



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA  
CONSTRUCCIÓN**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**TESIS**

**"EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO DEL RAJUELO  
APLICADO A LA REPOSICIÓN DE JUNTAS EN ARCOS DE  
MAMPOSTERÍA"**

**PRESENTA**

**I.C. Adrian Vallejo Alvarado**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERIA CIVIL CON  
ESPECIALIDAD EN ESTRUCTURAS**

**TUTOR**

**Dr. Miguel Ángel Soto Zamora**

**Aguascalientes, Ags., 15 de mayo de 2021**

**CARTA DE VOTO APROBATORIO  
INDIVIDUAL**

**DR. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA**  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
P R E S E N T E

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **ADRIAN VALLEJO ALVARADO** con ID **193881** quien realizó la tesis titulado: **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO DEL RAJUELO APLICADO A LA REPOSICIÓN DE JUNTAS EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
"Se Lumen Proferre"

**Aguascalientes, Ags., a día 16 de mayo de 2021.**



**DR. MIGUEL ANGEL SOTO ZAMORA**  
Tutor de Tesis

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO  
INDIVIDUAL**

**Dr. EN C.T. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA**  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como ASESOR designado del estudiante **ADRIAN VALLEJO ALVARADO** con ID **193881** quien realizó la tesis titulada: **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO DEL "RAJUELEO" APLICADO A LA REPOSICIÓN DE JUNTAS EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"Se Lumen Proferre"**  
Aguascalientes, Ags., a 14 de mayo de 2021

  
**Dr. Rudel Padilla Ceniceros**  
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO  
INDIVIDUAL**

**Dr. EN C.T. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN**

**PRESENTE**

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ADRIAN VALLEJO ALVARADO** con ID 193881 quien realizó la tesis titulada: **“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO DEL RAJUELEO APLICADO A LA REPOSICIÓN DE JUNTAS EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA”**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE  
“Se Lumen Proferre”**

**Aguascalientes, Ags., a 17 de mayo de 2021**



**M. en I. Yaimara Chávez Pérez  
Asesor de tesis**

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO  
INDIVIDUAL**

**Dr. EN C.T. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA**  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

**PRESENTE**

Por medio del presente como ASESOR designado del estudiante **ADRIAN VALLEJO ALVARADO** con ID **193881** quien realizó la tesis titulada: **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO DEL "RAJUELEO" APLICADO A LA REPOSICIÓN DE JUNTAS EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"Se Lumen Proferre"**

**Aguascalientes, Ags., a 14 de mayo de 2021**



**M. en I. José Antonio de Loera Aguilera**  
**Asesor de tesis**

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 16/05/2021

NOMBRE: I.C. ADRIAN VALLEJO ALVARADO ID 193881

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL LGAC (del posgrado): ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

TIPO DE TRABAJO: ( X ) Tesis ( ) Trabajo Práctico

TÍTULO: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO DEL RAJUELO APLICADO A LA REPOSICIÓN DE JUNTAS EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): LA EVALUACIÓN EXPERIMENTAL APORTA AL CONOCIMIENTO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS BÓVEDAS DE PIEDRA CON DESGASTE EN SUS JUNTAS, DETERMINANDO QUE EL MÉTODO DEL "RAJUELO" RESTAURA LAS CARACTERÍSTICAS ORIGINALES DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.	Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>	
N.A.	Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.	El estudiante es el primer autor
N.A.	El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.	La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

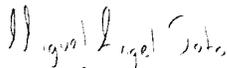
Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí  X   
No \_\_\_\_\_

Elaboró:

\* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

FIRMAS

  
DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

  
DR. ALEJANDRO ACOSTA COLLAZO

\* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

DR. ALEJANDRO ACOSTA COLLAZO

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

  
Dr. EN C. T. C. HÉCTOR HUMBERTO POSADA ÁVILA

**Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado**

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cumplir la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

## AGRADECIMIENTOS

Principalmente al Creador que me regalo la oportunidad de participar en esta gran aventura que es la vida, a mis padres que me enseñaron a vivir de mi trabajo, a Lupita mi esposa, que en las buenas y en las malas siempre está conmigo, a mis 3 hijos Cristóbal, Paulina y Emiliano, que todos los días me generan fortaleza para continuar en esta peregrinación terrenal.

A la dependencia federal Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el agradecimiento por proporcionar el apoyo económico durante todo el transcurso de la maestría, brindando la oportunidad de crecer en mi formación académica.

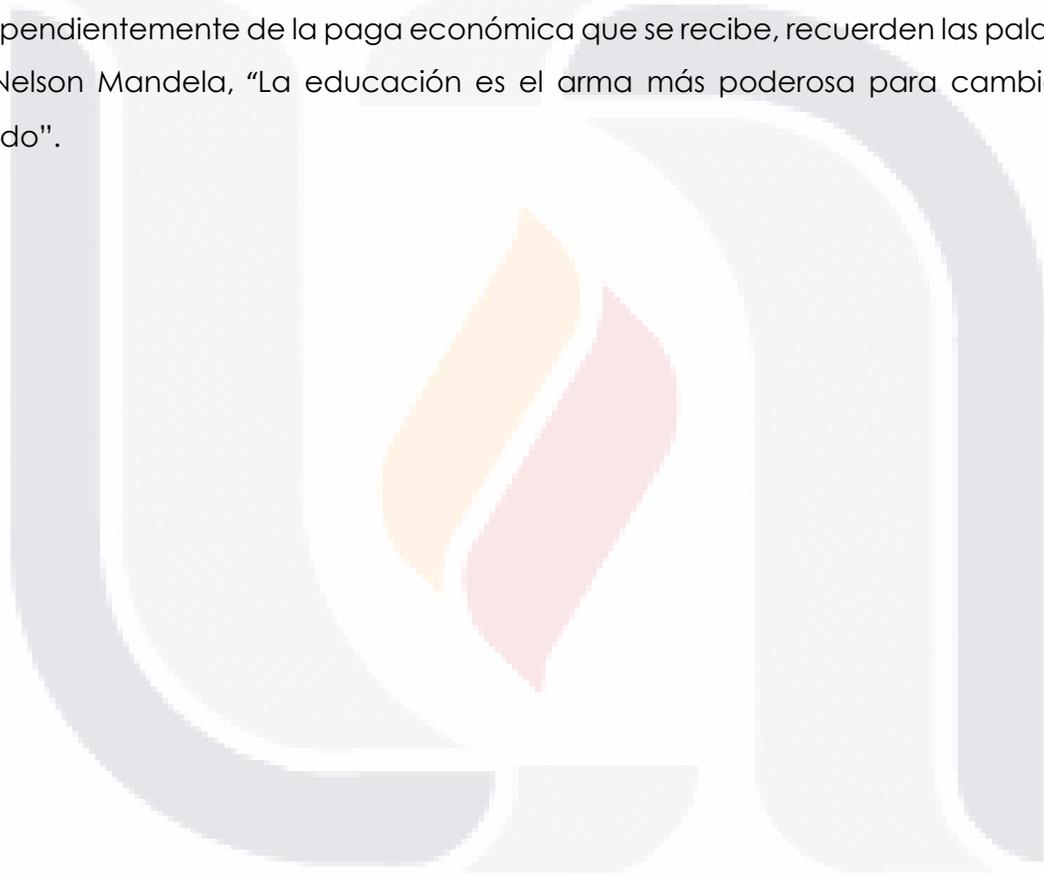
Gracias a la Universidad Autónoma de Aguascalientes a través del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, por el permitirme el ingreso a sus instalaciones, completando satisfactoriamente la etapa experimental de esta investigación. A mi tutor asignado Dr. Miguel Ángel Soto Zamora por compartir su talento.

A la empresa "Cal Química de México", que a través del Ing. José Adrian Chávez, apporto a manera de donación el agregado y el aglutinante necesarios para la construcción del modelo a escala.

## DEDICATORIAS

De manera muy especial para las personas que de oficio y de corazón, dedican el día a día a trabajar en el sector de la construcción, en varias ocasiones arriesgando hasta la vida por transformar este mundo al que llamamos hogar de toda la humanidad, con el propósito de mejorar las condiciones de vida de la ciudadanía a veces sin recibir el reconocimiento económico debido.

Para todos los colegas de la educación que comparten sus conocimientos independientemente de la paga económica que se recibe, recuerden las palabras de Nelson Mandela, "La educación es el arma más poderosa para cambiar el mundo".



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE TABLAS .....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ACRÓNIMOS .....	8
RESUMEN .....	9
ABSTRACT .....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Prólogo .....	12
1.2 Objetivo General.....	14
1.3 Objetivos Particulares .....	14
1.4 Alcance .....	14
1.5 Justificación .....	15
1.6 Hipótesis .....	18
2. ESTADO DEL ARTE:.....	20
2.1.- Procedimiento de restauración con morteros de cal.....	20
2.2.- Intervenciones compatibles .....	20
2.3.- Geometría de una estructura.....	21
2.4.- Incertidumbres geométricas en arcos.....	22
2.5.- Refuerzo en el intradós.....	22
2.6.- Arco mampostería reforzado .....	23
2.7.- Vulnerabilidad sísmica en bóvedas de mampostería.....	24
2.8.- Morteros de Reparación .....	25
2.9.- Morteros a base de cal.....	26
2.11.- Aglutinante sostenible .....	27
2.12.- Compuesto de Cáñamo .....	28
3. MARCO TEORICO:.....	31
3.1.- MORTERO CEMENTO-ARENA.....	31
3.2.- TIPOS DE MAMPOSTERÍA: .....	31
3.3.- BÓVEDAS .....	36
3.4.- JUNTAS .....	37
3.5.- CAL VIVA .....	38

3.6.- APAGADO DE LA CAL VIVA .....	38
3.7.- ARENA CALIZA.....	39
3.8.- CARBONATACIÓN .....	39
4. METODOLOGIA:.....	42
4.1.- PRUEBA PILOTO.....	42
4.2.- CONSTRUCCIÓN DE MODELO A ESCALA .....	49
4.2.1.- CÁLCULO DE ESCALA .....	50
4.2.2.- ENSAYO FÍSICO DEL MATERIAL CONGLOMERANTE.....	53
4.2.3.- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ARENA CALIZA .....	54
4.2.4.- DISEÑO DE ESTRUCTURA DE MADERA .....	55
4.2.5.- RETIRO DE CIMBRA PROVISIONAL.....	59
4.3.- INSTRUMENTACIÓN DE MODELO A ESCALA.....	59
4.4.- DETERMINAR PUNTOS DE APLICACIÓN DE CARGA.....	61
4.5.- DETERIORO CONTROLADO DE LAS JUNTAS .....	63
4.6.- PROCESO PARA DESGASTE DE JUNTAS .....	64
4.7.- INSTRUMENTACIÓN DEL ARCO CON JUNTA DESGASTADA .....	64
4.8.- APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL RAJUELO .....	65
4.9.- INSTRUMENTACIÓN DEL ARCO CON JUNTA REPUESTA .....	66
5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
5.1.- ANÁLISIS PREVIO.....	69
5.2.- MÉTODOS DE INTERVENCIÓN EN BÓVEDAS .....	69
5.3.- CONSTRUCCIÓN DE MODELO A ESCALA .....	69
a). – PROYECCIÓN DEL MODELO A ESCALA.....	70
b). – PILAS PRIMARIAS Y PILAS SECUNDARIAS .....	70
c). - SALMER .....	72
d). – APAREJO.....	73
e). – BÓVEDA CERRADA .....	74
f). – TÍMPANOS .....	75
g). - MODELO COMPLETO.....	77
h). – DESCIMBRADO .....	79
5.4.- APLICACIÓN DE LA CARGA CON ACTUADOR HIDRAULICO .....	79
5.4.- DESPLAZAMIENTOS VERTICALES, JUNTA SANA .....	80
5.5.- DESPLAZAMIENTO VERTICAL, JUNTA DESGASTADA .....	82

5.6.- DESPLAZAMIENTO VERTICAL, MÉTODO DEL RAJUELEO APLICADO ..... 84

5.7.- AGRUPAMIENTO DE RESULTADOS ..... 87

5.8.- ROTULAS PLASTICAS ..... 88

6.1.- CONCLUSIONES GENERALES ..... 91

6.2.- CONCLUSIONES PARTICULARES ..... 91

6.3.- NICHOS DE INVESTIGACIÓN ..... 92

**BIBLIOGRAFIA** ..... 93

GLOSARIO ..... 95



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados del tamizado de la Arena Caliza. Elaboración propia ..... 54

Tabla 2 Datos para construir la curva granulométrica. Elaboración propia. .... 55



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fachada aguas arriba del "Puente San Ignacio". (Soto, 2018) .....	13
Figura 2 arco del coro alto con desplazamiento vertical. (Costa et al., 2014). .....	16
Figura 3 Vista inferior del arco con las juntas selladas. (Costa et al., 2014). .....	16
Figura 4 Puente de "Santa Marta" con desprendimiento de juntas. (João et al., 2014) .....	17
Figura 5 Puente "Santa Marta" con las juntas restituidas, (João et al., 2014).....	17
Figura 6 Bóveda de piedra con desprendimiento de juntas. Imagen propia.....	18
Figura 7 Comparación de bóvedas con relleno y losas de concreto. (Sala et al., 2016). .....	21
Figura 8 Arco tipo cañón, ensayado con un refuerzo de polímeros de carbono. (Ananía et al., 2016) .....	24
Figura 9 puentes con desprendimiento de juntas y huecos en sus paredes. (SCT, 2018) .....	31
Figura 10 Colocación de mampostería ordinaria. ("BRUC YARDI") .....	32
Figura 11 Mampostería concertada. ("Maestrazgo Cover").....	33
Figura 12 Mampostería con ripios. (Bustamante, 2017). .....	33
Figura 13 Colocación de mampostería seca. ("Bruc Yardi").....	34
Figura 14 Mampostería de piedra laja. (Bustamante, 2017) .....	35
Figura 15 Mampostería decorativa. ("Panel Piedra").....	36
Figura 16 Partes de una bóveda tipo cañón. (Galeano, 2014).....	37
Figura 17 Intradós de modelo a escala con juntas desgastadas. Elaboración propia. .....	37
Figura 18 Vista microscópica de óxido de calcio (izquierda) e hidróxido de calcio (derecha) (Arizzi y Cultrone, 2012).....	40
Figura 19 Pilas de tabique para prueba piloto. Elaboración propia. ....	42
Figura 20 Pila de tabique con 10% de desgaste en la junta. Elaboración propia. .	43
Figura 21 Pila de tabique con el método del rajueleo aplicado. Elaboración propia. .....	44
Figura 22 Pila con desgaste del 45% en la junta sometida al ensayo de compresión simple. Elaboración propia.....	45
Figura 23 Gráfica con el resultado del ensayo en el par de pilas, 1-8. Elaboración propia.....	46
Figura 24 Gráfica con el resultado del ensayo en el par de pilas, 4-6. Elaboración propia.....	47
Figura 25 Gráfica con el resultado del ensayo en el par de pilas, 3-7. Elaboración propia.....	47
Figura 26 Agrupamiento de resultados. Elaboración propia. ....	48
Figura 27 Proyección de modelo a escala en metros. (Elaboración propia). .....	50
Figura 28 Proyección de modelo a escala instalado en el marco de carga. Elaboración propia. ....	52

Figura 29 Restricción lateral. Elaboración propia..... 52

Figura 30 Curva granulométrica arena caliza. Elaboración propia. .... 55

Figura 31 Corte constructivo, cimbra provisional de madera. Elaboración propia.56

Figura 32 Corte constructivo, cimbra falsa. Elaboración propia. .... 57

Figura 33 Corte constructivo, cimbra de contacto. Elaboración propia..... 57

Figura 34 *Cimbra provisional instalada. Elaboración propia*..... 58

Figura 35 Vista lateral cimbra de contacto. Elaboración propia. .... 58

Figura 36 Retiro de cimbra provisional. Elaboración propia..... 59

Figura 37 Esquema propuesto, contiene actuador hidráulico y puntos de aplicación de carga. Elaboración propia. .... 60

Figura 38 Modelo Instrumentado y listo para ensayo. Elaboración propia. .... 61

Figura 39 Trazo para determinar punto de aplicación de carga. Elaboración propia. .... 62

Figura 40 Detalle del mecanismo para aplicar carga. Elaboración propia..... 62

Figura 41 Micrómetros instalados y dispuestos en el intradós del modelo a escala. Elaboración propia. .... 63

Figura 42 Raspador manual que servirá para abrir espacio en juntas, “Escantillón”. Elaboración propia. .... 64

Figura 43 Intradós del modelo a escala, con la junta desgastada. Elaboración propia..... 65

Figura 44 Intradós del modelo a escala, con el método del “rajueleo” aplicado. Elaboración propia. .... 66

Figura 45 Modelo instrumentado listo para el último ensayo. Elaboración propia.67

Figura 46 Proyección de modelo a escala con cimbra provisional. Elaboración propia..... 70

Figura 47 Desplante de pilas secundarias. Elaboración propia..... 70

Figura 48 Placa de transición entre pilas secundarias y pilas primarias. Elaboración propia..... 71

Figura 49 Pilas a nivel, empatado con la línea de impostas. Elaboración propia. . 72

Figura 50 Colocación del salmer para arranque del arco. Elaboración Propia. .... 73

Figura 51 Aparejo lineal. Elaboración propia. .... 74

Figura 52 Bóveda cerrada. Elaboración propia..... 75

Figura 53 Construcción de tímpanos. Elaboración propia..... 76

Figura 54 Vista superior del extradós. Elaboración propia..... 76

Figura 55 Relleno compactado. Elaboración propia. .... 77

Figura 56 Calzada elaborada con piedra bola. Elaboración propia. .... 78

Figura 57 Modelo a escala durmiendo para alcanzar el fraguado correcto. Elaboración propia. .... 78

Figura 58 Descimbrado de modelo a escala. Elaboración propia. .... 79

Figura 59 Modelo a escala instrumentado con cámaras y micrómetros ..... 80

Figura 60 Gráfica que muestra el progreso de la carga conforme tiempo, junta sana. Elaboración propia ..... 81

Figura 61 Grafica que muestra el desplazamiento bajo el centro de la luz del modelo con la junta sana. Elaboración propia. .... 81

Figura 62 Grafica que muestra el desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo con la junta sana. Elaboración propia. .... 82

Figura 63 Grafica que muestra el progreso de la carga conforme tiempo, junta desgastada. Elaboración propia..... 83

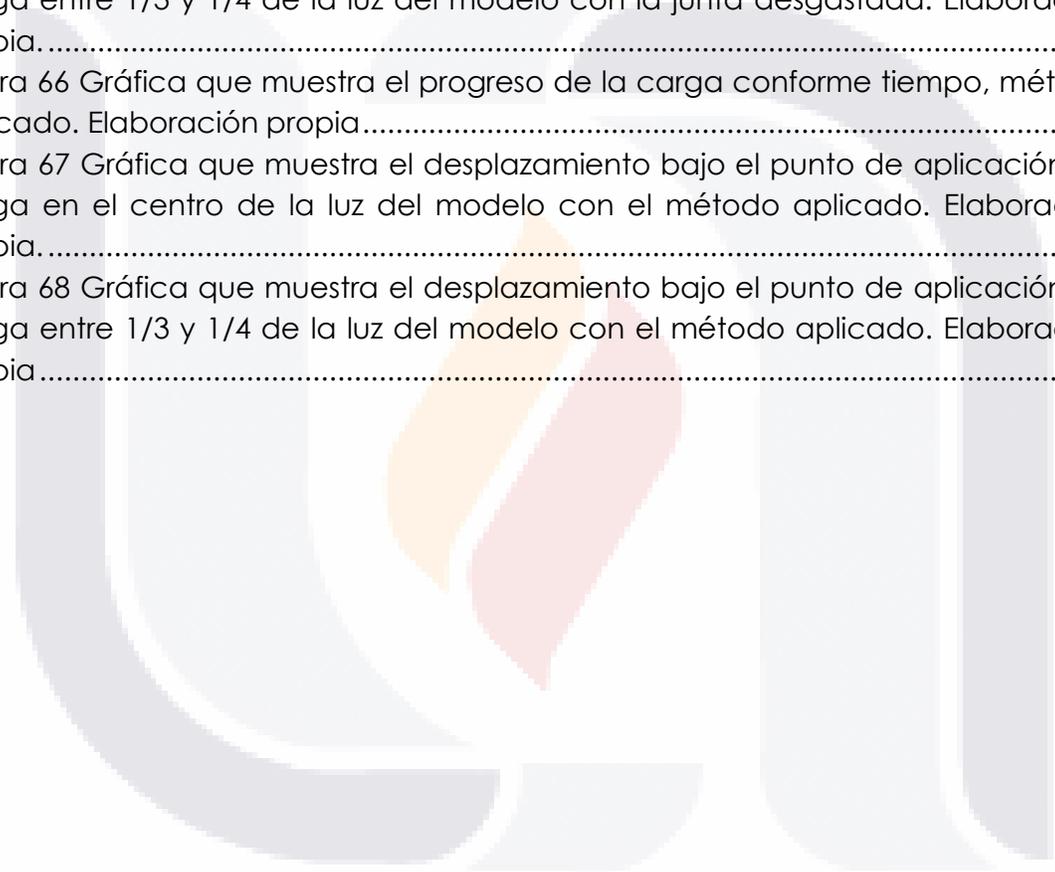
Figura 64 Grafica que muestra el Desplazamiento bajo el centro de la luz del modelo con la junta desgastada. Elaboración propia. .... 83

Figura 65 Gráfica que muestra el desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo con la junta desgastada. Elaboración propia..... 84

Figura 66 Gráfica que muestra el progreso de la carga conforme tiempo, método aplicado. Elaboración propia..... 85

Figura 67 Gráfica que muestra el desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga en el centro de la luz del modelo con el método aplicado. Elaboración propia..... 86

Figura 68 Gráfica que muestra el desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo con el método aplicado. Elaboración propia..... 86



## ACRÓNIMOS

**DRX:** Difracción de rayos x

**LWA:** Mortero de agregado liviano

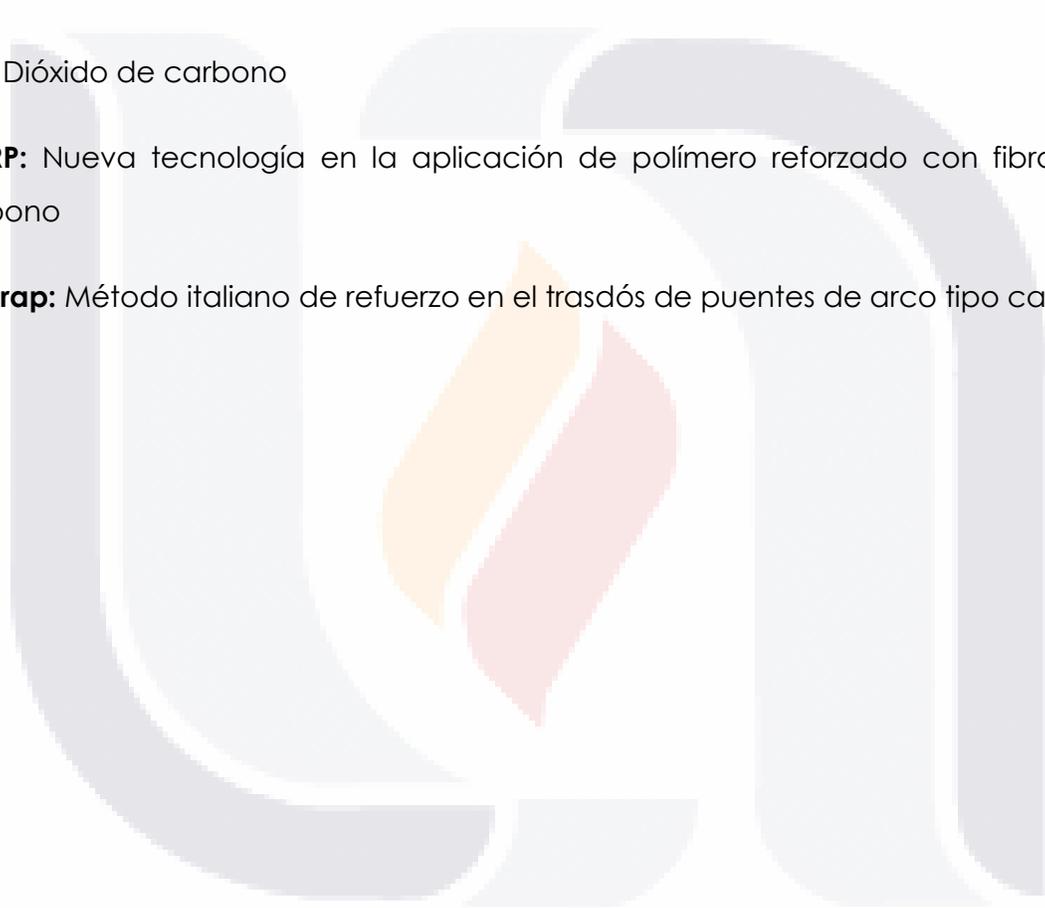
**NHL5:** Mortero a base de cal hidráulica natural

**HR:** Cámara climática

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**C-FRP:** Nueva tecnología en la aplicación de polímero reforzado con fibra de carbono

**Ω-Wrap:** Método italiano de refuerzo en el trasdós de puentes de arco tipo cañón.



## RESUMEN

Esta investigación de carácter experimental muestra los resultados obtenidos con la aplicación del método del rajueleo, ensayado con la aplicación de carga en un modelo a escala reducida que se construyó en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, con el propósito de conocer el comportamiento mecánico principalmente en la bóveda, ya que, estructuralmente hablando es considerado uno de los elementos clave en las edificaciones elaboradas a base de piedra.

El cálculo, la proyección y la construcción del modelo a escala reducida, derivó en una serie de actividades que se describen de manera puntual en el apartado de metodología en esta tesis. Una vez concluida la construcción del modelo a escala, se inicia con los ensayos aplicados de la siguiente manera, el primer ensayo se realiza con la junta totalmente sana y después de esperar un lapso de tiempo equivalente a 18 meses, fue necesario esperar un tiempo mayor al propuesto en el inicio de esta investigación, debido a la pandemia del COVID-19, en segundo lugar se procedió a desgastar la junta del modelo, generando un espacio entre piedra y piedra, simulando artificialmente el desprendimiento de juntas con el que cuenta nuestro caso de estudio, por último se ensayó el modelo con el método del rajueleo aplicado.

El resultado que se presenta con graficas carga-desplazamiento, muestra que se obtiene un mejoramiento en el comportamiento mecánico, aplicando el método implementado y propuesto como solución al desprendimiento de mortero en construcciones a base de piedra, enfocado principalmente en la bóveda, sin que esto sea una limitante para aplicar el método en las paredes de la construcción.

**Palabras clave:** Rajueleo, Bóveda, Mortero, Cal, Obra de piedra.

## **ABSTRACT**

This experimental research shows the results obtained with the application of the “rajuelo” method. It was tested with the application of load in a reduced-scale model that was built in the materials laboratory of the “Universidad Autónoma de Aguascalientes” with the purpose of been aware of the mechanical behavior focusing on the vault referring to structure. It is considered as one of the key elements in stone-based buildings.

The calculation, projection, and construction of the model on a reduced scale derived a serie of activities that are described in a specific way in the methodology section of this thesis. Once the construction of the scale model was completed, the applied test in the following way began. The first test was carried out with the joint completely healthy and after waiting a period of time equivalent to 18 months. It was necessary to wait a longer time to the one proposed at the beginning of this investigation due to the COVID-19 pandemic. Secondly, the model joint was worn down, and generating a space between stone and stone in order for the model joint to artificially simulating the detachment of joints that our case study has. Finally, the model was tested with the applied squiggle method.

The result that is presented with load-displacement graphs shows that an improvement in mechanical behavior is obtained by applying the method implemented and previously proposed as a solution to the detachment of mortar in stone-based constructions. Focused on the vault, without being a limitation to apply the method on the walls of the construction.



# CAPÍTULO

## I

### INTRODUCCIÓN

# TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Prólogo

La seguridad estructural en las construcciones de arco mampostería es un tema importante para la sociedad en general, dentro de estas edificaciones se encuentran las construcciones patrimoniales, lo que motiva al autor de este trabajo para iniciar la presente investigación.

De los principales propósitos de esta tesis, destaca contribuir a conservar el legado histórico cultural de las obras arquitectónicas de nuestros antepasados sin que esto sea una limitante para mencionar construcciones modernas o cualquier tipo de edificación construida a base de mampostería de piedra, se pretende alcanzar el objetivo estudiando el comportamiento estructural de una bóveda tipo cañón edificada en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, es preciso recurrir a la mampostería de piedra con la finalidad de que los materiales que son utilizados en la construcción de una bóveda a escala reducida y los materiales del caso de estudio cuenten con las características más similar posible.

Se toma como caso de estudio un puente que cuenta con 9 bóvedas circulares tipo cañón, de las cuales por motivos principalmente del intemperismo y de la edad, en 4 de las bóvedas, las alteraciones en sus juntas llegan al desprendimiento parcial y en las 5 bóvedas restantes las modificaciones llegan al deterioro total, quedando un vacío en el lugar donde existió mortero entre piedra y piedra. Dado que la bóveda es un elemento estructuralmente vital para cualquier edificación, es conveniente evaluar el elemento mencionado pues abarca una gran diversidad de técnicas, materiales y procedimientos constructivos de la época en la que fueron edificadas.

En la actualidad existe variedad de estudios que se enfocan en el desarrollo de metodologías para preservar las obras patrimoniales sin afectar su valor histórico, pero muy pocos puntualizan su investigación a la reposición de juntas en bóvedas

de piedra. Enseguida se muestra en la imagen 1, un perfil aguas arriba de nuestro caso de estudio, con el fin de conocer, identificar y localizar la bóveda 4:

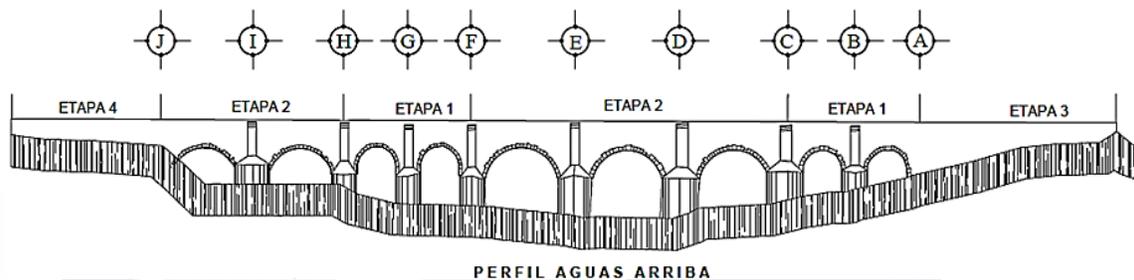


Figura 1 Fachada aguas arriba del "Puente San Ignacio". (Soto, 2018)

El desarrollo de técnicas y métodos de intervención en construcciones patrimoniales, que cuenten con un enfoque particular en la reposición de juntas, es extremadamente limitado en la literatura, es vital conocer el comportamiento estructural de una bóveda de fábrica de piedra con un desprendimiento, parcial o total de sus juntas, los resultados que esta investigación proporcione, servirán para la preservación de las edificaciones, ya que, la falta de junteo influye directamente en la vida útil de las edificaciones consideradas y mencionadas anteriormente en este trabajo.

El limitado número de investigaciones que se enfoquen directamente a la problemática de falta de juntas en bóvedas, abre una mayor posibilidad de aportar al conocimiento en el tema, de esta manera la presente investigación evalúa de manera práctica, cuantitativa y experimental el método del rajueo, el cual consiste en integrar pequeños fragmentos de piedra de forma geométrica laminar, también conocidos como ripios, se instalan entre los espacios que se generan con el desprendimiento de mortero entre piedra y piedra, muy generalmente en las paredes y en las bóvedas.

Para establecer si el método del rajueo es adecuado para la reposición de juntas, es necesario comprender su comportamiento estructural, analizando las propiedades físico-mecánicas de los materiales que conforman el mortero de reparación, cal, arena y piedra. En esta investigación se anexan apartados

detallados y enfocados directamente a la clasificación de material conglomerante (cal) y agregado (arena caliza) para la elaboración de morteros de cal, con una proporción de 1:2. (Pozo *et al.*, 2015).

## 1.2 Objetivo General

Evaluar de manera experimental el método del rajueo, implementándolo para reponer juntas dañadas en bóvedas de arco mampostería, documentando el comportamiento mecánico entre *mortero-piedra*.

## 1.3 Objetivos Particulares

A). - Revisar el método de sustitución de juntas conocido como rajueo, evaluar sus características y proporciones, con el propósito de conocer la correcta aplicación, además, de los resultados generados en intervenciones previas.

B). - Construir modelo a escala reducida de una bóveda de mampostería, usándolo para evaluar experimentalmente el método del rajueo, aprovechando el marco de carga del laboratorio de estructuras de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

C). - Evaluar las gráficas carga-desplazamiento para el modelo a escala ensayado en 3 etapas, la primera etapa se ensayará con la junta sana, en segundo lugar, con la junta desgastada y la tercera etapa con el método del rajueo aplicado en el intradós de la bóveda.

D). - Generar una ficha técnica donde se explique la aplicación del método del rajueo en arcos de mampostería.

## 1.4 Alcance

Este estudio se limita únicamente al análisis experimental del método del rajueo, por dos razones, la primera, debido a la pandemia que inicio en el mes de enero del año 2020 y que se prolonga hasta la fecha de entrega de este escrito y asciende a más de un año, provocando una severa limitación en los tiempos

considerados para la ejecución de los ensayos, en segundo lugar, la remodelación del laboratorio de materiales agrega una serie de retrasos, obligando a realizar un ajuste en los ensayos, para lograr este propósito, la reposición de juntas en el modelo a escala reducida se realizara con mortero a base de cemento portland-arena caliza, proporción 1:1, con la finalidad de acelerar el fraguado del mortero utilizado en la intervención. Con el ajuste propuesto se pretende que esta tesis contenga los suficientes ensayos para generar una idea más clara en la reposición de juntas de las bóvedas de nuestro caso de estudio, para que este ajuste funcione correctamente se deberá especificar las propiedades, características y rasgos importantes de los materiales que se emplearán en la investigación, principalmente, el mortero y piedra.

### 1.5 Justificación

La problemática de pérdida de juntas en construcciones de mampostería, con un enfoque particular en sus bóvedas y principalmente en sus juntas, es un hecho que causa incertidumbre respecto a la capacidad estructural del elemento, por este motivo es conveniente conocer cómo afecta el desprendimiento de juntas en función de su capacidad estructural, esto en edificaciones que contaban con juntas en sus bóvedas y que, por factores como el intemperismo y la edad, se desprendieron total o parcialmente, acortando el tiempo de vida y de uso de la edificación, además, de aprovechar la oportunidad de aportar al conocimiento en el sentido de las características mecánicas en arcos de mampostería.

De acuerdo con lo que menciona Costa *et al.* (2014) preservar las edificaciones patrimoniales es conservar la identidad de un pueblo, como referencia muestra la intervención en la iglesia de la tercera orden, en Braga, Portugal, donde se detectó un importante desplazamiento vertical en el arco que constituye el área del coro alto, como se puede observar en la figura 2, para resolver esta patología, además, de barras de acero en la parte del extradós, incluye la elaboración de un modelo a escala 1:2 en laboratorio, sin escatimar en el tiempo invertido o los recursos monetarios, procedimiento que ya se había aplicado por Roca *et al.* (2010), en

España, donde se hace uso de un modelo a escala reducida para conocer el comportamiento de la mampostería de piedra.

El análisis experimental en una edificación patrimonial se debe realizar en laboratorio, teniendo un especial cuidado en el sellado de juntas como se muestra en la figura 3.



Figura 2 arco del coro alto con desplazamiento vertical. (Costa et al., 2014).



Figura 3 Vista inferior del arco con las juntas selladas. (Costa et al., 2014).

Uno de los puentes muy similar al de nuestro caso de estudio es el puente de "Santa Marta", ubicado en una villa portuguesa llamada Carcaise, presenta un desprendimiento de juntas muy marcado, ver figura 4, de acuerdo con lo que menciona João *et al.* (2014), es vital la reposición de juntas en una estructura que además de estar sometida a la meteorización, cuenta con el uso rutinario de los habitantes y vehículos, generando un efecto dinámico a la estructura, poniendo en riesgo la integridad de la estructura y de los usuarios, propuso una solución para la reposición de juntas a base de sellado previo de todas las juntas en la zona del arco, seguido por la inyección a baja presión de un mortero premezclado a base de cal puzolánica, con una granulometría fina y una fluidez alta para conseguir llenar la totalidad de los huecos. Los resultados se muestran en las figuras 4 y 5.



Figura 4 Puente de "Santa Marta" con desprendimiento de juntas. (João *et al.*, 2014)



Figura 5 Puente "Santa Marta" con las juntas restituidas, (João *et al.*, 2014).

En la literatura se pueden encontrar una gran diversidad de ejemplos, tanto a nivel mundial como nacional, donde se da realce a una gran variedad de técnicas y soluciones que si se abordan no alcanzaría esta tesis para mencionarlas se tomaron las que se muestran en este apartado con la finalidad de justificar el trabajo que se realizó para elaborar esta investigación, mostrando la bóveda número 4 en la figura 6, donde se aprecia claramente el desprendimiento de juntas, patología que afecta a nuestro caso de estudio.



Figura 6 Bóveda de piedra con desprendimiento de juntas. Imagen propia.

## 1.6 Hipótesis

El rejunteo por el método del rajueleo es un procedimiento que mejora la capacidad estructural y restaura las características de resistencia mecánica de las construcciones a base de mampostería, obteniendo un mejor comportamiento estructural del caso de estudio.



**CAPÍTULO**

**2**

**ESTADODELARTE**

## 2. ESTADO DEL ARTE:

En el caso de las bóvedas de piedra, es necesario aplicar un método que ayude a consolidar correctamente las bóvedas que cuentan con un nivel de desgaste en sus juntas, y de acuerdo a los criterios de restauración mundialmente aceptados, que son, los criterios de reversibilidad y compatibilidad, se busca que los materiales que se utilizan en la intervención de edificios cuenten con las siguientes características, deberá ser un material transpirable e higroscópico, con una resistencia similar a la del material original de nuestro caso de estudio, cuya principal función será mantener las condiciones mecánicas de la bóveda durante toda su vida útil.

### 2.1.- Procedimiento de restauración con morteros de cal.

De acuerdo con el personal que trabaja en el INAH, la cal parece un material sin complicaciones que podría analizarse por métodos simples y entenderse en forma muy sencilla, pero conocer su naturaleza y propiedades no es fácil, (Alonso *et al.*, 2013), pretende dar a conocer las propiedades cualitativas del material utilizado en construcción conocido como "la cal", de los cuales se dan varios casos de estudio ubicados en México.

De acuerdo con Manuel *et al.* (2015), El término "cal" se refiere en general al producto fraguado de la cal apagada que al secarse inicia la reacción generada con el dióxido de carbono que contiene el aire de la atmósfera y desprende agua, dando origen al carbonato de calcio, que es el cementante de los materiales calcáreos de construcción.

### 2.2.- Intervenciones compatibles

En la investigación de Sala *et al.* (2016), se plantea una clara relación entre losas estructurales, no estructurales y bóvedas de piedra con rellenos livianos, debido a que nuestro tema de investigación está directamente enfocado al comportamiento estructural de una bóveda de piedra es correcto analizar el trabajo de Sala, donde considera la falla y el envejecimiento de las intervenciones

estructurales en edificios de fábrica de piedra, se demostró la necesidad de reparaciones compatibles.

Dentro del análisis se consideran las propiedades mecánicas, químicas, de transporte, además menciona que la densidad del concreto de cemento Portland son poco compatibles con las estructuras de mampostería de mortero de cal.

Se presentan dos intervenciones relevantes con diferentes requisitos en la relación resistencia-densidad, en primer lugar, el relleno de bóveda de mampostería, en segundo lugar, el revestimiento no estructural de piso de madera.

La minimización de la densidad se logra con varios tipos de mortero para juntas con un contenido de agregado liviano; también se emplean diferentes morteros de agregado liviano en un mismo mortero. En la figura 7 se comparan la densidad, resistencia, rigidez, costo y huella de carbono de los compuestos, (Sala et al., 2016).

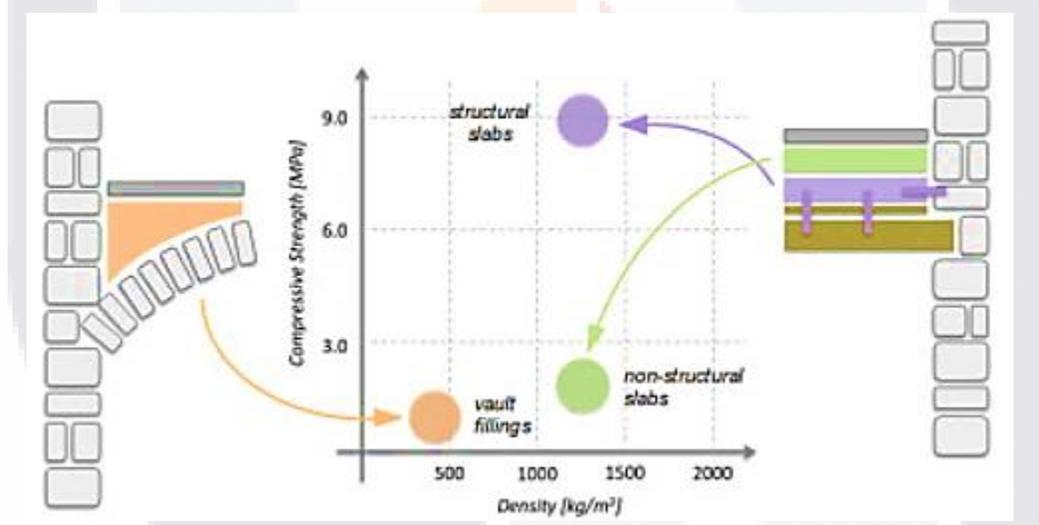


Figura 7 Comparación de bóvedas con relleno y losas de concreto. (Sala et al., 2016).

### 2.3.- Geometría de una estructura

Uno de los tópicos más importantes para tomar en cuenta en la construcción del modelo a escala reducida, en el cual se ensayará el método del rajueleo, es la geometría que lo constituye, esto nos lleva a examinar los elementos estructurales de un arco.

Las estructuras antiguas se han diseñado de acuerdo con reglas semiempíricas basadas en unos pocos principios mecánicos simplificados; sin embargo, su desempeño estructural es bastante bueno en la mayoría de los casos. Además, sugiere algunas reglas antiguas para la construcción de puentes y arcos de albañilería derivadas de manuales históricos, que se analizan con base en la mecánica moderna.

Algunas cuestiones sobre las características mecánicas del material y sobre la respuesta estructural de los arcos de mampostería permiten una mejor comprensión del rendimiento estructural y la respuesta de las estructuras de arco antiguas (Brencich y Morbiducci, 2007).

#### 2.4.- Incertidumbres geométricas en arcos

Es importante conocer el comportamiento debido a la geometría en arcos de mampostería, evaluando el efecto de las incertidumbres geométricas sobre la condición de colapso del arco de mampostería circular en presencia de acciones horizontales.

Debido a que la construcción en mampostería de piedra contiene imprecisiones a las que además se suman las irregularidades provocadas por la edad y el intemperismo, luego de un análisis de segundo orden y una comparación de resultados contra la geometría nominal, se determinó que los efectos de incertidumbre podrían reducir significativamente la capacidad de carga nominal de la estructura, (Misseri *et al.*, 2019).

#### 2.5.- Refuerzo en el intradós

El trabajo de Misseri *et al.* (2019), tiene un enfoque en el comportamiento estructural de los arcos de mampostería reforzados a través de compuestos que contienen fibra con matriz inorgánica, (Mortero Reforzado Textil). Se consideran dos compuestos innovadores:

- Textiles de fibra de basalto junto con una matriz a base de cal

- Textiles de fibra de carbono asociados con una matriz a base de cemento.

Presenta resultados experimentales sobre la capacidad de unión entre compuestos y ladrillos, además, el comportamiento estructural de arcos de mampostería a escala 1: 2 no reforzados y reforzados en el extradós, ensayados bajo carga vertical. La evidencia experimental se compara con los resultados obtenidos a través de un modelo analítico que explota la estacionalidad de la energía potencial de las fuerzas actuantes dentro del supuesto de grandes desplazamientos.

El efecto de la tira de refuerzo se tiene en cuenta al recuperar la relación fuerza-desplazamiento directamente de los resultados experimentales de la prueba de unión. Los resultados muestran que el modelo analítico proporciona una estimación de seguridad de la carga máxima alcanzada por el modelo de arco durante la prueba.

Se encuentra una coincidencia al comparar el diagrama de desplazamiento de carga de las fases iniciales de la prueba y las estimaciones del modelo numérico. Se destaca que la fuerza de enlace de los sistemas de mortero con refuerzo textil, determinada experimentalmente sobre un sustrato recto, ofrece niveles de capacidad relevantes bajo los alcanzados en una superficie convexa como el extradós de un arco.

## 2.6.- Arco mampostería reforzado

En el trabajo de Zampieri *et al.* (2019), se analizan los estados finales de un arco de mampostería circular apoyado en pilares delgados rectangulares, cuando se somete a un asentamiento impuesto de un soporte además del peso propio, utilizando el principio del trabajo virtual y el análisis de la línea de empuje.

Dependiendo del ángulo de asentamiento y la esbeltez del arco y los pilares, el estudio identifica los principales mecanismos de falla de articulación donde las configuraciones de las bisagras dependen principalmente del ángulo del asentamiento y la esbeltez del arco.

En la hipótesis en la que solo son posibles las rupturas radiales, un análisis exhaustivo muestra los diferentes mecanismos posibles en arcos reforzados de mampostería con diferentes tipos de asentamientos de soporte. Además, los análisis muestran que el arco reforzado de mampostería es más vulnerable al desplazamiento horizontal que el desplazamiento inclinado o vertical.

## 2.7.- Vulnerabilidad sísmica en bóvedas de mampostería

La vulnerabilidad que tienen las bóvedas de mampostería ante el efecto sísmico, fue analizado por Ananía *et al.* (2012), utilizo polímeros reforzados con fibras de carbono colocado en forma de  $\Omega$  (omega), conformando un núcleo de concreto generado en la bóveda extradós con el propósito de conocer el comportamiento estructural desde una perspectiva dinámica.

El experimento (ver figura 8), genero el aumento en la resistencia y la rigidez, considerándolos como una membrana, referente a la flexión, asegura una capacidad para distribuir uniformemente los esfuerzos que genera la fuerza sísmica, evitando que la edificación colapse de manera local o global.



Figura 8 Arco tipo cañón, ensayado con un refuerzo de polímeros de carbono. (Ananía *et al.*, 2016)

Para Ananía *et al*, (2016), es importante tomar en cuenta los pronósticos en la teoría referente a la resistencia última, que se generó en la campaña experimental, por ejemplo: la trituración de albañilería, rotura de polímeros reforzados con fibra de carbono, desprendimientos, deslizamiento a lo largo de la junta de mortero.

Con este propósito, se implementó un incremento de análisis de límites, aunque ahora paso a paso, tomando en cuenta un mecanismo de falla cortante en cada una de las juntas de mortero. Se aplicó la ley de fricción de Mohr-Coulomb, con el propósito de evaluar la resistencia a cortante de una manera puntual en el mortero de junteo, apegados y tomando en cuenta lo que menciona el código italiano en el sentido del método para refuerzo, "Ω-Wrap de CFRP". Es importante mencionar que, en el procedimiento para el análisis incremental aproximado, el valor actual de la resistencia a cortante, depende principalmente del esfuerzo a compresión que resulta del paso anterior, (Ananía *et al*, 2016).

## 2.8.- Morteros de Reparación

La creciente demanda de morteros a base de cal para la restauración de edificaciones y estructuras históricas justifica la investigación sobre estos materiales. Tal y como mencionan Lanás y Álvarez (2003), donde busca determinar el efecto de las variables tecnológicas sobre la estructura de los poros y las propiedades mecánicas de los morteros elaborados a base de cal.

Se discute la importancia de la influencia del tiempo de curado, la relación aglutinante-agregado, los atributos de los agregados y la porosidad. Se ensayaron morteros preparados con cal aérea, variando los tipos de agregados y las relaciones aglutinante-agregado, que varían de 1: 1 a 1: 5 en volumen.

Se menciona la importancia que tienen las mediciones obtenidas en el sentido de resistencia a la compresión y a la flexión, de igual manera la difracción de rayos X y los estudios térmicos, se realizaron después de 3, 7, 28, 91, 182 y 365 días.

Se encuentra un fuerte aumento en la resistencia de las mezclas de mortero después de 365 días de curado (en comparación con 28 días de curado). A pesar

de que grandes cantidades de aglutinante aumentan la porosidad total, la fuerza de estas mezclas también aumenta.

Se obtiene una buena estructura entrelazada a medida que aumenta el contenido de aglutinante. Además, las porosidades más altas permiten una mejor carbonatación de portlandita. Estableció la importancia de la relación entre las propiedades mecánicas y la estructura de los poros.

Se determinó que, en caso de exceso de aglutinante, el aumento de huecos por inclusión de aire, conduce a una significativa reducción en la resistencia. El uso de agregados de piedra (calcáreos), aumenta considerablemente la resistencia en comparación con el uso de agregados producto de la molienda (silíceos). También se han considerado factores como la distribución del tamaño de grano y la forma de grano de los agregados, (Lanas y Alvarez, 2003).

## 2.9.- Morteros a base de cal

El trabajo de Pozo (2015), menciona la importancia de investigar las propiedades mecánicas y físicas de morteros de cal, hace una amplia recomendación de los morteros a base de cal hidráulica natural (1:1.75), las muestras se hicieron con agregado de piedra caliza, motivo por el que se le presta especial atención, ya que es el material con el que se cuenta para la elaboración de morteros para esta investigación.

Además, menciona el control a la resistencia mecánica, así como la evolución del módulo de Young y la contracción por secado. El estudio se realizó bajo condiciones de curado que condujeron al desarrollo de una resistencia de mortero adecuada dentro de los primeros 28 días sin tener que esperar períodos de curado más largos.

El estudio reveló que el mortero NHL5, (Mortero a base de cal hidráulica natural), (1: 1.75) exhibe, durante 28 días en una cámara climática de  $70 \pm 5\%$ , obtiene mejores resultados desde el punto de vista de la resistencia y la contracción. Un mortero NHL5 (1: 1.75) podría ser un buen candidato para ser utilizado como mortero de reparación debido a su buena respuesta a los movimientos de las

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

pedras en los edificios y a sus mayores resistencias. Sin embargo, la contracción en un mortero a base de cal hidráulica, así como en un mortero a base de cal pura, es lo suficientemente alto como para causar una disminución en su resistencia.

### 2.11.- Aglutinante sostenible

De acuerdo con Ontiveros *et al.* (2018), en la industria del cemento, la utilización de un aglutinante sostenible que contenga un menor consumo de energía y emisiones de dióxido de carbono que el cemento Portland, es cada vez más importante.

La cal de aire es un aglutinante que se endurece al absorber  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, y su materia prima, la cal hidratada, se fabrica a una temperatura más baja (alrededor de  $900^\circ\text{C}$ ) que el cemento (alrededor de  $1450^\circ\text{C}$ ).

En este estudio, la cantidad y la tasa de absorción de  $\text{CO}_2$  por los materiales a base de cal aérea, se evalúan cuantitativamente en condiciones de curado ambiental de  $20^\circ\text{C}$ , 60% de humedad relativa y 0.04% de concentración de  $\text{CO}_2$ . Además, los efectos de la relación agua-aglutinante y la adición de humo de sílice en las propiedades del material del mortero de cal con aire, como la resistencia, el cambio de peso, la profundidad de carbonatación y la estructura de los poros.

A diferencia de materiales hidráulicos, tales como cemento Portland, el mortero de cal aérea, se endurecen bajo una condición de curado sellado, sin embargo, una vez expuesto a aire seco, el mortero comenzó a endurecerse mediante la absorción de  $\text{CO}_2$ . Durante la primera semana, la mayor parte del agua interna se evaporó, por lo que el peso del mortero se redujo considerablemente.

Después de eso, tanto el peso como la resistencia a la compresión aumentaron constantemente durante al menos 180 días debido a la reacción de carbonatación. Basado en las propiedades de 91 días, el reemplazo del 10% de la cal hidratada con humo de sílice mejoró las resistencias a la compresión y a la flexión en un 27% y 13% respectivamente, al tiempo que aumentó la relación agua-aglutinante, de 0.4 a 0.6 disminuyó ambas fuerzas en un 29% debido al aumento del volumen de los poros capilares.

La adición de humo de sílice y el cambio en la relación agua-aglutinante, no tuvieron un impacto significativo en la cantidad de CO<sub>2</sub> obtenida, pero estos dos factores fueron efectivos en la aceleración del CO<sub>2</sub>, aumentando la tasa de absorción antes de los 28 días. Por último, se evaluó el material a base de cal aérea, para ser capaz de recuperar la mitad de la CO<sub>2</sub> emitido durante la fabricación de cal hidratada dentro de los 3 meses.

## 2.12.- Compuesto de Cáñamo

Un material interesante y que destaca porque se puede utilizar en reposición de juntas es el compuesto de cáñamo, tal y como lo menciona Arizzi *et al.* (2015), las características del material justifican su uso no solo en trabajos de nueva construcción sino también en intervenciones de reparación, especialmente enfocadas en mejorar el aislamiento y el rendimiento higrotérmico, en edificios históricos.

Sin embargo, teniendo en cuenta las características físicas de las tiras de cáñamo, entre las que podemos mencionar la alta porosidad y el área de superficie específica, es fundamental evaluar el comportamiento higiénico de un compuesto a base de cáñamo cuando se utiliza como material de reparación.

Uno de los requisitos que debe cumplir un material de reparación para mejorar la durabilidad del edificio es, una capacidad de absorción de agua limitada. La presencia y el movimiento del agua, en condiciones ambientales adecuadas, permiten procesos de degradación, tales como fenómenos de congelación-descongelación, cristalización de sal y crecimiento de microorganismos, que reducen la durabilidad del material y creando un ambiente insalubre.

El objetivo del trabajo reportado es comparar el comportamiento higiénico y la transpirabilidad de los materiales de construcción sostenibles, hechos con cáñamo y tres tipos de cal. Se demostró que, aunque los tres morteros de cal de cáñamo mostraron un rendimiento higiénico similar, el tipo de cal influye en la transferencia de agua dentro de este material.

Esto indica que la red de poros de la matriz, controla prácticamente la absorción de agua y la tasa de desorción y las diferencias en la cantidad de agua absorbida. Los compuestos de cáñamo hechos con cal hidráulica natural presentaron una mayor capacidad de transpiración y secado, menor absorción de agua por inmersión y captación capilar y un biodeterioro menos intenso en comparación con los limos de cal aérea. Esto significa que se debe preferir la cal hidráulica natural en combinación con el cáñamo para obtener morteros nuevos y reparadores con un buen rendimiento higiénico.





**CAPÍTULO**

**3**

**MARCO TEORICO**

### 3. MARCO TEORICO:

#### 3.1.- MORTERO CEMENTO-ARENA

En el manual SCT (2018), se abordan las patologías de los materiales, haciendo referencia a la mampostería, como un material compuesto mediante fragmentos de roca acomodados, juntados o no con mortero, para obtener una forma requerida. Se mencionan los problemas que generalmente se presentan en este tipo de construcciones, son el aflojamiento de las piedras y la disgregación del mortero, generando huecos y falta de mortero entre piedra y piedra, como se puede ver en la figura 9.



Figura 9 puentes con desprendimiento de juntas y huecos en sus paredes. (SCT, 2018)

Presenta el mortero de cemento, como una combinación de agua, cemento hidráulico y arena, en una proporción adecuada para cada situación generando una resistencia determinada. Con la referencia mencionada en este apartado y agregando la disminución de tiempos para los ensayos en nuestra investigación, se decide elaborar un mortero de reparación, a base de cemento portland, con el propósito de acelerar los tiempos de fraguado en el mortero.

#### 3.2.- TIPOS DE MAMPOSTERÍA:

La mampostería es considerada un sistema constructivo con base en el manual de elementos o materiales, también nombrados mampuestos que en la mayoría de los casos se utilizan sin ningún tipo de trabajo preliminar a su disposición.

La mampostería se utiliza para elaborar muros y delimitar áreas, dando origen a una gran diversidad de tipos de mampostería, muy generalmente los mampuestos son instalados utilizando un mortero para junteo a base de cal o cemento, arena, y agua.

Dentro de los tipos de mampostería encontramos la denominada mampostería ordinaria, se conforma con un mortero a base de cemento o de cal y la idea es que se origine la menor cantidad de huecos entre los mampuestos, ajustando lo más posible la totalidad de los elementos, con la finalidad de consumir lo menos posible de mortero, lo que origina diferentes tipos de aparejos.



Figura 10 Colocación de mampostería ordinaria. ("BRUC YARDI")

Otro tipo de mampostería es menciona en el trabajo de Roca *et al.* (2010), que de manera textual dice: "Existen reglas de la mampostería concertada, una es evitar que coincidan cuatro aristas en un solo vértice. Si el espesor de la fábrica es superior al de los mampuestos, se asientan los de paramentos vistos y luego los principales del relleno, los cuales se acuñan con ripios si es necesario", (Roca *et al.*, 2010).



Figura 11 Mampostería concertada. ("Maestrazgo Cover").

Concerniente a la mampostería rostrada o careada, una de sus principales características es que solo se trabaja con la técnica de labrado, la cara expuesta al exterior utilizando las rajuelas para cubrir los huecos de mayor tamaño.



Figura 12 Mampostería con ripios. (Bustamante, 2017).

Se menciona otro tipo de mampostería que se encuentra muy comúnmente en diferentes países, es la mampostería seca, en este procedimiento es muy claro y se observa a simple vista que no se utiliza mortero para juntar los elementos.

Para ejecutar de manera correcta este trabajo de mampostería se considera indispensable la selección de pieza por pieza de los elementos a mampostar, el propósito es conseguir una edificación estructuralmente estable. Recurriendo de manera opcional al rajuelo para tapar huecos y acuñar los mampuestos.



Figura 13 Colocación de mampostería seca. ("Bruc Yardi").

Cabe mencionar que es difícil conseguir una edificación estructuralmente estable utilizando la mampostería seca, debido a la falta de mortero que ayude a distribuir de manera uniforme los esfuerzos entre los elementos, este es el motivo por el cual resultan sobresalientes las edificaciones conservadas en pie después de una edad centenaria.

Respecto a las rajuelas, son piedras pequeñas generadas tanto del desperdicio como manualmente, también se utilizan en la consolidación de caminos rústicos de tierra. El Dr. Roca lo define de la siguiente manera: "El diccionario define este término como «residuo» o «fragmentos de materiales de construcción que se usan para rellenar huecos de suelos y muros»", (Roca *et al.*, 2010). En la figura 14 se

muestra otro tipo de mampostería que se construye a base de rajuelas o también llamadas lajas.



*Figura 14 Mampostería de piedra laja. (Bustamante, 2017)*

Por último, se menciona la existencia de la mampostería decorativa. Dado que en este tipo de procedimiento se debe tomar en cuenta el embellecimiento o acabado final del trabajo, por ejemplo, pulimentos o barnices, se origina otro concepto muy importante llamado "aparejo", el cual está directamente relacionado con la instalación y la forma de la edificación, además de su espesor y altura.



Figura 15 Mampostería decorativa. ("Panel Piedra").

### 3.3.- BÓVEDAS

Dentro de la literatura existe una gran diversidad de escritos donde se abordan los diferentes tipos de bóvedas, así como el proceso constructivo, sin antes pasar por el cálculo de escala adecuada y la proyección en papel, para cada tipo de bóvedas, se clasifican de acuerdo con el uso, si se trata de una construcción cerrada o abierta, etc.

Para el caso particular de esta investigación se aborda el escrito de Rafael Galeano, donde textualmente menciona que: "la bóveda es una estructura arqueada que cumple una función: cubrir un espacio entre dos apoyos para así poder formar el techo o la cubierta de un edificio". (Galeano, 2014).

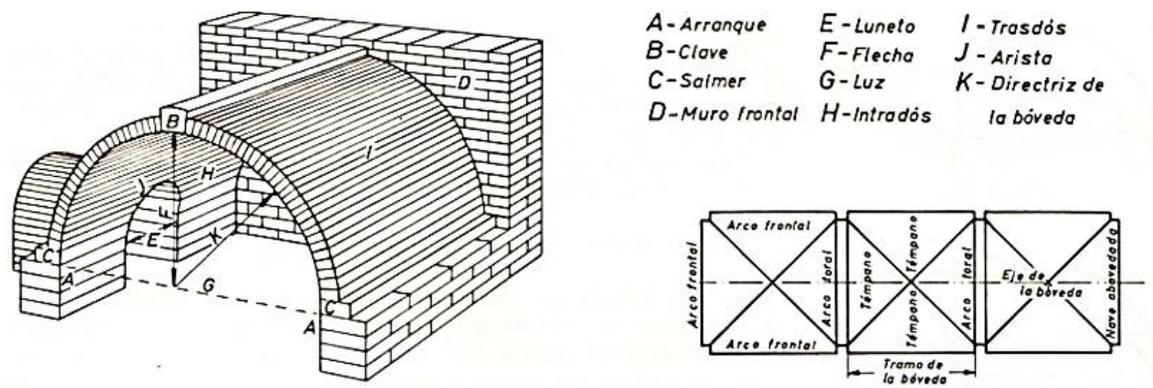


Figura 16 Partes de una bóveda tipo cañón. (Galeano, 2014).

### 3.4.- JUNTAS

En la construcción a base de fábrica de piedra, independientemente del aparejo que se utilice, se genera una separación entre las piezas de piedra, con o sin mortero (ver figura 17), cuando en las juntas existe argamasa o también llamado mortero para junteo, existe una correcta y uniforme distribución de los esfuerzos generados por el peso propio de la estructura, además, de las cargas de servicio calculadas con base al uso considerado. Cuando una edificación cuenta con desgaste parcial o total en sus juntas, existe una incertidumbre en el comportamiento estructural.



Figura 17 Intradós de modelo a escala con juntas desgastadas. Elaboración propia.

### 3.5.- CAL VIVA

En el escrito de Brümmer (2011), menciona el uso de la cal desde el Neolítico y de forma general, el uso de la cal se reduce considerablemente tras la aparición patentada en el siglo XIX del cemento portland. Para la obtención de la cal y utilizarla como un conglomerante natural inorgánico y aéreo, se tiene que calcinar las rocas calcáreas (piedra caliza).

Dentro de las propiedades químicas de la piedra caliza encontramos que, se compone de carbonato cálcico ( $\text{Ca CO}_3$ ), además de impurezas como arcillas, carbonato de magnesio, sílice, etc. Es importante mencionar, que para considerar que la cal cuenta con una buena calidad y no se alteren sus propiedades conglomerantes, las impurezas no deben exceder el 5%.

A mencionar a grandes rasgos el procedimiento para obtener la cal, primero se debe calcinar la piedra caliza, sometiéndose a una temperatura de  $898^\circ\text{C}$ ; este procedimiento libera anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), perdiendo considerablemente peso y volumen. En este paso el producto que se obtiene, pasando previamente la roca por el horno es el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), llamado comúnmente cal viva.

### 3.6.- APAGADO DE LA CAL VIVA

Debido a que la cal viva no se puede utilizar en la elaboración de morteros, es preciso someterla a un procedimiento con agua para el apagado de la cal. El apagado de la cal produce un efecto químico llamada reacción exotérmica, la cual se caracteriza por el desprendimiento calorífico que, según la calidad del material de aporte, la temperatura que se genera en la reacción exotérmica puede llegar hasta los  $300^\circ\text{C}$ .

Para apagar la cal viva se pueden considerar dos procedimientos:

1. Se introduce directamente la cal viva en fosas con agua, tal y como se viene haciendo desde tiempos inmemoriales, con este procedimiento se obtiene una pasta de cal que generalmente se considera de calidad mayor que la cal apagada con otros métodos. Es importante mencionar que, con la tecnología

actual, un apagado de cal en una hidratadora actual, un minuto equivale a un apagado de cal en fosas durante un año.

2. El método de apagado de cal viva que se industrializó es el procedimiento por aspersión, aportando únicamente y de forma controlada el agua necesaria para apagar un volumen de cal, este sistema es utilizado actualmente por la mayoría de las empresas que se dedican a la elaboración de cal hidratada, el resultado es un producto en polvo seco y listo para embolsar. NOTA: existe un tercer método, el cual consiste en exponer directamente la cal a la intemperie y la lluvia, (Arizzi *et al.*, 2015).

### 3.7.- ARENA CALIZA

Para definir correctamente una arena caliza, se puede mencionar que es un árido procedente de rocas calizas, utilizado como agregado en la elaboración de la argamasa para asentar mampuestos, muy generalmente dentro de su mezcla, contiene una granulometría que va dentro de 0 y 5 mm. El procedimiento que se utiliza para la elaboración de cemento, uno de los primeros pasos es el quebrado o molienda de piedras calizas, producto de la molienda se genera un material libre de arcillas y con un alto contenido equivalente de arena, de allí el nombre de arena caliza, (De Loera, 2018).

### 3.8.- CARBONATACIÓN

Existen varios trabajos de investigación enfocados a la carbonatación de la cal, se tomará la definición de Manuel *et al.* (2015), donde menciona que los morteros de cal no consiguen un endurecimiento o fraguado final, dado que el proceso mediante la carbonatación dividida en dos fases principales:

- 1.- El endurecimiento generado por la pérdida de agua debido a la evaporación.
- 2.- La carbonatación a través del CO<sub>2</sub> presente en el aire, con el anhídrido carbónico el cual se disuelve en el agua que conforma la pasta de cal, aunque de manera demasiado lenta, es producido el endurecimiento final, el fraguado inicial en las zonas expuestas al aire.

Una vez que la cal terminó su proceso de carbonatación, vuelve a tomar la composición y estructura original, con la única diferencia y examinada con un microscopio donde se observa el cambio en el tamaño de los cristales, analizando la considerable reducción en las dimensiones de la piedra caliza. Se pueden tomar textualmente las palabras de Manuel *et al.* (2015), donde menciona: "El carbonato cálcico que se forma tras el proceso de carbonatación tiene unas propiedades mecánicas mucho menores que las del material de partida, lo que la hace mucho menos resistente". (Manuel *et al.*, 2015).

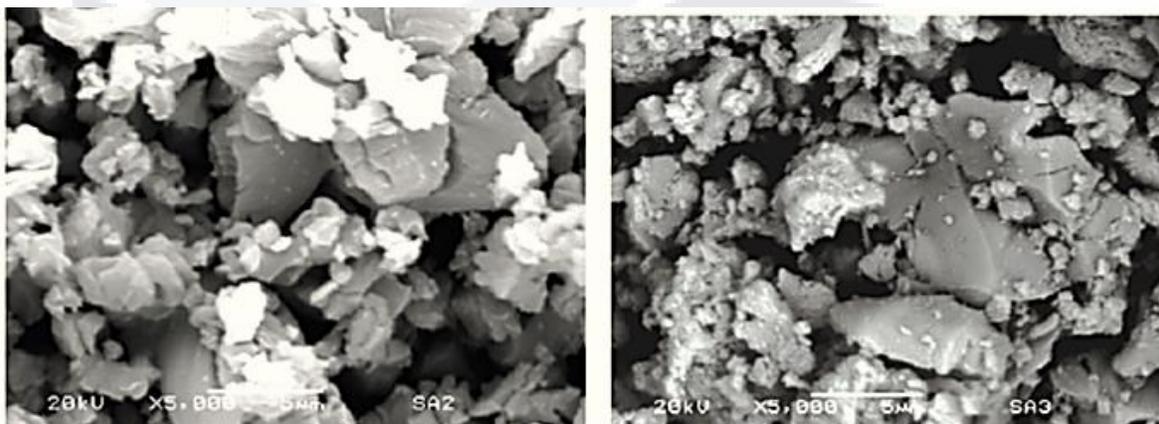


Figura 18 Vista microscópica de óxido de calcio (izquierda) e hidróxido de calcio (derecha) (Arizzi y Cultrone, 2012).



**CAPÍTULO**  
**IV**  
**METODOLOGÍA**

#### 4. METODOLOGIA:

##### 4.1.- PRUEBA PILOTO

El propósito principal de este apartado es obtener una idea clara del comportamiento mecánico de pilas de tabique sometidas al ensayo de compresión simple. Se presenta la elaboración de 11 pilas de tabique elaboradas con tabique de barro recocido (6cm x 14cm x 26 cm), el mortero que se utilizó para asentar los mampuestos es de una proporción 1:2, contiene cal hidratada, arena caliza y agua, el espesor de junta es de 1.8 cm uniformemente repartido en la base y cara de los mampuestos, cada pila está conformada por 5 piezas. Ver figura 19.

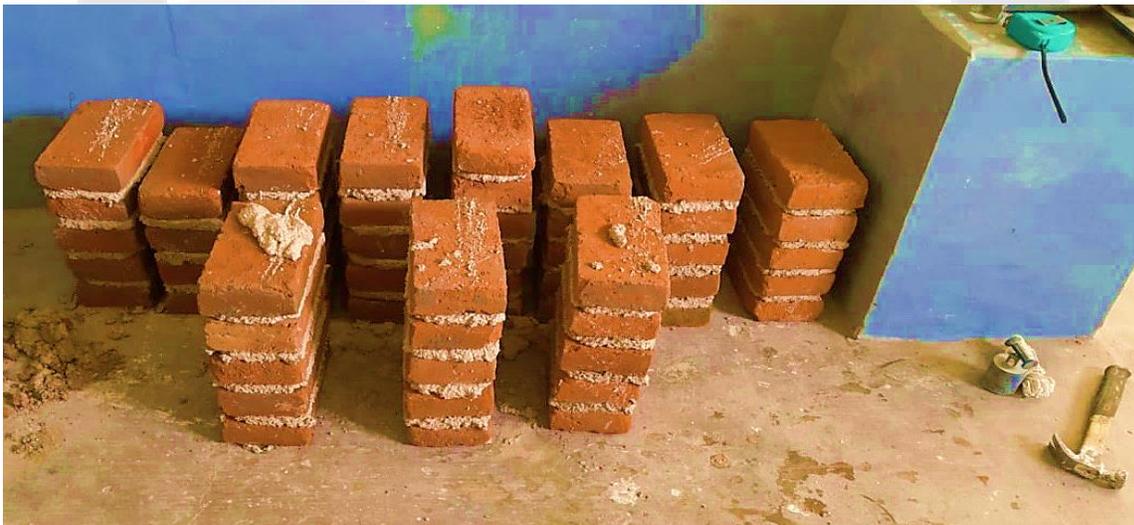


Figura 19 Pilas de tabique para prueba piloto. Elaboración propia.

Para incluir nuestra elaboración de las pilas dentro de un marco normativo vigente, se tomó como referencia la NORMA MEXICANA NMX-C-464-ONNCCE-2010 ENSAYE DE MURETES Y PILAS, CENAPRED (2015), de las 11 pilas elaboradas, 3 se destruyeron debido a los traslados originados por el cierre del laboratorio de materiales a causa de la pandemia COVID-19, de esta manera, en lo consecuente serán consideradas solo 8 pilas. El desarrollo completo del procedimiento utilizado en el ensayo, se presentará en forma alfabética.

a). – PORCENTAJE DE DESGASTE EN LAS PILAS

Se hermanan las 8 pilas, conformando 4 pares, con el propósito de considerar un diferente nivel de desgaste en la junta, para cada par de pilas. En el primer par de pilas se considera un 45% de desgaste, para el segundo par de pilas se considera un 10 % de desgaste, el tercer par de pilas se presenta con un 25% de desgaste en la junta.

Dado que se debe contar con un punto de partida, con el cual se puedan referenciar los resultados en el sentido de resistencia a la compresión de las pilas, una de las pilas restantes que en lo consecutivo será llamada pila 2, fue ensayada con la junta totalmente sana y completa, esto generó que una de las 8 pilas quedara huérfana y sin par para comparación, por lo tanto, se considera innecesario anexar en esta investigación.

b). – DESGASTE Y REPARACIÓN DE JUNTAS EN LAS PILAS

En este apartado se presenta el proceso de desgaste con escantillón, ver figuras 20, así como la intervención en pilas, para reponer juntas con el método del rajueleo, ver figuras 21.



Figura 20 Pila de tabique con 10% de desgaste en la junta. Elaboración propia.

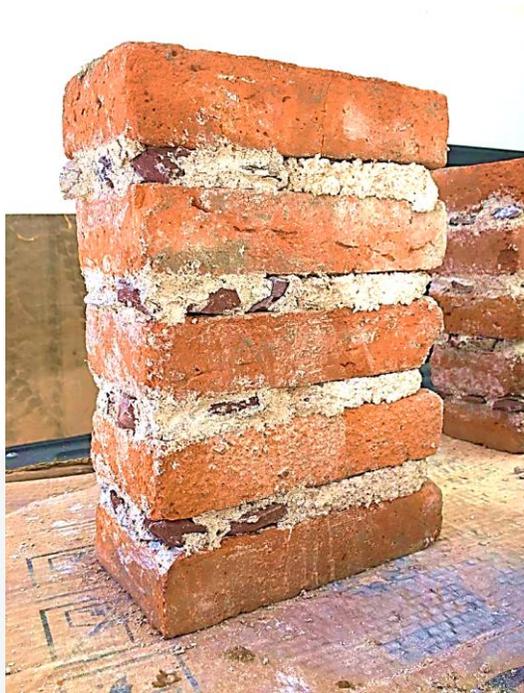


Figura 21 Pila de tabique con el método del rajuelo aplicado. *Elaboración propia.*

#### c). – ENSAYO A COMPRESIÓN SIMPLE

El equipo que se utilizó para el ensayo es una prensa universal 70-S12Z00, instalada en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Tal y como se indica en la NORMA MEXICANA NMX-C-404-ONNCCE-2012 PIEZAS PARA USO ESTRUCTURAL (Flores, 2015), para que la compresión aplicada cuente con una distribución uniforme sobre las pilas y se reparta correctamente en las caras inferior y superior de la pila se colocó una placa de acero de un espesor de 1/4",

agregando, una lámina de neopreno de 2 mm de espesor acompañando a cada una de las placas de acero, ver figura 22.



Figura 22 Pila con desgaste del 45% en la junta sometida al ensayo de compresión simple. Elaboración propia.

d). – RESULTADOS EN LA PRUEBA PILOTO

El total de los ensayos mostraron un aumento en la capacidad resistente a la compresión, que va de 58.0151 Psi, hasta 116.03 Psi. La figura 23, muestra los resultados del ensayo en el primer par de pilas, la pila identificada con el número 1 cuenta con un desgaste en la junta del 45% y la pila número 8 cuenta con 45% de nivel de reposición con el método del rajuelo.

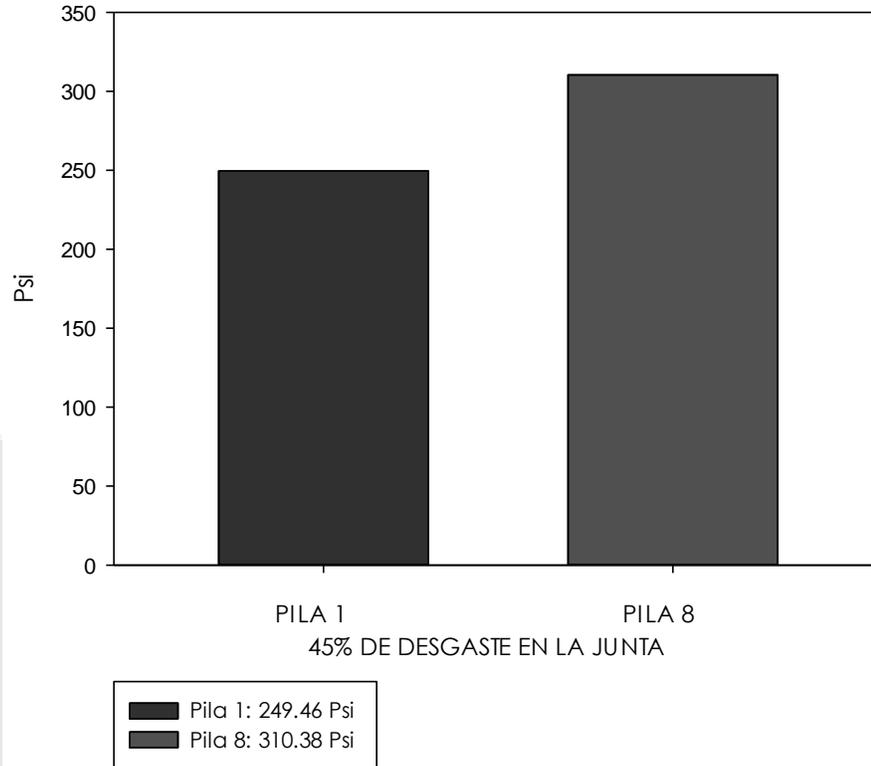


Figura 23 Gráfica con el resultado del ensayo en el par de pilas, 1-8. Elaboración propia.

El resultado muestra un aumento exacto en la resistencia a compresión de 60.92 Psi. entre ambas pilas, sin aproximarse a la resistencia que se observó en la pila 2, la cual que fue ensayada con la junta totalmente sana y completa, arrojando un resultado a la compresión simple de 452.5177 Psi, (Ver figura 24).

El par de pilas 4-6, (figura 24), muestra un resultado de 116.03 Psi, favorable para la pila 6 que contiene la reposición de la junta con el método del rajuelo. La pila identificada con el número 4 cuenta con un desgaste en la junta del 25% y la pila número 6 cuenta con 25% de nivel de reposición con el método del rajuelo.

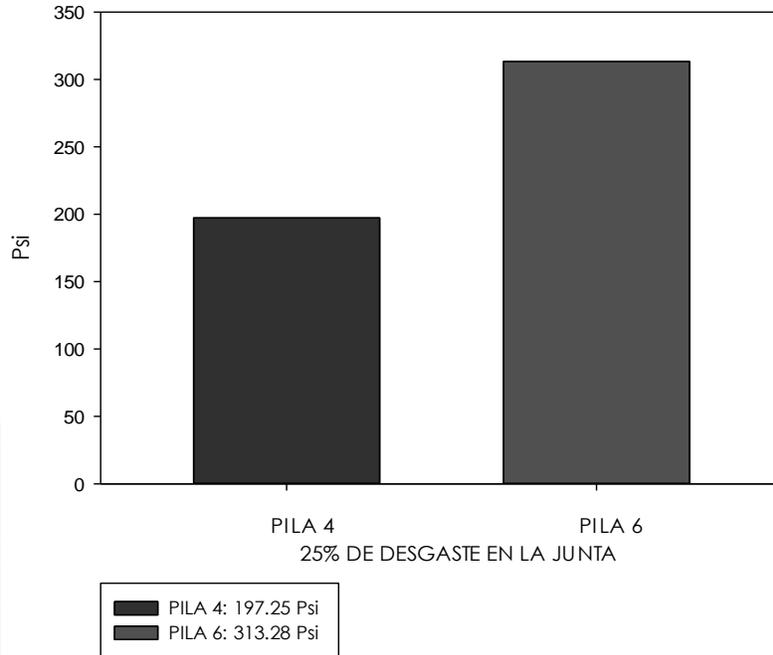


Figura 24 Gráfica con el resultado del ensayo en el par de pilas, 4-6. Elaboración propia.

Para el ensayo de las pilas identificadas con el numero 3 y 7, (ver gráfica 25), se aprecia un aumento en la resistencia a compresión de 15.9542 Psi, relacionado principalmente la aplicación del método del rajueleo con el aumento en la resistencia a compresión simple.

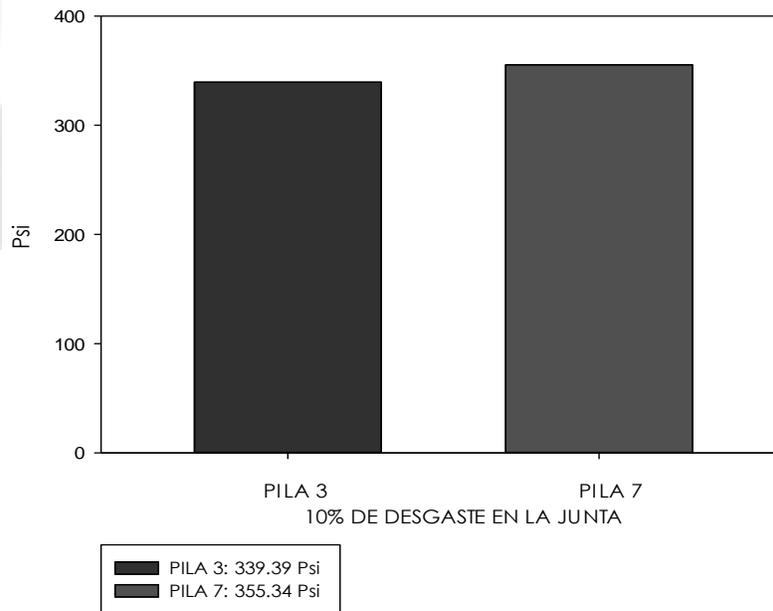


Figura 25 Gráfica con el resultado del ensayo en el par de pilas, 3-7. Elaboración propia.

Para poder referenciar la totalidad de los resultados obtenidos, se presenta en la figura 26, el agrupamiento del total de los ensayos, donde se puede apreciar claramente, la capacidad resistente de una pila de tabique con mortero de cal, ensayada con la junta totalmente sana y completa, comparando los ensayos de pilas con diferente nivel de desgaste y con el mismo nivel de reparación.

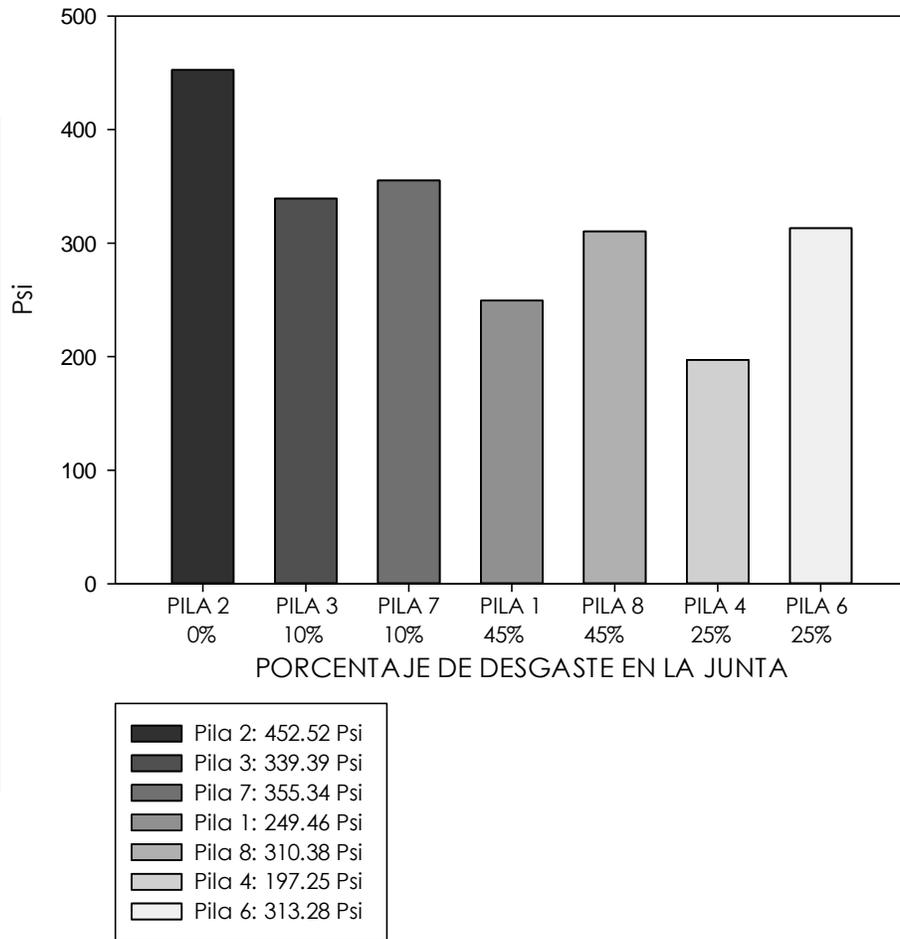


Figura 26 Agrupamiento de resultados. Elaboración propia.

En un análisis visual preliminar al ensayo en las pilas, de una manera lógica y empírica, se puede decir que, si un elemento que contribuye con la capacidad resistente en un elemento estructural como lo son las juntas, por causas ajenas al elemento o por el envejecimiento desaparece, tendrá una capacidad menor en el sentido de resistencia a la compresión, desconociendo cualquier tipo de cantidad numérica que pueda servir de comparación en nuestro caso de estudio.

Con esta prueba piloto, además de demostrar de una forma cuantitativa el mejoramiento resistente que se genera en un elemento mampostado e intervenido con el método del rajueleo, arroja los resultados numéricos suficientes para que se puedan tomar en cuenta y utilizarlos como base para obtener una idea clara y asertiva del mejoramiento en el comportamiento mecánico en elementos de mampostería asentados con mortero de cal hidratada y sometidos a compresión simple.

En el trabajo de Gorostizaga (2009), menciona la prioridad de los trabajos preliminares a la construcción de una bóveda, ya que muchas de las patologías existentes en las bóvedas, son motivadas por una deficiente ejecución de la cimbra o de su posterior desmontaje. Totalmente de acuerdo con este criterio la metodología que se utiliza para la presente investigación se desarrolla a continuación de manera escrita, visual y numerada. Se pretende que contenga un alcance explicativo y con la finalidad de que se entienda lo mejor posible, todos y cada uno de sus apartados.

#### 4.2.- CONSTRUCCIÓN DE MODELO A ESCALA

Para iniciar con la construcción del modelo a escala de nuestro caso de estudio, se considera el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, con el propósito de aprovechar el marco de carga y el equipo dispuesto adecuadamente.

El laboratorio de materiales se considera un sitio adecuado para ejecutar las campañas experimentales, procedimientos y todo lo necesario para aplicar carga y evaluar el comportamiento mecánico de la bóveda proyectada, generando los resultados que servirán para la reposición e intervención en juntas.

Con la ayuda del software AutoCAD y tomando en cuenta las dimensiones de la bóveda original, se elaboró una proyección a escala 1:3, la bóveda réplica cuenta con las siguientes dimensiones y se muestra en la Fig. 27:

Espesor de la dovela= 0.30 m

Altura= 2.6 m

Luz= 1.25 m

Flecha= 0.80 m

Largo= 2.25 m

Ancho= 1.22 m

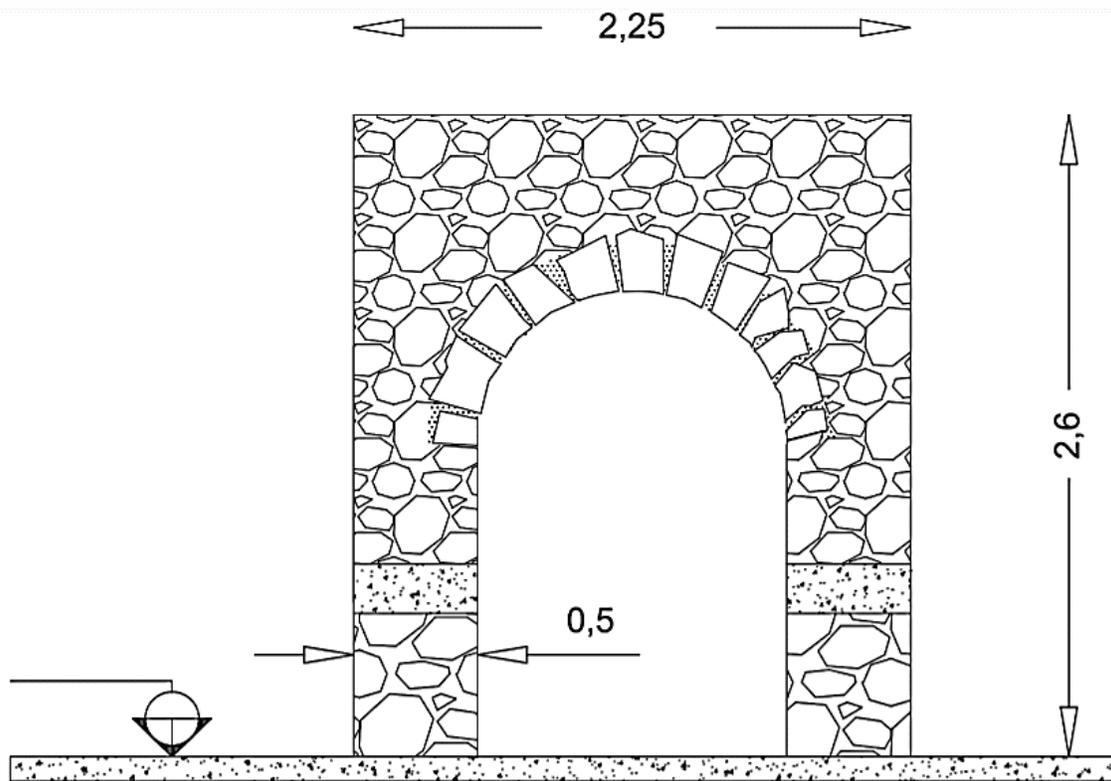


Figura 27 Proyección de modelo a escala en metros. (Elaboración propia).

#### 4.2.1.- CÁLCULO DE ESCALA

Tomando como referencia el trabajo de Narciso (2011), en el que cuenta cómo trazar un arco romano o de medio punto, menciona que la escala “E” es la relación lineal que existe entre una longitud medida en el terreno “T” y la correspondiente longitud medida en el papel “P”; expresada como fórmula de la siguiente manera:

$$E = \frac{T}{P} \quad [Formula\_1]$$

Donde

E= Escala

T= Correspondiente longitud medida en el terreno

P= Correspondiente longitud medida en el papel

Para calcular la escala a la que se debe construir el modelo, la variable “P”, se considera como la longitud disponible para construcción en el marco de carga y la variable “T” se considera como la longitud de luz en la bóveda 4, se modifica la expresión original, Ec.1, quedando de la siguiente manera:

$$E = \frac{\text{Longitud\_medida\_en\_la\_bóveda4}}{\text{Luz\_del\_modelo\_a\_escala}} \quad [Formula\_2]$$

Se necesita conocer la luz con la que debe contar el modelo a escala y tomando en cuenta la luz con la que cuenta la bóveda 4, que es de 3.75 m, se considera una escala de 1:3, aplicando la Ec.1, se hace el despeje correspondiente quedando de la siguiente manera:

Despeje:

$$\text{Luz\_del\_modelo\_a\_escala} = \frac{\text{Longitud\_medida\_en\_la\_bóveda4}}{E} \quad [Formula\_3]$$

$$\text{Luz\_del\_modelo\_a\_escala} = \frac{3.75 \text{ m}}{3} = 1.25 \text{ m} \quad [Formula\_4]$$

En la figura 28, se muestra la proyección del modelo, cumpliendo con los requisitos establecidos por el reglamento interno del laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, contando con el Vo. Bo. Del comité tutorial y los responsables del departamento de construcción y estructuras, el resultado se considera positivo, adecuado y permite iniciar con la construcción del modelo a escala en tiempo y forma.

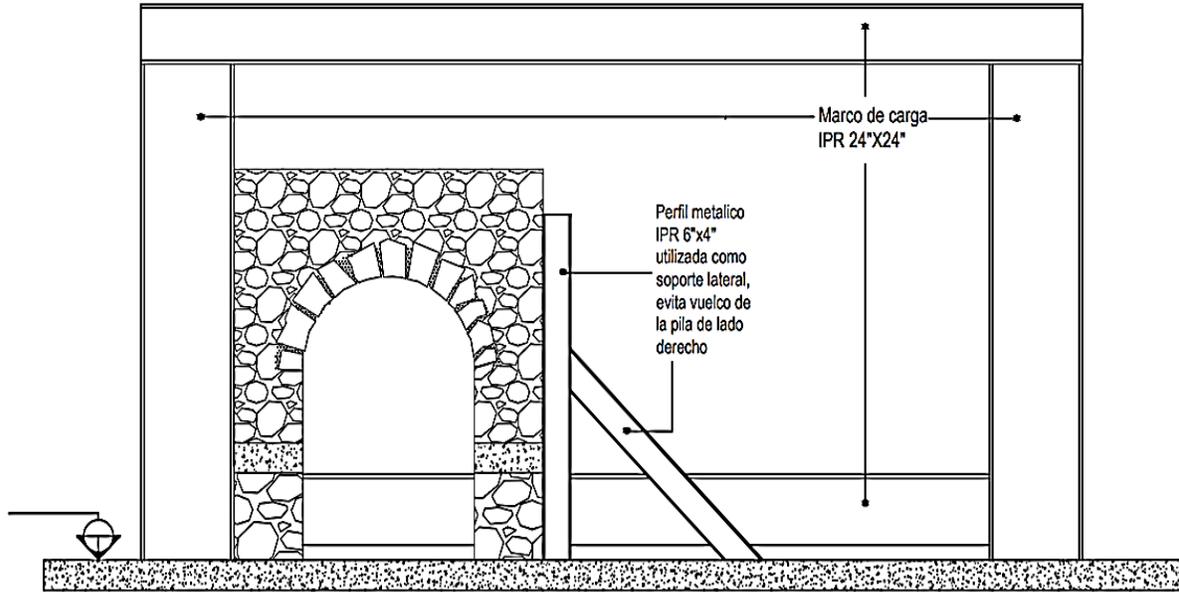


Figura 28 Proyección de modelo a escala instalado en el marco de carga. Elaboración propia.

En la figura 29, se observa un corte lateral del soporte, diseñado con el propósito de evitar el vuelco de la pila del lado derecho del modelo, consiste en 2 perfiles metálicos IPR 6"x4", instalados verticalmente, 2 perfiles IPR 6"x4", instalados en diagonal con la finalidad de reforzar la zona de la línea de impostas, agregando una mayor rigidez en el arranque del arco. Todos los perfiles están unidos con soldadura 6013 1/8.

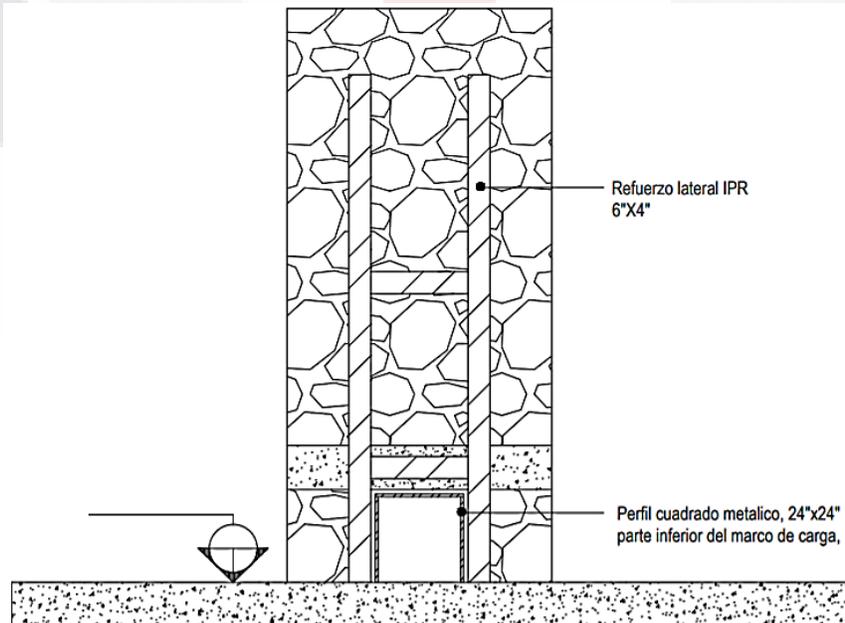


Figura 29 Restricción lateral. Elaboración propia.

#### 4.2.2.- ENSAYO FÍSICO DEL MATERIAL CONGLOMERANTE

La descripción del ensayo físico será plasmada en este escrito tal y como se realizó el procedimiento de caracterización, en la empresa "Cal Química de México S.A. de C.V.", se utilizó cal hidratada en bulto, cuenta con una caracterización realizada, está con base a la normativa ONNCCE NMX-C-003-2017 elaborada por miembros del comité técnico de normalización de productos, sistemas y servicios para la construcción:

Para la correcta ejecución del método para ensayo físico, el primer paso fue determinar la finura del material (cal hidratada) con el procedimiento que a continuación se describe:

Se tomó una muestra de 100g de cal hidratada dentro de un tamiz con malla del No. 100, misma que se colocó sobre otro tamiz con malla No. 200, se lavó el material sobre los tamices mediante un flujo de agua potable la cual se dejó fluir dentro de un tubo de manguera flexible con boquilla aspersora procurando que la presión fuera de 10 psi, una vez terminado el ensayo se separaron las mallas y se continuó con el procedimiento en la malla NO. 200.

El lavado de material se efectuó hasta que el agua que pasó a través de las mallas está lo más clara posible cuidando que el tiempo de lavado no excediera 30 minutos y a su vez se tuvo precaución de no tener acumulación de agua dentro del tamiz de la malla No. 200 ya que las aberturas se pueden obstruir y tener pérdida de material por los bordes del tamiz, se secó el material a una temperatura de 373 K (100°C) y 393 K (120°C) posteriormente se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente, cuidadosamente se retiraron los residuos de las mallas para ser pesados.

Para calcular el porcentaje de residuos retenidos en cada tamiz con base al peso original de la muestra, se sumaron los retenidos en ambos tamices, para obtener correctamente el retenido en las mallas se utilizan las siguientes expresiones:

$$\% \text{ Retenido}_{malla100} = \frac{W_1}{W_T} \quad [Formula_5]$$

$$\% \text{ Retenido}_{malla200} = \frac{W_2}{W_T} \quad [Formula_6]$$

Donde:

$$W_1 = \text{Pesoretenidomalla}_{100}$$

$$W_2 = \text{Pesoretenidomalla}_{200}$$

$$W_T = \text{PesoTotaldelaMuestra}$$

#### 4.2.3.- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ARENA CALIZA

El análisis granulométrico se realizó con la ayuda del jefe de laboratorio de la empresa "Cal Química de México S.A. de C.V.", se pasó el material (arena caliza) por la malla No. 4 retirando el total del material retenido, se tomó una muestra de 500 gr. de acuerdo a la normativa ONCE-003-ONNCCE-2017, como se muestra en la tabla 1, donde se indican las mallas utilizadas para el análisis:

Tabla 1 Resultados del tamizado de la Arena Caliza. Elaboración propia

No. Malla, (U.S. STD. Sieve)	PESO RETENIDO EN gr.	% RETENIDO
4	64	12.77
8	136	27.15
16	122	24.35
30	77	15.37
50	45	9
100	27	5.4
200	21	4.2
CHAROLA	9	1.8
SUMATORIA	501	100

Tabla 2 Datos para construir la curva granulométrica. Elaboración propia.

# Malla	Abertura (mm)	Masa retenida	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1"	25.4	0	0.00	0.00	100
3/4"	19.1	0	0.00	0.00	100
1/2"	12.7	0	0.00	0.00	100
3/8"	9.52	0	0.00	0.00	100
4	4.76	64	12.77	12.77	87.23
8	2.38	136	27.15	39.92	60.08
16	1.19	122	24.35	64.27	35.73
30	0.595	77	15.37	79.64	20.36
50	0.297	45	8.98	88.62	11.38
100	0.149	27	5.39	94.01	5.99
200	0.074	21	4.19	98.20	1.80
Charola		9	1.80	100.00	
Suma		501	100.00		

### CURVA GRANULOMÉTRICA ARENA CALIZA

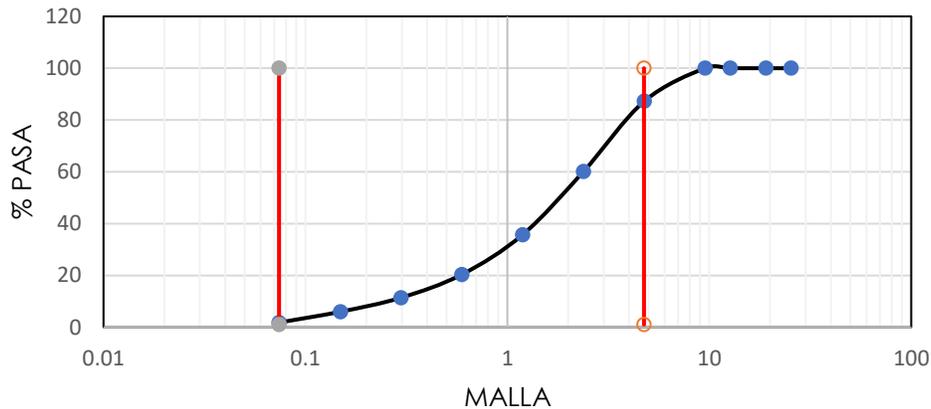


Figura 30 Curva granulométrica arena caliza. Elaboración propia.

En la curva granulométrica se puede interpretar que la mayor cantidad de material con el que estamos trabajando es arenoso, por encontrarse dentro de los límites de 0.074 mm y 4.75 mm, denotados en la gráfica con líneas verticales rojas.

#### 4.2.4.- DISEÑO DE ESTRUCTURA DE MADERA

La importancia del fraguado del mortero cal-arena caliza proporción 1:2, que se utiliza para asentar piedras en el modelo a escala, es muy alta, ya que dicho

elemento se encarga de transmitir la carga uniformemente en toda la obra de fábrica, el proceso de fraguado puede llevar de 2 hasta 3 meses según los análisis previos que se realizaron en cubos de 5 cm x 5 cm, elaborados por el autor de esta tesis, esto, nos lleva a diseñar una estructura provisional, que ayudará a soportar el arco de medio punto durante el proceso de fraguado, la cual estará conformada por 2 partes que llamaremos, cimbra falsa y cimbra contacto.

En el diseño y fabricación de cimbra falsa y cimbra de contacto, los materiales de madera que se utilizaron son los siguientes: polín de 3"x3" para puntales, barrotes de 4" x 2" para cargadores, triplay de 14 mm de espesor cortado en duelas de 10 cm de ancho que se utilizaron para cimbra de contacto, la proyección, diseño y construcción de la cimbra provisional, se realizó con base en conocimientos previos del autor de esta investigación, para la proyección se utilizó el software AutoCAD, el resultado se muestra a manera de corte constructivo en la figura 31, 32, 33.

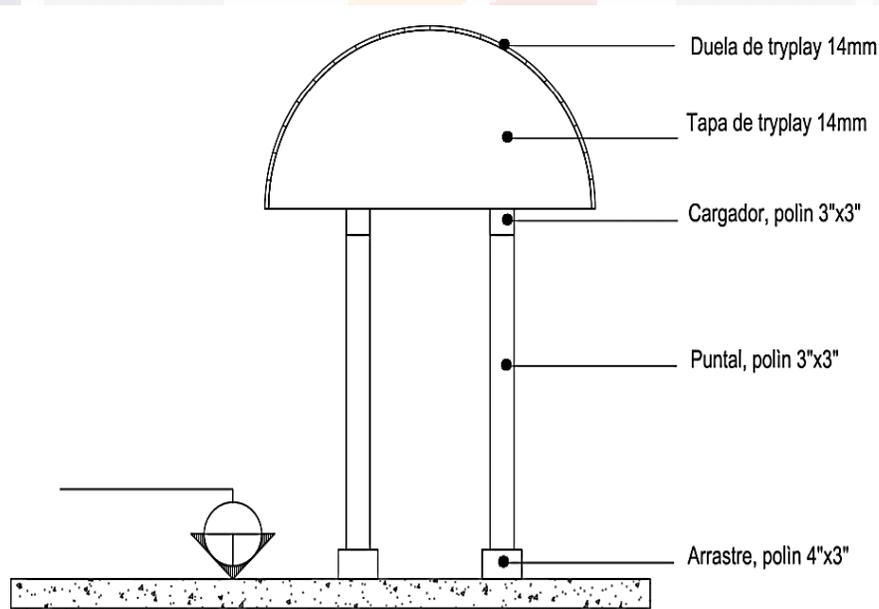


Figura 31 Corte constructivo, cimbra provisional de madera. Elaboración propia.

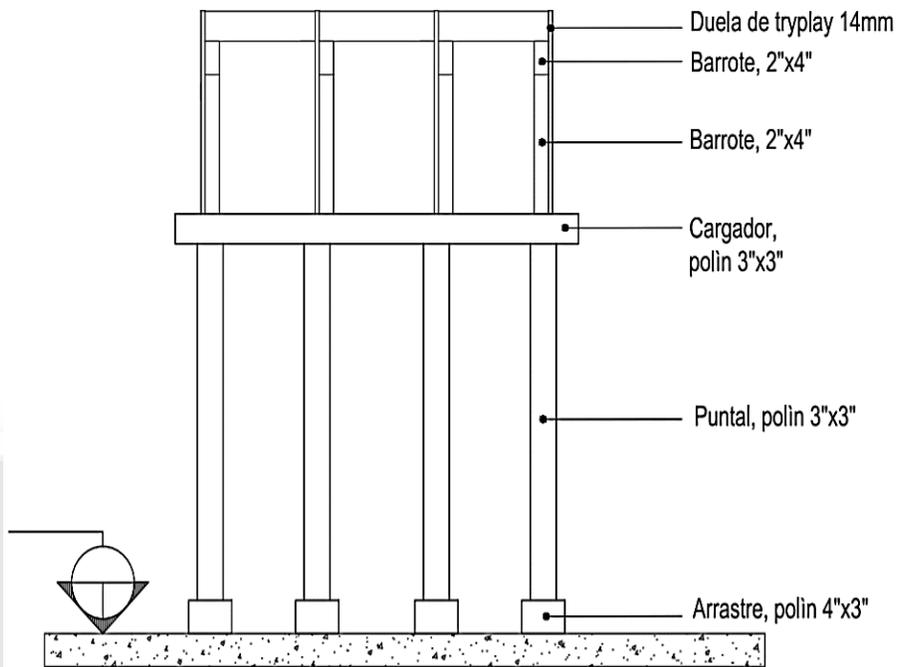


Figura 32 Corte constructivo, cimbra falsa. Elaboración propia.

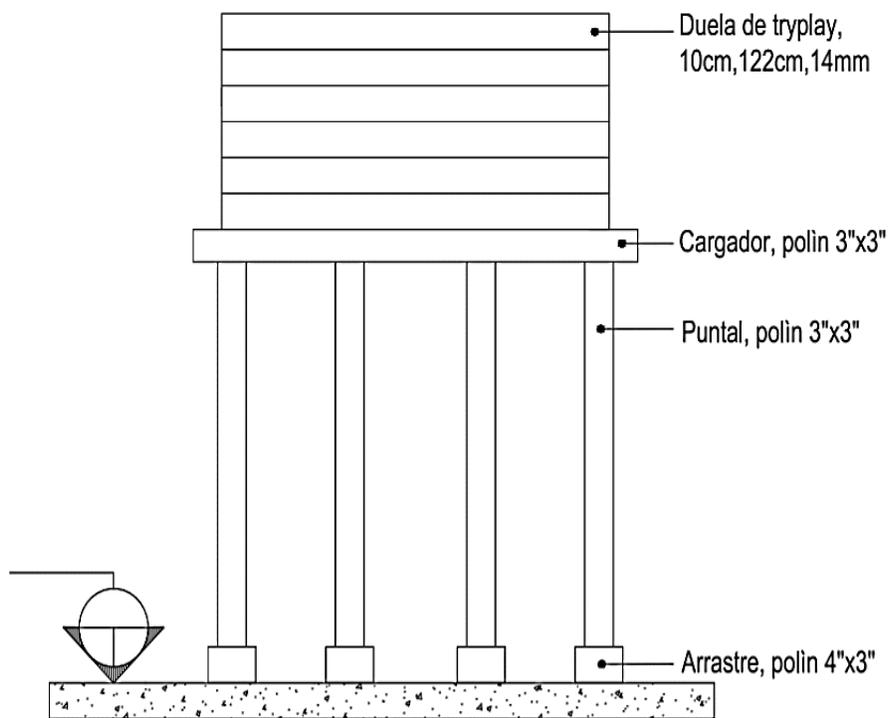


Figura 33 Corte constructivo, cimbra de contacto. Elaboración propia.



Figura 34 Cimbra provisional instalada. Elaboración propia.



Figura 35 Vista lateral cimbra de contacto. Elaboración propia.

#### 4.2.5.- RETIRO DE CIMBRA PROVISIONAL

El centro de ciencias del diseño y de la construcción, departamento de construcción y estructuras de la Universidad Autónoma de Aguascalientes presentó la investigación De Loera (2018), en esta investigación se menciona la edad preferente, donde un mortero de cal hidratada con agregado de arena caliza alcanza el punto de fraguado correcto para proceder a retirar la cimbra provisional. 3 meses después de la construcción del arco se inicia el proceso para retirar la cimbra, como se muestra en la figura 36.



Figura 36 Retiro de cimbra provisional. Elaboración propia.

#### 4.3.- INSTRUMENTACIÓN DE MODELO A ESCALA

Se pretende replicar, en la medida de lo posible, el mecanismo de aplicación de carga utilizado por Ibáñez (2002), solo con los materiales disponibles en el laboratorio de materiales, con 2 finalidades, la primera es conseguir el objetivo general de este trabajo, segunda, para evitar los momentos residuales que se puedan generar en el momento de aplicar la carga en el modelo. Se propone el mecanismo que se observa en la figura 37.

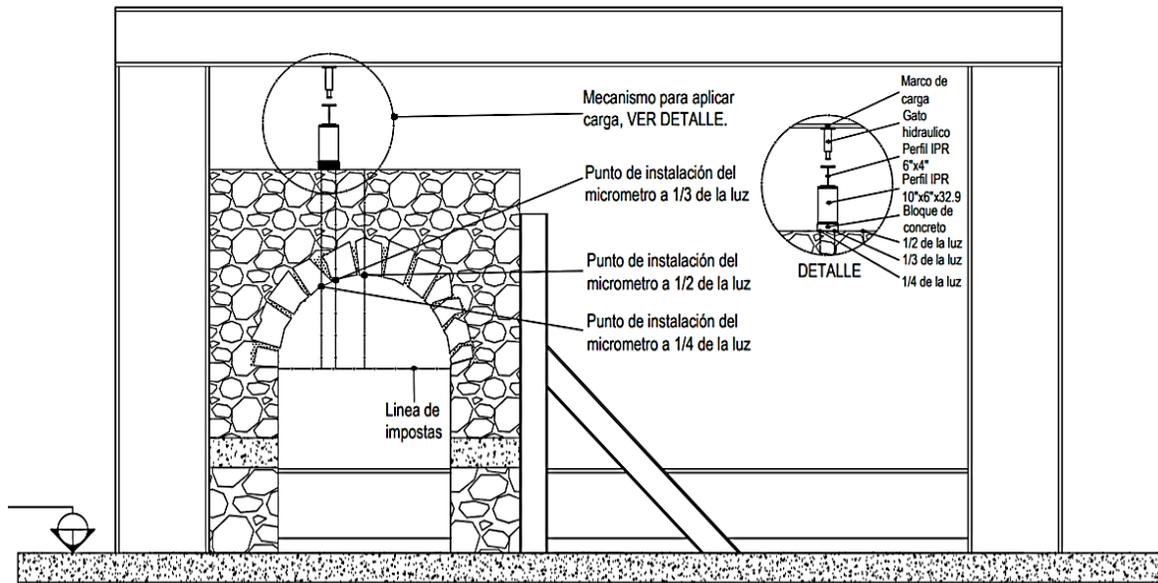


Figura 37 Esquema propuesto, contiene actuador hidráulico y puntos de aplicación de carga. Elaboración propia.

La restricción lateral servirá para impedir tanto el giro como el desplazamiento de las pilas y los riñones del arco, con el propósito de que la carga aplicada con el actuador hidráulico se puntualice totalmente en los bloques de concreto, evitando la formación de momentos residuales. En el detalle aparecen los elementos que conforman el actuador hidráulico para aplicar de carga, el gato hidráulico tiene una capacidad de 20 toneladas de las cuales se pretende aplicar únicamente 10 toneladas, según lo indica análisis previo mediante software de simulación "Abaqus", realizado con el objetivo de conocer la predicción mediante el método de los elementos finitos.



Figura 38 Modelo Instrumentado y listo para ensayo. Elaboración propia.

#### 4.4.- DETERMINAR PUNTOS DE APLICACIÓN DE CARGA

Para determinar y localizar el punto correcto, donde se debe aplicar la carga en el arco, una referencia buena es el trabajo que realizó De Marco *et al.* (2002), en el que se estableció un resultado positivo, determinando que el punto más crítico de un arco de medio punto se localiza entre  $1/3$  y  $1/4$  de la luz del mismo, de esta manera se aplica el procedimiento para trazar y como resultado localizar, con relación a la línea de impostas, el punto donde será instalado el gato hidráulico, placas y perfiles metálicos para ajuste de alturas, micrómetros que se utilizarán para la extracción de resultados, ver figura 39 y 40.

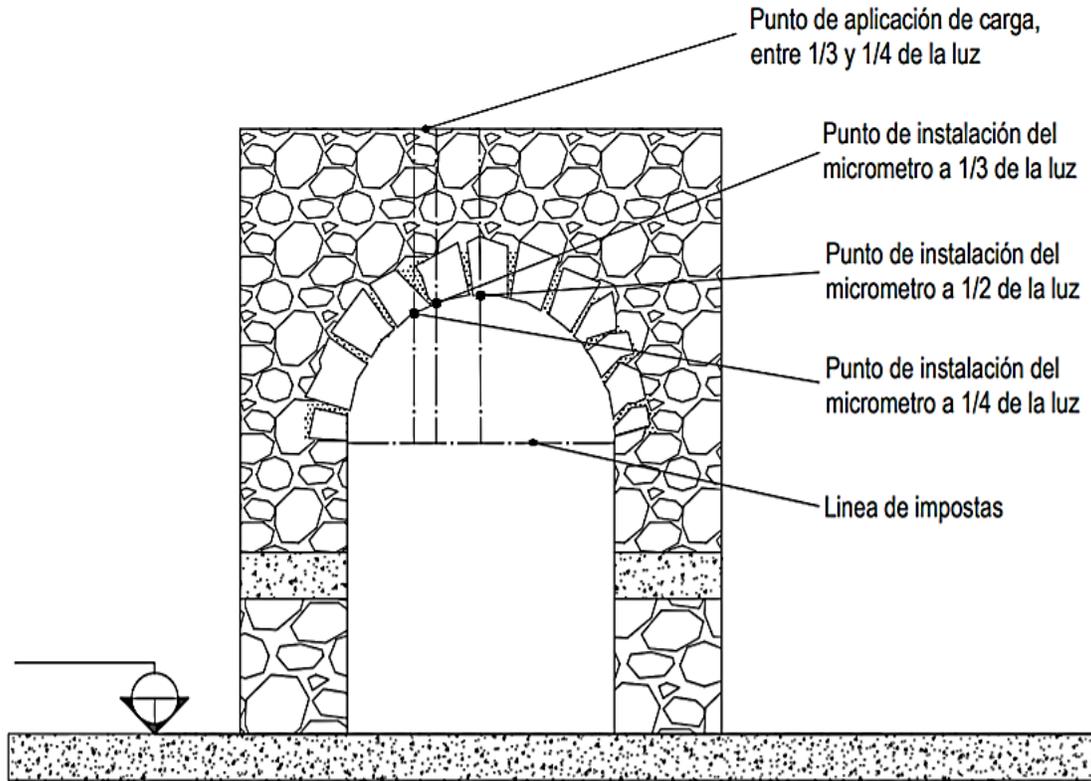


Figura 39 Trazo para determinar punto de aplicación de carga. Elaboración propia.

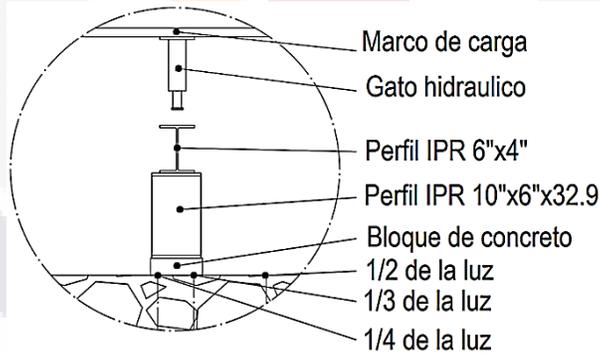


Figura 40 Detalle del mecanismo para aplicar carga. Elaboración propia.

Los equipos disponibles en el laboratorio de materiales, que se utilizaran para recolectar datos en las mediciones, son 2 micrómetros mecánicos con base magnética, para instalarlos de manera que no se genere ningún tipo de desplazamiento en el transcurso del ensayo, se utilizará el travesaño superior de una de las cabeceras del módulo de andamio colocado en la parte inferior del intradós del modelo, tal y como se puede observar en la figura 41.



Figura 41 Micrómetros instalados y dispuestos en el intradós del modelo a escala. Elaboración propia.

#### 4.5.- DETERIORO CONTROLADO DE LAS JUNTAS

La extracción de datos en la bóveda a escala, ensayada y con las juntas completamente sanas, genera la necesidad de conocer el comportamiento mecánico de la bóveda pero ahora con las juntas deterioradas, el deterioro de las juntas se conseguirá dando inicio a un proceso de envejecimiento acelerado, habilitando un raspador manual, con un fragmento rectangular de madera de 14mm de espesor, 10 cm de largo y 7 cm de ancho, con un clavo de 5" incrustado en la parte superior, Ver (Fig. 42), permite desbastar el mortero de junteo a una profundidad de 5 cm, disponiendo el intradós para continuar con el proceso de envejecimiento artificial.

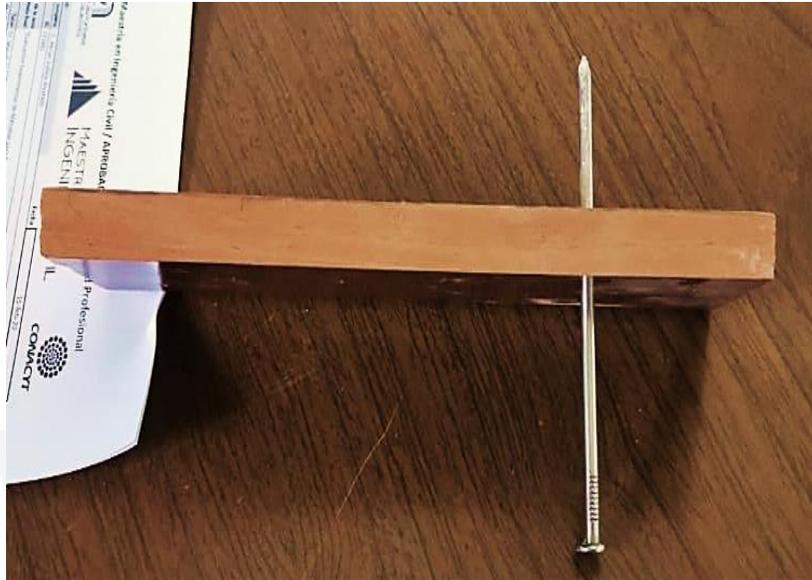


Figura 42 Raspador manual que servirá para abrir espacio en juntas, "Escantillón". Elaboración propia.

#### 4.6.- PROCESO PARA DESGASTE DE JUNTAS

La bóveda 4 de nuestro caso de estudio, además del desprendimiento parcial de sus juntas cuenta con un envejecimiento bicentenario, lo que ocasiona un efecto difícil de reproducir. Uno de los principales retos en esta investigación consistió en decidir y resolver, cual es el procedimiento adecuado para adecuar las juntas de la bóveda a escala, el objetivo es reproducir en las juntas, las características con las que cuenta la bóveda 4. Se propone un equipo hidroneumático, que se integrará a las actividades, en el momento que se preparen las juntas y cuenten con el espacio abierto y dispuesto con el escantillón.

#### 4.7.- INSTRUMENTACIÓN DEL ARCO CON JUNTA DESGASTADA

En la figura 43 se presenta el trabajo elaborado en su totalidad con el raspador manual, disponiendo de forma apropiada y con una uniformidad de 5 cm el espacio entre piedra y piedra, originando una superficie acertada para iniciar con la aplicación del método del "rajueleo".

Dado que se debe considerar la sincronía en las mediciones del sitio donde se encuentra alojado el gato hidráulico que aplicará la carga y al mismo tiempo, en el lugar donde se instalaron los micrómetros, se utilizaron cronómetros ajustados al

decisegundo. Una vez que terminó el ensayo se revisaron ambas videograbaciones con base en los cronómetros, con el propósito de obtener los datos con la mayor exactitud, el propósito es construir un par de gráficas carga-desplazamiento, en la primera gráfica se consideraron las lecturas en el micrómetro instalado a un tercio de la luz del modelo, en la segunda gráfica se construyó con las lecturas correspondientes al micrómetro instalado en el centro de la luz del modelo.



Figura 43 Intradós del modelo a escala, con la junta desgastada. Elaboración propia.

#### 4.8.- APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL RAJUELEO

Para iniciar con la aplicación del método del rajueleo, es necesario elaborar piezas de piedra de forma geométrica laminar, mismas que servirán para ser utilizadas como rajuelas integrándose en el espacio abierto previamente. Con la finalidad de dar un toque estético al método aplicado, se decidió buscar una colocación de las rajuelas con un aparejo lineal, tal como se puede apreciar en la figura 44.



Figura 44 Intradós del modelo a escala, con el método del "rajuado" aplicado. Elaboración propia.

El mortero para la aplicación del método, se utilizó una mezcla elaborada a base de arena caliza-cemento portland, en una proporción de 1:1, se usó esta dosificación con el objetivo de acelerar el proceso de fraguado en el mortero, cumpliendo en tiempo y forma con los tiempos establecidos al inicio de esta investigación.

#### 4.9.- INSTRUMENTACIÓN DEL ARCO CON JUNTA REPUESTA

Una buena referencia que se puede considerar para este último ensayo, son los ensayos realizados previamente, en los que las cabeceras del dado de andamiaje, el dispositivo para aplicar carga, los micrómetros, los cronómetros y las cámaras de videograbación funcionaron de manera correcta, se decide utilizar el mismo procedimiento descrito en los párrafos correspondientes a los ensayos previos. En

la figura 45 se aprecian todos los elementos con los que se realizó el ensayo y el momento en que se aplicó el mismo.



Figura 45 Modelo instrumentado listo para el último ensayo. Elaboración propia.



**CAPÍTULO**

**V**

**RESULTADOS**

## **5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1.- ANÁLISIS PREVIO**

Cabe mencionar que la revisión de la literatura para conocer cuáles son los estudios y trabajos, actuales o previos, que cuenten con un enfoque particular en restitución de juntas son muy limitados, esto se considera un buen resultado, ya que, en este trabajo se puede profundizar en el tema de reposición de juntas y aportar al conocimiento, independientemente de los resultados de la campaña experimental.

### **5.2.- MÉTODOS DE INTERVENCIÓN EN BÓVEDAS**

En varias pláticas con personal del INAH con el propósito de conocer los métodos existentes para la reposición de juntas, se nos proporcionaron varios documentos, de donde tomaremos el Manual El método del rajueleo o riplado, tiene un origen inmemorable según menciona personal del INAH, se nos proporcionó el Manual de Conservación de Monumentos Históricos y Arquitectura de Tierra, donde menciona un método de reposición de juntas en muros de adobe.

Particularmente en los muros que son elaborados a base de adobe, se considera un aplanado que protege los muros de la meteorización, aunque, existen casos en los que se desprende el aplanado quedando total o parcialmente expuestas las juntas iniciando el desprendimiento de las mismas. Con base en el método expuesto en este apartado se consideró que el método del rajueleo es un candidato ideal para analizarlo en el modelo a escala.

### **5.3.- CONSTRUCCIÓN DE MODELO A ESCALA**

Para presentar lo planteado en el objetivo particular B) de esta investigación, en este apartado se muestra, a través de imágenes y en ordenación alfabética, el resultado generado con la elaboración en su totalidad de las actividades programadas previamente y expuestas en el marco teórico de esta investigación.

a). – PROYECCIÓN DEL MODELO A ESCALA

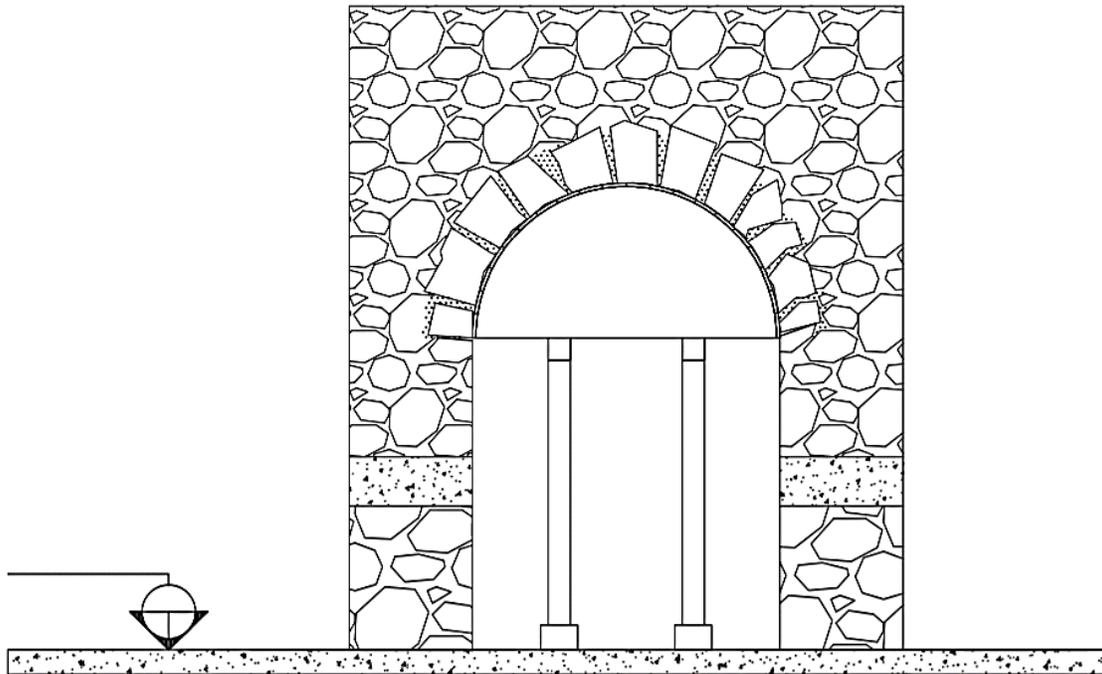


Figura 46 Proyección de modelo a escala con cimbra provisional. Elaboración propia.

Una de las principales consideraciones que se tomó en cuenta cuando se calculó cuál sería la escala conveniente para construir el modelo, fue las dimensiones disponibles en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, de esta manera, fue una proyección acertada y aprobada, para dar inicio con las actividades de replanteo.

b). – PILAS PRIMARIAS Y PILAS SECUNDARIAS



Figura 47 Desplante de pilas secundarias. Elaboración propia.

Para conseguir librar el perfil metálico inferior, que forma parte del marco de carga, como se muestra en la figura 13, fue necesario construir un par de pilas de dimensiones menores, que llamaremos pilas secundarias, si se toma como referencia las pilas de arranque del arco, (que llamaremos pilas primarias), las pilas secundarias son más pequeñas.

Se deberá conectar las pilas secundarias y las pilas primarias, para este efecto, se construyó un elemento de concreto reforzado, (ver figura 14), se pretende que la función del elemento, llamado placa de transición, ayude a absorber parte de la flexión generada al aplicar carga en la bóveda, simulando el amortiguamiento que produce el suelo cuando se desplanta una estructura directamente en el mismo, condiciones con las que cuenta nuestro caso de estudio.

Tal y como lo menciona (Roca et al. 2010), abordando los principales desafíos que se generan al replicar las estructuras históricas y las condiciones deseables que deben cumplir, los enfoques orientados al modelado y análisis de este tipo de estructuras.



Figura 48 Placa de transición entre pilas secundarias y pilas primarias. Elaboración propia.



Figura 49 Pilas a nivel, empadado con la línea de impostas. Elaboración propia.

Al tratarse de un ensayo en una obra de fábrica de piedra, si se integra un elemento de concreto, puede interferir directamente con el análisis de una manera puntual en la bóveda de mampostería, para no caer en conflictos, se considera que la pila primaria cuenta con un apoyo tipo empotramiento, semejante a la condición de apoyo de nuestro caso de estudio.

#### c). - SALMER

Una vez que se cuenta con la cimbra provisional instalada, se inicia con la construcción de la rosca del arco de medio punto, comenzamos con la instalación del salmer, es un elemento que se puede apreciar en la figura 16, colocada en el lado derecho de la imagen. El salmer debe contar con un ángulo de inclinación correcto, como lo menciona Orduña y Lourenço (2001),



Figura 50 Colocación del salmer para arranque del arco. Elaboración Propia.

Para que el salmer pueda contar con un ángulo correcto de arranque, con respecto a la línea de impostas, previamente a la instalación, se trazó una circunferencia en el suelo del laboratorio, con dimensiones idénticas a las del modelo a escala. Trazando la circunferencia completa, genera las 2 roscas necesarias para nuestro modelo, además, origina un desplante acertado de rosca.

#### d). – APAREJO

Para iniciar con la elaboración de la bóveda se tomó en cuenta un aparejo lineal, el principal cuidado y enfoque fue puntualizado en las juntas entre piedra y piedra, con la finalidad de obtener un espesor de juntas máximo de una pulgada, requisito que se cumplió satisfactoriamente.



Figura 51 Aparejo lineal. Elaboración propia.

#### e). – BÓVEDA CERRADA

En la figura 18 se muestra la bóveda completa y cerrada con un recubrimiento de mortero con un espesor de 0.5cm, la finalidad de aplicar el recubrimiento de mortero es que los mampuestos no queden expuestos directamente al relleno que dará forma junto con los tímpanos a la calzada del modelo.



Figura 52 Bóveda cerrada. Elaboración propia

#### f). – TÍMPANOS

La construcción de los tímpanos ayudó a generar un confinamiento del relleno sobre la bóveda cerrada, como se muestra en las figuras 19 y 20, que a su vez y en conjunto conformaron la calzada donde se aplicó la carga para la evaluación y análisis del método de reposición. Además, se muestra en la figura 21 el modelo con el relleno integrado sobre la bóveda.



Figura 53 Construcción de fímpanos. Elaboración propia

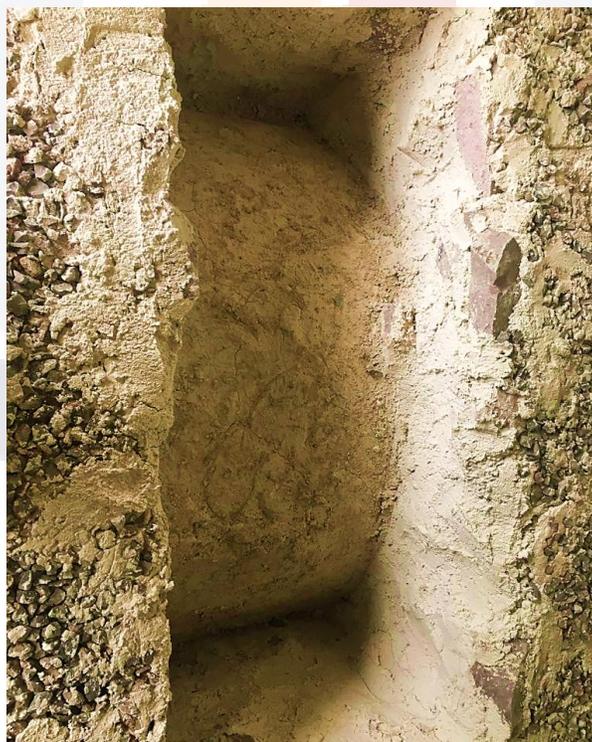


Figura 54 Vista superior del extradós. Elaboración propia.



Figura 55 Relleno compactado. Elaboración propia.

#### g). - MODELO COMPLETO

Con este apartado se cierra el capítulo correspondiente a los resultados del objetivo particular B), se puede apreciar claramente en la figura 30, intencionalmente se consideró un espacio entre el relleno y los pretilos, este espacio servirá para instalar una capa de piedra bola, que a su vez servirá como calzada y al mismo tiempo dará el enrase suficiente para empatar alturas en el modelo, tal como se muestra en la figura 22. Con la presentación del modelo a escala, se puede decir que el objetivo se alcanzó y se ejecutaron el total de las actividades correspondientes de una manera correcta. En la figura 23, se muestra el modelo completo y listo para el ensayo, después de que se alcance el fraguado necesario.



Figura 56 Calzada elaborada con piedra bola. Elaboración propia.



Figura 57 Modelo a escala durmiendo para alcanzar el fraguado correcto. Elaboración propia.

h). – DESCIMBRADO

Una vez que se cumplieron 3 meses tiempo programado para descimbrar, se inicia con el procedimiento para retirar la estructura de madera, con toda la precaución posible y sin aplicar palanca con los puntales, se obtiene un resultado favorable y se muestra en la figura



Figura 58 Descimbrado de modelo a escala. Elaboración propia.

5.4.- APLICACIÓN DE LA CARGA CON ACTUADOR HIDRAULICO

El equipo dispuesto en el laboratorio de materiales para la aplicación de la carga en el modelo a escala, es un actuador hidráulico manual de 20 toneladas, lo cual genera la necesidad de integrar un actuador hidráulico, es un conjunto de piezas que consiste en el gato hidráulico de 20 toneladas, una placa de acero de 1" de espesor, 2 vigas IPR y una viga IPR para distribución.

Para que las mediciones fueran lo más preciso posibles se instalaron 2 cámaras, la primera se ubicó en el lugar donde está instalada la palanca de acción, junto con un manómetro y un cronometro previamente ajustado.

En segundo lugar, se colocó una cámara para registrar las mediciones en el lado del modelo a escala, junto con los micrómetros y un cronómetro previamente ajustado con el primero (Ver figura 46).



Figura 59 Modelo a escala instrumentado con cámaras y micrómetros

#### 5.4.- DESPLAZAMIENTOS VERTICALES, JUNTA SANA

En este apartado se presentan los resultados obtenidos y que corresponden a las lecturas observadas en los micrómetros instalados al centro de la luz y entre 1/3 y 1/4 del modelo, además, la videograbación fue un equipo instalado y de alta importancia para los ensayos, se puede visualizar claramente el instante en el cual se generan un par de rotulas plásticas en la rosca del modelo. En las siguientes gráficas se observa el comportamiento del modelo a escala conforme pasa el tiempo en la aplicación de presión.

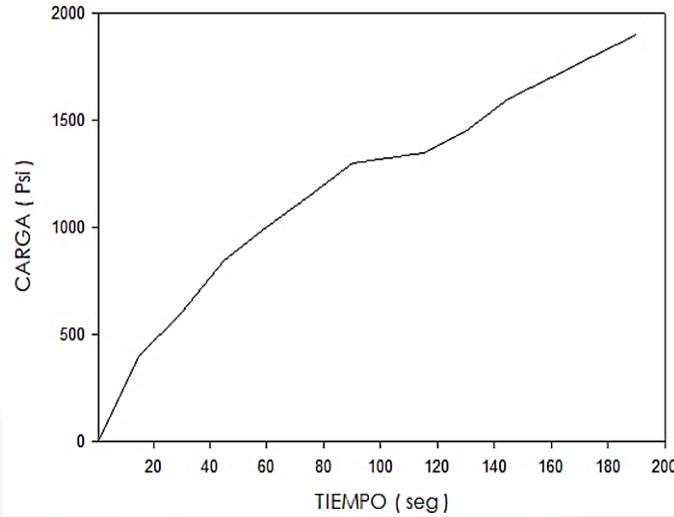


Figura 60 Gráfica que muestra el progreso de la carga conforme tiempo, junta sana. Elaboración propia

La figura 60 muestra que el tiempo de ejecución del ensayo con la junta sana, comprende un total de 190 segundos, aplicando una carga máxima de 1900 Psi, los puntos para construir la gráfica fueron tomados cada 15 segundos, cabe mencionar que se cuenta con la videograbación donde se puede apreciar claramente el instante en el que se forman 2 rotulas plásticas, instante que coincide cuando el desplazamiento vertical alcanza 40 milésimas de pulgada, (1 mm).

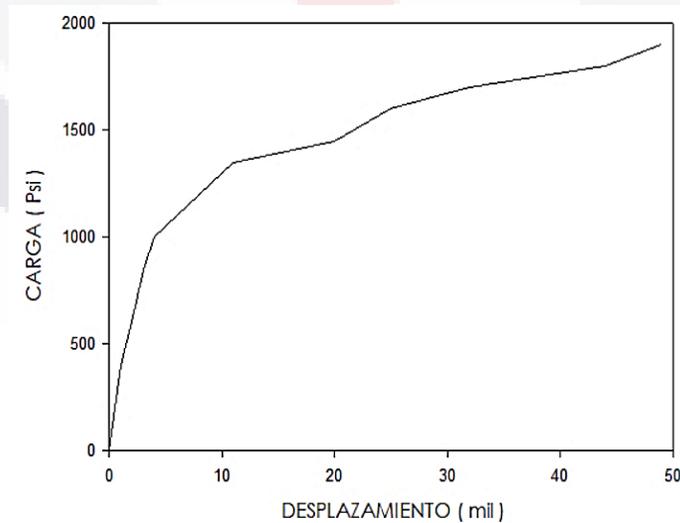


Figura 61 Grafica que muestra el desplazamiento bajo el centro de la luz del modelo con la junta sana. Elaboración propia.

La figura 61 muestra el comportamiento bajo el punto de aplicación de presión correspondiente al centro de la luz del modelo, donde, el desplazamiento vertical máximo fue de 49 milésimas de pulgada, (1.2446 mm), contra una carga máxima aplicada de 1900 Psi, respecto a las mediciones correspondientes al punto bajo la aplicación de presión instalado entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo, en la gráfica 3 se presentan las lecturas obtenidas y registradas en el micrómetro.

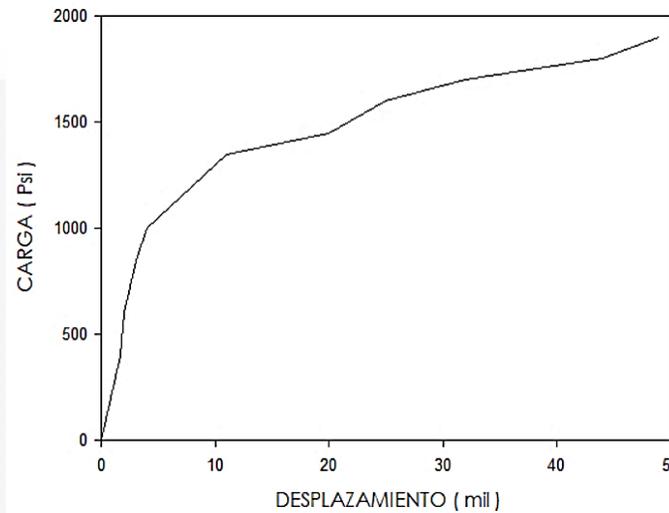


Figura 62 Grafica que muestra el desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo con la junta sana. Elaboración propia.

En las lecturas tomadas y que se observaron respecto a los desplazamientos verticales medidos en ambos micrómetros, el comportamiento es muy similar, los 2 micrómetros muestran un desplazamiento máximo de 49 milésimas de pulgada, (1.2446 mm), además, un recorrido muy parecido a lo largo del tiempo de la realización del ensayo. Una vez que se detiene la aplicación de presión en el modelo, se observó que los micrómetros no tuvieron tendencia a regresar a su posición inicial, de esta manera, se consideró que en el modelo a escala se generó una deformación irreversible.

### 5.5.- DESPLAZAMIENTO VERTICAL, JUNTA DESGASTADA

Una vez que el intradós está preparado con la junta desgastada y habilitado con la instrumentación del modelo, la cual, se menciona en el capítulo de metodología de esta investigación, los resultados del ensayo aplicado con la junta desgastada

se presentan a continuación en las siguientes tres gráficas iniciando con la figura número 63.

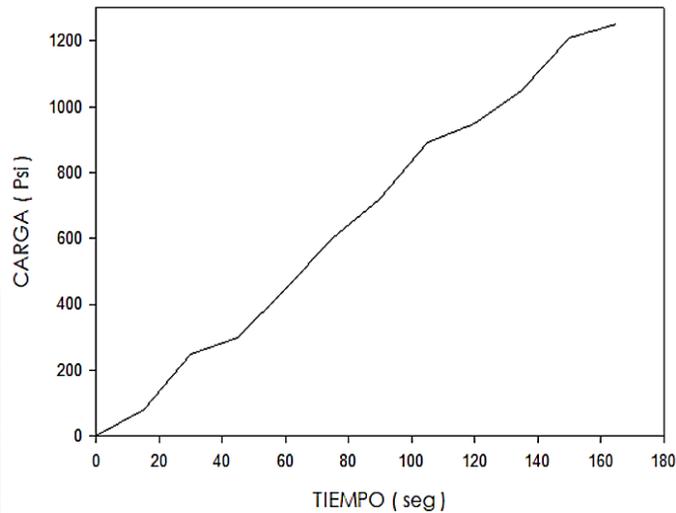


Figura 63 Grafica que muestra el progreso de la carga conforme tiempo, junta desgastada. Elaboración propia

El ensayo cuenta con un tiempo total de ejecución de 165 segundos y una presión máxima aplicada de 1250 Psi, en comparación con el primer ensayo el tiempo de ejecución se redujo en 15 segundos, se decidió interrumpir la aplicación de carga debido a la aparición de un par de rotulas plásticas, además, de ruidos extraños en el modelo, que anunciaban la fatiga o colapso del modelo.

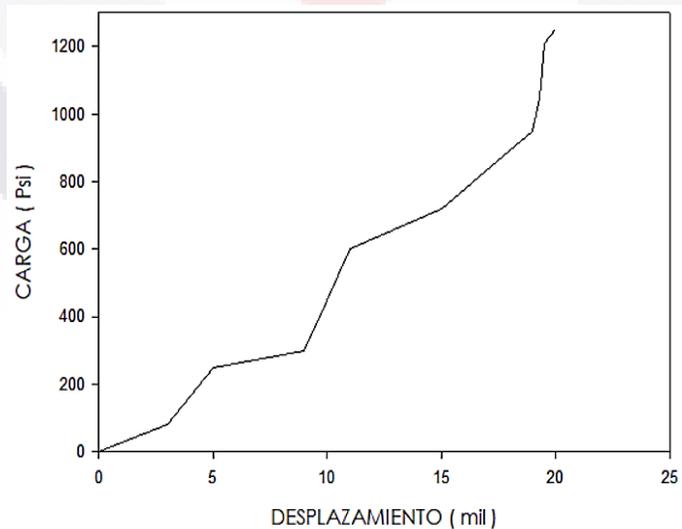


Figura 64 Grafica que muestra el Desplazamiento bajo el centro de la luz del modelo con la junta desgastada. Elaboración propia.

En la gráfica 64 se observa que el desplazamiento máximo para el ensayo con la junta desgastada, es de 20 milésimas de pulgada, (0.508 mm), reduciéndose a la mitad en comparación con el primer ensayo, mientras que la carga máxima aplicada es de 1250 Psi, observando una reducción en la lectura observada en el micrómetro, que es equivalente a un tercio si se compara con el ensayo donde el modelo cuenta con la junta totalmente sana.

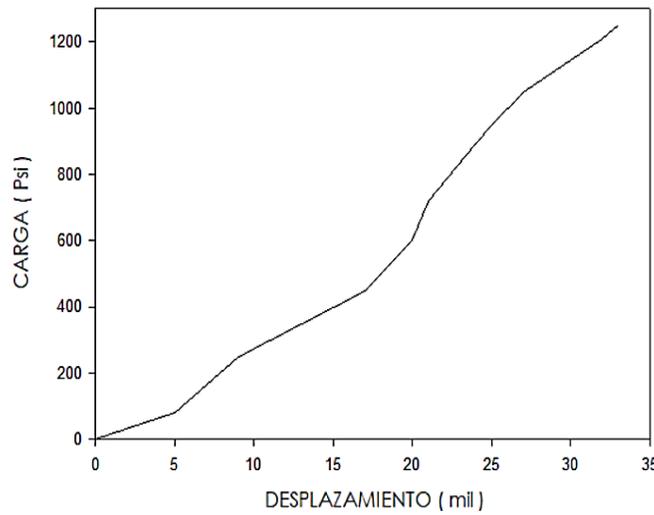


Figura 65 Gráfica que muestra el desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo con la junta desgastada. Elaboración propia.

En el micrómetro instalado entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo y con la misma carga máxima aplicada de 1250 Psi, las lecturas muestran un desplazamiento máximo de 33 milésimas de pulgada, (0.8382 mm), obteniendo variación en los resultados correspondientes al desplazamiento vertical tomando como base los 2 micrómetros instalados en el eje de la rosca del modelo.

A diferencia del primer ensayo, una vez que se descargó el modelo, ambos micrómetros regresaron a su posición original, mostrando lecturas en ceros.

### 5.6.- DESPLAZAMIENTO VERTICAL, MÉTODO DEL RAJUELO APLICADO

Previamente a este ensayo se aplicó el método del rajuelo en el intradós del modelo y se decidió esperar 7 días, con el propósito de que el mortero utilizado en la intervención, alcanzará un fraguado mínimo pero correcto, una vez más se

colocaron los instrumentos de medición y aplicación de presión, generando los siguientes resultados.

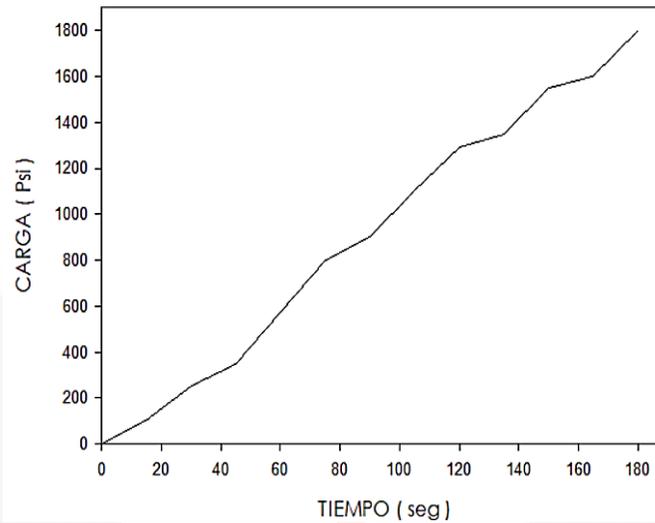


Figura 66 Gráfica que muestra el progreso de la carga conforme tiempo, método aplicado.  
Elaboración propia

El ensayo contiene una duración total de 180 segundos tal y como se puede ver en la figura 66, aplicándose una carga máxima de 1800 Psi. Se decidió interrumpir el ensayo por que el micrómetro instalado entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo sobrepasó la lectura observada en el primer ensayo, donde, el modelo contaba con la junta totalmente sana, a diferencia del micrómetro instalado en el centro de la luz del modelo, donde, se obtuvo una lectura total de solo la mitad a comparación con el ensayo número 1, los resultados correspondientes a los desplazamientos verticales en el ensayo 3, donde, el modelo cuenta con el método del rajuelo aplicado se presentan a continuación.

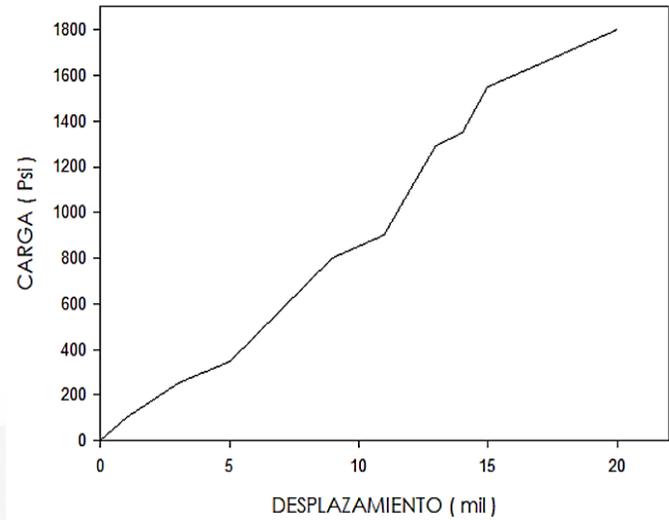


Figura 67 Gráfica que muestra el desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga en el centro de la luz del modelo con el método aplicado. Elaboración propia.

La lectura en el micrómetro correspondiente al desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga al centro de la luz del modelo, arroja un total de 20 milésimas de pulgada (0.508 mm), con una carga máxima aplicada de 1800 Psi, una vez descargado el modelo la lectura en el micrómetro al que se está haciendo referencia en este párrafo, se estaciono en 20 milésimas de pulgada, (0.254 mm).

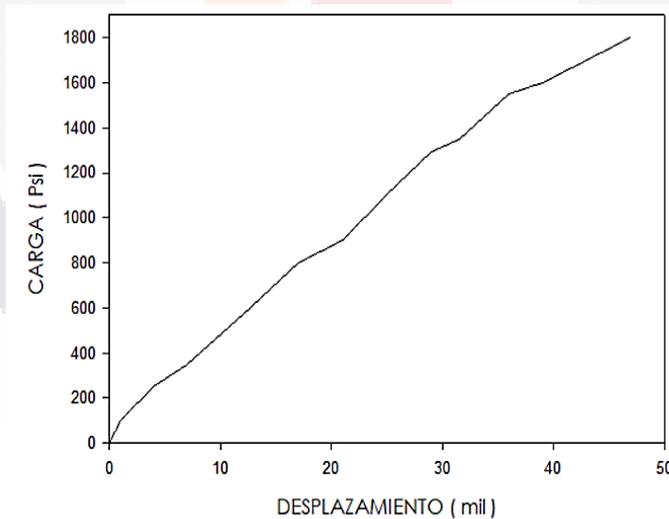


Figura 68 Gráfica que muestra el desplazamiento bajo el punto de aplicación de carga entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo con el método aplicado. Elaboración propia

La gráfica 68 presenta un desplazamiento vertical total de 47 milésimas de pulgada, (1.1938 mm), rebasando la lectura observada en el primer ensayo y 7

milésimas de pulgada más que la lectura observada en este mismo ensayo con el micrómetro instalado al centro de la luz del modelo, se aplicó una carga máxima de 1800 Psi, 100 Psi menos que en el ensayo 1. Cabe mencionar que una vez descargado el modelo el micrómetro que se utilizó para crear esta gráfica se estaciono en 10 milésimas de pulgada, (0.254 mm).

### 5.7.- AGRUPAMIENTO DE RESULTADOS

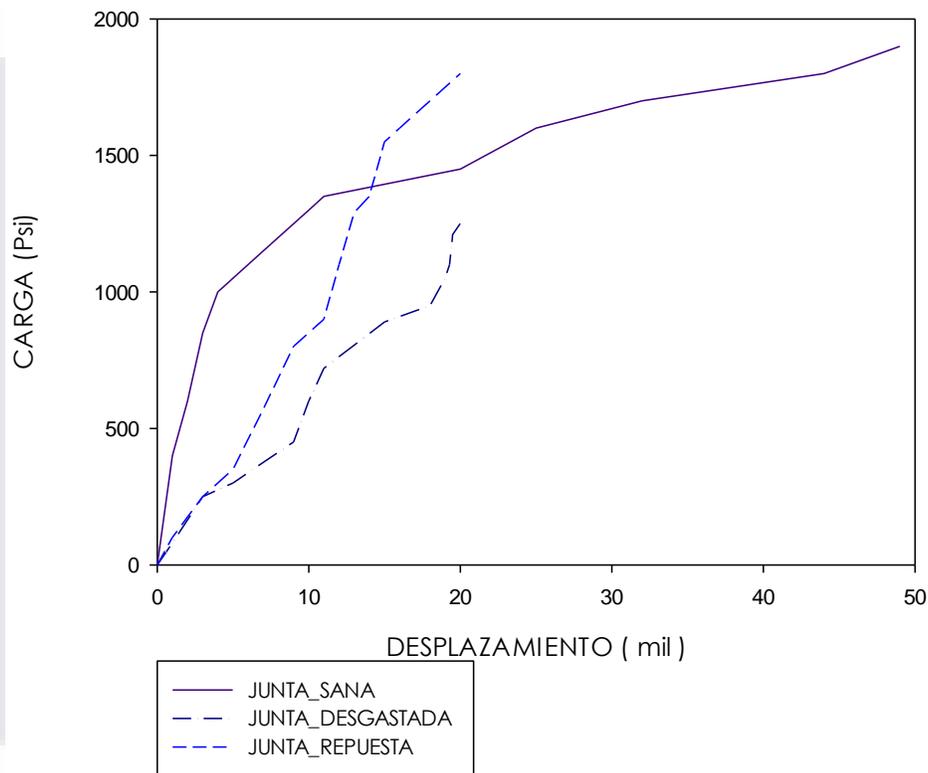


Figura 69 agrupamiento de resultados bajo el punto de aplicación de la carga al centro de la luz. Elaboración propia.

Según la figura 69 es claro el mejoramiento mecánico en el modelo a escala con el método del rajueo aplicado, consiguiendo una mejor respuesta ante la aplicación de carga, considerando un desplazamiento similar al de la junta desgastada y mayor una resistencia similar a la de la junta sana.

Respecto a los resultados correspondientes al punto bajo la aplicación de la carga entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo se presenta la figura 70, se aprecia distinguidamente el comportamiento casi lineal en el ensayo con las juntas

repuestas, es un indicador de que el método del rajueo además de brindar la oportunidad de conseguir una apariencia estética nueva y moderna, restaura las características mecánicas del elemento estructural.

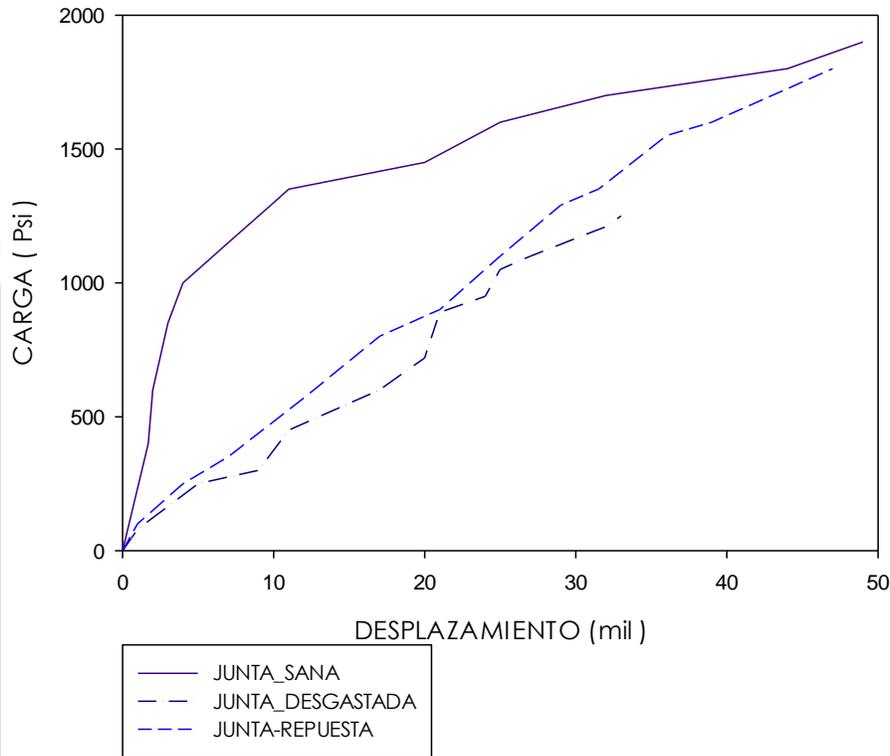


Figura 70 agrupamiento de resultados bajo el punto de aplicación de la carga entre 1/3 y 1/4 de la luz del modelo. Elaboración propia.

En la figura 70 destaca el comportamiento prácticamente lineal de la línea correspondiente al ensayo con la junta repuesta, mostrando claramente como el método del rajueo funciona perfectamente para regresar las características mecánicas al elemento estructural.

### 5.8.- ROTULAS PLASTICAS

Se crearon 2 rotula plásticas desde el inicio de los ensayos, tal y como lo advirtió el modelo realizado en el software "Abaqus", se presentan en la figura 71.



Figura 71 Rotulas plásticas generadas con la aplicación de carga. Elaboración propia.

Una vez que se finalizó el primer ensayo y descargado el modelo las lecturas de los micrómetros regresaron a su posición original quedando en ceros ambos instrumentos y observando el cierre en su totalidad de las grietas que se muestran en la figura 71 y que corresponden a la generación de un par de rotulas plásticas en ambas caras del modelo, terminando por quedar solo unas fisuras.

CAPÍTULO

**VI**

CONCLUSIONES

## 6.1.- CONCLUSIONES GENERALES

Una vez evaluado el método del rajueleo aplicado a un arco de bóveda mampostería y de acuerdo con las gráficas carga-desplazamiento presentadas en el capítulo anterior, se logró determinar que el aplicar este método en juntas dañadas permite restituir casi en su totalidad la rigidez en el elemento estructural, si bien no alcanza las características mecánicas de la bóveda no deteriorada, si sobrepasa la resistencia del elemento deteriorado. Los ensayos realizados indican que el método del rajueleo nos ofrece una menor posibilidad de colapso, la primera observación es en el ensayo con la junta totalmente sana, donde se generaron un par de rotulas plásticas, en ambas caras se puede apreciar una rotula de lado derecho y otra de lado izquierdo.

## 6.2.- CONCLUSIONES PARTICULARES

A). – Se reviso la literatura y se habló con expertos en la materia, precisamente con personal del INAH, y se logro conseguir las principales características para la correcta aplicación del método del rajueleo, se considera que el rajueleo es un procedimiento de restitución de juntas bueno, ya que, al integrar ripios entre el mortero de reparación, se logra una compresión entre el material aglutinante y las paredes de las juntas, generando una adherencia extra en la intervención.

B). – Se construyo el modelo a escala en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, luego de una proyección la escala 1:3 se considera correcta y se da inicio a la construcción. Con el propósito de utilizar materiales similares a los del caso de estudio y que fuera posible conseguirlos en la región, se suministraron los siguientes materiales, piedra braza del banco de "San Lorenzo" en Jesús María, cal hidratada en bulto y arena caliza, cabe mencionar que el agregado y el material aglutinante se consiguieron en calidad de donación por la empresa Cal Química de México S.A. de C.V.

C). – En la grafica que se muestra en la figura 69 correspondiente al punto bajo de aplicación de la carga al centro de la luz del modelo, se observa claramente como la reposición de juntas consigue mejorar en un 50% la capacidad de resistencia

mostrando un desplazamiento de 20 milésimas de pulgada contra las 40 milésimas que se observan en la curva del ensayo con la junta sana. Respecto a la curva correspondiente al ensayo con la junta desgastada se puede mencionar que la falta de juntas en el elemento estructural consigue una incertidumbre en la capacidad de carga.

La figura 70 muestra el resultado de los ensayos correspondiente al punto bajo de la aplicación de la carga instalado entre  $1/3$  y  $1/4$  de la luz del modelo a escala, mostrando un mejoramiento estructural positivo de la bóveda, consiguiendo un comportamiento prácticamente lineal, llevando la resistencia hasta los 1800 Psi, comparado con los 1900 Psi que se registraron con la junta sana. La curva correspondiente al ensayo con la junta desgastada muestra una total incertidumbre en su comportamiento mecánico, ya que, se interrumpió la aplicación de carga, debido a ruidos extraños y lecturas similares en los micrómetros a las del ensayo 1, advirtiendo un colapso del modelo a escala.

### 6.3.- NICHOS DE INVESTIGACIÓN

Debido a la pandemia COVID-19 y a la remodelación del laboratorio de materiales, los tiempos programados para el trabajo experimental sufrieron un recorte muy significativo, quedando pendiente analizar el método del rajueo utilizando mortero a base de cal.

Existen otros métodos de reposición de juntas como por ejemplo el método de inyección y el método del mortero lanzado, los cuales también deberán ser evaluados para conocer si también restituyen las características mecánicas del elemento estructural.

Si se considera que los ensayos para esta tesis son en un modelo a escala, se debe tomar en cuenta que solo es una referencia del comportamiento mecánico en nuestro caso de estudio, con base en los resultados de esta investigación se sugiere elaborar una correlación entre las cargas que soporta el puente "San Ignacio", existen factores de escala que no se pueden corroborar físicamente, ya que, en este momento nuestro caso de estudio se encuentra en restauración.

## BIBLIOGRAFIA:

- Alonso, Isabel Villaseñor, Pingarrón Barba, L. (2013). *La Cal: Historia, Propiedades y Usos*.  
[https://www.academia.edu/10460845/La\\_Cal\\_Historia\\_Propiedades\\_y\\_Usos](https://www.academia.edu/10460845/La_Cal_Historia_Propiedades_y_Usos)
- Ananía Laura, Badalá Antonio, D. G. (2016). *Seismic retrofitting of masonry vault using CFRP*. <https://dialnet-unirioja-es.dibpxy.uca.mx/servlet/articulo?codigo=6200503>
- Arizzi, A., Brümmer, M., Martín-Sánchez, I., Cultrone, G., & Viles, H. (2015). The Influence of the Type of Lime on the Hygric Behaviour and Bio-Receptivity of Hemp Lime Composites Used for Rendering Applications in Sustainable New Construction and Repair Works. *PLOS ONE*, 10(5), e0125520.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125520>
- BRUC YARDI. (2021). *Colocación de Mampostería - Bruc Jardí*.  
<https://www.brucjardi.com/colocacion-de-adoquines-y-mamposteria/colocacion-de-mamposteria/>
- Brümmer, M. (2011). Pequeña guía de la cal en la construcción y su aplicación. *EcoHabitar*. [http://www.ecohabitar.org/guia\\_de\\_aplicacion\\_de\\_la\\_cal/](http://www.ecohabitar.org/guia_de_aplicacion_de_la_cal/)
- Bustamante, R. (2017). *SISTEMAS ESTRUCTURALES DE FÁBRICA Muros de mampostería*.
- Costa, A. (2014). (9) (PDF) Reabilitação Estrutural Casos práticos de intervenção em estruturas de edifícios patrimoniais. In *Rehabilitación estructural Casos prácticos de intervención en estructuras de edificios. patrimonial*.  
[https://www.researchgate.net/publication/293652305\\_Reabilitacao\\_Estrutural\\_Casos\\_praticos\\_de\\_intervencao\\_em\\_estruturas\\_de\\_edificios\\_patrimoniais](https://www.researchgate.net/publication/293652305_Reabilitacao_Estrutural_Casos_praticos_de_intervencao_em_estruturas_de_edificios_patrimoniais)
- De, M., Presenta, C. ", José, I., De, A., Aguilera, L., Ángel, M., & Zamora, S. (2018). *CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS TESIS " CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE AGREGADOS PÉTREOS EN*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.  
<http://bdigital.dgse.uca.mx:8080/xmlui/handle/11317/1629>
- De Marco, G. (2002). *ENSAYO HASTA ROTURA DE UN PUENTE ARCO DE OBRA DE FÁBRICA CONSTRUIDO EN LABORATORIO* Germán de Marco Ibáñez Pere Roca Fabrega. Universidad Politecnica de Cataluña.
- De Marco Ibáñez, G. (2002). *Capítulo 4: Preparación y ejecución del ensayo*. Universitat Politècnica de Catalunya.  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6226>
- Flores, L. (2015). *NORMA MEXICANA NMX-C-404-ONNCCE-2012 PIEZAS PARA USO ESTRUCTURAL*.
- Gorostizaga, J. L. (2009). *Restauración y rehabilitación de bóvedas nervadas y no nervadas*.

- João, Miranda Paupério, E. (2014). No Title. In *Casos prácticos de intervención en estructuras de edificios patrimoniales*.
- Lanas, J., & Alvarez-Galindo, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1867–1876. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2)
- Loera Aguilera, J. A. de. (2018). *Caracterización mecánica de agregados pétreos en morteros de cal* [Universidad Autonoma de Aguascalientes]. <http://hdl.handle.net/11317/1629>
- Manuel, R., Valles, U., Juan, F., Junio, V., Santiago, D., & Esteve, T. (2015). *Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico*.
- Misseri, G., Rovero, L., Stipo, G., Barducci, S., Alecci, V., & De Stefano, M. (2019). Experimental and analytical investigations on sustainable and innovative strengthening systems for masonry arches. *Composite Structures*, 210, 526–537. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.054>
- Narciso. (2011). *Narciso Sánchez Sánchez Geometría de los arcos Guía para la construcción y trazado de arcos*.
- Ontiveros-Ortega, E., Rodríguez-García, R., González-Serrano, A., & Molina, L. (2018). Evolution of mechanical properties in aerial lime mortars of traditional manufacturing, the relationship between putty and powder lime. *Construction and Building Materials*, 191, 575–589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.053>
- Pozo-Antonio, J. S. (2015). Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*, 77, 472–478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115>
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pela', L. (2010a). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299–325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pela', L. (2010b). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299–325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
- Sala, E., Zanotti, C., Passoni, C., & Marini, A. (2016). Lightweight natural lime composites for rehabilitation of Historical Heritage. *Construction and Building Materials*, 125, 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.033>
- SCT. (2018). *MANUAL PARA CONSERVACIÓN DE PUENTES Y ESTRUCTURAS SIMILARES 2018*.
- Zampieri, P., Amoroso, M., & Pellegrino, C. (2019). The masonry buttressed arch on spreading support. *Structures*, 20, 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.03.008>

## GLOSARIO

**Truncar:** Interrumpir una acción o una obra, dejándola incompleta.

**Rajueleo:** Procedimiento para restituir juntas en edificaciones patrimoniales.  
**COVID-19:** Enfermedad respiratoria muy contagiosa causada por el virus SARS-CoV-2

**Incertidumbre:** Falta de seguridad, de confianza o de certeza sobre algo, especialmente cuando crea inquietud.

**Correlación:** Correspondencia o relación recíproca entre dos o más cosas o series de cosas.

**Mortero:** Conglomerado o masa constituida por arena, conglomerante y agua, que puede contener además algún aditivo.

**Bóveda:** Obra de fábrica curvada, que sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros o varios pilares.

**Junta:** pequeño espacio que queda entre las dos superficies de los sillares o ladrillos inmediatos unos a otros de una construcción que se llena de mortero o de cemento a fin de unirlos y ligarlos sólidamente.

**Desplazamiento:** cambio de posición que experimenta un cuerpo, desde un punto inicial A, hasta un punto final B, a través del movimiento.

**Aglutinante:** aquello que tiene la capacidad de conseguir que distintos elementos queden unidos entre sí.

**Rigidez:** aquello que posee la particularidad de que no puede ser doblado o que resulta riguroso, inflexible y severo.

**Restituir:** Restablecer o poner algo en el estado que antes tenía.

**Micrómetro:** Instrumento para medir con gran precisión cantidades lineales o angulares muy pequeñas.

**Grieta:** Abertura alargada y con muy poca separación entre sus bordes que se hace en la tierra o en un cuerpo sólido, generalmente de manera natural.