Europa a principios del siglo XII, construyéndose catedrales como la de Charles de 118 pies y en Reims 137 pies, sin la ayuda de cualquier teoría matemática referente a estas estructuras;

los arcos góticos requieren contrafuertes volados con el fin de evitar que se abran los arcos sobre columnas altas y delgadas. El hecho de que hayan sido estables por 700 años se debe a las habilidades técnicas de sus constructores y arquitectos. (pág. 330)

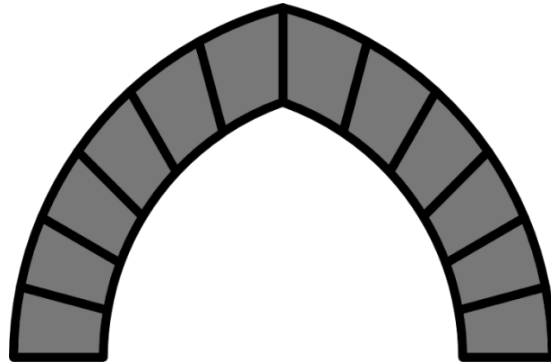


Ilustración 4. Arco apuntado arquitectura Gótica
Recuperado de: iesvilladenijar.musiquiatricos (2021)

La fuerza horizontal en la base de un arco varía conforme aumenta la altura, la fuerza horizontal en la base se duplica cuando la altura se reduce en un factor de 2. Esto explica por qué la fuerza horizontal requerida para soportar un arco puntiagudo alto es menor que la que se requiere para soportar un arco circular. (Serway, 1993, pág. 331).

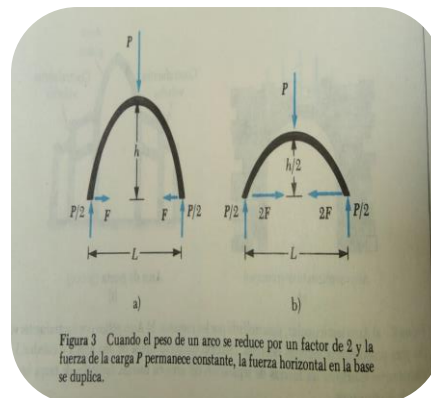


Ilustración 5. Razones entre fuerza y altura
Recuperado de Serway, Física tomo I (1993)

Serway, (1993) Para una abertura dada L , la fuerza horizontal en la base es proporcional a la carga total p , e inversamente proporcional a la altura h . Por lo que, para minimizar la fuerza horizontal en la base, el arco se debe construir lo más ligero y alto posible.

Con la llegada de métodos estructurales más avanzados, ha sido posible determinar la forma óptima de un arco en condiciones de carga dadas. Un ejemplo es el arco de Gateway en San Luis diseñado por Eero Saarinen; con una abertura de 192m y una altura de 192m con la forma de catenaria (cable colgante invertido) de tal forma que todas sus partes se encuentran a compresión. (pág. 331).



Ilustración 6. *Arco de Gateway en San Luis*

Recuperado de Structuralia (2023)

Existen formas en la naturaleza como las cavernas, el tronco de los árboles, el estípite de palmeras, la caña de la guadua, los cascos de los ungulados que presentan formas circulares en una de sus secciones transversales. ¿Por qué son circulares sus secciones y no de forma diferente? ¿Serán los esfuerzos de compresión, tensión los que hace que estas estructuras sean tan eficaces al someterse a esfuerzos incluyendo el de la gravedad?

El presente trabajo trata de comprender ¿por qué son tan eficaces estas formas?

bajo los esfuerzos de compresión, tensión en obras civiles y arquitectónicas tomando como referencia la obra de fray Domingo de Petrés en el Nuevo reino de Granada.

Existiendo una posibilidad de entender la obra de Fray Domingo de Petrés, se puede elaborar la opción de divulgación y enseñanza de estas técnicas de construcción con 200 años de antigüedad siendo vistas diariamente en fachada e interior, en este trabajo.

MANCIPE (2018) presentó una tesis titulada Una Manera de Abordar la Enseñanza de la Mecánica: Una Mirada al Caso de la Estática. Se adelantará en el campo de la estática con la intención de realizar un proceso de recontextualización de saberes, es decir, un análisis de los fenómenos que posibiliten rutas alternas para su respectiva enseñanza, de forma más significativa para los estudiantes y posibiliten un mejor proceso en el análisis y comprensión.

2. Pregunta Problema

¿Qué aportes, para la enseñanza de la estática en la educación media, se derivan del estudio de los “arcos de medio punto articulados” presentes en las catedrales de Zipaquirá y Bogotá, construidos bajo la dirección de Fray Domingo de Petrés?

3. Objetivos

Objetivo General

Elaborar una propuesta didáctica para la enseñanza de la estática con base en las obras civiles o arquitectónicas de Fray Domingo de Petrés.

Objetivos Específicos

- Analizar las fuerzas y los esfuerzos existentes en los arcos catalogados de

medio punto articulado, para comprender el equilibrio desde la perspectiva de la mecánica estática.

➤ Estudiar desde el punto de vista de la estática algunas de las características estructurales de las catedrales de Bogotá y Zipaquirá diseñadas por Fray Domingo de Petrés, estructuras que soportan solo con su forma las cargas a compresión sin ningún tipo de argamasa.

➤ Generar una propuesta didáctica para grados décimo y once con base en el estudio de las variables existentes en un arco de medio punto articulado.

4. Antecedentes

Los antecedentes utilizados en relación con la metodología son de tres categorías: los primeros dan información acerca de la obra de Fray Domingo de Petrés en el Nuevo Reino de Granada, los segundos dan información acerca de las estructuras del arco de medio punto en arquitectura e ingeniería civil y un tercer tipo los que nos proporcionan información acerca de la estática encontrada en los arcos de medio punto, teniendo en cuenta componentes del enfoque metodológico y del diseño de la investigación, propiamente dicho, para lograr mediante un estudio histórico de la obra arquitectónica de Fray Domingo de Petrés el análisis de los conceptos de la estática que se pueden ejemplificar en un arco de medio punto: tracción, compresión y esfuerzo.

Primera Categoría:

Como antecedente de primera categoría se encuentra (Alcaldía Mayor de Bogotá), 2012 Instituto Distrital Patrimonio Cultural, Fray Domingo de Petrés en el Nuevo Reino de Granada, por medio de este documento, se logró conocer todas las construcciones de las cuales fue partícipe Fray Domingo de Petrés, la mayoría funcionales hasta nuestros

días, obras construidas sin ferro concreto, en estas se encuentra los esfuerzos de compresión, tensión como principio de construcción.

4.2. Segunda Categoría:

En la segunda categoría de antecedentes, se estudió los arcos de medio punto, conceptos y construcción a través de la historia. Es el caso de (*Arenas de Pablo, JJ (2002)*). Que nos describe la trayectoria de los puentes en el siglo XVIII: (Alvarez de Miranda, Ansón Navarro, Arenas de pablo, & Capel Sáez, 2005) “El siglo XVIII exhibe un nuevo clima de atención a las obras públicas. Tras la guerra de Sucesión, se abre una centuria de reconstrucción que presencia la ejecución de las primeras carreteras dignas de ese nombre y, ya en el reinado de Carlos III, la aprobación del primer esquema director de lo que será la red nacional de carreteras radiales” (pág. 383). Caminos en el aire. Colección ciencias, humanidades e ingeniería, vol. 1. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Es la misma época donde se inician las construcciones de las catedrales en Santa Fe de Bogotá

- **En Bauder, E. (2006).** ¿Son seres humanos los puentes de fábrica? ¿Los puentes de mampostería son seres humanos? Nos hace un análisis de la interdisciplinariedad de las relaciones entre el lenguaje y la técnica, la idea entre ingeniero, arquitectos o antiguos maestros de obra que basan sus trabajos en criterios técnicos (cálculos de diverso tipo), alejados de las valoraciones humanistas, tomando como ejemplo a Vitrubio y sus Diez libros de arquitectura Siglo 1 A.C y la recíproca conexión y mutua comunicación entre todas las artes y ciencias, Steinmann y Watson indagan en el origen y la evolución del arte de construir en su libro Puentes y sus construcciones. De esta manera progresa el hombre, aprendiendo de lo que conoce y reconoce: la

naturaleza. La fábrica es la parte de la construcción o parte de ella realizada con materiales como piedras, ladrillos, bloques, tierra adobe, tapial y hormigón en masa. Estructuralmente, estos materiales no resisten esfuerzos a tracción, lo que obliga a que las construcciones erigidas con ellos tengan que trabajar por forma, es decir por compresión. Así, los puentes de fábrica tienen por estructura fundamental el arco apoyado en pilares o estribos y muros.

No se sabe fechar con exactitud el origen de los puentes de fábrica (entre 2500 y 3500 A.C) pero hasta los años treinta del siglo XX, cesaron de construirse dando paso a los de hormigón estructural. La relación entre generaciones de constructores desde los romanos hasta los años 30 y 40 del siglo XX, se establecía en construir, restaurar, rehabilitar y conservar debilidades debido a debilidades causadas por diferentes factores como ocurre en los seres vivos. Desgraciadamente, esta habilidad se perdió en los últimos cincuenta años casi por completo y solo ahora, a principios del siglo XXI, un grupo reducido de ingenieros trata de recuperar esta disciplina, pues es más económico preservar estos puentes que deshacer y rehacerlos, aparte de la importancia que tienen como legado histórico- artístico. De esta manera por deducción natural se puede llegar a comprender la metáfora “el puente de fábrica es un ser humano”.

- **Espejo, J. (2007).** Estudio del comportamiento experimental de los puentes de fábrica ensayados hasta rotura (Puente ferroviario de la Riera de Rubí y Puente sobre el ferrocarril de Plazaola en Urnietasu). Trabajo de investigación tutelado por León, M. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Este estudio realiza el fin de la evaluación estructural de comprobar la capacidad resistente del puente frente a patrones de carga y cuantificar el nivel de seguridad representado generalmente como

la relación entre la carga “Normativa” y la carga última. Finalmente concluir si es necesario acometer una reparación, un esfuerzo, o cualquier medida correctiva necesaria que garantice aumentar la vida útil.

Para obtener un resultado fiable del análisis se debe partir del conocimiento de la mayor cantidad de datos disponibles de la estructura, rara vez en estructuras de cierta edad esto es posible, por eso la caracterización geométrica y mecánica es una de las principales dificultades en la tarea de evaluación. Cuando no se encuentran planos del puente, la geometría externa resulta de las medidas tomadas en campo durante las tareas de inspección. Los datos concernientes a la estructura interna del puente resultan al final solo en una “estimación”. Los materiales son otra variable adicional en el estudio de este tipo de construcciones, los puentes de fábrica son los construidos con piezas de piedra, unidades de ladrillo, o por mezcla de estos dos estando unidas las piezas entre sí con morteros o solamente por estructura.

- **Fernández Casado, C. (2009).** Historia del puente en España: puentes romanos. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Hace una distinción entre los puentes romanos en España y los puentes construidos en la Edad Media puentes de fábrica utilizando el arco de medio punto, estribos y columnas como estructura, hace referencias a puentes como el puente y el arco de Martorell donde las reformas que en épocas de Augusto se efectuaron sobre el conjunto de la red viaria se acreditan en la fábrica romana del primer puente que en Martorell cruzaba las aguas del río Llobregat, más tarde arruinado y transformado en un puente medieval de dos vanos con un gran arco central apuntado y en su cenit una puerta central para el control del paso años 1276-1285. En la base del largo estribo conservado sobre la margen derecha, los sillares romanos se distinguen claramente de la obra medieval.

Así nos va narrando las diferencias de estilo arquitectónico entre puentes romanos y medievales.

- **González Parejo, JM (2014).** Puentes de fábrica, romanos y medievales en la provincia de Cáceres. tesis doctoral dirigida por Siegrist Fernández, C., y Rodado López, J. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, <http://oa.upm.es/30316/>. ramos casquero, A., León

González, (2013). La metodología adoptada en la tesis doctoral está estructurada en cuatro líneas de actuación: identificación de los puentes que puedan pertenecer tanto a época romana o medieval, visita in situ de los puentes identificados como puentes romanos y medievales, búsqueda de información de los puentes visitados, estudio paramétrico de los puentes arco de fábrica. En esta tesis doctoral se encontraron los materiales usados en las estructuras de fábrica utilizados en puentes en España y adoptada en el Nuevo Reino de Granada se le da a la roca como material de construcción diferentes tipos según sus propiedades de la siguiente manera:

Mineral: un mineral es una sustancia química natural, por ejemplo: (SiO_2), (CaCO_3), el anhídrido de silicio cristalizado constituye el cuarzo y el carbonato de calcio constituye la calcita.

Cristal: es aquella sustancia en la que sus partículas (átomos y iones) se encuentran dispuestos espacialmente siguiendo una estructura ordenada.

Roca: una roca es un agregado de minerales que se presenta de modo abundante en la corteza terrestre.

- **Huerta Fernández, S. (2004).** Arcos, bóvedas y cúpulas. geometría y equilibrio en el

cálculo tradicional de estructuras, de fábrica. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, en este libro se encontró la gran mayoría de las definiciones, la explicación detallada de fábrica al igual que las ecuaciones mencionadas en este trabajo.

- **Grupo de trabajo «Puentes de Fábrica»** del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR). (2009). Criterios y técnicas de ensanche de tableros en puentes de fábrica. Madrid: Asociación Técnica de Carreteras. En esta referencia se encuentran las diferentes bóvedas de puentes de piedra y cómo han evolucionado en el tiempo se reúne bibliografía de la construcción y observación de los puentes, posteriormente en el s XVIII fueron emergiendo formulaciones que en unos casos aportaban resultados y en otros el contrario. En Mesopotamia hace 4000 años se iniciaron los puentes en bóvedas en piedra que correspondían a ladrillos secados al sol. En la construcción de puentes de piedra el arco es uno de los elementos fundamentales contemplado en textos clásicos como Vitrubio en los Diez libros de arquitectura (siglo I A.C). Para ello ha sido objeto de innumerables estudios, observaciones y análisis a través de la historia. Se han tenido en cuenta variables como su forma, el espesor de su bóveda, la luz, la flecha y sus relaciones entre sí. En algunos trabajos se han estudiado la relación entre forma y estructura, comprobando la influencia de la eficiencia y la adaptación estructural observados en los cambios geométricos de la bóveda, de manera que su radio de curvatura ha ido aumentando con el paso de tiempo en busca de formas más rebajadas, tipos más estilizados y estéticos, variando el espesor de la bóveda a fin de mantener su estabilidad y resistencia, lo cual también ha redundado sobre el aspecto exterior de los mismos. El análisis Geométrico

es el parámetro que permite distinguir entre un tipo de arco de directriz circular única y otro es el rebajamiento, que proporciona la relación entre la flecha y la luz. Para determinar numéricamente el valor de este es preciso analizar la geometría del arco, que puede estudiarse en función de los parámetros básicos, de acuerdo con estos criterios los arcos de directriz circular única en función del rebajamiento pueden ser:

Arco de medio punto: El arco de medio punto está constituido por un sector de circunferencia de 180° , fácil de replantear, entre sus ventajas se encuentra la facilidad de realizar su montaje, ya que todas sus dovelas son iguales su rebajamiento es $\frac{1}{2}$.

Arco circular rebajado: Segmento de arco de un único radio de desarrollo inferior de 180° y superior a 90° , en caso extremo coincide con el de medio punto. Su centro queda por debajo de la línea de los arranques.

Arco escarzano. Segmento de arco de un único radio, de desarrollo inferior a 90° , Su centro queda por debajo de la línea de los arranques.

- **Grupo de trabajo «Puentes de Fábrica»** del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR). (2003). Ensayado de bóvedas. Revista RUTAS (96), mayo-junio, Separata.
- **Grupo de trabajo «Puentes de Fábrica»** del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR). (2014). Criterios de intervención en puentes de fábrica. Madrid: Asociación Técnica de Carreteras. Delaware fábrica. Informes de la Construcción, 65(532): 471-480, doi: <http://doi.org/10.3989/ic.12.062>.
- **Grupo de trabajo «Puentes de Fábrica»** del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR).
- **Manjon Miguel, JL (2006).** Los puentes de fábrica del río Arlanza. Análisis de su construcción y propuestas de datos. Tesis dirigida por Martínez Martínez, J. A (Tesis

doctoral no publicada). Universidad de Burgos.

- **Marías y Bustamante, F. (1983).** Un tratado inédito de arquitectura de hacia 1550. Madrid: Biblioteca Nacional.
- **Martín-Caro Álamo, JA (2001).** Análisis estructural de puentes arco de fábrica. Criterios de comprobación. dirección de tesis gira por León González, J. Universidad Politécnica de Madrid. (dieciséis) Huerta Fernández, S. (2000). Estática y geometría: el proyecto de puentes de fábrica en los siglos XV al XVII. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la construcción. Sevilla: Sociedad Española de Historia de la Construcción. En este texto se trata el comportamiento resistente de un puente arco de fábrica teniendo en cuenta tres aspectos fundamentales:
 - Son estructuras masivas que trabajan fundamentalmente por su forma. El elemento resistente principal, que no el único, es la bóveda y el esfuerzo predominante, en principio, es el esfuerzo axial, en relación con la sobrecarga con respecto a la carga permanente, y en lo adecuado de la directriz adoptada para la bóveda.
 - Están constituidas por materiales heterogéneos, anisótropos y, en ocasiones, hasta discontinuos, es decir por fábrica, que no es capaz de soportar tensiones de tracción.
 - Están formadas por elementos estructurales de diferente naturaleza y cuya acción estructural es también diferente (bóveda, relleno, tímpanos, aletas, etc.).
- **Martínez, JL, Martín-Caro, JA, León, J. (2003).** Monografías sobre el análisis estructural de construcciones de fábrica. Evaluación estructural de puentes arco de fábrica. Departamento de Mecánica de Medios continuos y teoría de estructuras. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- **Oliveira, DV, Lourenço, PB, Lemos, C. (2010).** Cuestiones geométricas y capacidad de carga última de los puentes de arco de mampostería del noroeste de la

Península Ibérica. Estructuras de ingeniería, 32(12): 3955-3965. En esta referencia se encuentran los aspectos geométricos y capacidad de carga última de los puentes arco de mampostería del noroeste de España y Portugal en 59 puentes de arco de mampostería dovelas, centrándose en las áreas geográficas adyacentes del norte de Portugal y el noroeste de España. Las reglas empíricas históricas se presentan brevemente y luego se comparan con los datos geométricos de los puentes. Partiendo de una discusión detallada de los resultados geométricos se evalúa la capacidad de carga con sus parámetros con los resultados. El uso de arcos y bóvedas para abarcar espacios horizontales tienen 5000 años, los primeros se encontraron en tumbas subterráneas en Mesopotamia, construidas hace 3000 a. C. Además de los sumerios, los egipcios y los griegos también conocían estructuras de bóvedas y arcos. Tras un largo proceso de evolución, se considera que los etruscos fueron los primeros en construir arcos de mampostería con piedras de cuña. Más tarde los romanos solo mejoraron las técnicas de construcción y agregaron mortero puzolánico. Con la caída del imperio Romano siglo V, el sistema de carreteras, incluidos los puentes sufrió una importante degradación. Seis siglos después, la ocurrencia de importantes cambios económicos y sociales en Europa provocó un aumento de la actividad económica, lo que requirió la construcción de nuevas carreteras y puentes.

El conjunto de puentes arco europeos de mampostería es el resultado de siglos de arduo trabajo, por lo que representa un patrimonio arquitectónico y cultural invaluable. En la actualidad, es posible encontrar puentes romanos, caracterizados por sus pavimentos planos e idénticos arcos de medio punto, así como los puentes medievales, más flexibles, con mayores luces centrales, arcos de medio punto o apuntados, tajamares y pavimentos

jorobados. Sin embargo, los sucesivos trabajos de mantenimiento y reparación a los que han sido sometidos han provocado dificultades en la datación dando clasificaciones erróneas. La mecánica de los puentes puede ser estudiada de acuerdo con las descripciones geométricas y arquitectónicas el análisis estructural. Antes de la aplicación de la estática a los arcos de mampostería, iniciada por La Hire en la primera mitad del siglo XVIII, el proceso de diseño de los puentes en arco implicaba el uso de reglas empíricas, que se basaban en relaciones geométricas simples y tenían como objetivo proporcionar las dimensiones de varios componentes del puente (tramo, elevación, grosor del arco, ancho y alto de las pilas) y la seguridad de la estructura basada en experiencias pasadas. Aunque las reglas empíricas difícilmente se justifican desde un punto de vista mecánico. La carga última soportada por un puente de arco de mampostería depende esencialmente de las propiedades del arco y el relleno. El arco es el elemento estructural responsable de transferir la carga a los estribos y pilas, mientras que el suelo agrega peso muerto, dispersa la carga aplicada en la superficie y proporciona una restricción horizontal a los movimientos del arco. Los puentes de arco de mampostería de vanos múltiples a menudo se analizan como una serie de vanos individuales separados debido a la presencia de pilares robustos y al uso de modelos numéricos más simples. Sin embargo, la carga última de un puente de varios tramos modelado como tal a veces puede ser significativamente menor que el valor calculado al omitir los tramos adyacentes.

- **Ramos Casquero, A. (2015).** caracterización estructural de los rellenos situados en el trasdós de bóvedas de ediciones suyos tóricos. Tesis dirigida por León González, FJ Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, <http://oa.upm.es/38758/>. En este documento se tiene de presente el papel esencial de los rellenos en el comportamiento y la

estabilidad de las construcciones de fábrica, la configuración morfológica de los rellenos del trasdós de bóvedas en la Península Ibérica en tres periodos histórico – técnicos: la construcción romana, la románica y la gótica. La clasificación se ha realizado en base a inspecciones visuales de diferentes edificios. En segundo lugar, se ha caracterizado el papel estructural de los rellenos, identificándose las características intrínsecas que se estiman más significativas de dichos rellenos en relación con su configuración como con su función estructural. En particular se proponen leyes de empujes coherentes con la naturaleza y las condiciones de contorno de los rellenos y las bóvedas. En esta tesis se ha desarrollado una herramienta de análisis que considera las principales variables que intervienen en el comportamiento de una estructura de fábrica, planteando el análisis tensional de los diferentes esfuerzos, normales o tangenciales, así como la interfaz entre bóvedas y rellenos dotándose a los técnicos de una herramienta que permite entender estas estructuras. En las ciudades y pueblos de nuestro entorno los edificios de fábrica constituyen una parte del valor patrimonial y monumental teniendo un uso significativo en la sociedad. Se trata de unos materiales, que en la actualidad no son utilizados en la construcción, su uso queda exclusivo para la restauración o reparación teniendo una gran importancia cualitativa y cuantitativa, dado el gran número de construcciones de este tipo. En las construcciones de fábrica la importancia del relleno en los tableros de un puente o en las cúpulas de las catedrales cumplía la función de compactar y hacer funcional la obra estructuralmente para lograrlo sería necesario conocer su forma, para una correcta cuantificación de la importancia estructural es necesario acotar las dimensiones de los rellenos en el trasdós de las bóvedas.

Su naturaleza, pues las características propias del relleno son necesarias para la cuantificación de su importancia. Por tanto, deberán conocerse sus parámetros mecánicos (módulo de deformación, coeficiente de Poisson) o geotécnicos (ángulo de rozamiento, cohesión, módulo de balasto) según sea su naturaleza. También es preciso conocer sus características de peso propio y humedad.

Su comportamiento, permitirá calibrar la importancia del relleno en la estabilidad de las bóvedas como en el resto de los elementos de la edificación.

Antes de la civilización romana se empezaron a construir bóvedas (Mesopotamia, Sumeria, Asiria, Caldea, Egipto), es durante el periodo correspondiente a la civilización romano- cristiana cuando se alcanza un desarrollo más elevado de estos elementos y aparecen las primeras construcciones abovedadas. Se considera, el periodo comprendido entre la época romana hasta el final del gótico como la más representativa con respecto al desarrollo y evolución de las construcciones abovedadas. Después durante el Renacimiento, Barroco y Rococó no se realizaron aportes valiosos, en el ámbito estructural a la construcción de bóvedas, en estos periodos las aportaciones se centran en el desarrollo de construcciones de cúpulas.

Los estudios de Hooke (1675), basados en el polígono antifunicular de cargas, concluían, de forma práctica pero analíticamente, que la directriz del arco debe tener la forma de una cadena bajo las mismas cargas, pero invertida, Bernoulli en 1704 determinó la ecuación de la catenaria. Gregory (1697) indicó que era suficiente que la cadena quedara dentro de los contornos, es decir dentro del espesor del arco. Con este principio el autor afirma que se pueden dimensionar no solo los arcos si no también los estribos de estos.

La Hire (1695) plantea el funcionamiento del arco como si en las juntas tan solo se transmitieran tensiones normales, sin componente de fricción. Mediante estos cálculos y aplicando los principios de la mecánica, determina una formulación para el cálculo de los arcos y de sus soportes o estribos. La aplicación de los principios expuestos por La Hire llevó a la determinación de que la forma óptima para los arcos de fábrica es con espesor variable y mínimo en el centro de luz. Belidor (1729) ajusta el modelo propuesto por La

Hire, ya que la formulación propuesta determina el espesor estricto estable que según este autor debe ser incrementado para asegurar la estabilidad de este. Couplet (1729) demostró de forma analítica que el fallo de un arco, aceptando que no se puede producir por cortante, se produce por la formación de un mecanismo cinemático de colapso. A partir de este momento aparecen expuestas de forma explícita las tres hipótesis básicas respecto al comportamiento de la fábrica: no resiste tracciones, su resistencia a compresión es infinita y que no es posible el deslizamiento de dovelas.

- **Serrano-López, R., Mínguez-Algarra, J., Cambronero-Barrientos, F., Saldaña-Arce, D.**(2014). La adaptación de la forma a las cargas en el arte estructural: desde las pilas y el arco, a la torre. Informes de la Construcción.

4.3. Tercera categoría:

La tercera categoría de antecedentes se utiliza, tesis de repositorio, y documentos en los cuales se analiza la estática con carácter pedagógico, aplicables en el propósito de explicar la estática desde el punto de vista del arco de medio punto.

- **Mancipé Peña Jorge Jonathan, 2018.** Trabajo de grado para optar por el título de Licenciado en Física. Una manera de adorar la enseñanza de la mecánica, una mirada al caso de la estática. Asesor Lic. Juan Carlos Castillo Ayala Universidad Pedagógica Nacional, Facultad de Ciencia y Tecnología, Bogotá D.C. En este documento de proyecto de grado encontré las siguientes consideraciones aplicables a la enseñanza de la mecánica, los procesos de formalización implican de ciertas actividades de gran importancia en la construcción del individuo en el abordaje de los fenómenos estáticos y su análisis conceptual en el estudio del equilibrio mecánico, guiada por la intencionalidad pedagógica. En la enseñanza de los fenómenos mecánicos se puede

evidenciar un tipo de formalización que según María Mercedes Ayala y otros, se puede definir como axiomatización de las teorías físicas y unificación de los campos fenoménicos. Este tipo de formalización se puede presenciar en algunos trabajos como el de la *Macanique Analytique* de Lagrange, en este trabajo se construyen algunos principios generales de conectar e implicar diversas proposiciones, a causa de buscar y organizar una variedad de campos de la mecánica, y al mismo tiempo definir características de utilidad en sus formas de organizar la experiencia. Por tal motivo, las propuestas de investigación en la enseñanza de los fenómenos mecánicos centren su interés en el diseño de diversas estrategias metodológicas cuyo último objetivo, es familiarizar al estudiante con un conjunto de análisis de los fenómenos en cuestión. Una vez se reconoce la variedad de problemas que surgen en poder organizar la experiencia con los fenómenos mecánicos, se requiere invitar al individuo a pensar sobre las posibles formas de representar un fenómeno. A su vez, se establece algunas reflexiones, de tal forma que se dé la posibilidad de un estudio del sujeto acerca de las diferentes formas de representar la mecánica.

Ayala María Mercedes, Rodríguez Luz Dary, Romero Ángel.

Departamento de física Universidad Pedagógica Nacional Santa Fe de Bogotá.

(1998)

Elementos para la enseñanza de la estática desde una perspectiva constructivista. En este trabajo se describen y caracterizan los principios que rigen la estática según Lagrange, las palancas la de composición de fuerzas y el de velocidades virtuales. En el presente trabajo de grado se ha utilizado la composición de fuerzas, en la rama de la física denominada estática se puede entender como las acciones que pueden ejercer los cuerpos

debido a su peso (presiones, tensiones, etc.) donde es considerado como inherente a los cuerpos mismos. El equilibrio es asumido como ausencia de movimiento y el desequilibrio significa movimiento, el examen del poder del peso en diferentes direcciones da origen a la composición de fuerzas. Con el trabajo realizado por Stevin se comienza a generar la posibilidad de independizar la fuerza del peso adquiriendo acción en sí misma permitiendo la reformulación del principio de las palancas como el de las velocidades virtuales.

En el principio de las palancas desde una perspectiva de Arquímedes la acción del peso, el equilibrio se reduce a la simetría geométrica especular de las disposiciones de los pesos, en el sentido de que el equilibrio solo es evidente para distribuciones espaciales de peso con esta simetría: magnitudes de pesos iguales a distancias iguales (del punto de equilibrio). El punto de simetría es el mismo punto de equilibrio, la invarianza del punto de equilibrio es la base de la constitución del concepto de centro de gravedad, siendo la Estática de Arquímedes una teoría sobre el centro de gravedad. El procedimiento seguido por Arquímedes está basado en la idea de conmensurabilidad de los pesos, estos son divididos en partes iguales, las cuales coloca a las mismas distancias entre sí sobre la balanza sin alterar la situación de equilibrio, obteniendo una distribución homogénea, la condición de equivalencia se encuentra en una palanca recta donde se cargan dos pesos cualquiera, colocados a uno y otro lado del punto de apoyo a distancias que son inversamente proporcionales a los mismos pesos, la palanca estará en equilibrio (es el principio de funcionamiento de la Romana). El enfoque de Arquímedes del equilibrio permite un trabajo pedagógico, la alteración sin afectar el equilibrio, de una distribución homogénea de bloques idénticos sobre una regla que puede girar libremente sobre un

punto de apoyo, teniendo en cuenta estos razonamientos el estudiante explora las condiciones de equilibrio de los cuerpos elaborando el concepto de centro de gravedad. Para Huygens el problema del equilibrio parte de la consideración de que las acciones de los pesos dependen de la distancia al eje del equilibrio, hace una distribución homogénea del peso extendiendo al plano determinando dos ejes de equilibrio, cuya intersección determina el centro de gravedad del plano. El estudio de la palanca angular de Huygens muestra que esta cumple la misma ley de la palanca recta considerando que la acción del peso no se manifiesta sólo verticalmente si no también en otras direcciones aportando elementos para la línea de descomposición de fuerzas.

Sobre el principio de descomposición de fuerzas el plano inclinado permite evidenciar las direcciones en las cuales el peso puede ejercer su acción. Stevin en su estudio de los planos inclinados se propone encontrar la porción del peso por la cual un cuerpo sobre el plano inclinado tiende hacia abajo, esta línea de análisis lleva al desarrollo del concepto de composición de fuerza concretado por Newton.

Sobre el principio de velocidades virtuales el esfuerzo realizado para levantar un cuerpo se basa en la suposición de la existencia de un movimiento posible en la dirección de acción del peso, el esfuerzo realizado es la medida de la acción vertical del peso considerando que para levantar un cuerpo de n unidades de peso una altura de I unidades debe ser equivalente a levantar a levantar una unidad de peso n unidades de altura considerado en la edad media por Jordano de Sajonia,, Descartes y Pascal lo consideraban como el principio general que regía el funcionamiento de las máquinas mecánicas. Para Bernoulli el producto $F \cdot x$ se denomina energía, puede ser positivo o negativo cuando la suma de todas las energías positivas es igual a la suma de todas las

energías negativas. Este principio de los desplazamientos o velocidades virtuales fue desarrollado y extendido por D´Alambert y Lagrange.

- **Nervi Pier Luigi (2015).** Artículo. La enseñanza de la Arquitectura, Traducción de Gustavo Carabal, publicado AYP Continuidad D3 diciembre 2015. En este artículo se relacionan los problemas arquitectónicos con la técnica constructiva, donde no se pone en evidencia la situación arquitectónica al desarrollo de las teorías estáticas y a los métodos constructivos consecuentes con el progreso científico y técnico. Antiguamente, el arquitecto, no poseía el conocimiento de realizar cálculos estáticos de verificación realizaba obras adoptando sistemas constructivos encontrados intuitivamente, perfeccionados sucesivamente a partir de un lento progreso empírico. El pasaje de un esquema estático-constructivo a otro, por ejemplo, de la estructura arquitebada al uso del arco, se realiza lentamente por grados sucesivos. Definido un esquema, el mismo se mantenía vigente por un notable número de siglos hasta que surgía una nueva intuición constructiva.

Las posibilidades de las cuales actualmente se disponen para investigar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento estático de cualquier disposición estructural y la eficiencia de los nuevos materiales constructivos han brindado en pocos años una completa libertad de invención de nuevos esquemas constructivos.

La libertad de invención alcanzada junto con la mayor eficiencia estática de los nuevos materiales ha modificado las obras haciendo inútil la inserción de elementos pertenecientes a técnicas y arquitecturas del pasado, función que deben realizar las escuelas de arquitectura en la formación de verdaderos creadores del fenómeno arquitectónico que adquiere forma a través de la armoniosa fusión de todas las técnicas.

La claridad de los métodos de enseñanza a los jóvenes arquitectos en el dominio de la estática trata de que el arquitecto sea capaz de inventar estructuras complejas comprendiendo las posibilidades resistentes sin obligarlo a pasar por el desarrollo de la más elevada teoría de los sistemas elásticos procurando ir al concepto antes que la demostración. Se considera que el estudio de la estática y de la ciencia de las construcciones debería ser conducido diferente a la ingeniería con fórmulas simples para la primera aproximación a los procedimientos matemáticos de cálculo. La fotoelasticidad y la experimentación con extensómetros sobre modelos de estructuras podrían ser una herramienta en la comprensión del funcionamiento de las estructuras portantes, la estática gráfica con la representación de fuerzas en sus componentes y los fundamentos del equilibrio son aspectos importantes en el estudio de las técnicas de construcción que van de la mano con la estética de la construcción.

5. MARCO TEÓRICO

La obra de Fray Domingo de Petrés, con una focalización en las catedrales de Bogotá y Zipaquirá.



Ilustración 7. *Catedral de Zipaquirá, autoría propia*



Ilustración 8. *Catedral Primada de Colombia*

Recuperado de ColombiaPaís (2022)

Huerta Fernández (2004) Las primeras construcciones tenían muros de fábrica sobre los que se apoyaban troncos de árbol para formar suelos o techumbres. El siguiente paso consistió en cubrir el espacio también con fábrica. La manera natural de salvar un vano a base de piedras o ladrillos es formar un arco, el arco se inventa en Mesopotamia o Egipto hace 6000 años. El cómo se pudo llegar a esta idea es un misterio, pero no es algo evidente lo demuestra que otras culturas como los mayas o incas, construyeron en fábrica durante siglos sin llegar a la idea del arco.

Un arco típico se construye apilando piedras unas al lado de otras sobre una estructura auxiliar de madera o cimbra. La cimbra da la forma al arco; se empiezan a colocar las piedras a partir de los arranques y colocada la última piedra en el centro, la clave, el arco queda terminado. Al bajar la cimbra las piedras tienden a caer, así una dovela que intenta caer empuja a las dos dovelas colindantes que contrarrestan ese empuje, y los empujes se van transmitiendo, incrementados por los pesos. Si la forma del arco es correcta, y su espesor suficiente, estos empujes y contra empujes se anularán entre sí y el arco permanecerá en equilibrio. No obstante, las últimas piedras de los arranques

del arco transmiten un empuje que debe ser contrarrestado. El arco debe estar apoyado firmemente contra algo que resista su empuje: machones o estribos de fábrica. (pág. 1).

. La humanidad utilizó el arco de medio punto durante tres milenios en grandes obras que perduran hasta el día de hoy siendo en muchos casos funcionales (puentes, edificaciones, acueductos), lográndose un amplio desarrollo práctico de esta tecnología cuyo conocimiento se transmitía de padres a hijos o de maestros constructores a sus aprendices. En el siglo XVII empieza a ser objeto de consideración por los filósofos naturales que, como en el caso de Young, se ocuparon de matematizar los esfuerzos que se ejercen en los arcos de medio punto articulado dándole un carácter científico en su construcción.

Son ejemplos de estabilidad y funcionalidad el Coliseo Romano, los acueductos y puentes romanos que datan de 2000 años de antigüedad. En la Edad Media los arcos de medio punto fueron utilizados en puentes, castillos medievales e Iglesias, que perduran hasta nuestros días. Con la llegada de los europeos, su uso se extendió a América con una amplia aplicación en construcciones civiles, militares y religiosas. Teniendo particularidades en su construcción de forma subjetiva como la solemnidad, de forma objetiva acústica, luminosidad, que desde el punto de vista físico solo puede dar las superficies cóncavas al reflejarse las ondas de una fuente emisora.

El arco de medio punto articulado cayó en desuso alrededor de 130 años cuando la aparición del hierro en la construcción (vigas, columnas, estribos) fueron reemplazando las grandes estructuras en roca que solo trabajaban con fuerzas perpendiculares (compresión) y su respectivo esfuerzo (tracción) completando el par de fuerzas de acción y reacción en la mecánica clásica. El uso del hierro en el ferro concreto

que puede trabajar óptimamente con todos los esfuerzos: perpendiculares (compresión tracción) tangenciales (cizallamiento), torque, hasta cierto límite de tolerancia de los materiales sin que colapse la estructura.

Se realiza una descripción de la situación (arco de medio punto articulado) teniendo en cuenta la obra de Fray Domingo de Petrés (P3), en obras civiles del Nuevo Reino de Granada vigentes y funcionales hasta nuestros días declaradas patrimonio cultural de la nación como lo son:

La Catedral Primada de Colombia, el Observatorio Astronómico de Bogotá, la Catedral Diocesana de Zipaquirá, la Catedral de Facatativá, la Catedral del Rosario de Nuestra Señora de Chiquinquirá. el puente del Topo en Tunja. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2012, pág. 7).

Habiendo soportado dos terremotos sin desplomarse prescindiendo el uso del ferro concreto, con materiales inelásticos (rocas) cuyo fundamento de estructura portante son los esfuerzos de compresión y tracción en arcos de medio punto articulado, contrafuertes, bóvedas de cañón y bóvedas en crucería utilizadas desde hace 6000 años y perfeccionadas de manera casiartesanal por más de 2700 años, siendo reemplazados por el ferro concreto hasta hace aproximadamente 120 años.

El arco de medio punto articulado que soporta grandes esfuerzos a compresión en la actualidad no se utiliza como estructura portante, se ven arcos de medio punto en la construcción de vanos en ventanas, como estructura decorativa en patios donde la estructura portante puede ser solamente un cielo raso o tejas, el uso del ferro concreto ha dado la posibilidad de cubrir grandes vanos (distancias) y áreas con estructuras en forma de paraboloides y paraboloides hiperbólicos.

Para realizar su obra utilizó la tecnología de la época que eran los arcos de medio punto las bóvedas de cañón y los arcos de crucería como estructura de las edificaciones que en esta época se realizaban de manera casi artesanal, los cálculos utilizados eran los usados por los romanos y expandidos en libros en latín donde se utilizaban proporciones entre vanos (espacios) y el cálculo de los estribos (columnas) que debían soportar el peso de la estructura y llevarlo adecuadamente a los basamentos.

El arco de medio punto en la arquitectura: una breve presentación de su uso a.

Estructuras:

Herrera Sierra & Fernández Concellón,(2022) Una estructura puede definirse como un conjunto de elementos que, unidos entre sí a través de uniones articuladas, atornilladas, remachadas o soldadas, tienen la misión de soportar cargas de diversa naturaleza (peso propio, cargas de objetos que descansan, se apoyan o cuelgan de ellas, viento, nieve y agua) sin que se vea afectada su integridad ni su estabilidad.

Las estructuras no presentan movimiento, son construcciones estáticas constituidas por elementos longitudinales (en su mayoría) que se unen entre sí, normalmente por sus extremos, aunque pueden existir uniones en puntos intermedios de estas. Las uniones entre todos los componentes estructurales suelen ser por contacto (en apoyos o cargas), la representación de las estructuras para el análisis de su estabilidad, transmisión de esfuerzos y equilibrio se lleva a cabo considerando únicamente la dirección principal de cada tipo de elemento estructural, despreciando la geometría de su sección. (pág. 162)

b. Tipos de estructuras

Herrera Sierra & Fernández Concellón (2022) Las estructuras pueden clasificarse de

forma simplificada en función de cómo están unidos los elementos que las componen y de la posición de estos. Atendiendo al tipo de uniones entre sus elementos, pueden clasificarse en:

- **Estructuras articuladas:** en los extremos de sus componentes existen uniones tipo rótula o pasador, permitiendo el giro entre estas, en cualquier dirección o en el plano que las contiene respectivamente.
- **Estructuras rígidas:** en los extremos de todas sus componentes existen uniones que impiden el giro relativo entre estas.

Adicionalmente, pueden encontrarse estructuras que combinan ambos tipos, presentando partes rígidas y partes articuladas. Un tipo de estructura donde se suele presentar esta combinación entre sus partes es el entramado, donde al menos un par de barras están unidas por una unión rígida. (pág. 163).

c. Estabilidad e Isostaticidad:

Herrera Sierra & Fernández Concellón (2022) Uno de los aspectos más importantes que ha de tenerse en cuenta al diseñar correctamente una estructura es su estabilidad ya que, de no quedar garantizada, la estructura no tendrá ninguna aplicación.

La estabilidad puede definirse como la propiedad que una estructura posee para garantizar que ante cualquier estado de cargas se mantiene en equilibrio estático. Una estructura estable puede colapsar si se superan los valores contemplados en los estados de carga para los que se había diseñado, si se dimensionan mal los elementos que la componen o si se presenta un diseño inadecuado.

Una estructura se considera isostática si posee el mismo número de ecuaciones que de incógnitas, siendo por tanto una estructura estable. Lo contrario, dentro de la

estabilidad, da lugar a estructuras hiperestáticas, restringidas en exceso porque su configuración y diseño provoca que no puedan plantearse el número de ecuaciones necesario para despejar todas las incógnitas. (pág. 167).

d. Estructuras articuladas

Las estructuras denominadas articuladas, presentan las siguientes características:

- Sus contornos están cerrados.
- Los extremos de sus barras están articulados.
- Utilizan apoyos fijos o móviles.
- Las cargas que actúan sobre ellas deben ser puntuales. (Herrera Sierra & Fernández Concellón, 2022, pág. 177)

e. Estabilidad de estructuras articuladas

Herrera Sierra & Fernández Concellón (2022) Las estructuras articuladas, al no poseer contornos cerrados, pueden presentar dos tipos de estabilidad, la externa y la interna. La estabilidad interna tiene que ver con la disposición de las barras en la estructura y la externa con sus apoyos. En términos generales, una estructura articulada es estable internamente si todas las barras que la componen se mantienen en equilibrio estático (ni se desplazan ni se giran) y externamente si los apoyos de la estructura impiden que ésta se desplace o gire, en ambos casos ante la acción de cualquier carga.

Externamente, la estabilidad puede comprobarse teniendo en cuenta la condición general de estabilidad:

- El número de incógnitas N , es mayor o igual al número de ecuaciones.
- Las ecuaciones de equilibrio externo de la estructura son coherentes y pueden resolverse, lo que está condicionado por la disposición y tipología de los apoyos (pág.

179).

f. Isostaticidad en estructuras articuladas

Herrera Sierra & Fernández Concellón (2022) La isostaticidad y lo contrario, la hiperestaticidad, tienen que ver con la estabilidad de una estructura. Al igual que con la estabilidad, ambas pueden y deben valorarse externa e internamente. (una estructura presenta hiperestaticidad si existen incógnitas que no pueden determinarse, esto puede producirse por causas externas).

Una estructura es estable e hiperestática externamente si posee un número de incógnitas mayor o igual al de ecuaciones que pueden plantearse para determinar estas, debido a que los apoyos de la estructura restringen en exceso sus grados de libertad. Esta situación dejará reacciones generadas en ellos sin poder determinarse mediante las ecuaciones de equilibrio. (pág. 183).

¿Como se realizaron estas construcciones sin la utilización de hierro, ferro concreto, columnas y vigas de amarre como las construcciones modernas?

Estas técnicas recopiladas a través de los siglos en Asia y Europa en especial los sumerios y romanos eran el ordenamiento de rocas o ladrillos cocidos superpuestos o pegados por una argamasa (cemento), estas acumulaciones eran denominadas por los maestros construcciones de fábrica.

Me encuentro ante la inquietud: ¿Que peculiaridades se tuvieron en cuenta para que estas estructuras que funcionan bajo fuerzas perpendiculares perduraran en la historia?, soportando terremotos donde existen ondas longitudinales y transversales que producen esfuerzos tangenciales en las estructuras produciendo cizallamientos con su correspondiente colapso.

En las estructuras elaboradas con arcos de medio punto articulado podemos encontrar las siguientes características: de **orden objetivo** resistencia, rigidez, acústica, iluminación y **subjetivos** esbeltez, solemnidad, armonía, cuyos significados se incluyen en

Resistencia

La resistencia es ampliamente comprobada en las estructuras de los arcos de medio punto articulados, han soportado esfuerzos perpendiculares y algunos tangenciales en menor medida sin colapsar.

Rigidez

La rigidez la podemos observar de manera objetiva al tratar de deformar una estructura elaborada con arcos de medio punto articulados, los materiales empleados junto con la estructura conforman un sistema no elástico que soporta grandes esfuerzos perpendiculares.

Acústica

Debido a la forma cóncava de la estructura elaborada en arcos de medio punto la reflexión de las ondas sonoras sobre la superficie se une en puntos denominados focos evitando la superposición de las ondas sonoras favoreciendo la acústica en el espacio interior de la construcción.

Iluminación

Al igual que las ondas sonoras, las ondas de luz se reflejan en las superficies cóncavas generando espacios más iluminados al ojo humano, evitando en muchos casos la formación de sombras o penumbras. En general todos los fenómenos físicos que son compuestos por ondas se favorecen al ser reflejadas en las superficies cóncavas de las estructuras elaboradas con arcos de medio punto articulado en su interior.

Esbeltez

Las estructuras elaboradas con arcos de medio punto sus columnas portantes de los estribos pueden ser elaboradas gracias al comportamiento mecánico de sus materiales con una altura considerable en comparación al área de la base, esta característica fue muy utilizada en la construcción de catedrales en la edad media.

Solemnidad

Esta característica de tipo subjetivo es percibida al entrar a algún recinto elaborado con la técnica de arcos de medio punto articulado que en su mayoría han sido construidas hace más de 2000 años.

Armonía

La mayoría de las construcciones elaboradas con arcos de medio punto han seguido proporciones áureas a través de los siglos, utilizadas por arquitectos y pintores en sus obras a través de los siglos.

Tabla 1. Características Arco Romano

que se ejerce en la parte superior del arco que debe soportar las cargas y la tracción la que se ejerce sobre los estribos cuando el arco debido a la carga soportada tiende a expandirse completando un par de fuerzas y esfuerzos de acción reacción. El arco de medio punto no cumple su objetivo con fuerzas tangenciales.

Existen diferentes tipos de arcos en las construcciones: romanas, bizantinas, clásicas, neoclásicas, góticas, modernas como lo fueron el arco de herradura en La Alhambra, apuntalado, en catenaria, adintelado. Las construcciones en arco de medio punto son joyas que nos han dejado las civilizaciones y las culturas, algunas observaciones de tipo subjetivo: asimple vista una construcción moderna no posee la luminosidad, espacio, solemnidad y elegancia que se presentan las construcciones hechas con arcos, de tipo objetivo: el sonido en las construcciones hechas en arcos unas más que otras reflejan mejor las ondas sonoras y la luz evitando en algo la superposición de las ondas reflejadas. En el siglo XVII empieza a ser objeto de consideración por los filósofos naturales que, como en el caso de Young, se ocuparon de matematizar los esfuerzos que se ejercen en los arcos de medio punto articuladodándole un carácter científico en su construcción y Cristian Huygens a finales del siglo XVI realiza la ecuación de la catenaria dándole este significado por tratarse de la forma que toma una cadena al ser sostenida en sus dos extremos formándose por la acción de la gravedad.

6.2. Módulo de Elasticidad de Young

Zapata (2020) El módulo de Young o módulo de elasticidad es la constante que relaciona el esfuerzo de tracción o compresión con el respectivo aumento o disminución de longitud que tiene el objeto sometido a estas fuerzas. Las fuerzas externas aplicadas a los objetos no solamente pueden cambiar el estado de movimiento de estos, al igual son

capaces de cambiar su forma, romperlos o fracturarlos.

El módulo de Young sirve para estudiar los cambios producidos en un material cuando se le aplica una fuerza de tracción o compresión a nivel extremo útil en ingeniería y arquitectura. Debe su nombre a Thomas Young (1773- 1829), que fue quien llevó a cabo estudio de materiales proponiendo una medida de la rigidez de distintos materiales, en materiales con baja rigidez hay más deformación ante una carga de extensión o de compresión tratando de responder la pregunta ¿Cuánto se puede deformar un objeto? Depende de las propiedades del material y de las dimensiones que tenga. Por ejemplo, al comparar dos barras de Al con distintas dimensiones, cada una con diferente área de sección transversal y longitud, sometidas a una misma fuerza de tracción, el comportamiento esperado es el siguiente:

A mayor grosor (sección transversal) de la barra menor estiramiento.

A mayor longitud inicial, mayor estiramiento final.

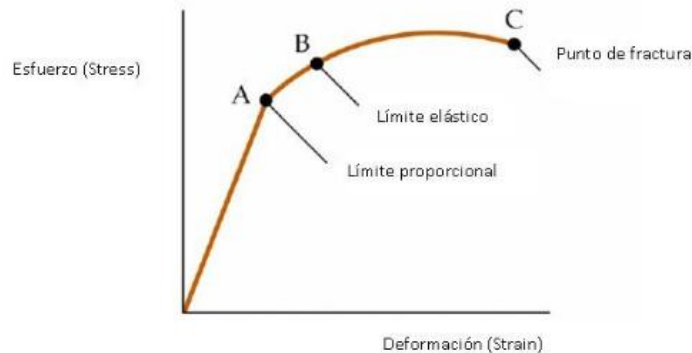


Ilustración 9. Gráfica del esfuerzo versus la deformación para un material.

Recuperado de Zapata(2020)

El parámetro llamado módulo de elasticidad del material es un indicativo de la respuesta elástica, Young siendo médico lo halló al querer conocer el papel de la

elasticidad de las arterias en el buen desempeño de la circulación sanguínea entendiendo que el esfuerzo es proporcional a la deformación, mientras no se supere el límite elástico del material. Según la gráfica, en el primer tramo que va desde el origen hasta el punto A, es una línea recta siendo válida la ley de Hooke:

$F = -k \cdot x$, donde F es la magnitud de la fuerza que retorna al material a su estado original, x es la deformación experimentada por este y k es una constante que depende del objeto sometido al esfuerzo. Del origen hasta el punto A, las deformaciones consideradas aquí son pequeñas y el comportamiento es perfectamente elástico. Desde A hasta B el material también se comporta de manera elástica, pero la relación entre el esfuerzo y deformación ya no es lineal. Desde B hasta C, el material experimenta una deformación permanente, siendo incapaz de regresar a su estado original. A partir de C si el material se sigue estirando sufre una ruptura. Matemáticamente, las observaciones de Young se deducen de la siguiente manera: Esfuerzo \propto Deformación, donde la constante de proporcionalidad es el módulo de elasticidad del material:

Esfuerzo = Módulo de elasticidad x deformación.

Existen muchas maneras de deformar los materiales. Los tres tipos de esfuerzo más comunes a los cuales someter un objeto son: Tensión o estiramiento, Compresión, Corte o cizalla, un esfuerzo al que comúnmente están sometidos los materiales en la construcción es la tracción.

Cuando un objeto de longitud L se estira o se tensa, está sometido a una tracción que ocasiona una variación en su longitud, el esfuerzo realizado para deformar al objeto es la fuerza por unidad de área. La deformación longitudinal es $\Delta L/L$ de esta forma su nueva longitud será $L + \Delta L$ de esta forma $\frac{F}{A} = Y \frac{\Delta L}{L}$, la

deformación unitaria indica la deformación relativa respecto a la longitud original, no es proporcional que una barra de 1m se estire o encoja 1cm, a que una barra de 100m de longitud se deforme igualmente 1 cm. Para el buen funcionamiento de las piezas y estructuras, hay una tolerancia en cuanto a las deformaciones relativas permitidas. Ecuación de la deformación $\Delta L = \left(\frac{1}{Y}\right) \left(\frac{L}{A}\right) F$ para una determinada fuerza F, cumple con las observaciones que hizo Young:

- A mayor área de sección transversal, menor deformación. Inversamente
- A mayor longitud, mayor deformación. Directamente
- A mayor módulo de Young, menor deformación. Inversamente.

Las unidades de esfuerzo (N/m²), son las unidades de presión en términos de presión el módulo de Young se expresa:

Ecuación 1: Módulo de Elasticidad de Young:

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación unitaria}}$$

Zapata, (2020)

6.3. Catenaria

Ecuación 2: Ecuación de la catenaria tomando su mínimo en el punto (0, h) es:

$$y = a \cosh \left[\frac{2x}{l} \cosh^{-1} \frac{a+h}{a} \right]$$

Huerta Fernández 2013(pág. 139)

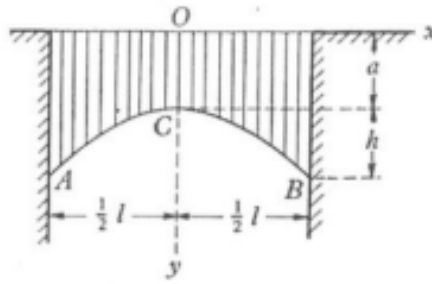


Ilustración 10. *Catenaria*

Recuperado de Huerta Fernández (2013) pág. 139

Swokowski, 1988 La función $f(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$ se conoce como coseno hiperbólico.

Esta función se utiliza para describir la forma de un cable uniforme flexible, o de una cadena que pende bajo su peso y cuyos extremos están sometidos a una misma altura. Si se introduce un sistema coordenado la ecuación del cable es $y = \left(\frac{a}{2}\right) (e^{x/a} + e^{-x/a})$ en la que a es un número real. El nombre de la gráfica es catenario. (pág. 232).

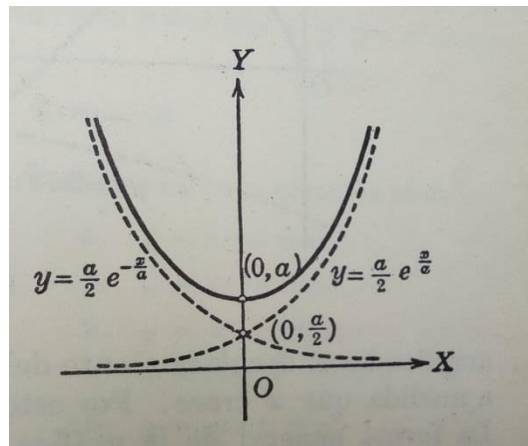


Ilustración 11. *Catenaria con vértice en el origen*

Recuperado de Lehman, (1953), pág. 311

$$y = \frac{a}{2} (e^{x/a} + e^{-x/a}), a > 0$$

Ecuación 3: Catenaria con vértice en el punto $(0, a)$ Lehman, 1953 pág. 311

Lehman, 1953. La curva corta al eje Y solamente en el punto (0, a). La curva es simétrica con respecto al eje Y. Como e^x es positiva para todos los valores de x. Y es positiva para todos los valores de x. A medida que x tiende al infinito tomando valores positivos o negativos y tiende a infinito positivamente. El valor mínimo de y es: a. La curva se extiende indefinidamente a la derecha e izquierda del eje Y hacia arriba de la recta $y = a$. (pág. 311)

6.4. Resistencia de Materiales en Construcciones de Fabrica

Ecuación 4: Ecuación resistencia de materiales en construcciones de fábrica

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

Ecuación 3. Huerta Fernández, 2004 (pág. 24)

Huerta Fernández (2004) Cualquier tabla realista de resistencia a compresión de las fábricas debe dar valores inferiores a la resistencia de la piedra, pero muy superiores a la del mortero. Cuando los ingenieros acometían grandes viaductos de 50m de luz, Engesser (1907) propuso la anterior fórmula donde σ_f es la resistencia de rotura a compresión de la fábrica, siendo σ_p y σ_m las resistencias de rotura a compresión de la piedra y el mortero. (pág. 24)

7. Metodología

En relación con los aspectos metodológicos que orientaron el desarrollo del trabajo, cabe mencionar:

7.1. Enfoque

Estudio histórico de la obra arquitectónica de Fray Domingo de Petrés y análisis de

los conceptos de la estática que se pueden ejemplificar en un arco de medio punto: tracción, compresión y esfuerzo.

7.2. Diseño

Fases o etapas que se consideran necesarias para el desarrollo del trabajo de grado:

1. Acopio documental relacionado con la obra de Fray Domingo de Petrés.
2. Análisis de las fuerzas y los esfuerzos existentes en los arcos catalogados de medio punto articulado. En particular en los diseños de las catedrales de Bogotá y Zipaquirá.
3. Elaboración de un conjunto de criterios para el diseño de una propuesta didáctica. 4. Elaboración de la propuesta didáctica.
4. Elaboración del informe final.

Este proyecto se basa en un análisis histórico crítico de las construcciones elaboradas con arcos (romanos) de medio punto articulado en las obras realizadas por Fray Domingo de Petrés en el NuevoReino de Granada, utilizados en las construcciones de La colonia.

Con el fin explicar el primer objetivo:

- Análisis de las fuerzas y los esfuerzos existentes en los arcos catalogados de medio punto articulado, para entender según la mecánica estática dicho equilibrio logrando soportar las cargas a compresión sin ningún tipo de argamasa solamente con su forma.

En la naturaleza se encuentran arcos formando la estructura de catenarias, en la herradura de una cabalgadura con su línea clavera, en la forma de los cascos de los ungulados, en los troncos y estípites de palmas y guaduas. La distribución de esfuerzos a compresión en un

arco de medio punto está distribuida en todas las dovelas de su estructura a lo largo de una línea imaginaria denominada imposta que asemeja la línea clavera en una herradura.

Siguiendo con el orden el segundo objetivo es:

- Estudiar desde el punto de vista de la estática algunas de las características estructurales de las catedrales de Bogotá y Zipaquirá.

En el estudio de la estática en construcciones diseñadas por Fray Domingo de Petrés el concepto de arco de medio punto articulado es **abstraído** del contexto de la construcción por ser la estructura portante que organiza la composición de la estructura y el diseño de la edificación o de la obra civil.

Las estructuras elaboradas por la humanidad desde hace más de 3 milenios eran construidas con grandes rocas acomodadas al principio sin la ayuda de ninguna argamasa, los esfuerzos en estas grandes construcciones eran la compresión y tracción, con la aparición del arco de medio punto articulado las civilizaciones de Mesopotamia lograron salvar o cubrir grandes vanos en puentes o en estructuras de edificaciones. La construcción bajo estas técnicas pasó a los romanos hace 2 milenios que las perfeccionaron creando grandes obras civiles, la transmisión del conocimiento era hereditario por lo general de padre a hijo o de maestro a aprendiz sometiéndolo a un continuo ensayo y error. Las estructuras elaboradas en arcos de medio punto estaban diseñadas con los criterios de proporciones que indicaban la relación entre vano y estribos, entre vano y espesor del arco sin tener en cuenta la resistencia del material a esfuerzos perpendiculares.

Los arcos de medio punto se extendieron y perfeccionaron durante la Edad Media, siendo la base de las grandes construcciones (catedrales, castillos, puentes) su

funcionalidad, durabilidad, desempeño y eficacia están ampliamente comprobada a través de los milenios, los cambios climáticos, terremotos y uso continuo no han impedido que las estructuras elaboradas con esta tecnología perduren hasta nuestros días.

Los dos primeros objetivos nos describen el concepto de arco de medio articulado puntoy su utilidad en el tercer objetivo se explica las posibles relaciones existentes en las estructuras elaboradas por Fray Domingo de Petrés.

- Generar un modelo de enseñanza de estática que describa el comportamiento de los esfuerzos existentes en este tipo de estructura portante, con base en base a la investigación realizada, teniendo en cuenta algunos de los criterios del equilibrio en el arco de medio punto articulado (romano) al igual que las, variables e invariantes existentes en éste.

Siguiendo una concreción progresiva en la descripción de la obra de Fray Domingo de Petrés se mencionan los diferentes tipos de arcos articulados que son catalogados como de medio punto articulado entre estos están: el arco que toma la forma de una catenaria, el arco apuntalado, el arco gótico, el arco en forma de herradura, el dintel articulado, todos cumplen su función adecuadamente bajo esfuerzos a compresión, dependiendo de la cultura o la funcionalidad que requiera la estructura el arco de medio punto adquiere su forma. Todos los arcos catalogados de medio punto articulado están sometidos a fuerzas perpendiculares de compresión, tracción, de igual forma existe desplome cuando se le aplica una fuerza tangencial al sistema que produzca cizallamiento. Deben estar soportados sobre bases denominados estribos que pueden ser el capitel de una columna, o sobre el terreno, el estribo debe tener la capacidad de soportar las fuerzas de tracción generadas por la compresión de las dovelas en el arco de

medio punto generando un par de fuerzas acción reacción.

➤ Elaboración de la propuesta didáctica con base en el estudio del arco de medio punto articulado en la obra de Fray Domingo de Petrés.

Fases del proceso:

- Presentación del tema (estudio de la mecánica estática)
- Elaboración del arco de medio punto con los estudiantes o construcción del arco de medio punto con las piezas elaboradas por el profesor.
- Reconocimiento de la estructura del arco de medio punto en la catedral de Zipaquirá. Estudio histórico de su construcción.
- Estudio y análisis de las fuerzas en el arco de medio punto, para lograr equilibrio (estática)
- Comprobación experimental de la resistencia del arco de medio punto y explicación física de ésta.

Para lograr una explicación concreta de la obra de Fray Domingo de Petrés es necesario realizar una descripción con base en las explicaciones formuladas de los arcos catalogados de medio punto articulados; estos están contruidos en roca o ladrillo que están bajo una fuerza perpendicular denominada compresión, con su correspondiente esfuerzo de tracción, la tracción que ejercen las dovelas sobre la estructura del arco es transportadas hasta el piso por los estribos que pueden pertenecer a una columna o sobre el suelo. Los arcos de medio punto quedaron en desuso con la aparición del ferro concreto en las grandes estructuras, esta nueva tecnología disminuyó vertiginosamente el tiempo de construcción en grandes edificios y puentes, la estructura del material da la

oportunidad que trabajen bajo fuerzas perpendiculares, en muchísima menor medida bajo la acción de fuerzas tangenciales y el torque que no se puede dar en una estructura rígida.

Tanto los arcos de medio punto articulados como los arcos realizados con ferro concreto están diseñados para soportar cargas con fuerzas perpendiculares, el arco de mediopunto articulado depende del peso y el rozamiento entre dovelas, el construido con ferro concreto de la elasticidad y resistencia del material como particularidad común ambos necesitan de estribos que anclen el puente dirijan el peso del puente al piso y soporten el esfuerzo de tracción igual a la fuerza de compresión sobre el tablero del puente o estructura.

A continuación, se describen las actividades relacionadas con el diseño y construcción de la propuesta didáctica. La cual incluye la elaboración de un material didáctico de estática en el que se incorporan aspectos relacionados con el estudio de la obra arquitectónica de Fray Domingo de Petrés, Aquí se incluirán fotos e ilustraciones que hacen parte del equipo para el estudio de la estática.

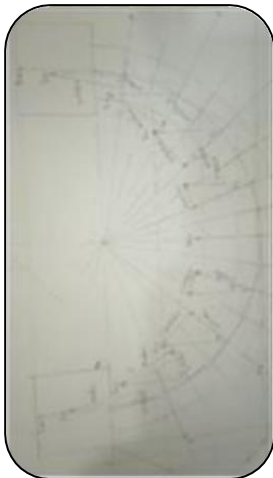


Ilustración 14.
Autoría propia



Ilustración 14. *Autoría propia*



Ilustración 14.
Autoría propia

8. Elaboración arco de medio punto:

Al comenzar el desarrollo de la construcción de un modelo de arco de medio punto en madera se debe elaborar un plano donde se muestren los ángulos para realizar los cortes en el material a realizar los cortes (*Ilustración 12*), posteriormente este plano es calcado en papel mantequilla y colocado sobre un papel carbón, para ser repujado sobre la superficie a cortar (tabla de pino industrial)(*Ilustración 13*); se realizan los cortes con una caladora manual o industrial. (*Ilustración 14*).

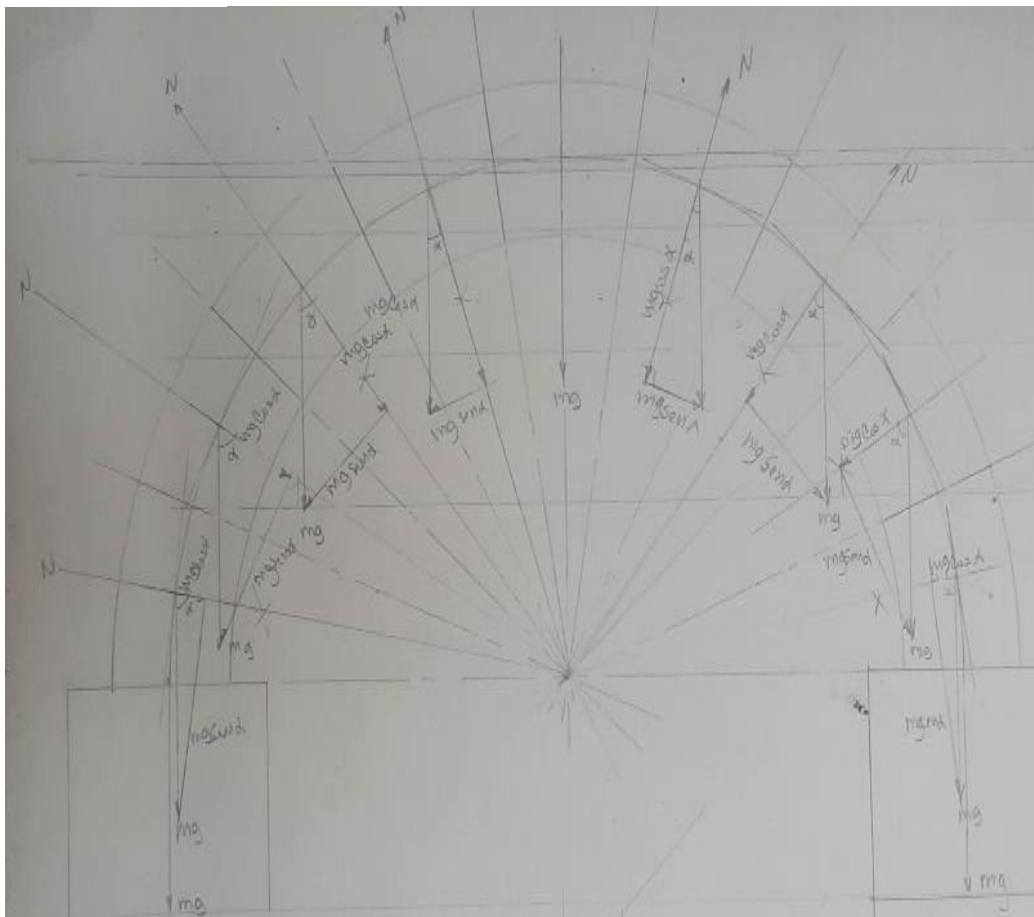


Ilustración 15. Descomposición del vector peso Autoría propia

La (*Ilustración 15*) muestra la descomposición del vector peso en cada una de las

dovelas en el arco, como se puede observar al iniciar el arco en las dovelas basales el peso en la componente horizontal es reducido, en la dovela central (clave) la componente horizontal es cero, a medida que el arco aumenta en altura y se aleja de la dovela central la componente horizontal aumenta en magnitud, lo que nos hace suponer que pueden existir esfuerzos de tracción en estos puntos donde el arco de medio punto articulado puede colapsar al no contar con la silletería adecuada en sus extradós.



Ilustración 18.
Autoría propia



Ilustración 18
Autoría propia



Ilustración 18.
Autoría propia

Se realizan los cortes en este caso de forma manual primero con un serrucho para definir el trozo de tabla donde se realizará el arco de medio punto (*Figura 17*), luego con



Ilustración 19
Autoría propia



Ilustración 20
Autoría propia



Ilustración 21
Autoría propia

la caladora manual se le hacen los contornos del intradós y los estrados en el arco de

mediopunto de madera con una caladora manual (*Ilustración 18*), de tal forma que nos quede un arco rígido (*Ilustración 19*), para posteriormente con la segueta que es de un corte fino realizar los trazos horizontales.

Logrando un arco de medio punto se procede a cortar las dovelas por medio de



Ilustración 22.
Autoría propia



Ilustración 23.
Autoría propia



Ilustración 24.
Autoría propia

una segueta debido al corte fino de la hoja, obteniendo el arco de medio punto articulado.

Las dovelas son numeradas debido a la falta de precisión en el corte manual, (en teoría todas las dovelas en el arco de medio punto deben tener la misma forma), se



Ilustración 25.
Autoría propia



Ilustración 26.
Autoría propia

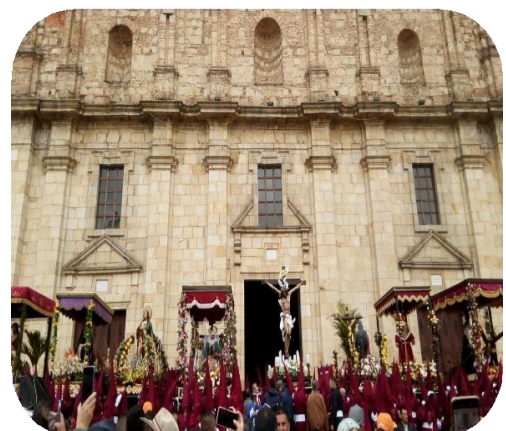


Ilustración 27. *Autoría propia*

numeran con el fin de lograr el equilibrio en la estructura. El arco de medio punto necesita de unos estribos (contra fuertes que soporten los esfuerzos de tracción en la base del arco de medio punto), en este caso fueron empotrados cuatro tornillos en una base de madera con la finalidad de contrafuertes.

9. Implementación

Tomando como referencia la catedral de Zipaquirá obra de Fray Domingo de Petrés a finales de Siglo XVII y principios del Siglo XIX, en la época de colonia Española hace más de 200 años, la catedral ha soportado sismos y el paso del tiempo, donde se celebra la santa misa todos los días durante 200 años y oficios religiosos albergando miles de naturales y extranjeros que vienen de diferentes partes de Colombia y el mundo, soportando su estructura basada en arcos de medio punto de estilo Romano (Español), columnas y contra fuertes el paso del tiempo en su monumental estructura de más de 40 metros de altura. Guardando su estructura estable el equilibrio solamente por los esfuerzos de compresión y tensión sin ningún tipo de ferro concreto, los materiales empleados en su estructura: ladrillo recocido tipo español de la época y roca en su mayoría de tipo sedimentario (caliza).

9.1. Implementación grado sexto.

La capilla de Nemocón al igual que la de Zipaquirá de estilo Romano (español) posteriormente construida (época de la república) guarda los mismos materiales y estilo de construcción, no es obra de Fray Domingo de Petrés, se toma como referencia en la implementación pedagógica debido a la cercanía con el Colegio Ruperto Aguilera León (Nemocón), debido a que este colegio es colindante en el costado oriental de la capilla¹.

¹ Las fotografías correspondientes a las figuras 28 a 49 hacen parte de los registros realizados por el investigador durante la implementación de la propuesta.



Ilustración 28.
Autoría propia



Ilustración 29. *Autoría propia*

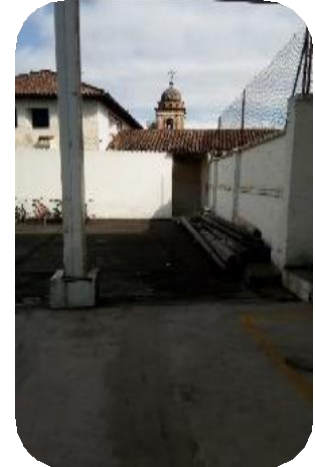


Ilustración 30.
Autoría propia

Utilizando el recurso pedagógico de la capilla, se inicia el proceso de entender el concepto de equilibrio en estructuras, las estudiantes de grado sexto hacen una imitación de la estructura de la capilla, tratando de conservar el equilibrio, con fichas de dominó

Ilustraciones 31, 32 y 33. *Autoría propia.*



Ilustración 31



Ilustración 32



Ilustración 33

Realizando una breve explicación a los alumnos de grado sexto de cómo está diseñada la capilla y su fundamento el arco de medio punto, se implementa el modelo de

madera del arco de medio punto en clase, como forma didáctica se utiliza para la comprensión de que formas articuladas logran mantener el equilibrio en su estructura.

La actividad para realizar es un arco de medio punto en el cual se debe utilizar compás y transportador con el fin de dividir el arco de medio punto en nueve dovelas, trazar cada veinte grados (20°) de arco la respectiva línea radial en el plano de un arco de



Ilustración 34.
Autoría propia



Ilustración 35.
Autoría propia



Ilustración 36. *Autoría propia*

medio punto y colorear cada dovela con el fin de diferenciarlas.

9.2. Implementación grado décimo



Ilustración 40



Ilustración 41



Ilustración 42

Ilustración 40, 41, 42. *Autoría propia*

En grado décimo se utiliza el modelo (maqueta en madera), como estrategia didáctica en la enseñanza del equilibrio de las fuerzas, se introduce el concepto de vector peso en la dirección de la línea de la plomada, en todas las dovelas de igual magnitud, haciendo la aclaración que el peso en el arco de medio punto es igual debido a que son del mismo material. La descomposición del vector peso se realiza en componente

horizontal y vertical, logrando formular preguntas como: ¿cuál es el lugar donde el arco de medio punto pueda soportar el mayor peso, teniendo en cuenta su estructura.?

9.3. Implementación grado once

En grado once se utiliza al igual el modelo de arco de medio punto como estrategia didáctica, se analiza la estática y el equilibrio del arco de medio punto teniendo en cuenta las componentes perpendiculares a la recta tangente de la línea de imposta en el punto que cortan la recta normal y esta tangente, la recta normal coincide con el radio del arco de medio punto romano por ser este una semicircunferencia de 180° .



Ilustración 43



Ilustración 44



Ilustración 45

El análisis de fuerzas estructural en once se realiza en cada punto del arco de medio punto (Romano) comparándolo con el diagrama de cuerpo libre, relacionando las



Ilustración 46. Autoría propia



componentes en un diagrama de cuerpo libre como: superficie, línea normal a la superficie, peso, ángulo de inclinación de la superficie, componente horizontal, componente vertical. Surge preguntas como: ¿Dónde no existe componente horizontal? ¿Qué ocurre en dichos puntos? ¿Cuál es la fuerza que mantiene la estructura en equilibrio? ¿Qué tan intensa es la fuerza?

En grado 11 como análisis de la aplicación de los arcos se realiza el siguiente experimento



Ilustración 47



Ilustración: 48

Ilustraciones: 47,48. Autoría propia

En la (*Ilustración 46*) se coloca un vaso vacío sobre un tablero (octavo de cartón paja) a manera de puente cruzando un vano, el vaso es lleno de agua y se coloca sobre el tablero, es colocado un cartón paja a manera de arco entre los estribos del puente (libros) y el tablero, el peso del tablero es soportado por el arco que trabaja a compresión (*Ilustración 47*), a continuación son colocados dos vasos con agua encima del tablero, el arco se deforma por el peso ejercido por el peso de los dos vasos (*Ilustración 48*). El análisis al que se puede llegar en el aula es que el arco soporta el peso del vaso con agua, cuando se coloca mayor peso va tomando distintas formas el cartón paja. El arco en el

montaje trabaja como estructura a compresión, teniendo la misma funcionalidad y principios que el arco articulado de las iglesias y del arco modelo de madera. (Estribos, tablero, peso, fuerzas a compresión y tracción).

10. Análisis estructural de un arco de medio punto.

En la (*Ilustración 49*) se encuentra un arco de medio punto con la línea de imposta, en la (*Ilustración 50*) se encuentra un arco romano inscrito en un pórtico, la (*Ilustración 51*) representa las componentes rectangulares en una dovela, según el ángulo de inclinación con respecto al eje horizontal en el arco de medio punto articulado romano, donde todas las dovelas son iguales por ser concéntrico y correspondiente a la mitad de una circunferencia.

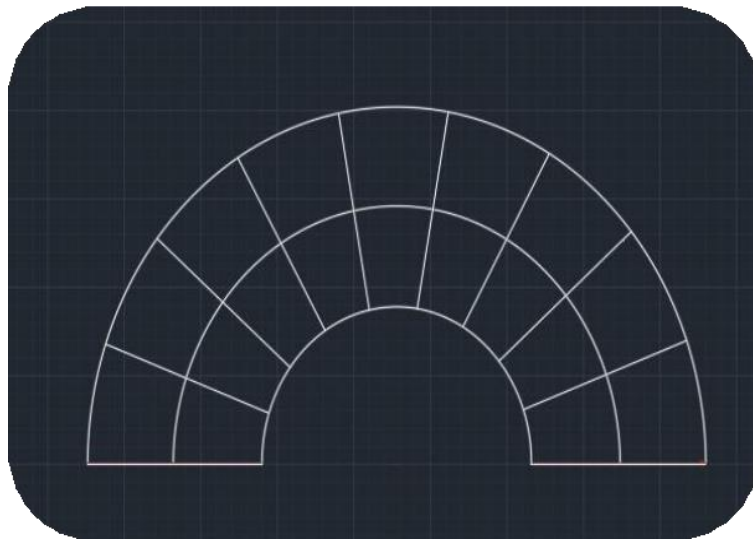


Ilustración 49. *Arco Romano con Imposta*

Recuperado de (Rodríguez Quiuntana, 2023) Arco de medio punto con línea de imposta.

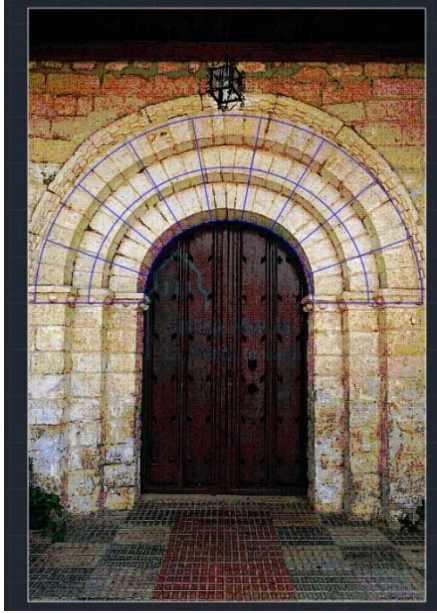


Ilustración 50. Arco Romano Inscrito en Pórtico

Recuperado de (románico digital fundación Santa María la Real)

CONCLUSIONES

Existen diferentes tipos de arcos catalogados de medio punto según los diferentes periodos en la historia de la humanidad, todos realizan su función en grandes estructuras

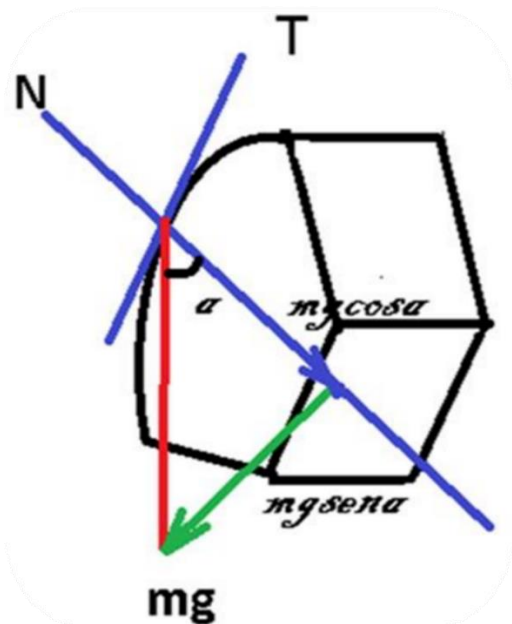


Ilustración 51. Autoría propia
Componentes perpendiculares del vector peso en una dovela

de roca trabajando a esfuerzos perpendiculares (compresión, tracción) el esfuerzo de

tracción es transportado hasta los estribos o contrafuertes del arco en la estructura, como fines didácticos en el estudio de la estática se escogió el arco de medio punto romano, por ser de fácil explicación debido a su geometría, en este tipo de arco las dovelas son todas iguales, logrando un esquema sencillo en los diagramas de cuerpo libre, debido a que las componentes normales a la imposta siempre son concéntricas al eje de simetría en el arco, y las componentes trigonométricas que corresponden a los esfuerzos de fácil diagramación, lográndose observar en la conclave e impostas de arranque del arco, que las componentes son iguales al peso según la bibliografía consultada. Siendo característica de un arco de medio punto articulado en roca (romano) como los existentes en puentes, iglesias y construcciones denominadas de fábrica.

En este trabajo se estudia la obra de Fray Domingo de Petrés, en la construcción de catedrales y basílicas, los arcos romanos existentes en ellas y las iglesias que conservaron la tradición de la construcción de fábrica. Por medio de esta tecnología ha sido construidas iglesias en la época de la república teniendo en cuenta que en esta época no se construía con ferro concreto y la mampostería confinada era inexistente.

Teniendo en cuenta la eficacia de los arcos de medio punto, y su aplicación en dinteles y estructuras de gran porte en la actualidad (puentes, túneles), el estudio de la estática de estas construcciones es un recurso en la construcción del concepto peso y estática en estructuras que por su forma cumplan con este propósito.

Este trabajo logra definir conceptos como peso y gravedad, para tal fin se construyó un modelo de arco de medio punto en madera, ¿las preguntas que surgieron por parte de algunos estudiantes, ilógicas y a la vez muy lógicas como: ¿qué clase de pegamento mantienen unidas las dovelas? Algunos lograron tomarlo a broma, pero al darse cuenta de

que existe una *fuerza débil* que mantiene unidas a las dovelas en la estructura del arco en madera, existe otra fuerza *muy fuerte* que mantiene las dovelas individualmente.

Las construcciones de fábrica han sido una tradición olvidada en la segunda mitad del siglo 19, con la aparición del ferro concreto, mampostería confinada y técnicas en construcción donde se encontró el hierro como material primordial en las estructuras, en las cuales los efectos del cizallamiento por esfuerzos tangenciales son transportados por este material al ser más adaptable a las deformaciones y menos rígido en las estructuras.

El estudio del arco de medio punto en todas las formas halladas durante la historia de la humanidad, es de gran utilidad ante la escasez de hierro o la falta de recursos, para lograr dinteles o mampostería confinada, en algunos casos las formas en arco dan solución al cruce de vanos en puentes de grande o pequeña construcción, dando solución al cruzar una quebrada y poder llegar a alguna institución educativa, solucionando un problema con posibles aplicaciones del análisis en un fenómeno físico.

Como aportes a la enseñanza de la estática se logra observar dos condiciones de equilibrio, una de estas la descomposición de fuerza siendo inexistente el movimiento, la otra la ausencia de movimiento debido a la inexistencia de componentes horizontales en la estructura u objeto. Logrando tener material didáctico y visual para la enseñanza de la estática en el bachillerato, en especial los grados décimo y once.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2012). *Fray Domingo de Petres En el nuevo Reino de Granada*. Bogotá DC: Instituto Distrital de Patrimonio Cultural.
- Alvarez de Miranda, P., Ansón Navarro, A., Arenas de pablo, J. J., & Capel Sáez, H. (2005). *TÉCNICA E INGENIERÍA* (Vol. II). Zaragoza, España: MANUEL SILVA SUÁREZ, ed.
- ColombiaPaís. (2022). *colombiapais.com*. Recuperado el 07 de 07 de 2023, de <https://colombiapais.com/principales-destinos/principales-destinos-bogota-atractivos-turisticos-arquitectura-religiosa.html>
- Enciclopedia concepto. (2023). <https://concepto.de/edad-de-piedra/>. Recuperado el 07 de julio de 2023, de Enciclopedia concepto edad de piedra: (<https://concepto.de/edad-de-piedra/>, s.f.)
- Herrera Sierra, J., & Fernández Concellón, P. J. (2022). *Estática para ingeniería*. Madrid: Ra-Ma.
- Huerta Fernández, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas*. (I. J. Herrera, Ed.) Madrid: Reverte.
- Huerta Fernández, S. (2013). 2. *El cálculo de estructuras en la obra*. Barcelona, España: Torre Girona. Obtenido de https://oa.upm.es/30203/1/Huerta_2013_El_calculo.pdf
- iesvilladenijar.musiquiatricos. (2021). http://iesvilladenijar.musiquiatricos.es/TECNOLOGIA/TECNOU5/34_arcos.html. Recuperado el 7 de 7 de 2023, de http://iesvilladenijar.musiquiatricos.es/TECNOLOGIA/TECNOU5/34_arcos.html
- Lehman, C. (1953). *Geometría analítica*. Mexico: Hispano Americana.
- MANCIPE PEÑA, J. J. (2018). *UNA MANERA DE ADORDAR LA ENSEÑANZA DE LA MECANICA* (Tesis de licenciatura Universidad Pedagógica Nacional Bogotá). Repositorio Institucional, Bogotá D.C. Obtenido de <http://repositorio.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/11270/TE-22692.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MUDETRAD. (2020). <https://estancias2020mudetrad.territoriomudejar.es/tecnicas-arcos/>.

(MUDETRAD, Editor) Recuperado el 7 de Julio de 2023, de

<https://estancias2020mudetrad.territoriomudejar.es/tecnicas-arcos/>

REVISTA AMÉRICA. (2021). http://www.cehsf.ceride.gov.ar/america_14/05-vittori_ciudad.html. (C. D.

Hispanoamericanos, Productor) Recuperado el 7 de julio de 2023, de

http://www.cehsf.ceride.gov.ar/america_14/05-vittori_ciudad.html

Rodríguez Quintana, P. C. (s.f.).

Rodríguez Quintana, P. C. (2023). *Arco de medio punto romano*. Zipaquirá.

románico digital fundación Santa María la Real. (s.f.). *La Parroquia de San Miguel*.

Serway, R. A. (1993). *Física tomo I*. MÉXICO: McGRAW-HILL.

Serway, R. A. (1998). *FÍSICA TOMO I*. MÉXICO: McGRAW-HILL.

Structuralia. (04 de Abril de 2023). [https://blog.structuralia.com/el-arco-gateway-el-monumento-mas-](https://blog.structuralia.com/el-arco-gateway-el-monumento-mas-alto-del-mundo-construido-por-el-hombre)

alto-del-mundo-construido-por-el-hombre. Recuperado el 07 de 07 de 2023, de

[https://blog.structuralia.com/el-arco-gateway-el-monumento-mas-alto-del-mundo-construido-por-](https://blog.structuralia.com/el-arco-gateway-el-monumento-mas-alto-del-mundo-construido-por-el-hombre)
el-hombre

Swokowski, E. (1988). *Álgebra y Trigonometría*. México: Iberoamerica.

Zapata, F. (14 de 04 de 2020). <https://www.lifeder.com/modulo-de-young/>. Recuperado el 08 de 07 de

2023, de <https://www.lifeder.com/modulo-de-young/>