



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

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

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y
ESTRUCTURAS**

TESIS

**CARACTERIZACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICA DE LA MAMPOSTERÍA POR
EFECTO DEL INTEMPERISMO**

PRESENTA

MARÍA JOSÉ FONSECA MONZÓN

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN
INGENIERÍA CIVIL EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

TUTOR

DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORAL

**M. RAUDEL PADILLA CENICEROS
DR. RUBÉN ALFONSO LÓPEZ DONCEL**

AGUASCALIENTES, AGS., 17 DE SEPTIEMBRE DE 2018



UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M. EN FIL. OMAR VÁZQUEZ GLORIA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **MARÍA JOSÉ FONSECA MONZÓN** con ID 224326 quien realizó *la tesis* titulado: **CARACTERIZACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA POR EFECTO DEL INTEMPERISMO**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla, y 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 Septiembre de 2018.

DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ

Tutor de tesis

DR. RAUDEL PADILLA CENICEROS

Cotutor de tesis

DR. RUBÉN LÓPEZ DONCEL

Asesor de tesis

- c.c.p.- Interesado- María José Fonseca Monzón
- c.c.p.- Secretario de Investigación y Posgrado- Dr. Ricardo Arturo López León
- c.c.p.- Jefatura del Depto. De Construcción y Estructuras – Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez
- c.c.p.- Consejero Académico – Dr. José Ángel Ortiz Lozano
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "CARACTERIZACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA POR EFECTO DEL INTEMPERISMO".
Presentado por la sustentante: **María José Fonseca Monzón** con ID: 224326, egresada de la Maestría en Ingeniería Civil, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que la autora cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que a la interesada convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags., 25 de septiembre de 2018
"SE LUMEN PROFERRE"


M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Tutor de tesis.
~~c.c.p.-~~ Ing. María José Fonseca Monzón – Egresada de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p. - Archivo

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quisiera agradecer a mi familia, amigos, Dany, Richard y a Oscar Samano por aguantarme y apoyarme todo este tiempo, ya que sin ustedes esto no hubiera sido posible.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) y al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico y brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

Al Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, así como al Dr. Rubén López Doncel por el apoyo y conocimiento en el área de investigación.

Al Dr. Raudel Padilla Ceniceros por su ayuda sobre todo en la etapa experimental ya que sin ella tal vez esta investigación no hubiera terminara a tiempo.

Para finalizar quiero agradecer al Dr. Jesús Pacheco Martínez por darme la oportunidad de unirme a su proyecto de investigación, además de su ayuda y orientación en este tiempo que trabajamos juntos para lograr esta investigación.

DEDICATORIA

María del Carmen Monzón Ramírez

José Antonio Guadalupe Fonseca Fonseca

Oscar Ricardo Samano Zavala

Familia

Amigos

A ustedes que siempre me han impulsado a seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS 3

ÍNDICE DE FIGURAS 4

RESUMEN 6

ABSTRACT..... 7

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 9

1.1 Antecedentes..... 9

1.2 Definición del problema 10

1.3 Objetivo General..... 11

1.4 Objetivos Particulares..... 11

1.5 Alcances 11

1.6 Justificación 11

1.7 Hipótesis 12

1.8 Metodología 12

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE 15

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO 20

3.1 El patrimonio histórico y la importancia de su estudio 20

3.2 Mampostería 21

3.2.1 Generalidades 22

3.2.2 Roca..... 24

3.2.3 Mortero 25

3.2.4 Propiedades físico-mecánica de la mampostería..... 27

3.3 Intemperie..... 30

3.3 Templo de San Antonio de Padua 31

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL EXPERIMENTO | 35 |
| 4.1 Determinación del principal factor de intemperismo | 35 |
| 4.2 Determinación de propiedades mecánicas | 35 |
| CAPÍTULO V: RESULTADOS | 38 |
| 4.1 Análisis climático | 38 |
| 4.2 Caracterización física de piedra hermosa | 43 |
| 4.3 Cristalización de sales | 45 |
| CAPÍTULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS | 52 |
| CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES | 55 |
| REFERENCIAS | 56 |
| ANEXO "A" | 60 |
| ANEXO "B" | 64 |
| ANEXO "C" | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Sistemas constructivos en el Templo de San Antonio (Adaptado de Orenday,2016 y Navarro 2013). | 33 |
| Tabla 2. Resumen de las temperaturas mínimas y máximas mensuales entre los años 2010 a 2016. | 39 |
| Tabla 3. Porcentaje representativo de los meses con respecto a la precipitación anual. | 41 |
| Tabla 4. Área de afectación de las patologías exteriores del templo de San Antonio. | 43 |
| Tabla 5. Promedio de porosidad, densidad, peso seco y condiciones húmedas de la piedra hermosa. | 45 |
| Tabla 6. Valores obtenidos del módulo de Young estático por medio del método secante de la cantera hermosa. | 47 |
| Tabla 7. Valores obtenidos del coeficiente de Poisson estático por medio del método secante de la cantera hermosa. | 47 |
| Tabla 8. Transformación de módulo de Young dinámico a estático. | 50 |

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de las propiedades mecánicas en elementos de la mampostería por efecto del intemperismo. 10

Figura 2. Determinación de las caras de un sillar y disposición en los muros de sillería (Crespo, E. S. 2013). 22

Figura 3. Denominación y disposición de mampuestos (Crespo, E. S. 2013)... 23

Figura 4. Mampostería careada (a), mampostería ordinaria o de cantos concertados (b), mampostería ordinaria, cantos redondeados grandes (c), mampostería ordinaria, con mampuestos de cantera (d) Pareja. M. (1979). ... 24

Figura 5. Módulo de Young tangencial E_{tan} (a), Módulo de Young promedio E_{av} (b) y Módulo de Young secante E_{sec} (c) (Małkowski, P., & Ostrowski, Ł., 2017). 28

Figura 6. Patologías en rocas debido a su origen de deterioro. 30

Figura 7. Templo de San Antonio de Padua. (En línea, 2017)..... 31

Figura 8. Sistemas constructivos en muros de carga de la mampostería del Templo de San Antonio (Adaptado de Navarro, 2013). 32

Figura 9. Polígonos de voronoi de las estaciones meteorológicas del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (infap) (Elaboración propia). 38

Figura 10. Graficas de precipitaciones mensuales del 2010 a 2013. 40

Figura 11. Gráficas de temperaturas maximas y minimas mensuales del 2014 a 2015. 40

Figura 12. Orientación del viento predominante en la zona del templo correspondiente a los meses marzo-junio. 41

Figura 13. Orientación del viento predominante en la zona del templo correspondiente a los meses junio-octubre. 42

Figura 14. Orientación del viento predominante en la zona del templo correspondiente a los meses noviembre-diciembre. 42

Figura 15. Difractograma de rayos X de una muestra de piedra hermosa. 44

Figura 16. Fotografías de lámina delgada a) fotografía macroscópica, b) foto de microscopio con luz natural y c) foto con luz polarizada..... 44

Figura 17. Distribución de tamaño de poro y porosidad total de la piedra hermosa..... 45

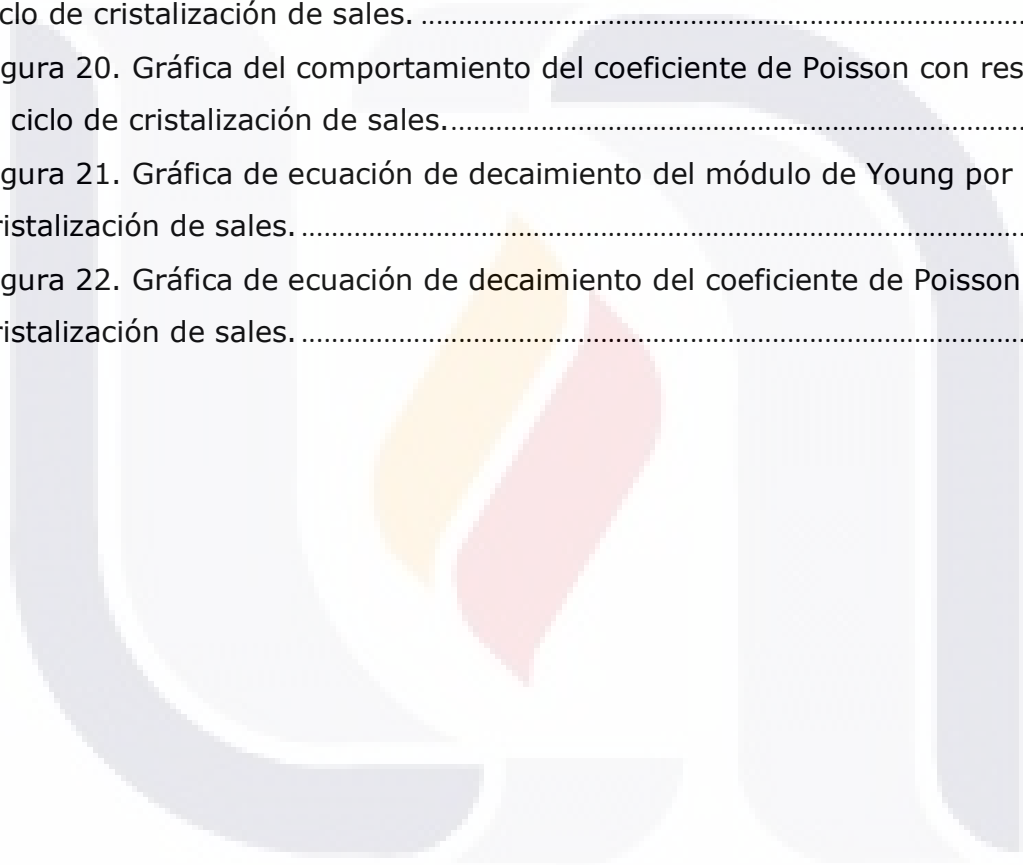
Figura 18. Variación del peso de la cantera hermosa sometida a ciclos de cristalización de sales..... 46

Figura 19. Gráfica del comportamiento del módulo de Young con respecto al ciclo de cristalización de sales..... 48

Figura 20. Gráfica del comportamiento del coeficiente de Poisson con respecto al ciclo de cristalización de sales..... 48

Figura 21. Gráfica de ecuación de decaimiento del módulo de Young por cristalización de sales..... 49

Figura 22. Gráfica de ecuación de decaimiento del coeficiente de Poisson por cristalización de sales..... 49



RESUMEN

El sistema constructivo comúnmente usado en la antigüedad fue a base de mampostería con unidades de roca por su abundancia, resistencia y durabilidad. No obstante, estos materiales sufren alteraciones en su comportamiento mecánico debido a la degradación de los mismo por distintos factores ya sean ambientales, propios de las rocas y el tiempo de exposición a ellos.

En Aguascalientes existen distintos inmuebles con mampostería a base de roca y uno de los más emblemáticos es el Templo de San Antonio de Padua por su atractivo arquitectónico y visual debido a que combina distintos estilos como el ruso, árabe, neogótico, etc. En este trabajo se presenta un estudio de los factores naturales que producen la intemperización de la mampostería del templo de San Antonio, en los resultados se muestra que el mecanismo principal de intemperización del edificio es la cristalización de sales causada por la humedad ambiental producida por lluvia y por transmisión de humedad del subsuelo por capilaridad. En el estudio se incluye además la caracterización mecánica en el laboratorio de muestras de las unidades de la mampostería de la fachada del templo, las cuales fueron sometidas a ciclos de secado y cristalización de sales (SC). Entre cada ciclo de degradación se midieron la Resistencia a la Compresión, el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson para determinar los posibles cambios de estas propiedades asociadas a la degradación por SC. Los resultados del experimento permitieron determinar una ecuación de decaimiento del Módulo de Young y Coeficiente de Poisson con la cual es posible inferir las propiedades mecánicas para diferentes niveles de degradación de la mampostería.

Palabras clave

- Templo de San Antonio de Padua
- Degradación
- Cristalización de Sales
- Propiedades mecánicas
- Modulo de Young
- Coeficiente de Poisson
- Ecuación de decaimiento

ABSTRACT

The construction system used in antiquity was masonry with rock units for its abundance, strength and durability. However, these materials suffer alterations in their mechanical behavior due to the degradation of them due to different environmental factors, typical of the rocks and the time of exposure to them.

In Aguascalientes there are different buildings with stone-based masonry and one of the most emblematic is the Temple of San Antonio de Padua for its architectural and visual appeal because it combines different styles such as Russian, Arabic, Neo-Gothic, etc. In this work a study of the natural factors that produce the weathering of the masonry of the temple of San Antonio is presented, in the results shows that the main mechanism of weathering of the building is the crystallization of salts caused by the environmental humidity produced by rain and by moisture transmission of the subsoil by capillarity. The study also includes the mechanical characterization in the laboratory of samples of the masonry units of the facade of the temple, which were subjected to drying cycles and salt crystallization (SC). Between each degradation cycle, the Compression Resistance, the Young's Modulus and the Poisson's Coefficient were measured to determine the possible changes of these properties associated to the degradation by SC. The results of the experiment allowed to determine a decay equation of Young's Modulus and Poisson's Coefficient with which it is possible to infer the mechanical properties for different levels of masonry degradation.

Keywords

• Temple of San Antonio de Padua • Degradation • Salt crystallization • Mechanical properties • Young's module • Poisson's coefficient • Decay equation

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En los últimos años la ingeniería estructural ha incluido el estudio de los monumentos históricos para determinar el comportamiento estructural del edificio ante su peso propio y ante efectos de sismos, y de esta manera contribuir en las tareas de conservación y restauración de estas construcciones (Moreno Cruz, 2011).

Un aspecto importante de estas estructuras es el material con que fueron construidas, en su mayoría es mampostería de roca y/o ladrillos unidos con morteros de cal y arena (Moreno Cruz, 2011).

Como consecuencia, el comportamiento estructural de este tipo de construcciones depende de gran medida del arreglo y disposición, así como las propiedades mecánicas de los materiales que componen la mampostería (rocas y mortero), hay que considerar que el deterioro de la mampostería afecta el comportamiento estructural global del edificio (Moreno Cruz, 2011). De ahí resulta de interés práctico y científico la caracterización del cambio en las propiedades mecánicas de las rocas por efectos de la intemperie. Sin embargo, los estudios sobre la influencia de la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales de la mampostería en el comportamiento estructural de edificios históricos son prácticamente inexistentes.

Cuando la mampostería es expuesta a los procesos de intemperismo, estos afectan las propiedades físicas de la roca y el mortero (Ver figura 1), por ejemplo, a nivel microscópico cuando la matriz o el cementante de la roca es degradada, la cohesión de los minerales que los componen quedarán débilmente unidos, lo que macroscópicamente se observa como una disminución en la resistencia a la compresión de las rocas, y en consecuencia, ocurre una disminución de la resistencia de la capacidad estructural de los edificios construidos con dicha roca. (Royo-Ochoa et al., 2010)

El conocer la afectación de la intemperie en el comportamiento de las propiedades mecánicas en función del tiempo, permitiría precisar el momento

en el que la seguridad estructural del edificio alcance un estado crítico, lo que contribuiría la toma de decisiones para el rescate de edificios en tal situación.

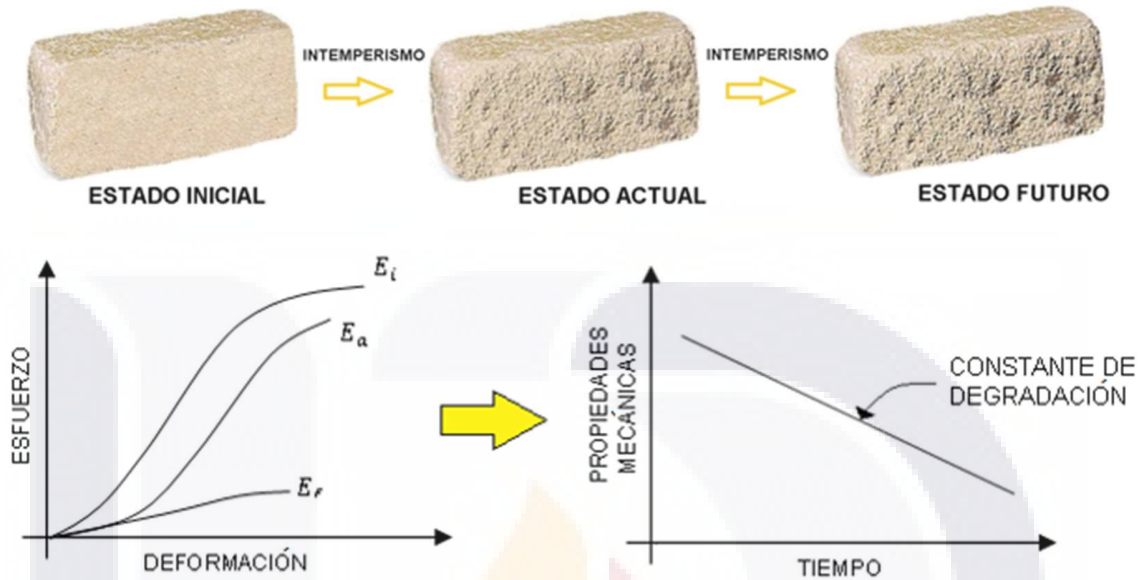


Figura 1. Variación de las propiedades mecánicas en elementos de la mampostería por efecto del intemperismo (Elaboración propia).

1.2 Definición del problema

Estudios recientes han desarrollado un modelo matemático para predecir la degradación de las propiedades mecánicas de las calizas y areniscas por efecto de intemperismo, como la cristalización de sales y cambios térmicos (Wang, Xu, Liu, & Wang, 2016), (Wang, Xu, Liu, Liu, & Wang, 2016), (Bayram, 2012), (Heidari, Torabi-Kaveh, & Mohseni, 2016). Estas investigaciones en su mayoría se concentran en los efectos del cambio de temperatura como el principal proceso de intemperismo de las rocas, sin embargo, no se ha investigado la degradación de las propiedades mecánicas de la mampostería considerada como un material compuesto de roca y mortero. Por otro lado, en la investigación actual se demostró que la cristalización de sales es el intemperismo predominante en la zona de Aguascalientes, por lo que es esencial este tipo de caracterización que permita estimar el comportamiento estructural de edificios patrimoniales de mampostería.

1.3 Objetivo General

El objetivo general de esta tesis fue la caracterización de la degradación mecánica por intemperismo en función del tiempo de la mampostería de edificios patrimoniales.

1.4 Objetivos Particulares

1. Revisar del estado del arte de los trabajos realizados hasta el momento con relación al tema.
2. Determinar el diseño experimental para simular la degradación de los materiales de construcción del Templo de San Antonio, Ags.
3. Realizar pruebas preliminares y determinar del número de pruebas representativas.
4. Caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales ensayados para las diferentes etapas de degradación.
5. Analizar la información generada y de resultados experimentales.
6. Presentar los resultados en congreso nacional o internacional y/o escritura de artículo científico.

1.5 Alcances

Las propiedades mecánicas que se caracterizarán serán la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad de los materiales del templo de San Antonio, particularmente la mampostería del material localmente conocido como "matacán", y de la "piedra hermosa" verde/amarilla de la fachada del templo, debido a que estos dos materiales son rocas porosas fácilmente intemperizables.

1.6 Justificación

La mampostería ha sido el sistema constructivo más usado por generaciones debido a su durabilidad y a la facilidad de obtención del material. Sus componentes han cambiado a través del tiempo y dependiendo de la región geográfica. Se han usado desde piedras unidas con mortero de cal usadas por las civilizaciones antiguas hasta los tabiques de concreto en la actualidad. Sin

embargo, al estar en contacto directo con el ambiente exterior la mampostería está expuesta a ataques de agentes contaminantes y al mismo cambio climático, factores que alteran su comportamiento y estabilidad.

Actualmente existe un interés en la ingeniería estructural por conocer el efecto de la degradación de los materiales en el comportamiento de las estructuras, especialmente en los monumentos históricos.

El conocer los efectos del intemperismo en las propiedades mecánicas de los materiales que componen la mampostería en función del tiempo facilitará la comprensión del comportamiento estructural global del patrimonio y contribuir a su conservación y restauración.

1.7 Hipótesis

Existe una constante de degradación para cada material que permite predecir su comportamiento mecánico en lo que resta su vida útil.

1.8 Metodología

La metodología aplicada fue teórico-experimental, incluyó campañas de caracterización de propiedades mecánicas de la mampostería en laboratorio, y de adquisición de datos en el templo a estudiar para caracterizar los agentes de intemperización, principalmente el relacionado con la cristalización de sales.

Se analizaron datos de las temperaturas, humedad relativa y precipitación para determinar las condiciones del intemperismo predominante que afecta a los monumentos históricos de la zona de Aguascalientes, y en particular al templo de San Antonio.

En canteras locales, se extrajeron materiales similares a los que conforman el templo de San Antonio, debido a que no se permitió extraer muestras directamente del templo. A las piedras areniscas localmente conocidas como matacán y piedra hermosa se les realizó pruebas estandarizadas de petrografía y físico-mecánicas para saber la condición que tuvieron los materiales del templo cuando fue edificado.

De acuerdo a los datos climatológicos recabados de Aguascalientes se determinó los agentes de intemperismo que afectan al templo de San Antonio, en primera instancia se hipotetizó que el intemperismo predominante era la cristalización de sales por capilaridad. Es por ello que se planeó realizar pruebas de cristalización de sales a las probetas de cada material que componen mampostería de la nave principal (matacán y mortero) y la mampostería a hueso de la fachada principal (piedra hermosa), midiendo las características mecánicas entre los ciclos para determinar los probables cambios asociados a cada ciclo de degradación.

Por medio de regresión polinómica aplicado a los datos de las propiedades mecánicas de las rocas se determinó una ecuación que representa el comportamiento de la degradación de la roca y por medio de una expresión matemática la relación del mortero con la roca para conocer el comportamiento de la mampostería. La ecuación determinada (ecuación de decaimiento) está en función de las características mecánicas de la mampostería de piedra (módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson) y del tiempo. La ecuación de degradación contra tiempo incluyó la historia del material desde el inicio de su construcción hasta el punto en que las propiedades mecánicas representen un riesgo para el edificio.

Por otra parte, se cuenta con información de las propiedades mecánicas de los materiales del templo en su condición de degradación actual. Estos datos sirvieron como entrada en la ecuación de decaimiento para determinar cuál es el nivel de degradación actual de los materiales del templo.



CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

Recientemente se le ha dado gran importancia a la conservación de los edificios patrimoniales, y uno de sus desafíos es la evaluación estructural de los mismos ya que en su mayoría están compuestos de materiales de comportamiento muy heterogéneo. Además, el efecto del intemperismo, hace que las propiedades mecánicas de los materiales de los elementos estructurales del edificio se degraden con el paso del tiempo.

Son distintas las investigaciones que se han llevado a cabo con respecto a los efectos del intemperismo en elementos de mampostería. Están dirigidos a caracterizar el comportamiento de las rocas por ser el material usado generalmente en los monumentos históricos. Estas construcciones están sujetas a varios tipos de intemperismo que pueden ocasionar la destrucción de la mampostería, entre los más comunes además de los diferentes daños ocasionados por la humedad, la cristalización de sales y efectos debidos a cambios térmicos.

Bayram (2012) llevo a cabo un estudio para la predicción del porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión uniaxial en rocas calizas intactas. El estudio consistió en caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de 9 piedras calizas de diferentes áreas de Turquía con el fin de comparar sus porcentajes de pérdida de compresión uniaxial antes, durante y después de los ciclos de congelamiento-descongelamiento. El porcentaje de pérdida se correlacionó estadísticamente con 7 propiedades de la roca intacta (resistencia a la compresión uniaxial (UCS), resistencia a la tracción de Brasil (TS), resistencia a la flexibilidad (FS), resistencia al impacto (IS), módulo de elasticidad (E), porosidad aparente (AP) y absorción de agua (WA)). Se concluyó que la ecuación obtenida para calcular el porcentaje de pérdida en la resistencia a la compresión uniaxial $UCS = -20.55 - 1.2915IS + 2.13E - 3.9WA$ solo es válida para las calizas provenientes de las mismas canteras y que tiene similares propiedades de la roca.

Mutlutürk et al (2004) desarrollaron un modelo matemático de decaimiento de la pérdida de integridad de las rocas en Isparta, Turquía. Se realizó un experimento en laboratorio que consistió en realizar 50 ciclos calor-frio (H-C) y congelamiento-descongelamiento (F-T) a 10 distintas de rocas (sedimentarias, metamórficas e ígneas) en donde se evaluaba la integridad de la roca mediante dureza elástica de los materiales (dureza shore, SH) este parámetro fue medido después de 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50 ciclos de F-T y H-C. Con los datos experimentales se ajustó una ecuación que proporciona varios parámetros significativos (decaimiento (λ) y vida media ($N_{1/2}$)) para la desintegración de la roca o la durabilidad de la roca bajo la acción recurrente F-T o H-C.

Ghobadi & Babazadeh (2015) evaluaron el comportamiento de areniscas de la zona de Qazvin (oeste de Irán) por efecto del intemperismo. En este estudio se analizaron 9 muestras bajo procesos acelerados de cristalización de sales (SC), congelación-descongelación (F-T), calentamiento-enfriamiento (H-C) y calentamiento-enfriamiento-humedecimiento (H-C-W). Se evaluaron los cambios del peso de la muestra, de la velocidad de onda p, de la resistencia a la compresión uniaxial y de la resistencia a carga puntual, después de varios ciclos de degradación de la muestra. Los resultados indican que rocas de la misma capa estratigráfica pueden mostrar diferencias importantes en el grado de intemperización, y que su sensibilidad a los procesos de intemperización son diferentes. Además, la función de decaimiento reveló la sensibilidad de las areniscas a la cristalización de la sal. Se obtuvieron valores de desintegración relativamente más altos para las muestras sometidas a cristalización de sales, en comparación con muestras sometidas a ensayos de congelación-descongelación, calentamiento-enfriamiento y calentamiento-enfriamiento-humedecimiento.

Heidari et al (2016) evaluaron los efectos de procesos acelerados de envejecimiento en rocas calizas. Se obtuvieron muestras frescas en canteras de Chelmaran ya que es la cantera principal usada en el templo de piedra Anahita de Kangavar al oeste de Irán. Se evaluaron las siguientes propiedades físico-mecánicas de las rocas: porosidad, velocidad de onda p, índice de resistencia a

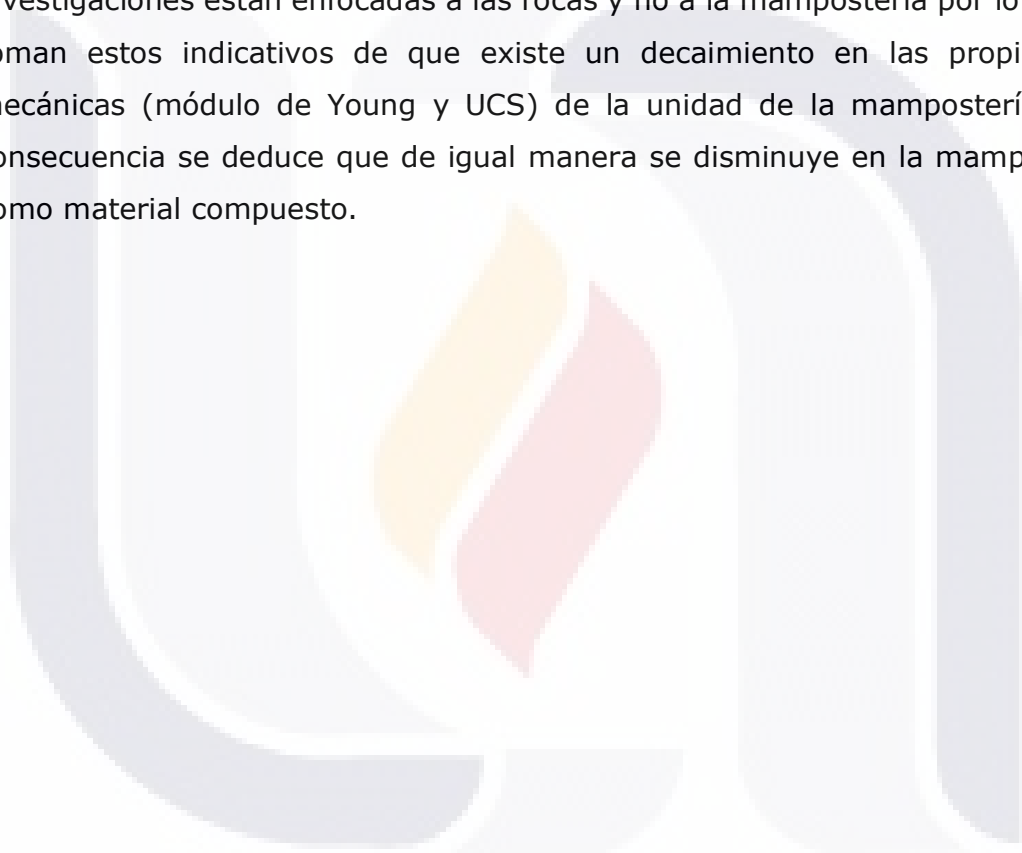
carga puntual, resistencia a la tracción de Brasil, resistencia a la flexibilidad, resistencia a la compresión uniaxial, antes y después de cierto número de ciclos de congelamiento-descongelamiento y cristalización de sales.

Mediante métodos estadísticos se correlacionaron estas propiedades para crear ecuaciones para predecir el comportamiento tanto para ciclos de congelamiento-descongelamiento como de cristalización de sales. La prueba de congelación-descongelación disminuyó los valores de la UCS, BTS, I_{s50} y V_p y aumentó la porosidad de los especímenes. Los resultados indican un efecto adverso considerable de la cristalización de sales de sulfato sódico sobre las propiedades físicas y mecánicas de los especímenes. Los valores de la UCS, BTS, I_{s50} y V_p después del 16º ciclo disminuyeron significativamente debido a la acumulación de sales. Además, se encontró que el efecto de cristalización de la sal era más destructivo que los ciclos de congelación-descongelación.

Wang, Xu, Liu, & Wang (2016) y Wang, Xu, Liu, Liu, et al. (2016) estudiaron el efecto del intemperismo en las propiedades mecánicas-dinámicas de rocas (areniscas). En su trabajo consideran como un factor clave a la velocidad de deformación usada para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Las cuales podrían cambiar sustancialmente dependiendo de la velocidad de aplicación de la deformación en las pruebas de laboratorio. De ahí que en la ecuación propuesta por Mutlutürk et al (2004), la constante de decaimiento y vida media, se consideró en como una función de la velocidad de deformación ($\lambda = \lambda_{(\dot{\epsilon})}$).

Se consiguió predecir la degradación de las propiedades mecánicas dinámicas de la roca ensayada, causada por ciclos de congelación-descongelación. Los modelos de la función de decaimiento propuestos incluyeron el efecto de la velocidad de deformación. La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el módulo de elasticidad dinámico (E_d) fueron seleccionados como los índices de integridad de los modelos de la función de decaimiento.

Se ha determinado una constante de decaimiento con respecto a la velocidad de deformación de las propiedades mecánicas de rocas por distintos mecanismos de degradación como SC, F-T, H-C y H-C-W. Se ha visto que los cambios en las propiedades físicas-mecánicas de las rocas pueden estar relacionadas directamente con la capacidad de resistencia de la misma y se han desarrollado ecuaciones de decaimiento en las propiedades físico-mecánicas de las rocas con relación al grado de degradación por SC y F-T. No obstante, estas investigaciones están enfocadas a las rocas y no a la mampostería por lo que se toman estos indicativos de que existe un decaimiento en las propiedades mecánicas (módulo de Young y UCS) de la unidad de la mampostería y en consecuencia se deduce que de igual manera se disminuye en la mampostería como material compuesto.





CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 El patrimonio histórico y la importancia de su estudio

La UNESCO define el patrimonio cultural como el conjunto de bienes muebles e inmuebles, materiales e inmateriales, de propiedad de particulares o de instituciones u organismos públicos o semipúblicos que tengan valor excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte, de la ciencia y de la cultura y por lo tanto sean dignos de ser considerados y conservados para la nación. (Garré, F., 2001).

Uno de los elementos destacados del patrimonio cultural para nuestra área es el patrimonio construido, sin embargo, tuvieron que pasar alrededor de dos siglos para poder llegar a este término, ya que desde el siglo XVIII hasta las primeras décadas del siglo XX el concepto que se percibía de los monumentos arquitectónicos quedaba reducido a aquellos bienes con un valor histórico, estético o simbólico relevante (Azkarate, A., Ruiz, M., Santana, A. 2003).

Son considerables los acuerdos, recomendaciones y cartas internacionales acerca de los monumentos patrimoniales, con el fin de establecer consideraciones importantes con respecto al reconocimiento de patrimonios, sus conceptos y la implementación de metodologías de restauración, conservación y protección. Pasando por la Carta de Atenas para la Restauración de Monumentos Históricos (1931) orientada a legislaciones para la protección de *monumentos de interés artístico, histórico o científico*, la Carta de Venecia (1965) donde establece como definición de monumento histórico tanto aquella *arquitectura aislada como el conjunto urbano o rural que da testimonio de una civilización particular, de una evolución significativa o de un acontecimiento histórico*. La Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico (1975) que retoma los ideales de la Carta de Venecia y además establece recomendaciones para los gobiernos con planificaciones legislativas, administrativas, financieras y educativas para la conservación integral de los patrimonios, así como la integración de los ciudadanos y la vida social para su conservación.

No fue sino hasta al final del siglo XX donde comenzó una nueva perspectiva con la Carta de Cracovia (2000) donde se habla acerca del *patrimonio construido o edificado* en el cual engloba en su conjunto tanto el *patrimonio arquitectónico, urbano y paisajismo*, en esta última carta se hace hincapié en que los instrumentos, métodos o técnicas de *conservación o protección deben estar estrictamente vinculadas a la investigación pluridisciplinar científica sobre materiales y tecnologías usadas para la construcción, reparación y/o restauración del patrimonio edificado*.

Estas consideraciones en la conservación del patrimonio construido son de gran relevancia ya que una alteración sustancial en su estilo repercute directamente en la sociedad, debido a que se considera como un *signo de identidad y soporte de la memoria histórica* de la humanidad (Carta de Atena, 1931).

Son varios los beneficios sociales y económicos que pueden proporcionar el patrimonio construido, por ejemplo, una función del patrimonio es tener la posibilidad del acceso y apreciación del mismo, puesto que *cada generación le da una interpretación diferente a su pasado y extrae de él ideas nuevas* (Carta Europea, 1975). Otra apreciación es su potencial como fuente de turismo cultural, es verdad que la valoración por el patrimonio construido ha sido de interés desde la antigüedad, pero no es hasta años recientes que el turismo se convirtió en la mayor industria generadora de grandes ingresos para las comunidades (Garré, F., 2001).

Es de allí que actualmente los trabajos de conservación, protección y restauración recurren a estudios previos que diagnostiquen la salud del patrimonio edificado, *imponiendo gradualmente una metodología científica y respetuosa* al patrimonio (Garré, F., 2001).

3.2 Mampostería

En su mayoría el patrimonio edificado está conformado por construcciones de fábrica. Las cuales son obras realizadas con materiales pétreos (de roca) unidos entre sí con aglutinantes (morteros) de una manera determinada, o sea con una

especial disposición que llamamos aparejo. Así, cuando decimos un muro de fábrica de ladrillos, queremos indicar que este muro está con ladrillos dispuestos de acuerdo con un aparejo o sistema determinado (Pareja, M. 1979)

3.2.1 Generalidades

Desde la antigüedad la roca extraída de canteras es el elemento principal de la mampostería de fábrica debido a su durabilidad, resistencia y su disponibilidad en la época. Las formas comúnmente comerciales de estos elementos son:

- Sillar. - Es un bloque o elemento con forma prismática recta, es decir, con forma de paralelepípedo rectangular en el que sus tres dimensiones son del mismo orden o muy parecidas, como máxima relación de lados 1:1:2, generalmente es grande y por lo tanto pesado, por lo que se necesitan medios mecánicos para su manipulación y colocación. La labra de todas las superficies del sillar será perfecta. Los parámetros vistos tendrán una labra fina. La cara posterior, o trasdós, del sillar podrá tener labra basta, pero hay que tener presente que nunca deben quedar resaltos u oquedades de más de 4 cm (Crespo, E. S. 2013).
- Sillarejo. Es un sillar pequeño de forma más o menos regular, pero sensiblemente paralelepipedica, y generalmente con labra basta (ver figura 2) (Crespo, E. S. 2013).

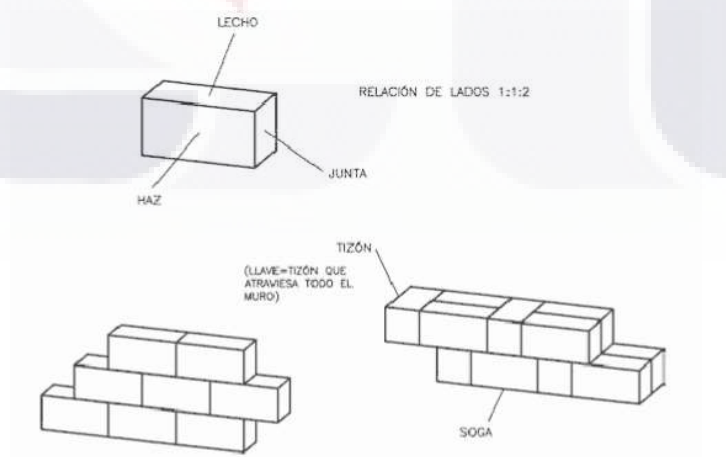


Figura 2. Determinación de las caras de un sillar y disposición en los muros de sillaría (Crespo, E. S. 2013).

- Mampuesto. Roca con forma irregular, generalmente sin forma definida, excepto en algunos casos, que se aproxima a un prisma. Puede ser sin labra o con poca labra, que se maneja a mano. La dimensión menor suele ser >12 cm. aunque a veces es difícilmente medible. Como relleno o complemento son utilizados piedras de menor tamaño llamados ripio o perpiaño (ver figura 3) (Crespo, E. S. 2013).



Figura 3. Denominación y disposición de mampuestos (Crespo, E. S. 2013).

Otros elementos usados son losas o chapas, adoquín, peldaño y dovelas; los primeros utilizados para revestimientos o pavimentación, y los dos últimos para la construcción de escalones y arcos, respectivamente.

De acuerdo a estos elementos los muros de los edificios históricos pueden clasificarse en tres tipos de fábrica: fábrica de sillería, fábrica de sillarejo y fábrica de mampostería. Este último se clasifica en:

- Mampostería ordinaria. - Mampuestos de cantera asentadas en seco (sin mortero) o mortero, se colocan por hiladas más o menos horizontales, trabándose con trozos de roca más pequeños, que se conocen con los nombres de cuñas o ripios (ver figura 4c y 4d) Pareja. M. (1979).
- Mampostería careada. - es la realización con mampuestos que tienen una cara plana y que, por lo tanto, forman una superficie exterior o interior completamente lisa (ver figura 4a) Pareja. M. (1979).
- Mampostería concertada. - si los mampuestos, además de una cara plana (la que se verá) tienen las otras caras algo desbastadas, tanto como para

adquirir formas geométricas aproximadamente, tenemos la mampostería concertada, o sea combinada (ver figura 4b) Pareja. M. (1979).

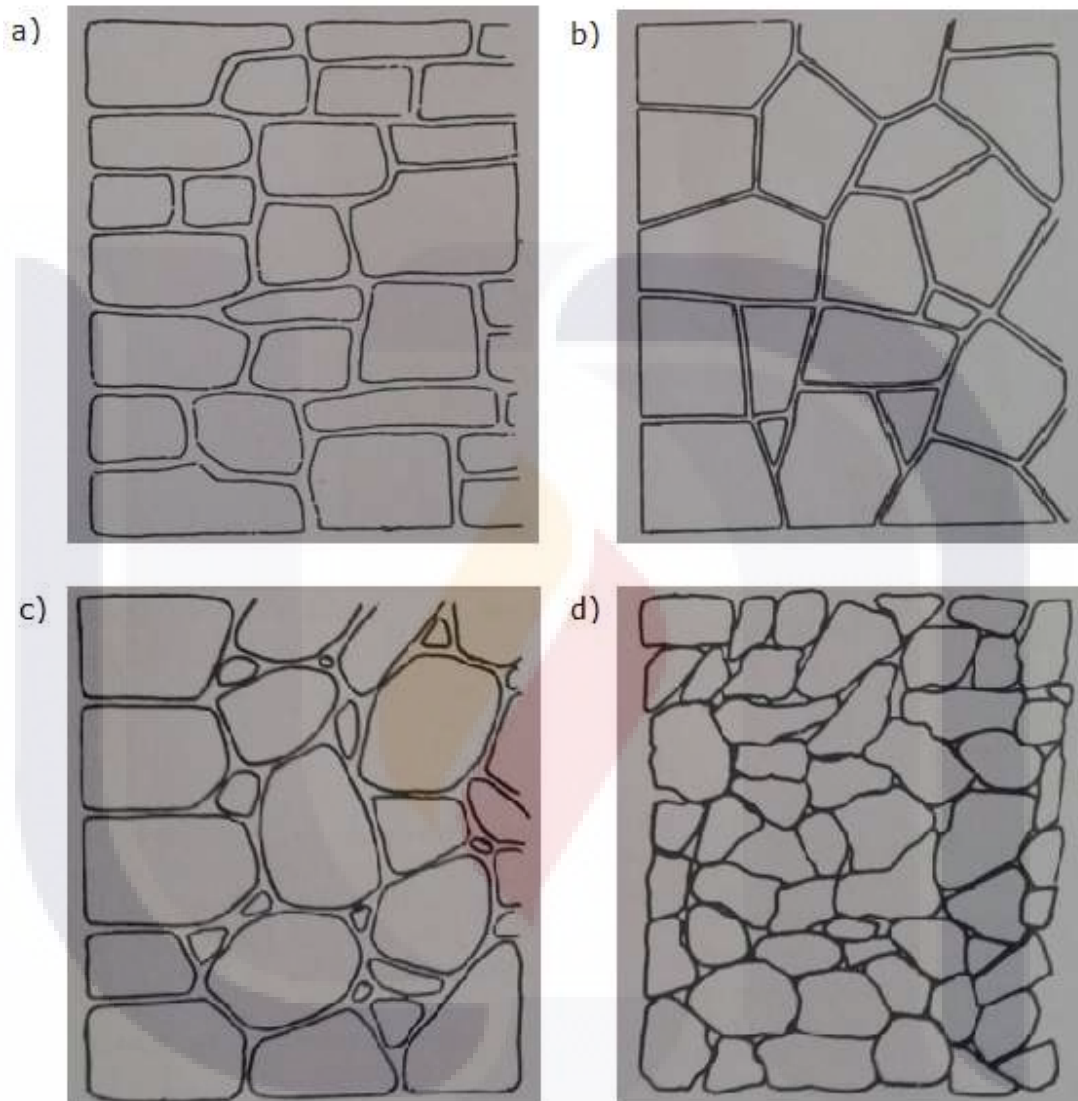


Figura 4. Mampostería careada (a), mampostería ordinaria o de cantos concertados (b), mampostería ordinaria, cantos redondeados grandes (c), mampostería ordinaria, con mampuestos de cantera (d). (Pareja. M.,1979).

3.2.2 Roca

Según la geología, se considera roca a un material constitutivo de la corteza terrestre, formado en general por una asociación de minerales, que presentan

una cierta homogeneidad estadística, en general dura y coherente, a veces plástica o móvil; en el límite líquida o gaseosa (Galván, 2015).

Las piedras en la construcción son definidas por su origen geológico: ígneas, sedimentarias o metamórficas (Figura 5), además de esta clasificación son catalogadas en la práctica como rocas duras o blandas.

- **Ígneas:** Son formadas por el enfriamiento y solidificación del magma en lo profundo de la corteza, en el manto o cerca de la superficie, así mismo se dividen en intrusivas (formación bajo la corteza) o extrusivas (formación en la superficie)
- **Sedimentarias:** Formadas por la consolidación de sedimentos, materiales procedentes de la erosión de rocas preexistentes, o de precipitación a partir de una disolución.
- **Metamórficas:** Formadas por la alteración en estado sólido de rocas ya consolidadas de la corteza de la Tierra, cuando quedan sometidas a un ambiente energético diferente al de su formación.

Como se mencionó anteriormente la roca ha sido el material mayormente usado en la construcción de edificios de fábrica debido a sus propiedades físicas y mecánicas. Su principal contribución es su alta capacidad de resistencia a la compresión, sin embargo, esta es menor que su resistencia a la tensión, alrededor de 10 a 30 veces más bajas.

Para evaluar el comportamiento mecánico que presenta una roca es importante conocer las tensiones y deformaciones que puede llegar alcanzar. La relación entre estos dos parámetros además depende de las propiedades propias del material y las condiciones en las que se encuentra sometida (Galván, 2015).

3.2.3 Mortero

Los patrimonios construidos a base de mampostería se integran ya sea piedra y/o ladrillo, se encuentran unidos mediante morteros de yeso, cal o cemento. Alrededor del mundo, en la mampostería tradicional el conglomerante para unir las formas de las unidades fue el mortero de cal (Banfill et al.,2016). Los

morteros de cal presentan bajas resistencias mecánicas, debido a la baja afinidad de la calcita y cristal de cuarzo, así como a la unión débil entre las partículas de calcita. Sin embargo, tiene fácil manejabilidad, debido a la lentitud del proceso de ajuste (carbonatación), que depende de las condiciones ambientales y de alta capacidad de deformación (bajo módulo de elasticidad). Esto permite que el material absorba los pequeños movimientos de los materiales adyacentes. Por otro lado, presenta una alta permeabilidad al agua y al vapor de agua, pero baja resistencia a ciclos hielo-deshielo (Rheinheimer, V.,2008).

La cal puede obtenerse por medio de la calcinación de la piedra caliza (CaCO_3), en donde se obtiene cal gruesa si estas son ricas en calcina. Si ésta contiene arcilla se obtiene una cal hidráulica. Y si la piedra caliza es totalmente pura se le denomina cal viva (óxido de calcio, CaO), estabilizándola con agua para obtener cal apagada (Ca(OH)_2) (Pareja, M. 1979).

La cal utilizada en mortero puede ser:

- Cal de aire, constituida por óxido de calcio (cal viva) y / o hidróxido de (cal apagada). En este caso, la adición de agua es para facilitar la mezcla de los componentes y colocar el mortero, pero no interviene en cualquier reacción química. El endurecimiento del mortero se lleva a cabo por la reacción del Ca(OH)_2 con la atmósfera CO_2 produciendo CaCO_3 . Este producto proporciona las propiedades físicas, químicas y mecánicas del mortero (Rheinheimer, V.,2008).
- Cal hidráulica, predominantemente silicatos de calcio, aluminatos de calcio e hidróxido de calcio. La adición de agua interviene en las reacciones químicas con los silicatos y aluminatos (ambos presentes en la materia prima) que generan la formación de compuestos hidratados que le confieren al mortero algunas propiedades diferentes a los obtenidos en el caso de las cales de aire (Rheinheimer, V.,2008).

Este tipo de morteros no tienen presencia de sales solubles que evitan los procesos de cristalización de disolución de las sales, y por lo tanto da lugar a la aparición de eflorescencias y subeflorescencia (Rheinheimer, V.,2008).

3.2.4 Propiedades físico-mecánica de la mampostería

Tanto el comportamiento como las propiedades de la mampostería al ser un material heterogéneo se determinan a partir de las propiedades mecánicas de los elementos que la conforman (unidad de mampostería y mortero).

Las propiedades índices de las rocas junto con la composición mineralógica y de fábrica determinan las propiedades y comportamiento mecánico de dicho material (Galván, 2015). Al realizar los estudios petrofísicos de la roca nos permite interpretar sus propiedades físicas en función de sus componentes y características petrográficas, como son poros, uniones, minerales, composición química, etc.

Entre las propiedades fundamentales en los modelos de predicción matemática para conocer el comportamiento de las estructuras (Ruiz, V., et al, 2002) son:

- La porosidad. Es la relación entre el volumen total de huecos de un árido y el volumen aparente (Mingarro, F. 1996)

$$n = \frac{V_v}{V_{ap}} = \frac{V_{ap} - V_s}{V_{ap}} = 1 - \frac{\gamma_{ap}}{\gamma_s}$$

Además de la porosidad, se suele utilizar el índice de índice de vacíos (e), que viene dada por su relación:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{ap}} - 1$$

- Absorción de agua por capilaridad. El agua al encontrarse en su forma líquida y debido al sistema de poros con el que cuenta el material favorece a la succión de la misma por capilaridad. La velocidad de absorción de agua capilar es función de su coeficiente capilaridad, la cantidad de agua absorbida de un material (M) es directamente proporcional a este coeficiente de capilaridad (C) y a la raíz cuadrada del tiempo (t) (Mingarro, F. 1996)

$$C = \frac{M}{t} \text{ (Kg/m}^2\text{s)}$$

Un parámetro importante de la roca en ingeniería civil es el módulo de Young y coeficiente de Poisson, debido a que influye *directamente en la rigidez y/o deformación* de la estructura. Sin embargo, esta característica se ve alterada por diversas exposiciones del material ante el medio ambiente repercutiendo en el comportamiento general de la construcción. Por ello es necesario determinar procedimientos para la obtención de *módulos fiables y de fácil puesta en práctica*.

El módulo de Young obtenido de *ensayos de deformabilidad ante cargas estáticas, es conocido como módulo de elasticidad estático (E_{est})* (Brotons, V., 2014), el cual de acuerdo al ASTM D 3147-02 se calcula (ver figura 5):

- Módulo de Young tangencial E_{tan} se define como la pendiente de una línea tangente a la curva esfuerzo-deformación a un porcentaje fijo del esfuerzo máximo generalmente establecido al 50% (ver figura 5a).
- *Módulo de Young promedio E_{av}* se define como la pendiente de la línea recta de la curva esfuerzo deformación (ver figura 5b).
- *Módulo de Young secante E_{sec}* se define como la pendiente de la línea desde el origen hasta un porcentaje fijo de la carga máxima (ver figura 5c).

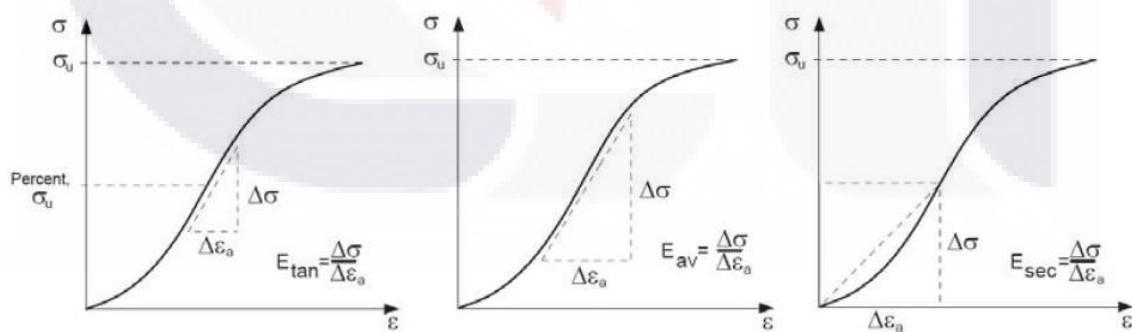


Figura 5. Módulo de Young tangencial E_{tan} (a), Módulo de Young promedio E_{av} (b) y Módulo de Young secante E_{sec} (c) (Małkowski, P., & Ostrowski, Ł., 2017).

No obstante conseguir este módulo se requiere de la extracción de núcleos de los especímenes lo cual no siempre es posible, por lo que distintas

investigaciones en relación al estudio de rocas este módulo estático para relacionarlo con el módulo de Young dinámico (E_{din}) el cual se obtiene mediante resonancia o propagación de ondas ultrasónicas en el material (Brotons, V.,2014).

El coeficiente de Poisson (ν) influye en la deformabilidad relativa y se ve afectado por las no linealidades a bajos niveles en la curva de esfuerzo-deformación axial y lateral. Se calcula a partir de la siguiente manera (ASTM D 3147-02):

$$\nu = \frac{E}{\text{pendiente de la curva esfuerzo - deformacion lateral}}$$

Las propiedades anteriormente mencionadas se enfocan en las propiedades individuales de los elementos de la mampostería, sin embargo, se han desarrollado modelos analíticos para calcular el módulo de Young de la mampostería a partir de estos datos (Mayorga, J., Altamirano, B. 2017).

$$E_m = \left(\frac{1 + \frac{h}{j}}{\frac{E_u}{E_p} + \frac{h}{j}} \right) * E_u$$

En donde:

E_m es el módulo de Young de la mampostería.

E_u es el módulo de Young de la unidad de mampostería.

E_p es el módulo de Young del mortero.

h es la altura de la unidad de mampostería.

j es el espesor de la junta de mortero.

De acuerdo a la expresión anterior el módulo de Young de la mampostería será menor al módulo de Young de la unidad de mampostería cuando el mortero sea más deformable ($E_u < E_p$), pero aumenta cuando el mortero es más rígido y el espesor de la junta más pequeña (Mayorga, J., Altamirano, B. 2017).

3.3 Intemperie

La capacidad de la mampostería de soportar cargas se ve afectada por el tiempo y por factores climáticos como los cambios de temperatura, exposición a la lluvia, humedad y procesos químicos en cada una de las unidades que integran la mampostería, además de estos aspectos influyen sus deformaciones elásticas y plásticas, la combinación de ellas alteran la respuesta de los materiales ante la intemperie, así como la resistencia de la mampostería (Feld, J.,1967).

Se considera como factor primordial en la degradación del material poroso a la humedad presente ya sea por lluvias, condensación o por capilaridad, ya que afecta directa o indirectamente a la respuesta de procesos de decaimiento severos, como son los ciclos de congelación-descongelación, ciclos de cristalización de sales solubles, crecimiento biológico y ataques químicos Korkanç, M. (2013).

Estos procesos de decaimiento de los materiales se pueden identificar debido a que producen patrones de deterioro particulares, sin embargo, un mismo patrón puede ser característico de dos o más mecanismo de degradación por ello se debe determinar el origen de estos daños, así como del entorno ambiental en el que encuentran. Por medio de la literatura se han asociado algunas patologías de las rocas a cuatro mecanismos de degradación (The Mechanism of Masonry Decay Through Crystallization, 2017) (ICOMOS).

| Crecimiento de cristales por congelación | Crecimiento de cristales por sales | Choque térmico | Viento |
|--|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> •Descamación (scaling) •Deslaminación (Deslamination) •Ampollas (Blistering) •Disgregación (Desintegration) | <ul style="list-style-type: none"> •Deslaminación (Deslamination) •Eflorescencia (Efflorescence) •Subflorescencia (Subflorescence) •Descamación (Scaling) •Ampollas (Blistering) •Disyunción de películas (Peeling) | <ul style="list-style-type: none"> •Grietas/Microfisuras (Crack) •Disgregación Granular (Desintegration) •Descamación (Scaling) •Planos de división | <ul style="list-style-type: none"> •Erosión |

Figura 6.Patologías en rocas por a su origen de deterioro. (Elaboración propia).

3.3 Templo de San Antonio de Padua

Los materiales usados en la mampostería antigua dependen de la disponibilidad de ellos en el lugar de construcción, de modo que a cada edificación requiere un análisis particular. En nuestro caso de estudio se analizó los factores que ocasionan intemperización en el Templo de San Antonio de Padua en el centro de Aguascalientes en el cruce de las calles Pedro Parga y Zaragoza (Fig. 7). Es considerado por los habitantes de Aguascalientes como uno de los templos más emblemáticos de la ciudad dado a su importancia religiosa, histórica y arquitectónica ya que combina distintos estilos de como son el barroco, neoclásico, neogótico, arábico y ruso. Además, es *catalogado por el INAH como monumento histórico de propiedad federal*. (Navarro, 2013).



Figura 7. Templo de San Antonio de Padua. (En línea, 2017).

La construcción del templo comenzó en 1896 y no fue sino hasta 1906 que se completó y se abrió al público hasta 1908. El templo está construido con canteras de la región de colores verde, amarillo y rosa, la construcción estuvo a cargo de J. Refugio Reyes Rivas. El costo del trabajo fue financiado casi en su totalidad por el terrateniente Antonio Morfin (Navarro 2013).

Los muros de carga del templo de San Antonio de Padua están constituidos por piedras volcánicas magmáticas, piroclásticas y sedimentarias, las cuales fueron

usados en los 5 sistemas constructivos (S) del inmueble (Fig 8) (Navarro, 2013). La descripción de los elementos pétreos que conforman los sistemas constructivos de los muros se presentan en la tabla 1 (Orenday,2016 y Navarro 2013) el sistema constructivo S1 corresponde a la fachada principal, S2, S3 y S4 corresponden a la nave principal y S5 al camarín de Santa Rita. La ignimbrita verde/amarilla correspondiente al sistema constructivo S1 representa el mayor atractivo visual en el templo de San Antonio por su color y detalles labrados en los mismos.

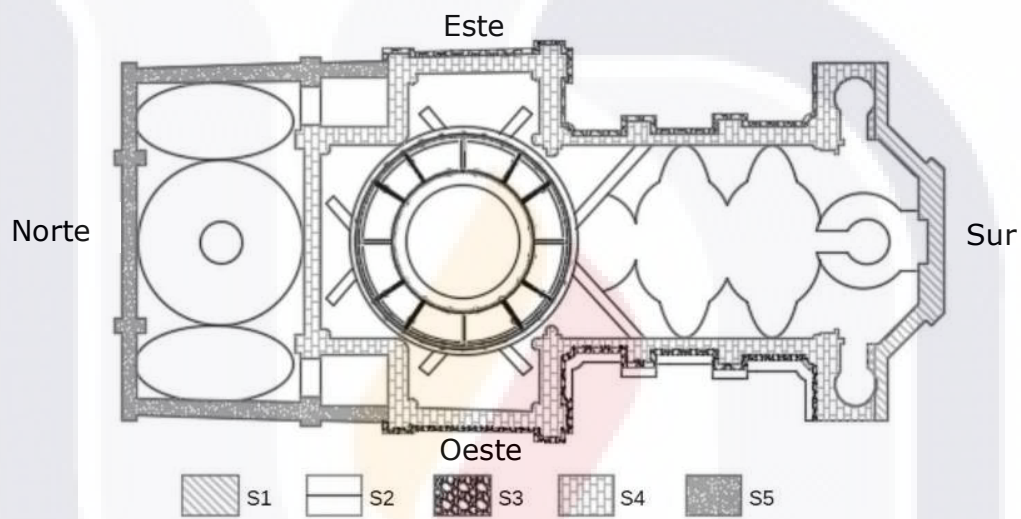


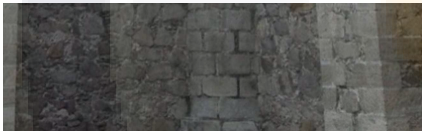




Figura 8. Sistemas constructivos en muros de carga de la mampostería del Templo de San Antonio. (Adaptado de Navarro, 2013).

Tabla 1. Sistemas constructivos en el Templo de San Antonio. (Adaptado de Orenday,2016 y Navarro 2013).

| Sistema Constructivo | Descripción |
|---|--|
| <p>S1</p>  | <p>Ignimbritas de dos colores (verde/amarilla y rosa) unidas a hueso; la primera es de grano muy fino con líticos verdes (2mm), soldada y en su mayoría con alteraciones hidrotermales, la segunda es de grano fino, clastos semiredondeados (2mm) y porosa.</p> |
| <p>S2</p>  | <p>Ignimbrita de color rojizo pardo constituido por 80% de matriz y 20% de líticos (alargados de 2mm) y cristales finos (blancos semiredondeados), soldada y porosa, unida con mortero de arena y cal apagada.</p> |
| <p>S3</p>  | <p>Riolita de color rojiza, densamente soldada con oquedades rellenas por cristales blancos, unida con mortero de arena y cal apagada.</p> |
| <p>S4</p>  | <p>Ignimbrita color beige a gris claro, soldada con líticos semiredondeados color oscuro y oquedades, unida con mortero de arena y cal apagada.</p> |
| <p>S5</p>  | <p>Roca sedimentaria litificada de un depósito de arena fina a media y la cual contiene clastos semiredondeados, diques y microfósiles de plantas; unida con mortero de arena y cal apagada.</p> |



CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL EXPERIMENTO

CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL EXPERIMENTO

4.1 Determinación del principal factor de intemperismo

Se realizó una recopilación de información meteorológica de las estaciones meteorológicas del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (infap), solo de los últimos 7 años debido a la falta de información de años anteriores. La Información recopilada corresponde a las estaciones meteorológica próximas al templo de San Antonio, y relacionada con los agentes naturales que son factor de intemperismo para los materiales del templo de San Antonio, Ags., tales como temperatura, humedad relativa, precipitación, viento. Paralelamente se realizó un levantamiento de patologías en los muros exteriores del templo para determinar el intemperismo predominante en la zona.

4.2 Determinación de propiedades mecánicas

Extracción y preparación de muestras de las rocas del mismo tipo que las usadas en la construcción del templo de San Antonio. Esta roca es localmente conocida como cantera hermosa. Se realizaron pruebas estandarizadas de petrografía (difracción de rayos X), porosidad del material, resistencia a la compresión uniaxial (UCS), módulo de Young (E_{est}) y coeficiente de Poisson (ν), las cuales se asumieron como representativas de las condiciones físicas iniciales de los materiales del templo.

Se realizaron pruebas de cristalización de sales (UNI EN 12370) a 9 probetas de 6.5x6.5x6.5 cm de cantera hermosa por ciclo, y en cada uno de los ciclos se midió las propiedades mecánicas para asociar los posibles cambios a los efectos de degradación. Debido a que en determinado ciclo las rocas tomaron una forma irregular debido al desgaste por la cristalización de sales se dificultó la toma de medidas necesarias para el cálculo de sus propiedades mecánicas por lo que para determinar su sección transversal se recurrió al método de fotogrametría usado por Vizcaino (2018), y al cabeceo de los especímenes para llevar a cabo la medición de los parámetros mecánicos de acuerdo a la norma ASTM C-617-98.

Los datos obtenidos de las propiedades mecánicas se correlacionaron por medio de una regresión polinómica, obteniendo una ecuación de decaimiento en función de las propiedades mecánicas de la mampostería de la piedra (resistencia a la compresión uniaxial, módulo de Young y coeficiente de Poisson) de acuerdo a la norma EN 1926 (2006) y ASTM D-3148-02 respectivamente.

La ecuación de decaimiento se validó con información de las propiedades mecánicas de la condición actual de degradación de los materiales del templo, obtenidas "in situ" por Orenday (2016).





CAPÍTULO V: RESULTADOS

CAPÍTULO V: RESULTADOS

4.1 Análisis climático

Los resultados del análisis de la información meteorológica de la zona del templo de San Antonio realizada para determinar el tipo de degradación predominante en los muros exteriores del inmueble, se presentan a continuación.

En la figura 5 se presenta la localización de las 8 estaciones meteorológicas existentes en el municipio de Aguascalientes. Para asociar los datos de estas estaciones al Templo de San Antonio se realizaron los polígonos de voronoi; en ellos se determinó que la información de la estación el Cedazo corresponden al Templo de San Antonio.

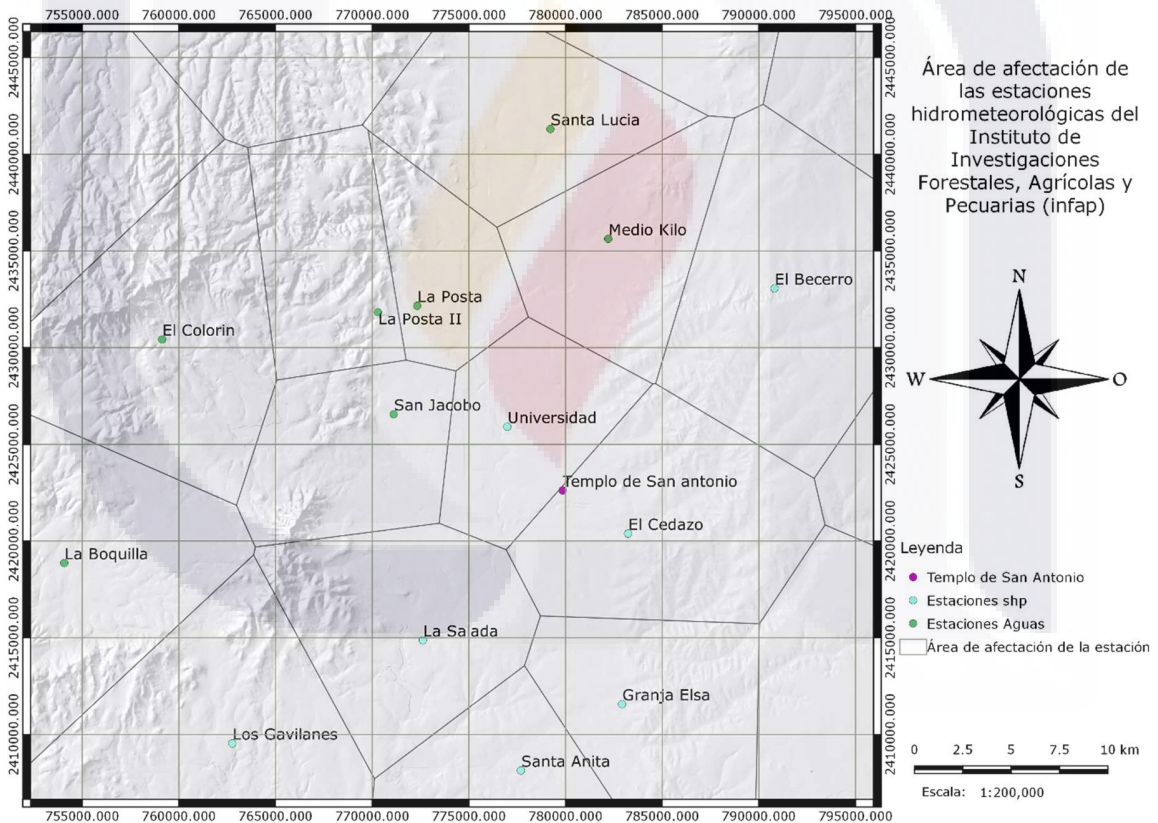


Figura 9. Polígonos de voronoi de las estaciones meteorológicas del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (infap).

En anexo A se muestran los resultados de las temperaturas de la estación meteorológica el Cedazo, obteniendo una tabla resumen (tabla 1) de las

temperaturas mayores a 30°C y menores a 1°C de los meses comprendidos del 2010 al 2016.

Tabla 2. Resumen de las temperaturas mínimas y máximas mensuales entre los años 2010 a 2016.

| Fecha | Temperatura Mínima (°C) | Fecha | Temperatura Máxima (°C) |
|----------------|----------------------------|------------|----------------------------|
| enero-2010 | 0.1 | mayo-2010 | 34 |
| noviembre-2010 | 0.6 | junio-2010 | 33.3 |
| diciembre-2010 | 0.1 | abril-2011 | 31.7 |
| enero-2011 | 0.6 | mayo-2011 | 34.9 |
| noviembre-2011 | -1.1 | junio-2011 | 32.8 |
| enero-2016 | 0.8 | abril-2012 | 31.4 |
| febrero-2016 | 0.9 | mayo-2012 | 33.1 |
| marzo-2016 | 0.9 | junio-2012 | 32.4 |
| | | abril-2013 | 32.2 |
| | | mayo-2013 | 32.7 |
| | | junio-2013 | 32.7 |
| | | marzo-2014 | 30.5 |
| | | abril-2014 | 31 |
| | | mayo-2014 | 30.6 |
| | | junio-2014 | 30.7 |
| | | abril-2015 | 30.3 |
| | | mayo-2015 | 31.7 |
| | | junio-2015 | 31.4 |
| | | abril-2016 | 30.3 |
| | | mayo-2016 | 33.6 |
| | | junio-2016 | 31.1 |
| | | julio-2016 | 30.1 |

Correspondiente a las precipitaciones presentes de la zona, en las figuras 8 y 9 se observa que los meses con mayor precipitación corresponde de junio-septiembre, con algunos extraordinarios en los meses fríos de noviembre-febrero. En la tabla 2 se representan en porcentaje los meses con respecto a la anualidad.

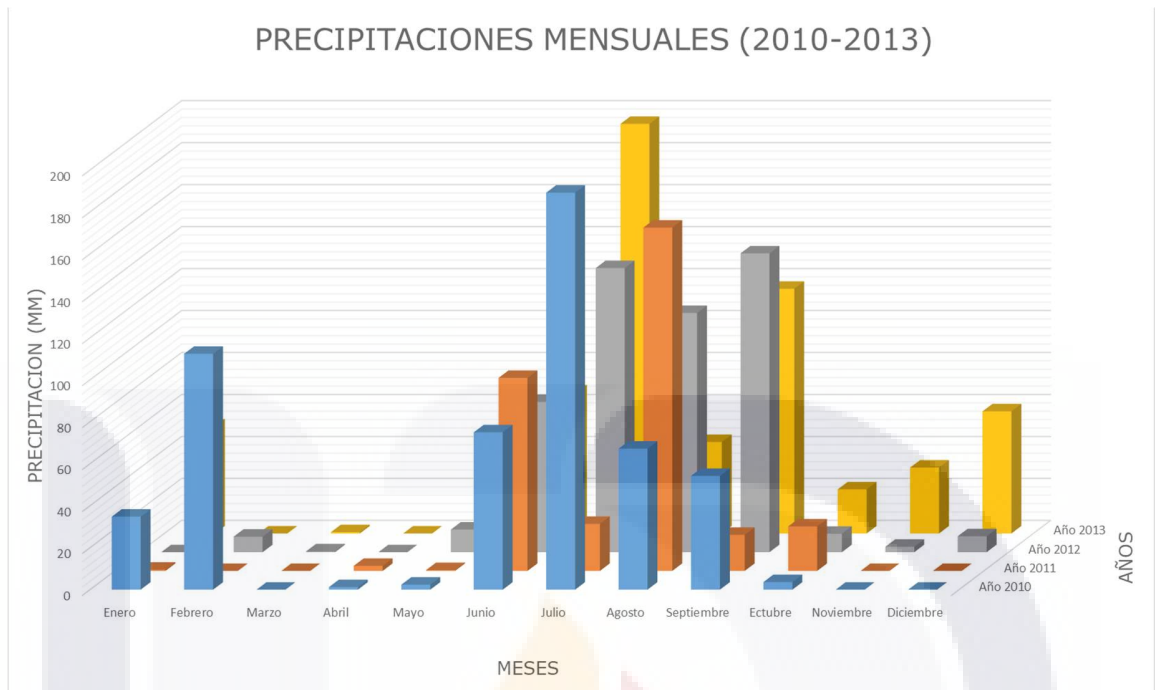


Figura 10. Graficas de precipitaciones mensuales del 2010 a 2013.

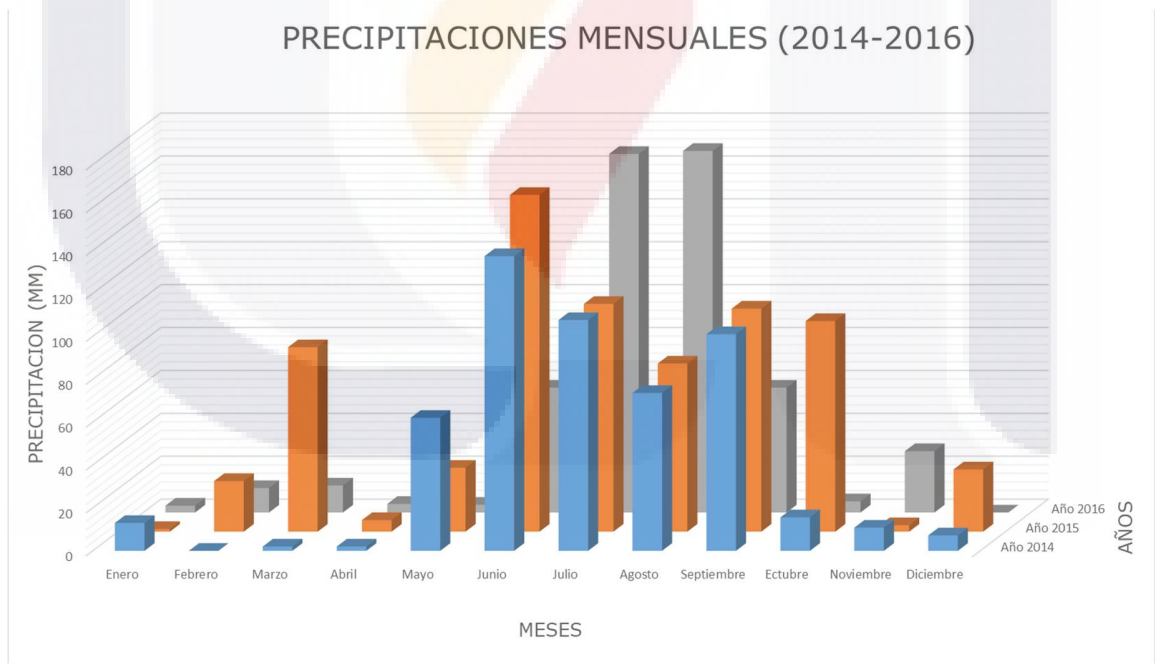


Figura 11. Gráficas de temperaturas maximas y minimas mensuales del 2014 a 2015.

Tabla 3. Porcentaje representativo de los meses con respecto a la precipitación anual.

| Fecha | Precipitación anual (mm) | Precipitación Noviembre-Febrero (mm) | Precipitación Marzo-Mayo (mm) | Precipitación Junio-Octubre (mm) |
|----------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Año 2010 | 540 | 27.26% | 0.67% | 72.07% |
| Año 2011 | 319.8 | 0.19% | 0.88% | 98.94% |
| Año 2012 | 501 | 3.51% | 2.24% | 94.25% |
| Año 2013 | 607.8 | 23.13% | 3.88% | 67.09% |
| Año 2014 | 532.2 | 5.82% | 12.40% | 78.84% |
| Año 2015 | 721.8 | 7.87% | 16.79% | 75.34% |
| Año 2016 | 520.8 | 8.29% | 3.88% | 87.83% |

En las figuras 10, 11 y 12 por medio del programa WRPLOT se determinaron las orientaciones del viento observando, el viento predominante en los meses cálidos (marzo - junio), húmedos (junio - octubre) y fríos (noviembre - diciembre).

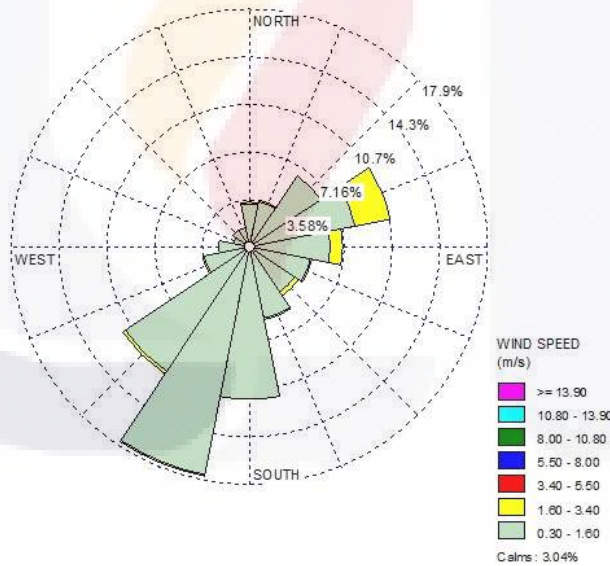


Figura 12. Orientación del viento predominante en la zona del templo correspondiente a los meses marzo-junio.

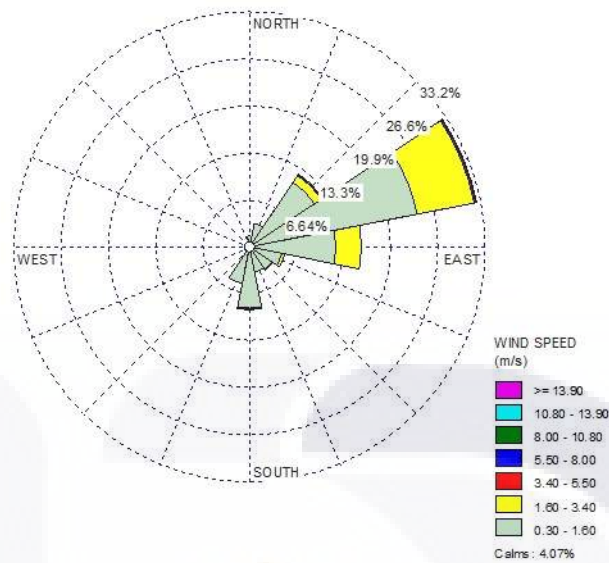


Figura 13. Orientación del viento predominante en la zona del templo correspondiente a los meses junio-octubre.

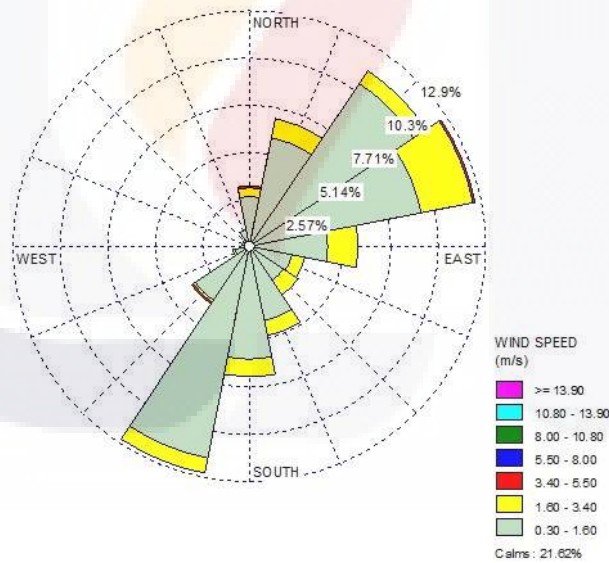


Figura 14. Orientación del viento predominante en la zona del templo correspondiente a los meses noviembre-diciembre.

El levantamiento de patologías existentes en las rocas que conforman el inmueble fue realizado de acuerdo a ICOMOS. En la tabla 3 se muestra el área de afectación de las patologías correspondientes al templo a una altura menor a 2 y mayor a 2m.

Tabla 4. Área de afectación de las patologías exteriores del templo de San Antonio.

| Patologías | Norte | | Sur | | Este | | Oeste | |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Afectación (m²) < 2.50 | Afectación (m²) > 2.50 | Afectación (m²) < 2.50 | Afectación (m²) > 2.50 | Afectación (m²) < 2.50 | Afectación (m²) > 2.50 | Afectación (m²) < 2.50 | Afectación (m²) > 2.50 |
| | m | m | m | m | m | m | m | m |
| Alteración cromática (Discolouration) | 14.745 | 0.200 | 0 | 0 | 0 | 0.9579 | 1.4709 | 3.23 |
| Alveolización | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 3.59 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ampollas (Blistering) | 1.345 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 1.65 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Colonización Biologica | 0.000 | 0.024 | 0.00 | 0.00 | 1.84 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Costra (Crust) | 0.000 | 6.422 | 0.00 | 1.20 | 9.13 | 7.67 | 5.81 | 0.00 |
| Daño Mecánico (Mechanical Damage) | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 6.42 | 0.00 | 0.00 | 4.82 |
| Deposito (Deposit) | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.83 | 0.00 |
| Descamación (Scaling) | 0.000 | 0.550 | 0.00 | 0.00 | 1.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Desintegración (Desintegration) | 11.820 | 44.153 | 5.95 | 5.34 | 10.86 | 31.61 | 17.21 | 9.80 |
| Deslaminación (Deslamination) | 3.634 | 13.980 | 4.80 | 0.00 | 15.15 | 56.29 | 4.49 | 35.00 |
| Disyunción de Películas (Peeling) | 0.000 | 13.354 | 0.00 | 15.29 | 4.41 | 15.24 | 0.00 | 16.01 |
| Eflorescencia (Eflorescence) | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 5.27 | 0.00 | 5.06 | 0.00 |
| Enmugrecimiento (Solling) | 0.738 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 15.34 | 0.00 | 18.99 | 0.00 |
| Erosión (Erosion) | 2.509 | 3.599 | 0.00 | 0.00 | 1.54 | 0.65 | 0.00 | 0.00 |
| Faltante (Missing Part) | 0.833 | 0.066 | 0.01 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Graffiti | 0.000 | 0.000 | 0.46 | 0.00 | 0.81 | 0.00 | 2.57 | 0.00 |
| Grietas (Crack) | 11.357 | 3.722 | 0.18 | 0.00 | 10.04 | 24.31 | 0.00 | 3.08 |
| Liquen (Lichen) | 0.000 | 0.761 | 0.00 | 0.38 | 0.00 | 2.93 | 1.18 | 0.00 |
| Mancha de Humedad (Moist Area) | 13.472 | 2.940 | 17.57 | 8.68 | 14.69 | 5.44 | 4.63 | 0.00 |
| Patina (Patina) | 0.000 | 1.251 | 8.46 | 0.00 | 27.29 | 0.00 | 59.48 | 0.00 |
| Pitting (Pitting) | 0.000 | 0.000 | 5.24 | 0.00 | 11.71 | 8.07 | 0.00 | 0.00 |
| Plantas (Plant) | 0.002 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Perforación (Perforation) | 7.229 | 10.96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.58 | 127.46 |

4.2 Caracterización física de piedra hermosa

Las pruebas de lámina delgada y difracción de rayos X fueron realizadas en el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por el Dr. Rubén Alfonso López Doncel a una muestra de piedra hermosa.

Los resultados de la prueba de difracción de rayos X (ver figura 14) determina que la piedra hermosa se compone principalmente de cuarzo, sanidina (plagioclasa), y en poca proporción de minerales arcillosos como illita y kaolinita. Muy poca moscovita y albita.

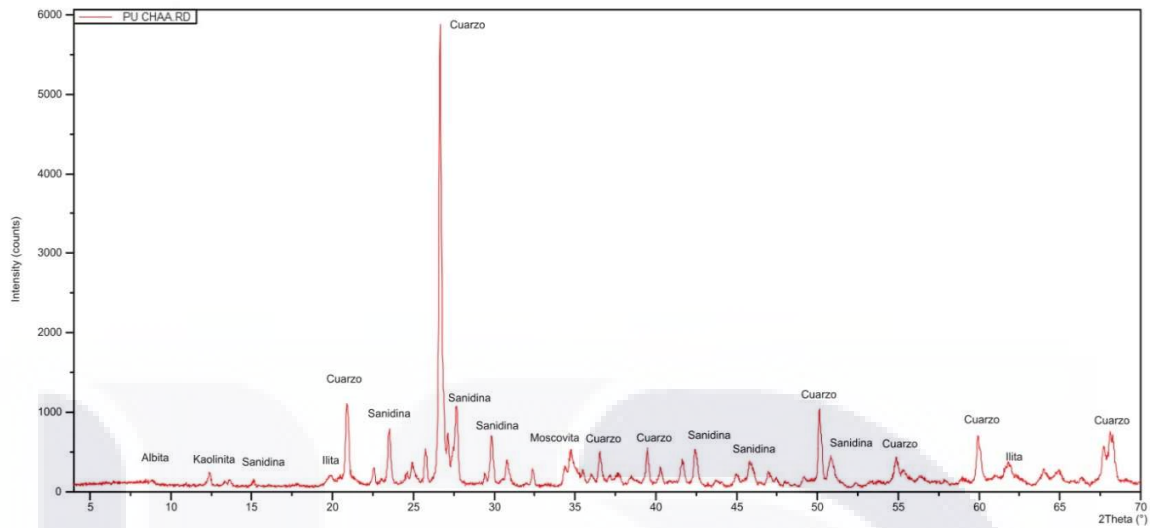


Figura 15. Difractograma de rayos X de una muestra de piedra hermosa.

Las fotografías de láminas delgadas de la muestra presentan una matriz vítrea (50%) (ver figura 15) debido al rápido enfriamiento de la roca en su formación, además de ser rica en cuarzo por ser una ignimbrita (roca volcánica ácida) contiene líticos incrustados de 2mm.

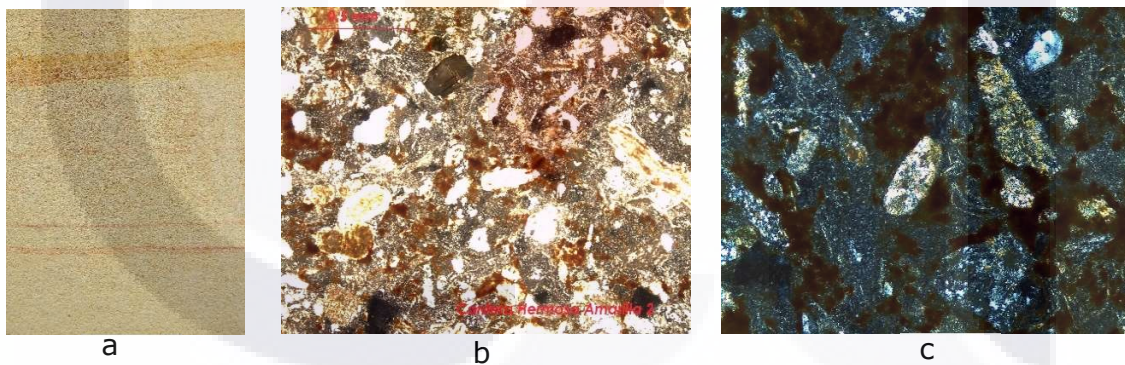


Figura 16. Fotografías de lámina delgada a) fotografía macroscópica, b) foto de microscopio con luz natural y c) foto con luz polarizada.

En la tabla 4 se observa el promedio en la porosidad, densidad matriz y densidad aparente obtenida de la prueba hidrostática.

Tabla 5. Promedio de porosidad, densidad, peso seco y condiciones húmedas de la piedra hermosa.

| Muestra | Peso Seco [g] | Peso Sumergido | Peso Húmedo [g] | Porosidad [%] | Densidad de Matriz (g/cm ³) | Densidad Aparente (Bulk)(g/cm ³) | Absorción al vacío [Gew.%] |
|----------|---------------|----------------|-----------------|---------------|---|--|----------------------------|
| CHA-1 | 474.6 | 264.36 | 538.07 | 23.189 | 2.257 | 1.734 | 13.373 |
| CHA-2 | 449.21 | 242.89 | 516.45 | 24.580 | 2.177 | 1.642 | 14.969 |
| CHA-3 | 468.28 | 258.34 | 531.99 | 23.282 | 2.231 | 1.711 | 13.605 |
| CHA-4 | 515.54 | 301.63 | 581.14 | 23.470 | 2.410 | 1.844 | 12.725 |
| CHA-5 | 463.99 | 256.61 | 529.95 | 24.131 | 2.237 | 1.697 | 14.216 |
| CHA-6 | 452.69 | 246.33 | 520.27 | 24.670 | 2.194 | 1.653 | 14.929 |
| Promedio | | | | 23.887 | 2.251 | 1.714 | 13.969 |

Una muestra de piedra hermosa fue analizada para determinar la porosidad total y el radio efectivo de poro por la prueba de intrusión de mercurio, en la figura 14 se puede observar que el tamaño de poro principal varía de 1 y 10 μm

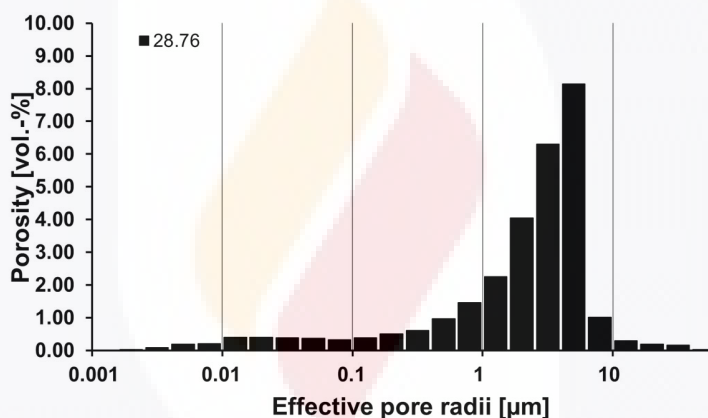


Figura 17. Distribución de tamaño de poro y porosidad total de la piedra hermosa.

4.3 Cristalización de sales

En la figura 16 se muestran los resultados de una prueba realizada sobre una muestra de cantera hermosa para determinar el número de ciclos que soporta la roca. La gráfica muestra que son necesarios 11 ciclos para llevar a la degradación total este tipo de roca. En el anexo B se muestra fotografías del proceso de degradación de la muestra.

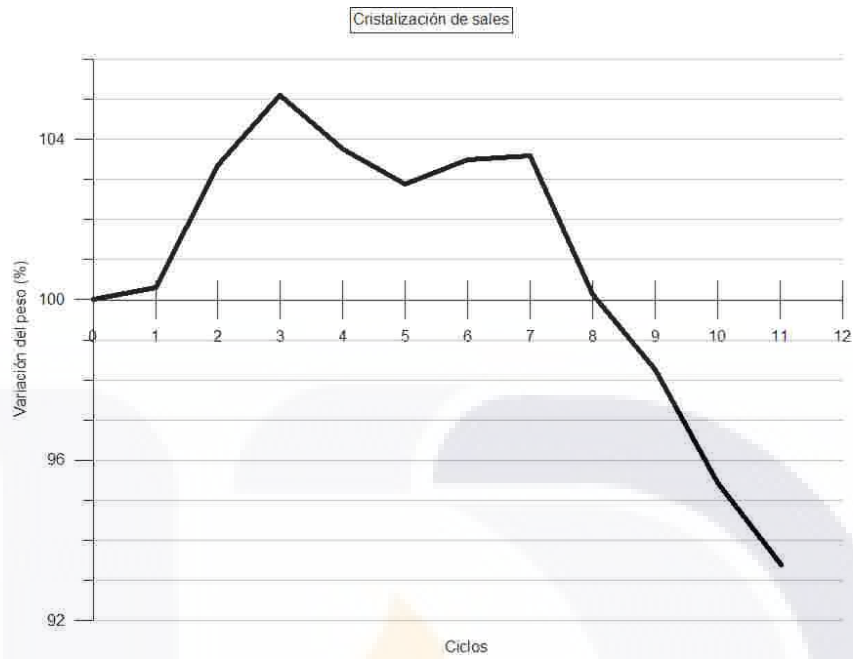


Figura 18. Variación del peso de la cantera hermosa sometida a ciclos de cristalización de sales.

En anexo C se presentan los datos capturados de las deformaciones axiales y laterales de cada una de la cantera hermosa por cada ciclo de cristalización de sales que se sometió, además en la tabla 6 y 7 se muestran respectivamente los resultados del módulo de Young secante al 60% del esfuerzo máximo y el coeficiente de Poisson de acuerdo a los datos del anexo C.

Tabla 6. Valores obtenidos del módulo de Young estático por medio del método secante de la cantera hermosa.

| Muestra | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) | E (Mpa) |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| | Ciclo 0 | Ciclo 1 | Ciclo 2 | Ciclo 3 | Ciclo 4 | Ciclo 5 | Ciclo 6 | Ciclo 7 | Ciclo 8 | Ciclo 9 | Ciclo 10 | Ciclo 11 |
| 1 | 1529.05 | 1289.29 | 1233.00 | 1549.97 | 790.31 | 886.58 | 1187.84 | 221.33 | 733.58 | 212.22 | 1620.89 | 245.47 |
| 2 | 1421.38 | 1597.89 | 2272.18 | 1494.93 | 793.76 | 726.16 | 1251.47 | 546.73 | 279.45 | 933.91 | 351.88 | 376.80 |
| 3 | 2468.45 | 1844.34 | 1545.94 | 1244.35 | 560.13 | 812.45 | 1124.68 | 949.72 | 503.69 | 1493.46 | 1330.19 | 785.26 |
| 4 | 1870.37 | 980.57 | 839.02 | 970.04 | 720.18 | 866.00 | 719.49 | 965.41 | 2051.64 | 2068.67 | 2353.94 | 421.43 |
| 5 | 1161.88 | 1720.88 | 1298.15 | 1916.86 | 455.53 | 755.17 | 302.71 | 203.65 | 609.60 | 541.02 | 124.29 | 2063.45 |
| 6 | 1999.86 | 2222.71 | 1077.61 | 713.54 | 426.87 | 1254.99 | 535.01 | 1312.93 | 734.56 | 593.59 | 145.16 | 583.79 |
| 7 | 2069.49 | 1499.47 | 650.69 | 1028.27 | 1095.55 | 315.04 | 1072.58 | 812.08 | 2124.81 | 2603.78 | 1642.74 | 423.40 |
| 8 | 2841.02 | 1917.73 | 1660.80 | 1053.73 | 926.71 | 304.06 | 396.03 | 499.11 | | 2193.52 | 294.80 | |
| 9 | 2358.66 | 1485.08 | 1851.95 | 405.90 | 1232.66 | 437.80 | 504.97 | 1841.75 | | | | |
| Promedio | 1968.91 | 1617.55 | 1381.04 | 1153.07 | 777.97 | 706.47 | 788.31 | 816.97 | 1005.33 | 1330.02 | 982.99 | 699.94 |

Tabla 7. Valores obtenidos del coeficiente de Poisson estático por medio del método secante de la cantera hermosa.

| Muestra | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| | Ciclo 0 | Ciclo 1 | Ciclo 2 | Ciclo 3 | Ciclo 4 | Ciclo 5 | Ciclo 6 | Ciclo 7 | Ciclo 8 | Ciclo 9 | Ciclo 10 | Ciclo 11 |
| 1 | 0.50 | 0.42 | 0.24 | 0.26 | 0.28 | 0.11 | 0.46 | 0.17 | 0.27 | 0.24 | 0.27 | 0.01 |
| 2 | 0.46 | 0.16 | 0.25 | 0.42 | 0.38 | 0.55 | 0.42 | 0.13 | 0.64 | 0.20 | 0.40 | 0.24 |
| 3 | 0.33 | 0.37 | 0.19 | 0.36 | 0.10 | 0.18 | 0.31 | 0.25 | 0.23 | 0.23 | 0.20 | 0.14 |
| 4 | 0.22 | 0.21 | 0.13 | 0.17 | 0.05 | 0.22 | 0.18 | 0.29 | 0.50 | 0.33 | 0.28 | 0.49 |
| 5 | 0.44 | 0.35 | 0.09 | 0.34 | 0.21 | 0.24 | 0.37 | 0.07 | 0.02 | 0.26 | 0.75 | 0.18 |
| 6 | 0.48 | 0.24 | 0.45 | 0.20 | 0.23 | 0.30 | 0.22 | 0.25 | 0.42 | 0.30 | 0.21 | 0.22 |
| 7 | 0.42 | 0.24 | 0.36 | 0.25 | 0.05 | 0.27 | 0.22 | 0.41 | 0.32 | 0.19 | 0.15 | 0.40 |
| 8 | 0.28 | 0.29 | 0.29 | 0.03 | 0.25 | 0.14 | 0.30 | 0.11 | | 0.33 | 0.35 | |
| 9 | 0.31 | 0.37 | 0.23 | 0.19 | 0.31 | 0.26 | 0.28 | 0.21 | | | | |
| Promedio | 0.38 | 0.29 | 0.25 | 0.25 | 0.21 | 0.25 | 0.31 | 0.21 | 0.34 | 0.26 | 0.32 | 0.24 |

En la figura 19 y figura 20 se muestra de manera gráfica los resultados de la tabla anterior con respecto a los módulos de Young (E secante) y coeficiente de Poisson (ν secante) con respecto al ciclo de degradación.

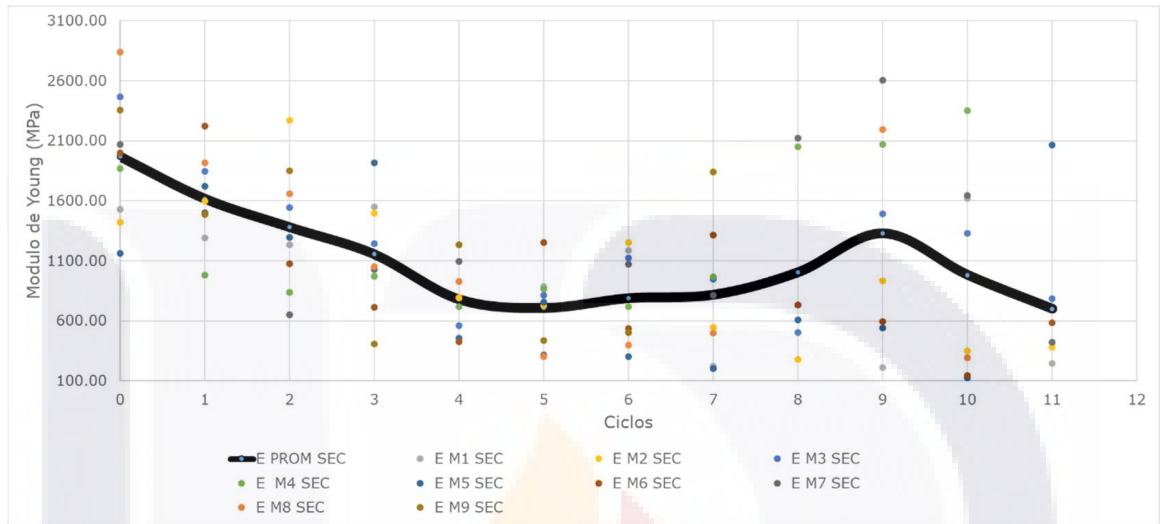


Figura 19. Gráfica del comportamiento del módulo de Young con respecto al ciclo de cristalización de sales.

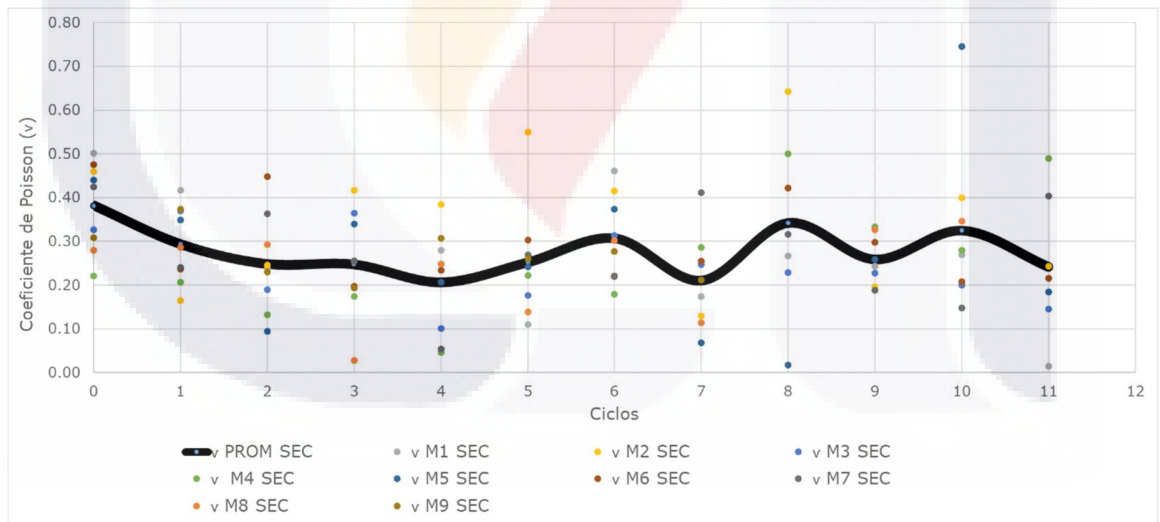


Figura 20. Gráfica del comportamiento del coeficiente de Poisson con respecto al ciclo de cristalización de sales.

Con estas gráficas se puede estimar el comportamiento de la cantera hermosa con respecto a la cristalización de sales, obteniéndose mediante una regresión cubica las siguientes ecuaciones:

Módulo de Young: $y = -4.7295x^3 + 97.829x^2 - 618.33x + 2094.9$

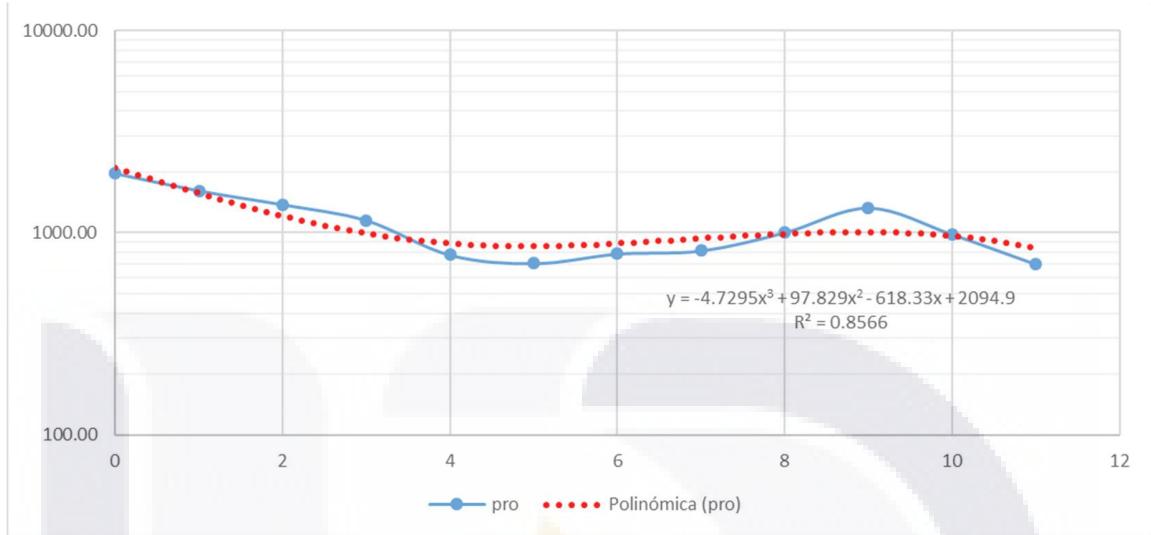


Figura 21. Gráfica de ecuación de decaimiento del módulo de Young por cristalización de sales.

Coefficiente Poisson: $y = -0.0001x^3 + 0.0187x^2 - 0.0956x + 0.3778$

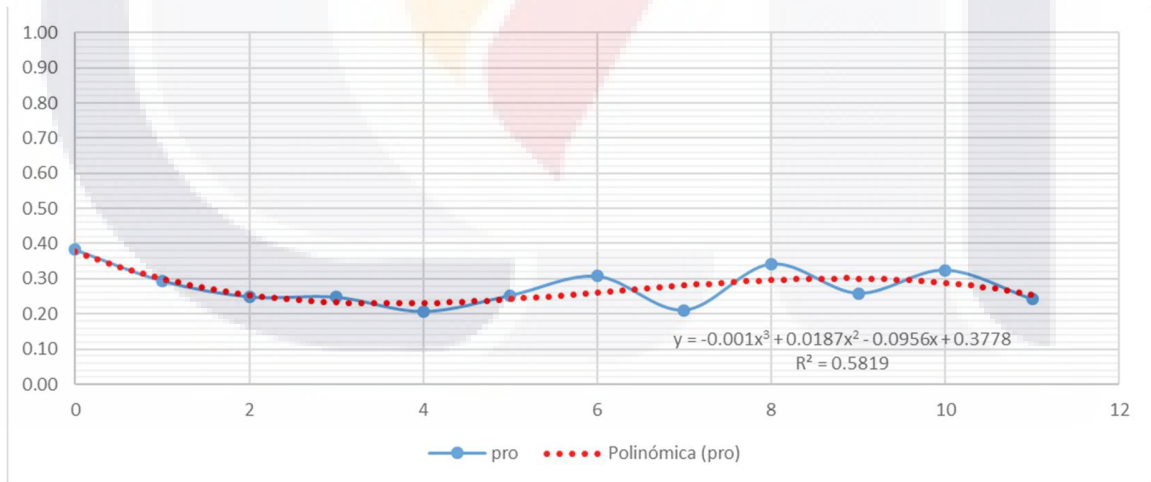


Figura 22. Gráfica de ecuación de decaimiento del coeficiente de Poisson por cristalización de sales.

En el estudio realizado por Olivera (2000) se discute la diferencia en el cálculo del módulo de Young de la roca por si sola y en su uso como mampostería a hueso llegando a la conclusión que no es significativa la variación en este valor sin embargo con respecto al esfuerzo que soporta sube significativamente en la mampostería a hueso. Considerando este punto a los datos de la mampostería de la fachada del templo de San Antonio proporcionada por Orenday (2016) se transforma a módulo de Young estático con las formulas facilitadas por Brotons (2014).

Tabla 8. Transformación de módulo de Young dinámico a estático.

| Módulo dinámico de la mampostería de la fachada | Transformación del módulo dinámico a estático por Brotons (2014) | Módulo estático de la mampostería de la fachada |
|---|--|---|
| $E_{din} = 2.1 \text{ Gpa}$ | $E_{st} = 0.74 E_{dyn} - 0.82$ | $E_{est} = 0.734 \text{ Gpa}$ |

Comparando E_{est} transformado de Orenday (2016) con los datos realizados experimentalmente se puede apreciar que se asemeja a los datos recabados en el ciclo 5 de cristalización de sales el cual es de 706.47 MPa.



CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados del análisis de la climatología de la zona se observó que la degradación por congelamiento-descongelamiento no es un factor dominante debido a que en el registro realizado solo se encontró una fecha con temperatura bajo cero y 7 más cercanas a ella, sin embargo, se encuentra un alto índice de precipitación en los meses húmedos ocasionando la saturación de la mampostería, dejando la cristalización de sales como el principal factor de degradación en la mampostería.

Los vientos predominantes que se muestran en las figuras 12, 13 y 14 indican las zonas más afectadas por degradación, probablemente a que el viento favorece el proceso de secado durante la temporada de estiaje, y de humidificación y cristalización de sales en la temporada húmeda.

Estos datos coinciden con la información registrada con en el levantamiento de patologías, la cual sugieren que las áreas afectadas en la parte alta corresponden a estas direcciones predominantes en el viento.

La parte baja del templo (hasta los 2m de altura) es la más afectadas por cristalización de sales por humedad relacionada a la absorción por capilaridad de la mampostería debido al suelo rico en minerales donde se encuentra ubicado el templo de San Antonio, además de la constante humedad en los meses lluviosos.

La cantera hermosa es una roca que contiene minerales arcillosos, además de que su matriz está compuesta principalmente de cuarzo, debido a que es una roca microporosa tiene la facilidad de transportar minerales en combinación en el agua a través de sus redes por capilaridad de los mismo, los cuales al momento de cristalizarse fracturan estas cavidades incrementando las fisuras y por lo tanto la circulación de más minerales.

Se aprecia que la cantera rosa es una roca débil al proceso de cristalización de sales debido a que el ciclo máximo que soporto fueron 11 ciclos no obstante

durante el proceso experimental a partir del ciclo 8 el tamaño de muestra disminuye debido a la fragilidad de la roca ante estas acciones.

En el modelo de regresión cúbica del módulo de Young (E) podemos afirmar que el ajuste del modelo es bueno debido a que $R^2=0.8566$, es decir, que el 85.66% de la variabilidad de E es explicado por el modelo de regresión, aunque con el modelo de regresión cúbica del coeficiente de Poisson (ν) podemos decir que el ajuste del modelo es moderado debido a que $R^2=0.5819$, es decir, que el 58.19% de la variabilidad de ν es explicado por el modelo de regresión cúbica.

De acuerdo a la transformación del módulo de Young dinámico a estático podemos estimar que hasta el estudio elaborado por Orenday (2016) en templo estuvo sometido a una degradación equivalente a 5 ciclos de cristalización de sales. Asociando estos ciclos a los años de vida del inmueble, podemos estimar que la degradación causada por 5 ciclos de cristalización de sales, corresponden a la degradación del material del templo que se ha producido durante los 110 años que ha estado expuesto a las condiciones climáticas de Aguascalientes. Por lo tanto, el tiempo estimado del inmueble hasta que las propiedades mecánicas sean inestables de acuerdo a los 11 ciclos que la roca soportó la degradación es de 242 años. Esto asumiendo ningún tipo de mantenimiento o recuperación en la mampostería de piedra hermosa.



CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

En base a los estudios realizados en este trabajo podemos llegar a las siguientes conclusiones con respecto a los objetivos planteados.

De acuerdo al análisis climatológico y auxiliada con el levantamiento de las patologías exteriores en el templo por exposición al ambiente se determinó que el mecanismo de degradación de los materiales que conforman el templo de San Antonio de Padua es mediante la cristalización de sales.

Dado que el material conocido como matacán ya no es extraído debido a que está ubicado en parque temático el caracol que es propiedad federal, no se realizaron pruebas en este material. Sin embargo, en muestras de cantera hermosa se realizaron pruebas de degradación de sales registrándose un número máximo de ciclos de cristalización de sales de 11 ciclos, no obstante, a partir del ciclo 8 el número de muestras en alcanzar este estado disminuyen debido a la variabilidad de las propiedades de dicha roca.

A simple vista en las gráficas del módulo de Young vs ciclos y coeficiente de Poisson vs ciclos se puede apreciar que existe una tendencia de decaimiento en las propiedades mecánicas de la roca con relación a la degradación por cristalización de sales.

Esta tendencia se ve corroborada por la ecuación de regresión cúbica la cual explica el comportamiento observado en estas propiedades debido al su decaimiento por cristalización de sales. Además, las mediciones tomadas in situ por Orenday (2016) se asemejan a las obtenidas experimentalmente por lo que se pueden relacionar los años de vida del inmueble con los ciclos de degradación y estimar la vida útil del inmueble ante los efectos de la cristalización de sales, lo que nos permite decir que existe una ecuación para cada material que nos permite predecir el comportamiento mecánico del material en lo que resta de su vida útil.

REFERENCIAS

- ASTM C-617-98. Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. American Society of Testing Materials.
- ASTM D-3148-02. Standard test method for elastic moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression. American Society of Testing Materials.
- Azkarate, A., Ruiz, M., Santana, A. (2003). El Patrimonio Arquitectónico. Vitoria-Gasteiz. Recuperado de: <http://www.ehu.es/gpac/documentos/1118164264Patrimonio.pdf>
- Bayram, F. (2012). Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 83–84, 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.07.003>
- Brotos, V. Tomás, R., Ivorra, S. (2014). "Propiedades físicas y mecánicas de una calcarenita: la Piedra de San Julián". Tesis (Doctoral). Universidad de Alicante. Alicante.
- Carta de Atenas para la Restauración de Monumentos Históricos (1931). Recuperado de: <http://www.icomoscr.org/doc/teoria/VARIOS.1931.carta.atenas.restauracion.monumentos.historicos.pdf>
- EN 12370 Standard (1999). Natural stone test methods—determination of resistance to salt crystallization.
- EN 1926 (2006). Natural stone test methods—determination of uniaxial compressive strength. European Committee for Standardization, 20p.
- En línea. (2017). Recuperado el 18 de octubre de 2017, a partir de <https://vivaaguascalientes.com/en/templo-de-san-antonio-de-padua/>
- Feld, J. (1967). Mampostería. Biblioteca Internacional del Ingeniero Civil. (Tomo III. Cap, 6, pp 225-247). Barcelona. Grupo noruega. Pp. 249-250.

- Garré, F. (2001). Patrimonio arquitectónico urbano, preservación y rescate: bases conceptuales e instrumentos de salvaguarda. *Conserva* N° 5. Recuperado de: http://www.dibam.cl/dinamicas/DocAdjunto_34.pdf
- Ghobadi, M. H., & Babazadeh, R. (2015). Experimental Studies on the Effects of Cyclic Freezing–Thawing, Salt Crystallization, and Thermal Shock on the Physical and Mechanical Characteristics of Selected Sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(3), 1001–1016. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0609-6>
- Heidari, M., Torabi-Kaveh, M., & Mohseni, H. (2016). Assessment of the Effects of Freeze–Thaw and Salt Crystallization Ageing Tests on Anahita Temple Stone, Kangavar, West of Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0090-y>
- ICOMOS, Committee on Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments 1982.
- Korkang, M. (2013). Deterioration of different stones used in historical buildings within Nigde province, Cappadocia. *Construction and Building Materials*, 48, 789–803. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.033>
- Małkowski, P., & Ostrowski, Ł. (2017). The Methodology for the Young Modulus Derivation for Rocks and Its Value. *Procedia Engineering*, 191, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.164>
- Mayorga, J., Altamirano, B. (2017). “Elaboración de un manual del proceso constructivo de mampostería en Nicaragua”. Monografía. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Managua.
- Moreno Cruz, G. (2011). “Análisis paramétrico de la geometría de templos típicos de la época colonial”. Universidad Nacional Autónoma de México, d.f., México.

Mutlutürk, M., Altindag, R., & Türk, G. (2004). A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing–thawing and heating–cooling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(2), 237–244. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00095-9](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00095-9)

Navarro, M, Pacheco, J. (2013). “Levantamiento geométrico y de daños del templo de San Antonio y análisis estructural de la situación actual”. Tesis (Maestría en ingeniería civil en el área de especialización de estructuras). Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes.

Olivera, D. (2000) “Mechanical characterization of Stone and brick masonry”. Report 00-DEC/E-4. Universidad de Minho. Portugal.

Orenday, E., Pacheco, J. (2016). “Estudio de caracterización de las propiedades mecánicas del templo de San Antonio para su análisis dinámico”. Tesis (Maestría en ingeniería civil en el área de especialización de estructuras). Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes.

Royo-Ochoa, M., Chávez-Aguirre, R., Pinales-Munguía, A., Castañeda-ávila, J., Villalba, M. de L., Espino-Valdés, M. S., ... Sujo, L. C. (2010). El intemperismo y las rocas en la construcción. En ResearchGate (pp. 8–10). Xalapa, Veracruz. Recuperado a partir de https://www.researchgate.net/publication/267453496_El_intemperismo_y_las_rocas_en_la_construccion

Ruiz, V., González, H. (2002). Elementos de mecánica de rocas. *Geología Aplicada a la ingeniería civil* (Cap. 6, pp. 113-152). México. Limusa. Pág. 122-152.

The Mechanism of Masonry Decay Through Crystallization | Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments | The National Academies Press. (n.d.). Obtenido Mayo 2, 2017. Recuperado a partir de <https://www.nap.edu/read/514/chapter/11>

Vizcaino, I., Soto, M., Pacheco, M., Padilla, R. (2018). "Propuesta y evaluación de una metodología para la determinación del peso propio en elementos constructivos y ornamentales de edificios patrimoniales empleando fotogrametría digital de corto rango". Tesis (Maestría en ingeniería civil en el área de especialización de estructuras). Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes.

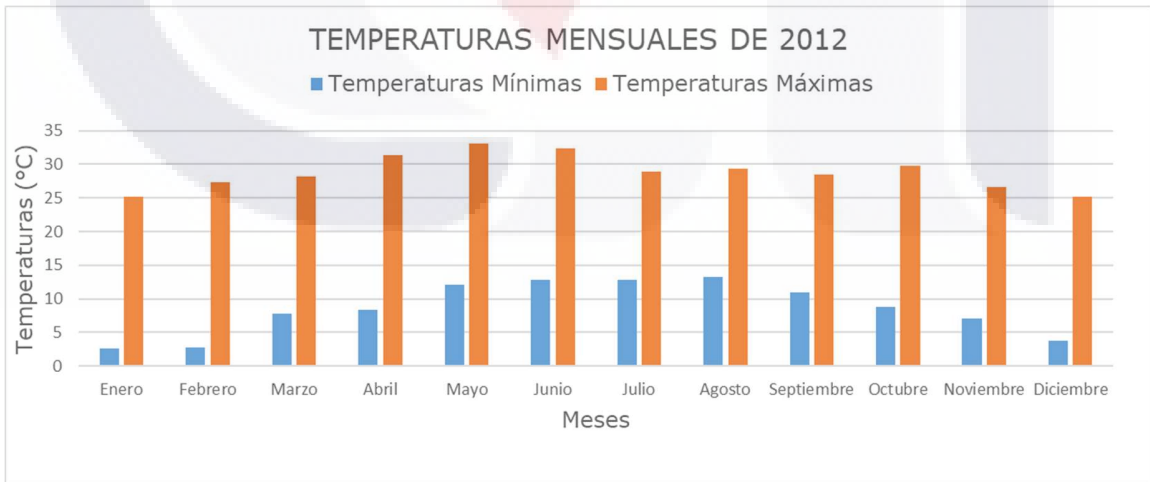
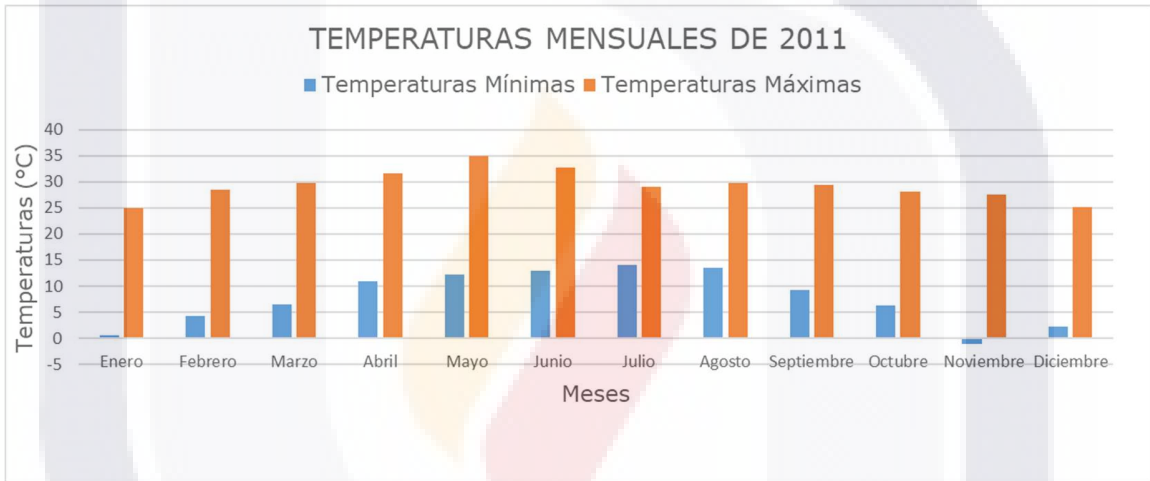
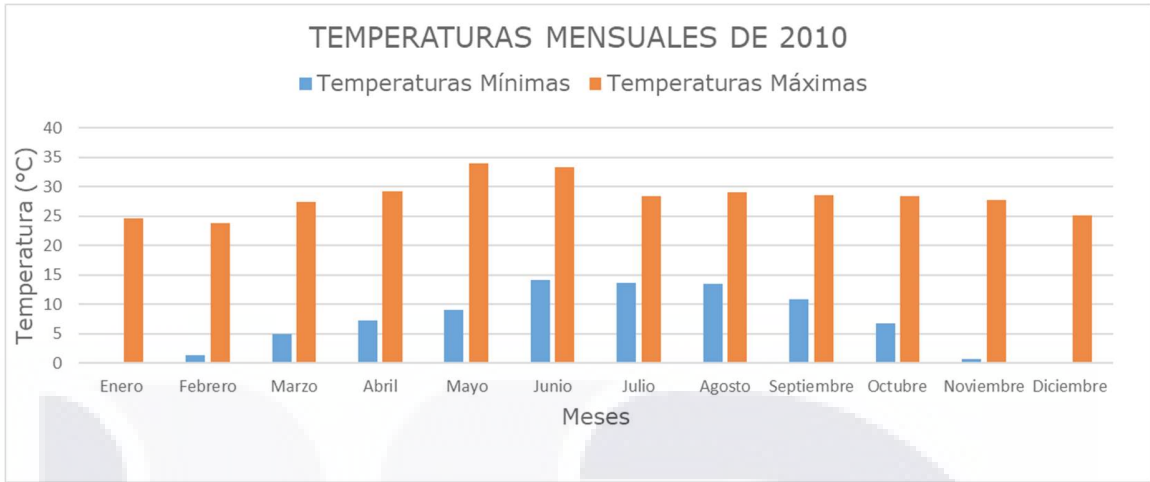
Wang, P., Xu, J., Liu, S., Liu, S., & Wang, H. (2016). A prediction model for the dynamic mechanical degradation of sedimentary rock after a long-term freeze-thaw weathering: Considering the strain-rate effect. *Cold Regions Science and Technology*, 131, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.08.003>

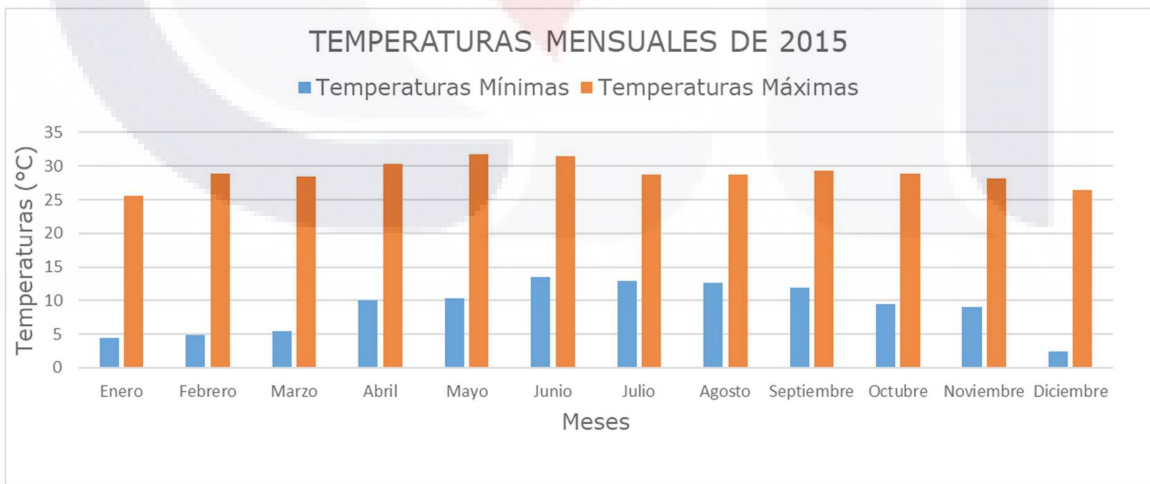
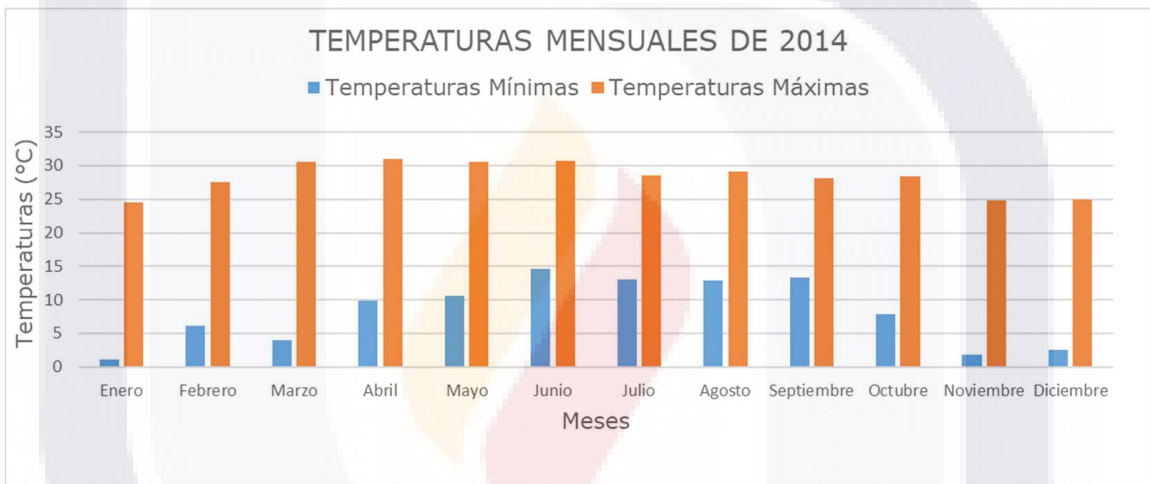
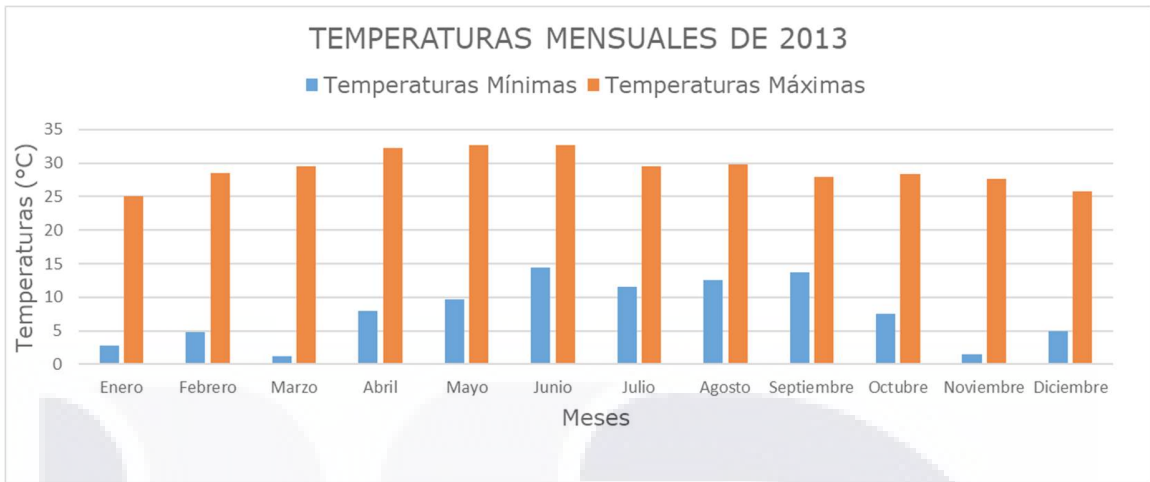
Wang, P., Xu, J., Liu, S., & Wang, H. (2016). Dynamic mechanical properties and deterioration of red-sandstone subjected to repeated thermal shocks. *Engineering Geology*, 212, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.015>

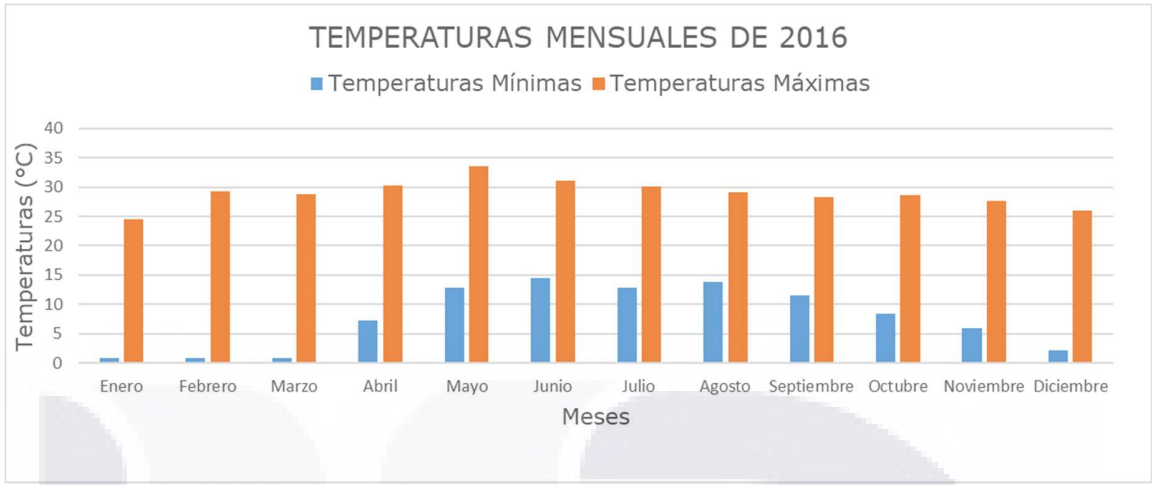
TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS







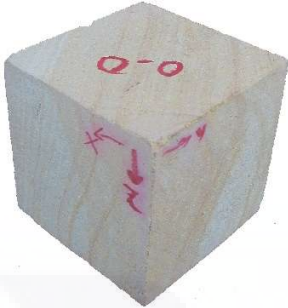

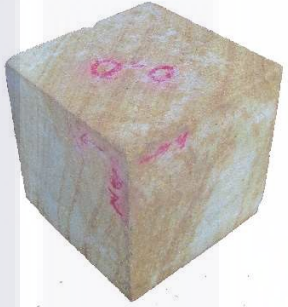





TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



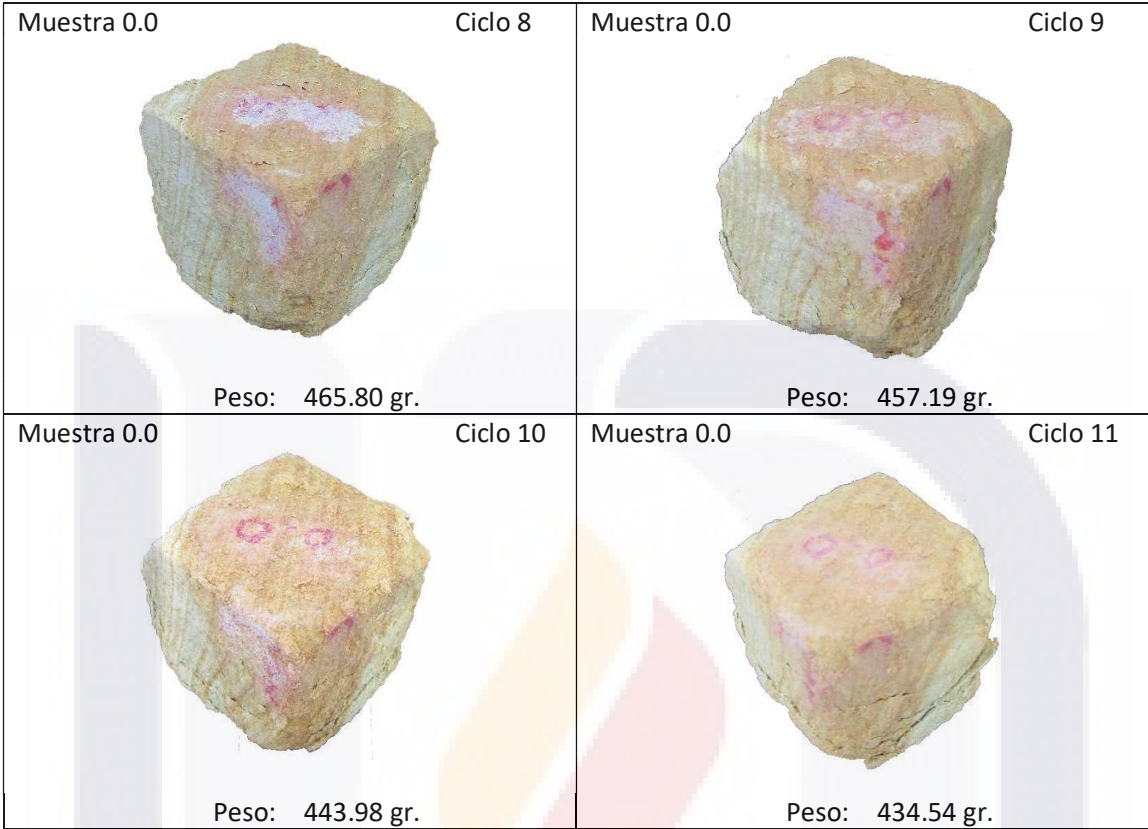
ANEXO "B"

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

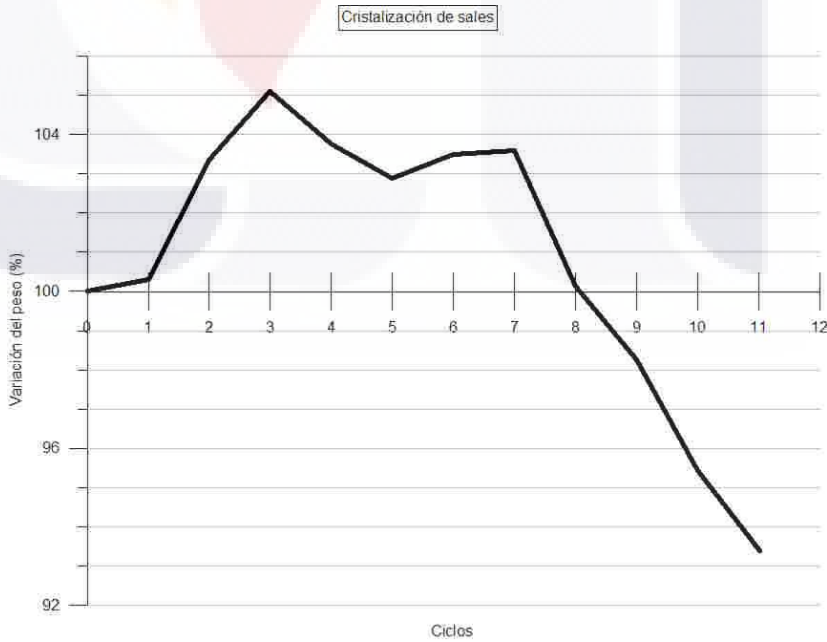
RESUMEN DE NÚMERO DE CICLOS PARA CANTERA HERMOSA

| | | | |
|--|---------|---|---------|
| Muestra 0.0  Peso: 465.24 gr. | Ciclo 0 | Muestra 0.0  Peso: 466.59 gr. | Ciclo 1 |
| Muestra 0.0  Peso: 480.76 gr. | Ciclo 2 | Muestra 0.0  Peso: 488.95 gr. | Ciclo 3 |
| Muestra 0.0  Peso: 482.78 gr. | Ciclo 4 | Muestra 0.0  Peso: 478.61 gr. | Ciclo 5 |
| Muestra 0.0  Peso: 481.43 gr. | Ciclo 6 | Muestra 0.0  Peso: 481.95 gr. | Ciclo 7 |

RESUMEN DE NÚMERO DE CICLOS PARA CANTERA HERMOSA



| Muestra 0.0 | |
|-------------|------------|
| Ciclo | Peso Seco |
| 0 | 465.24 gr. |
| 1 | 466.59 gr. |
| 2 | 480.76 gr. |
| 3 | 488.95 gr. |
| 4 | 482.78 gr. |
| 5 | 478.61 gr. |
| 6 | 481.43 gr. |
| 7 | 481.95 gr. |
| 8 | 465.80 gr. |
| 9 | 457.19 gr. |
| 10 | 443.98 gr. |
| 11 | 434.54 gr. |

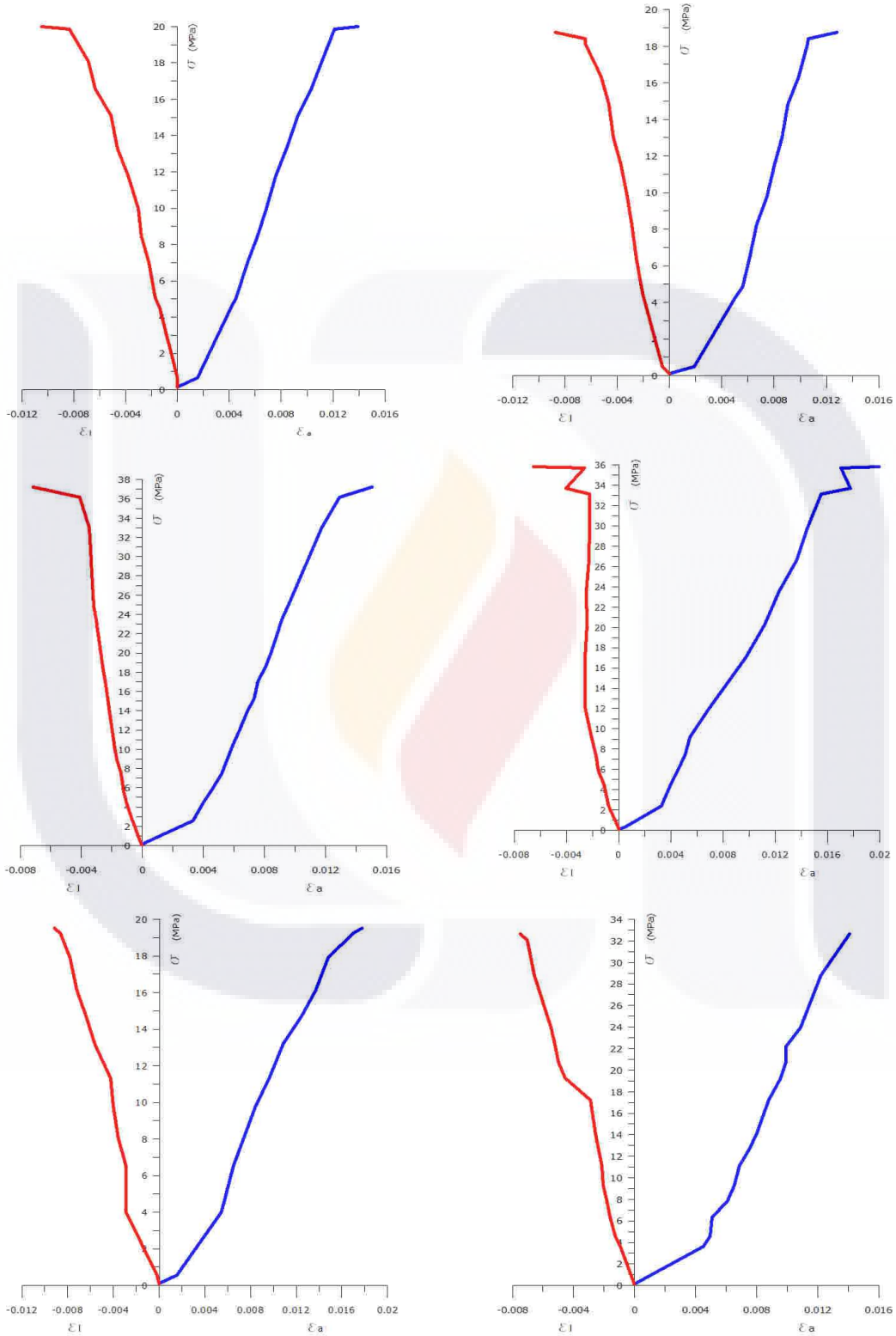


TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

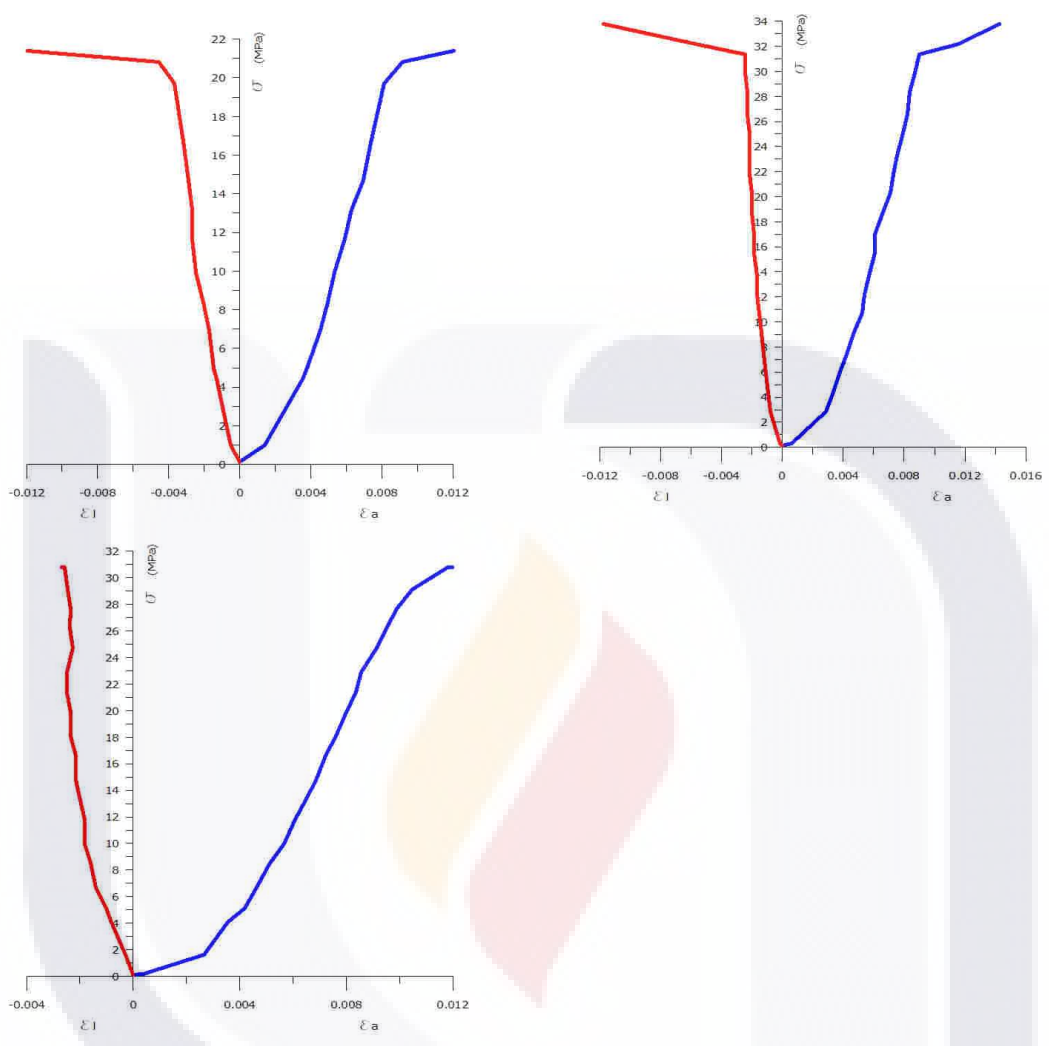


TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

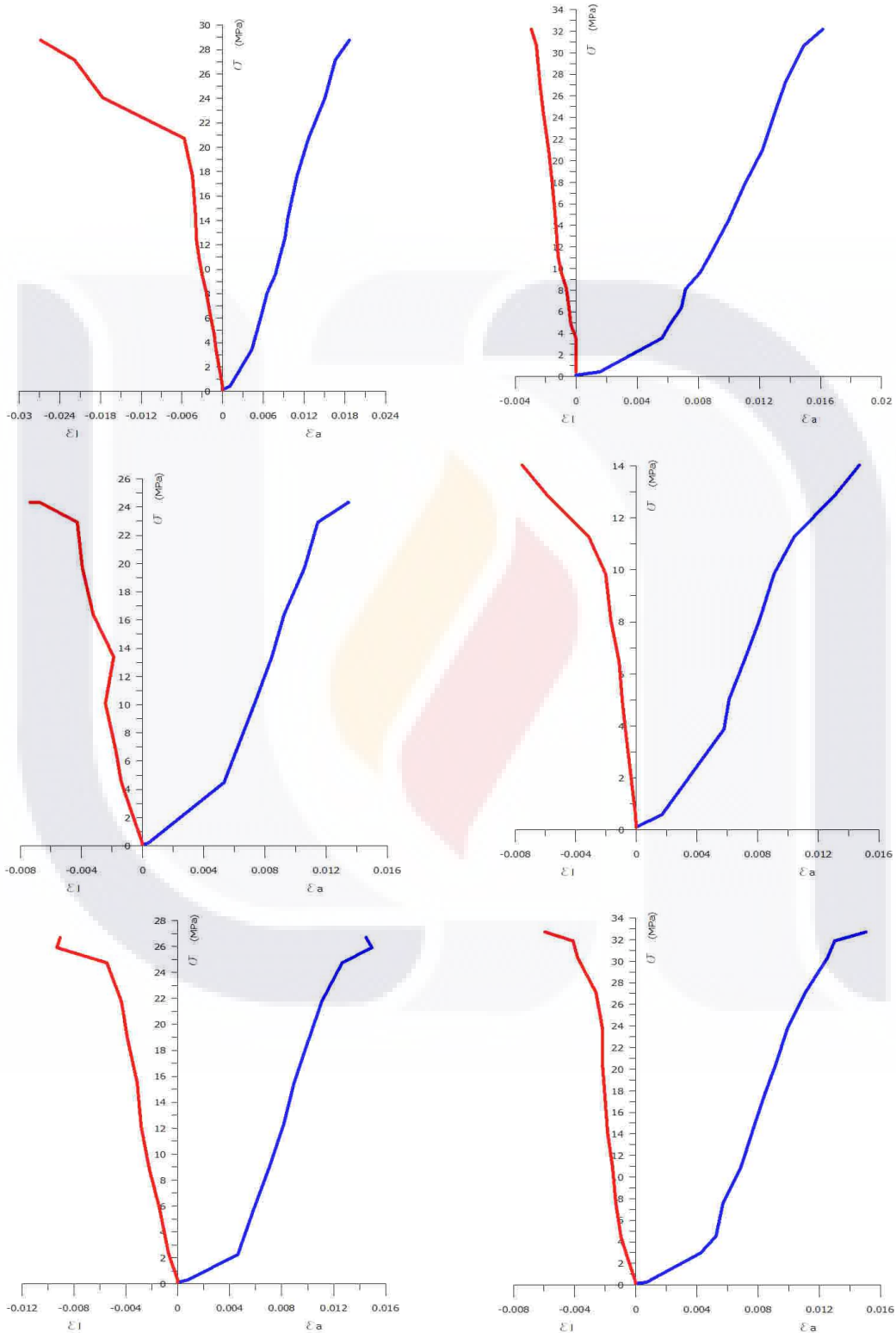
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 0.



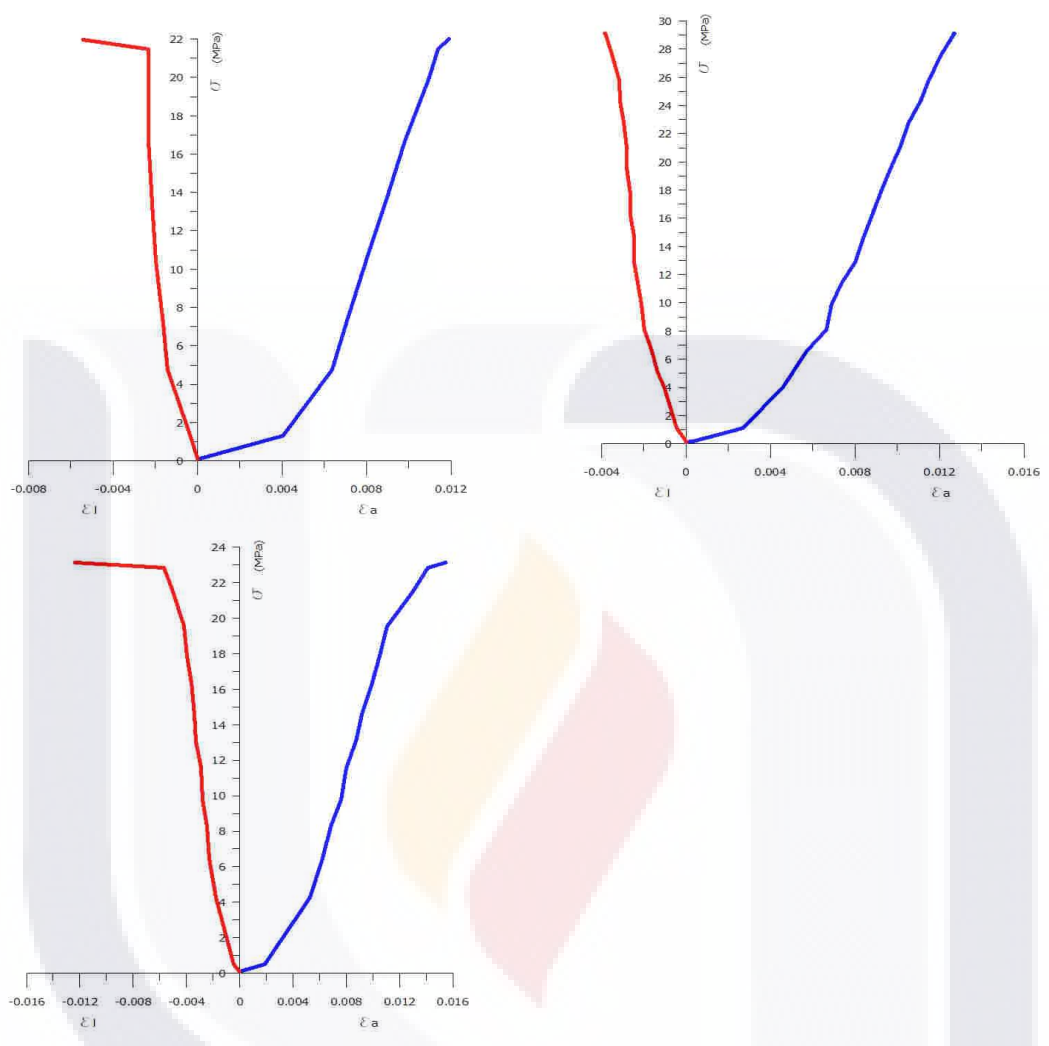
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 0.



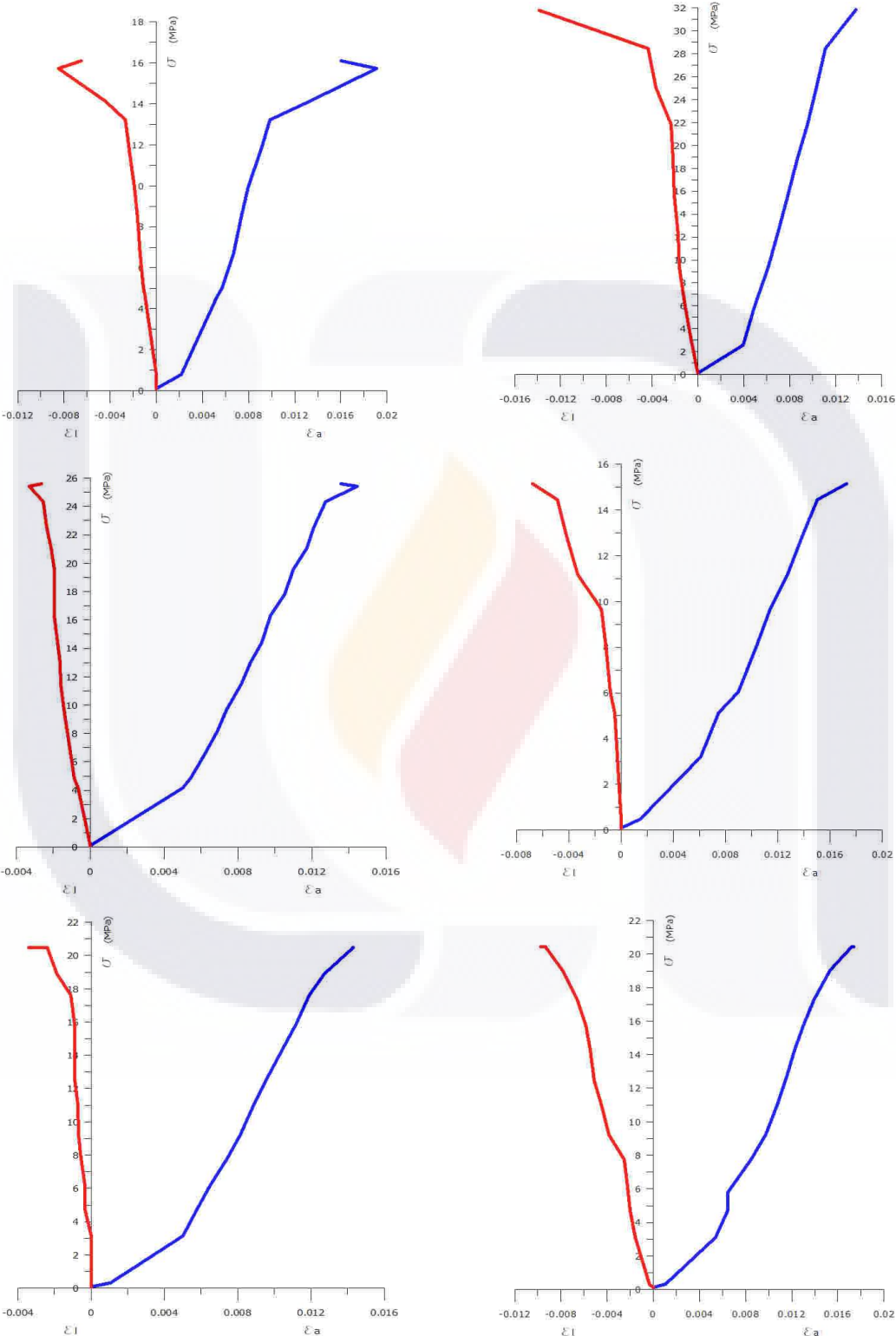
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 1.



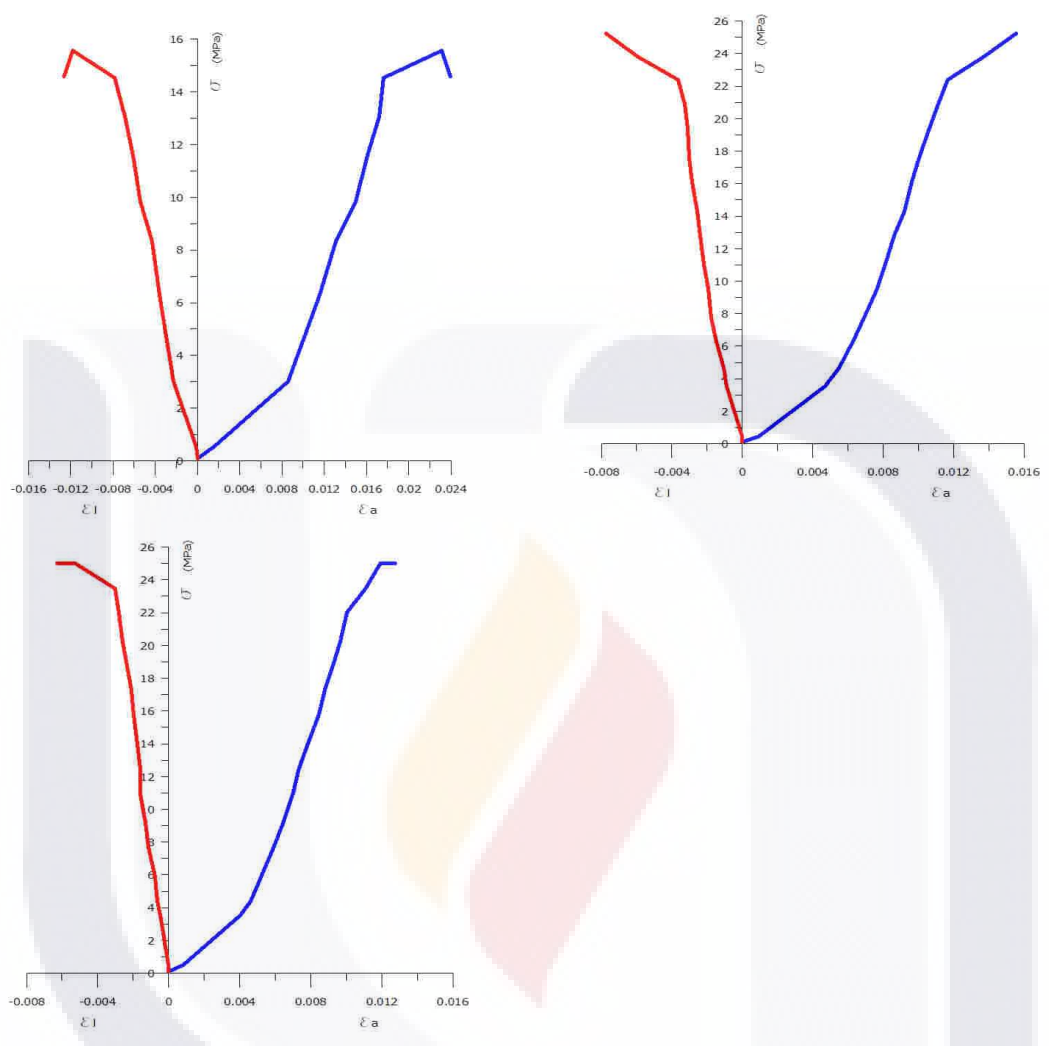
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 1.



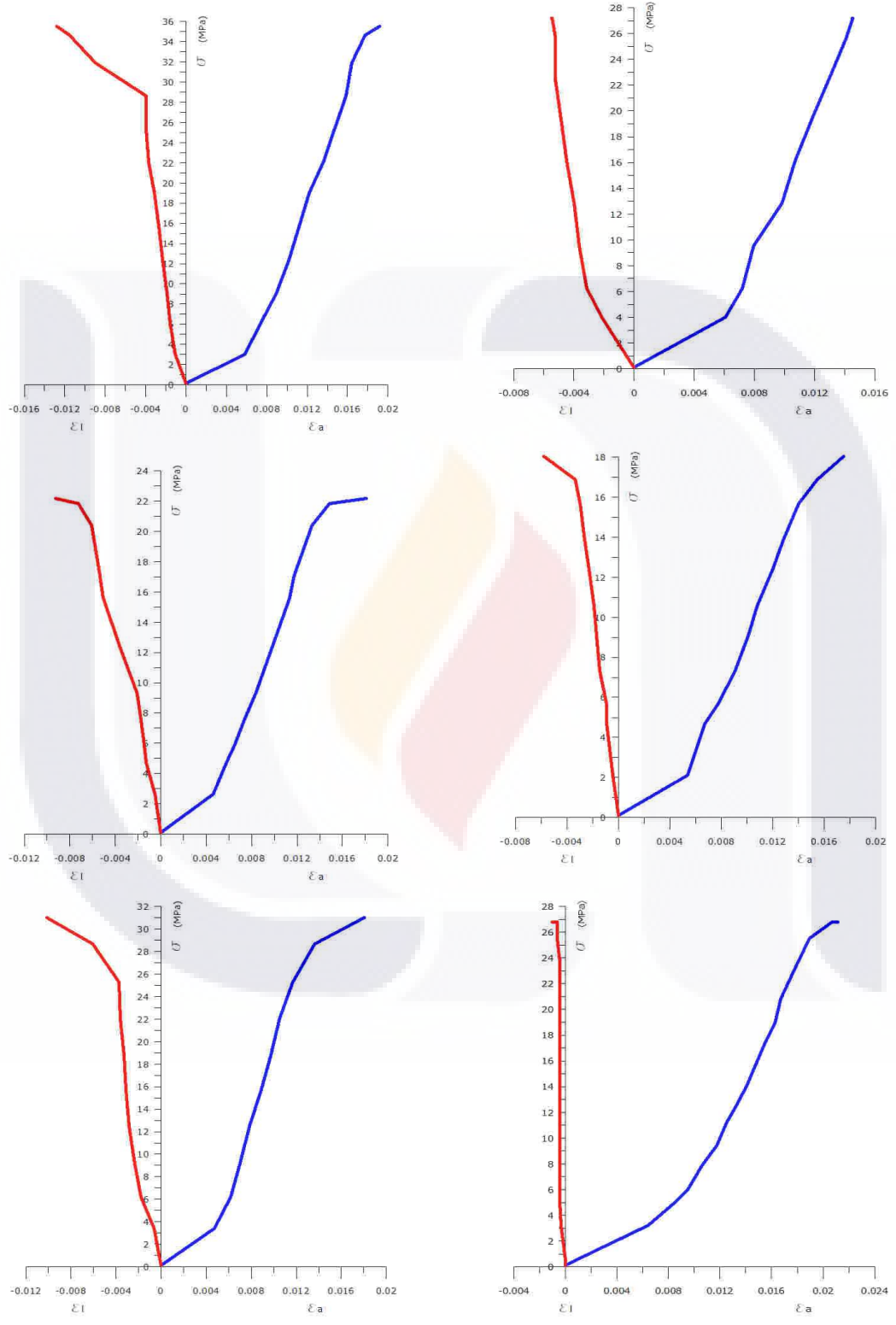
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 2.



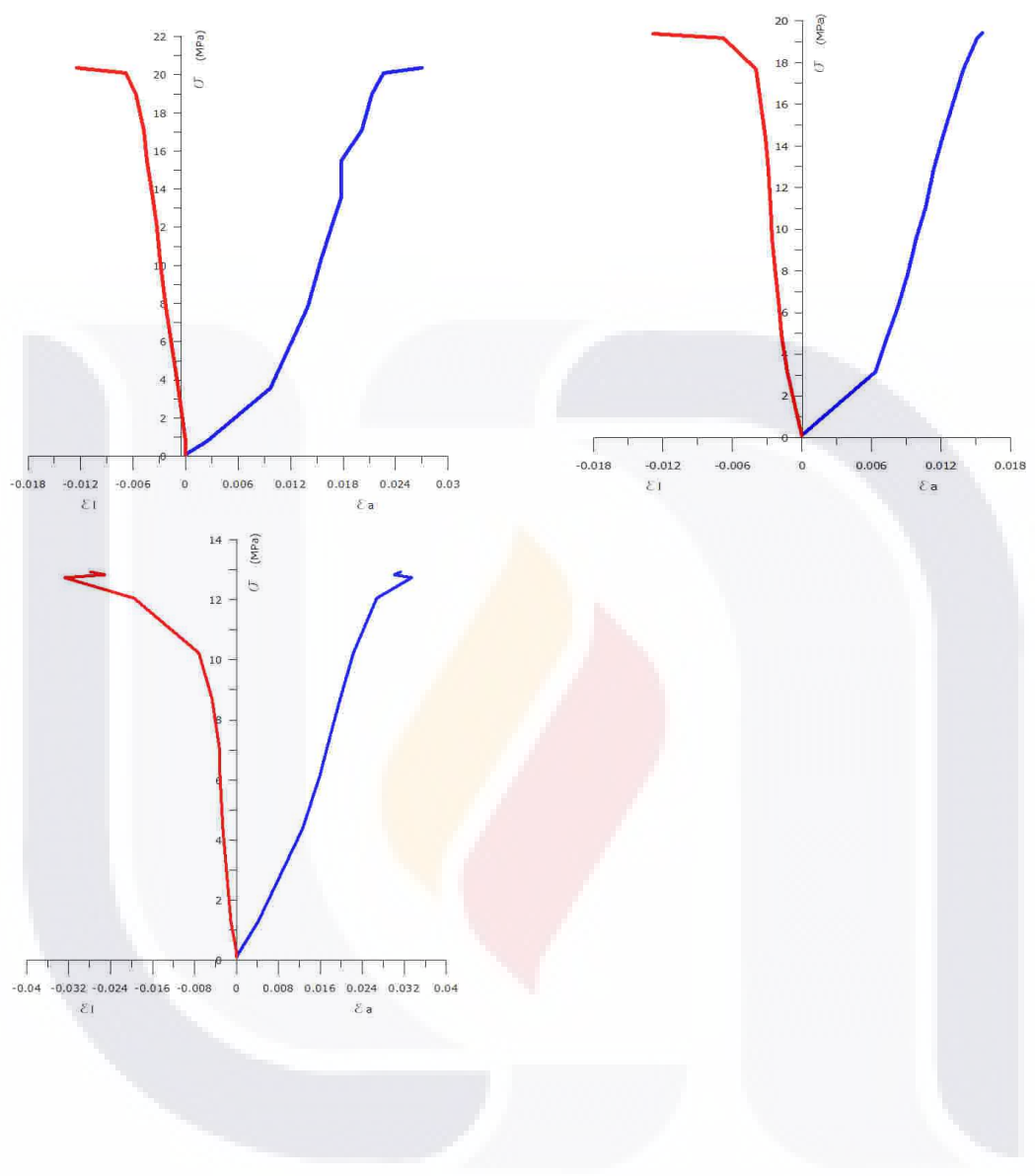
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 2.



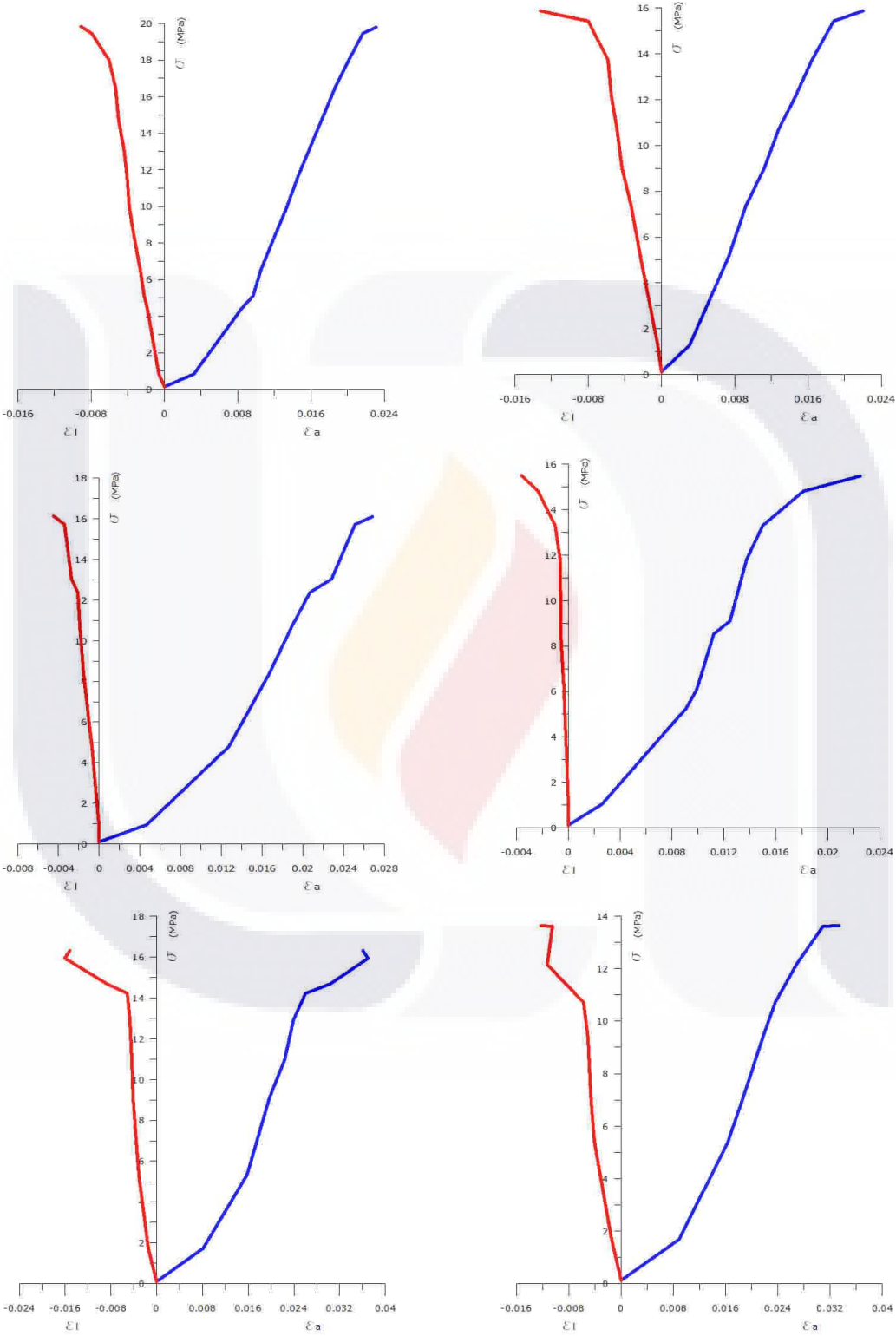
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 3.



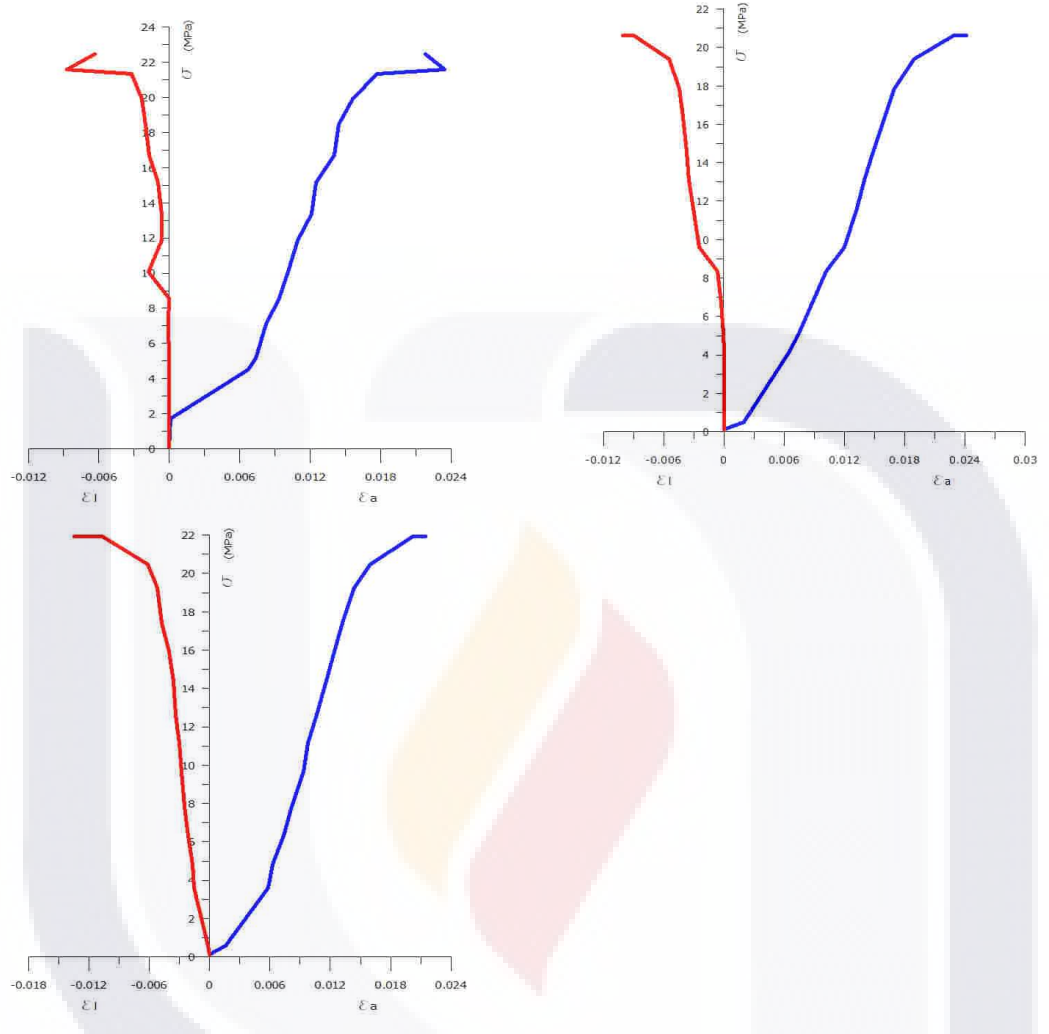
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 3.



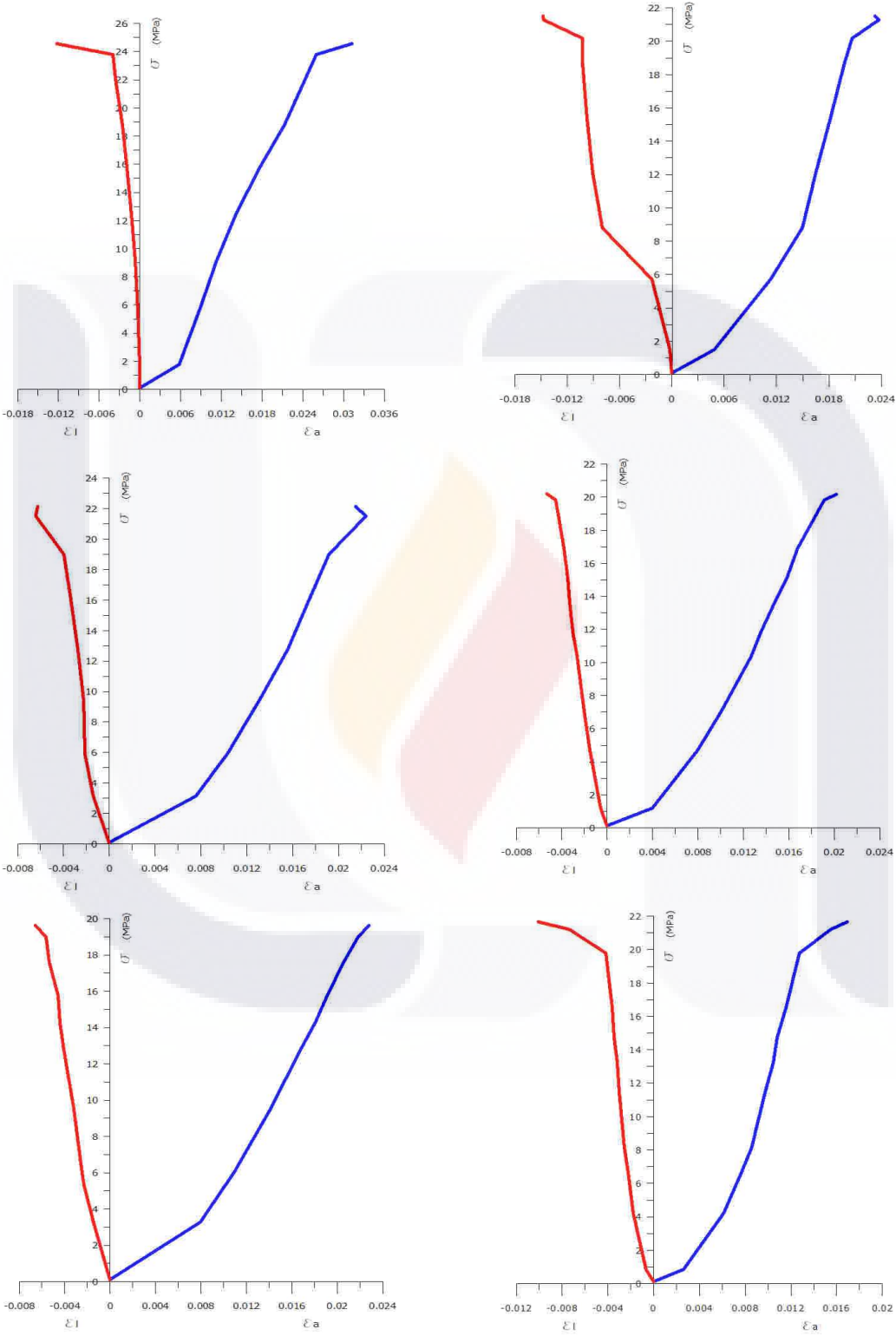
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 4.



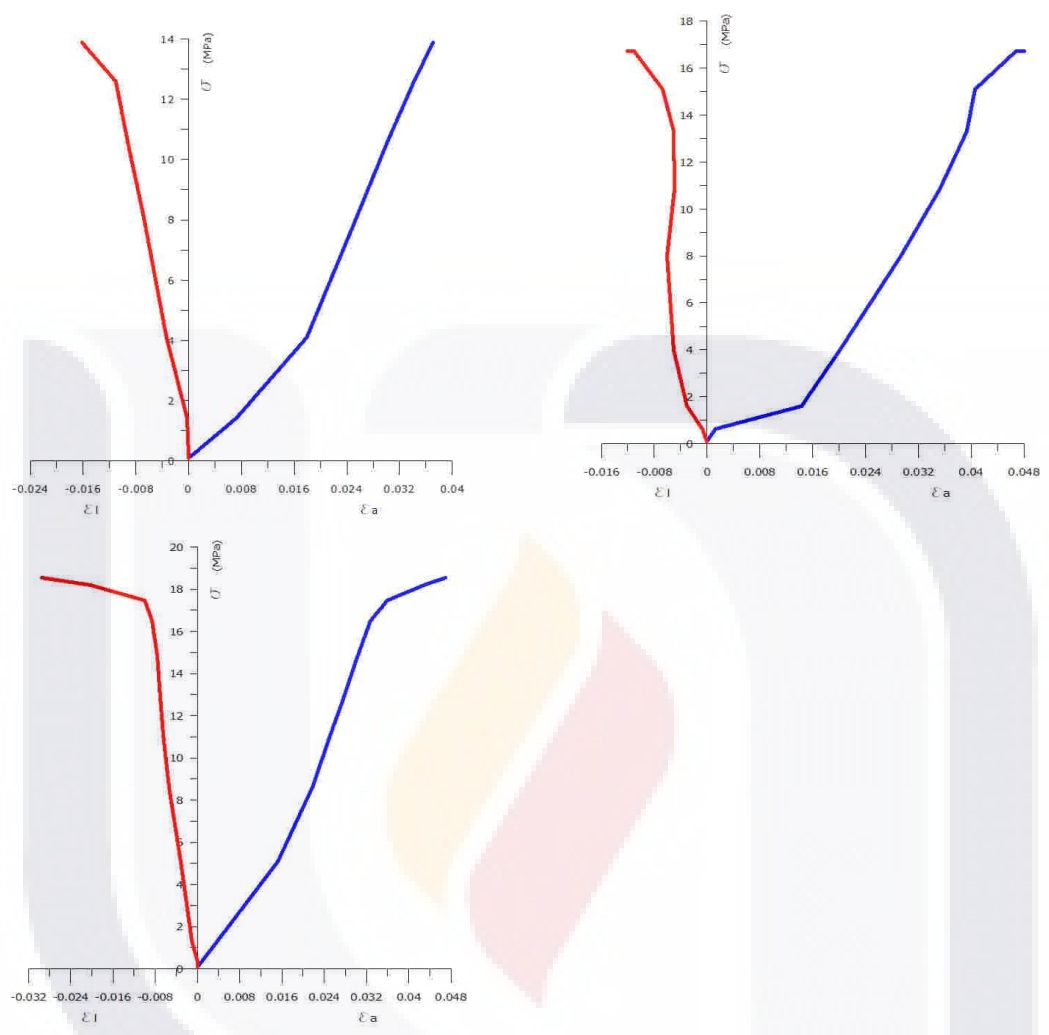
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 4.



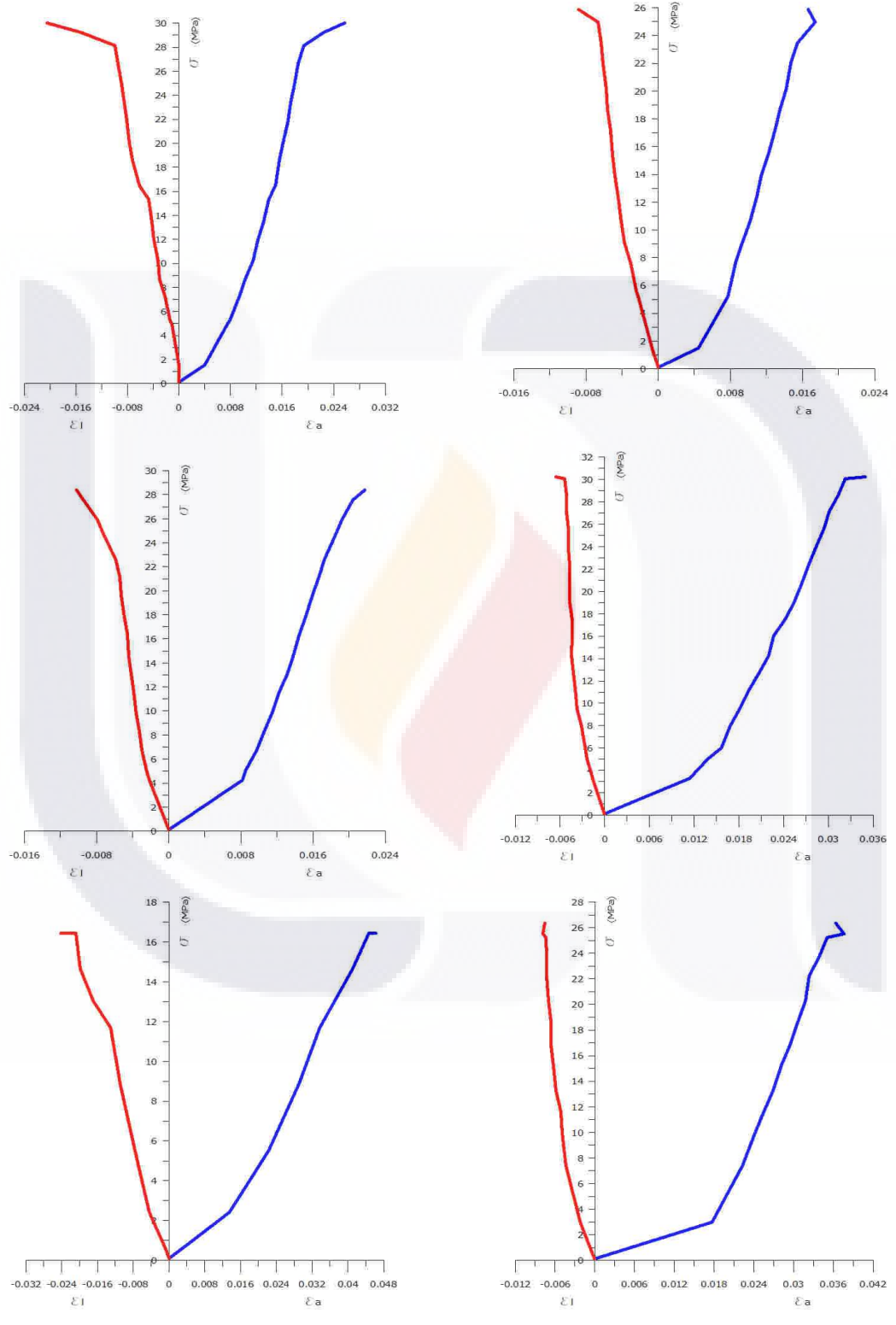
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 5.



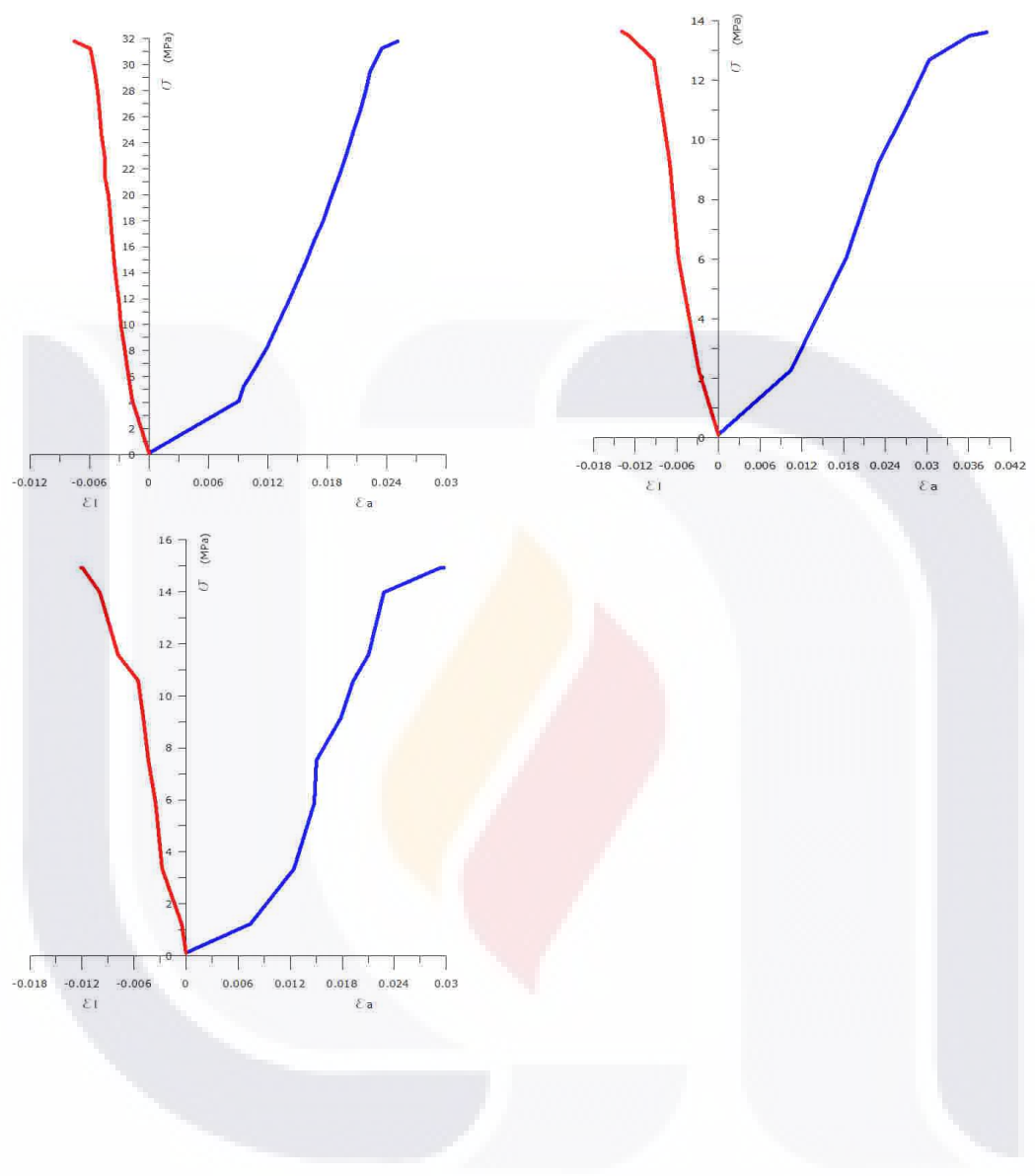
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 5.



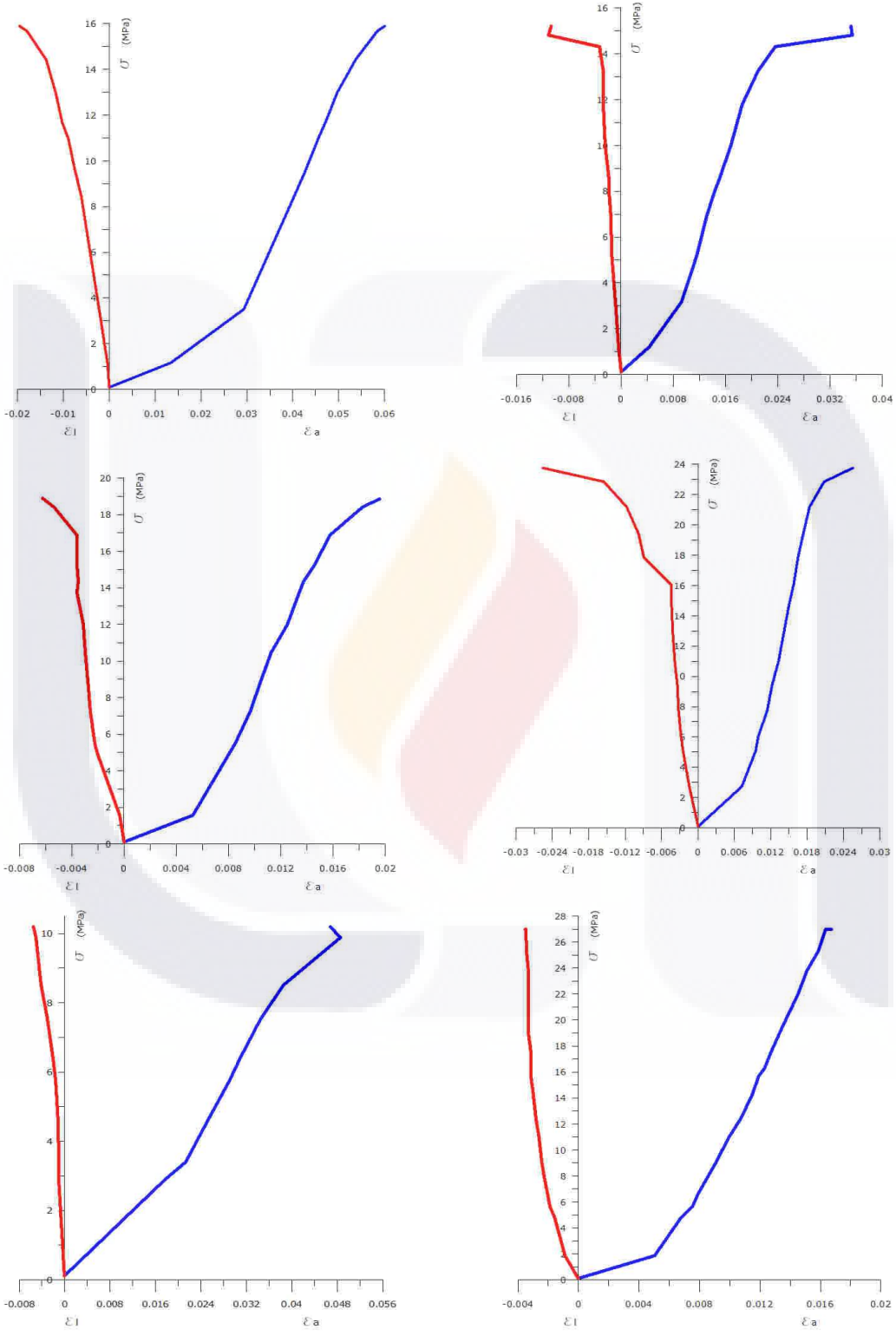
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 6.



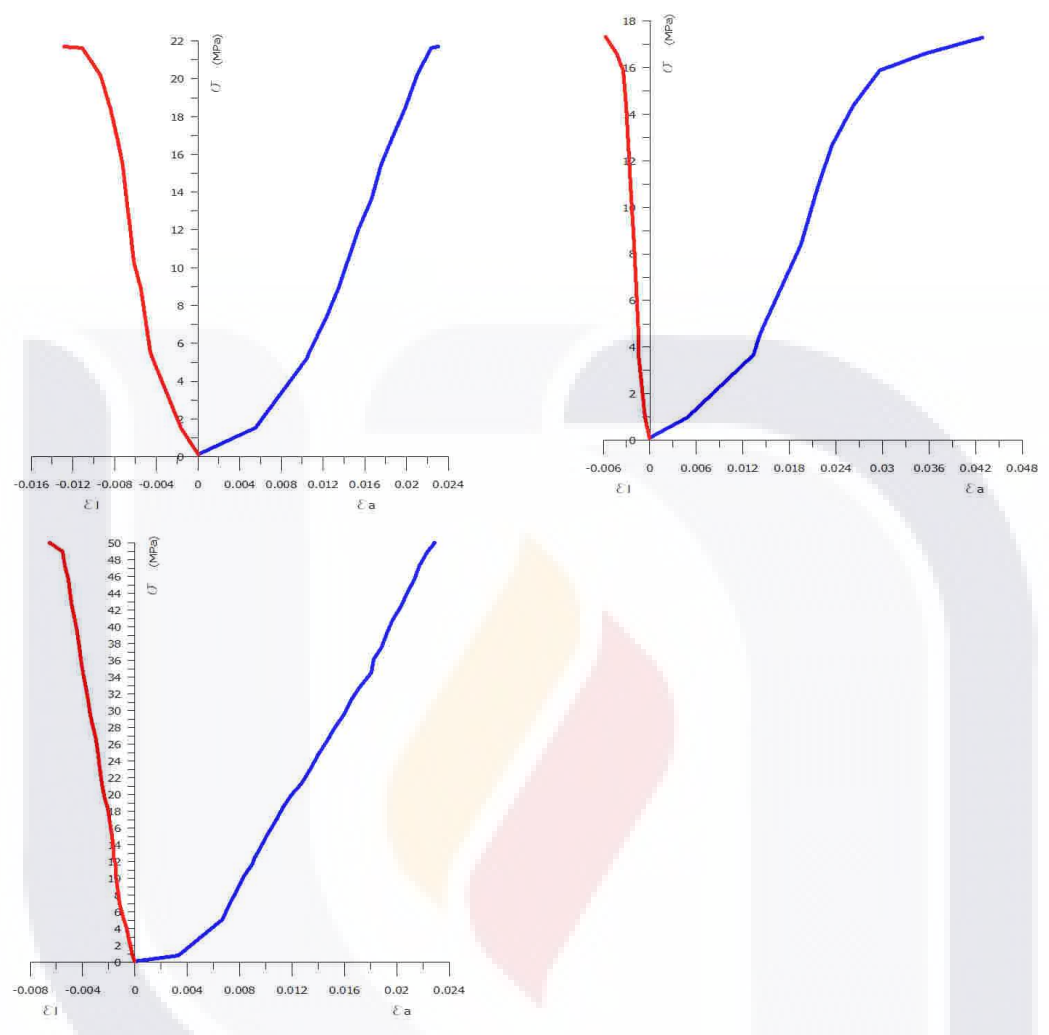
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 6.



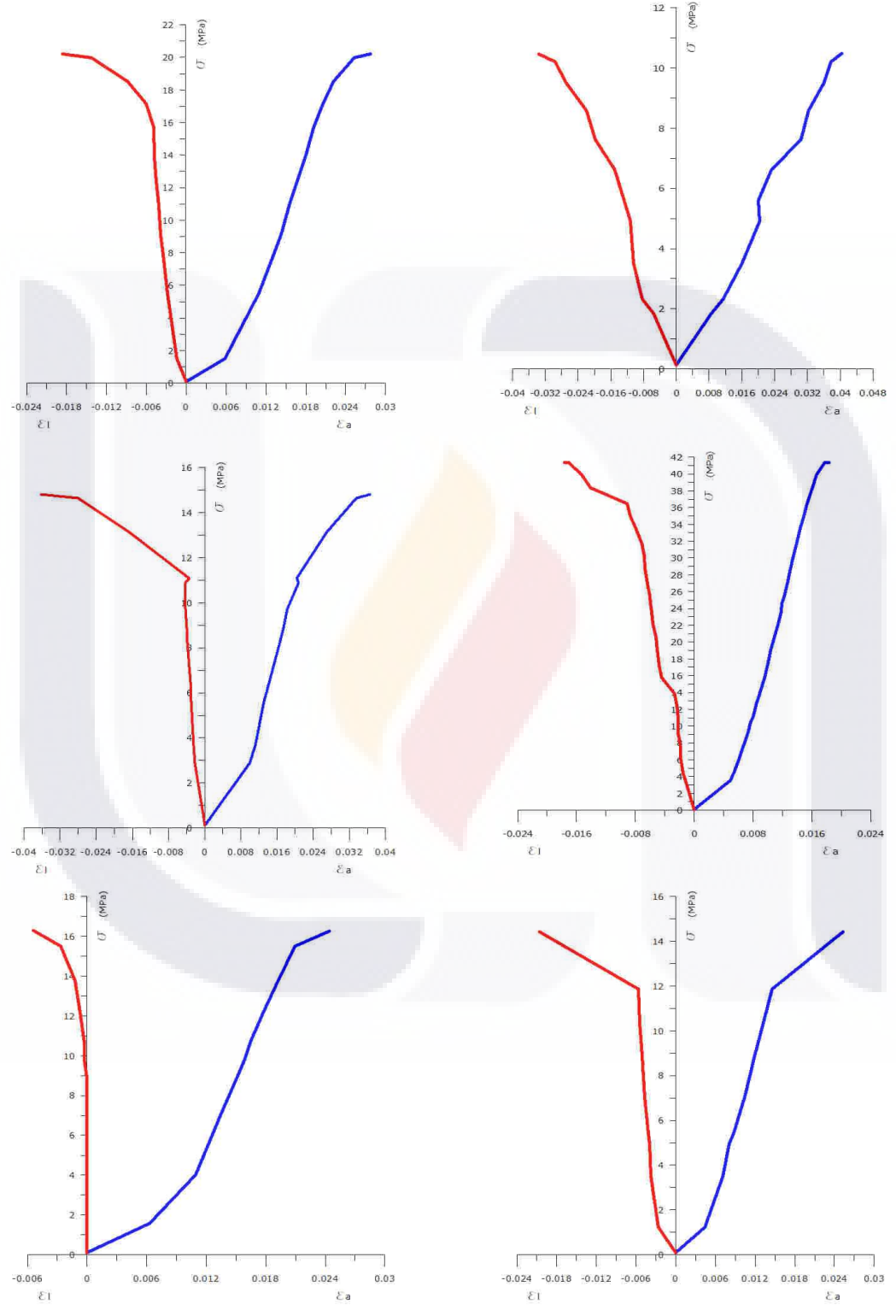
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 7.



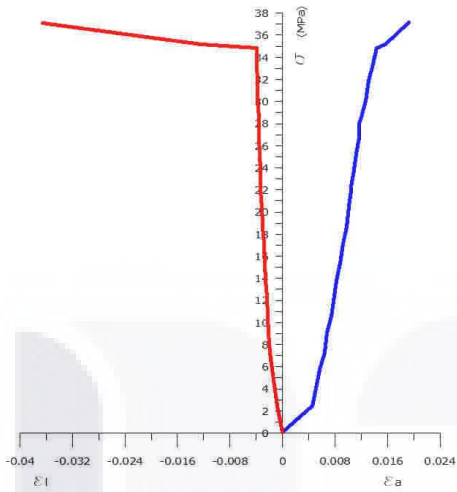
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 7.



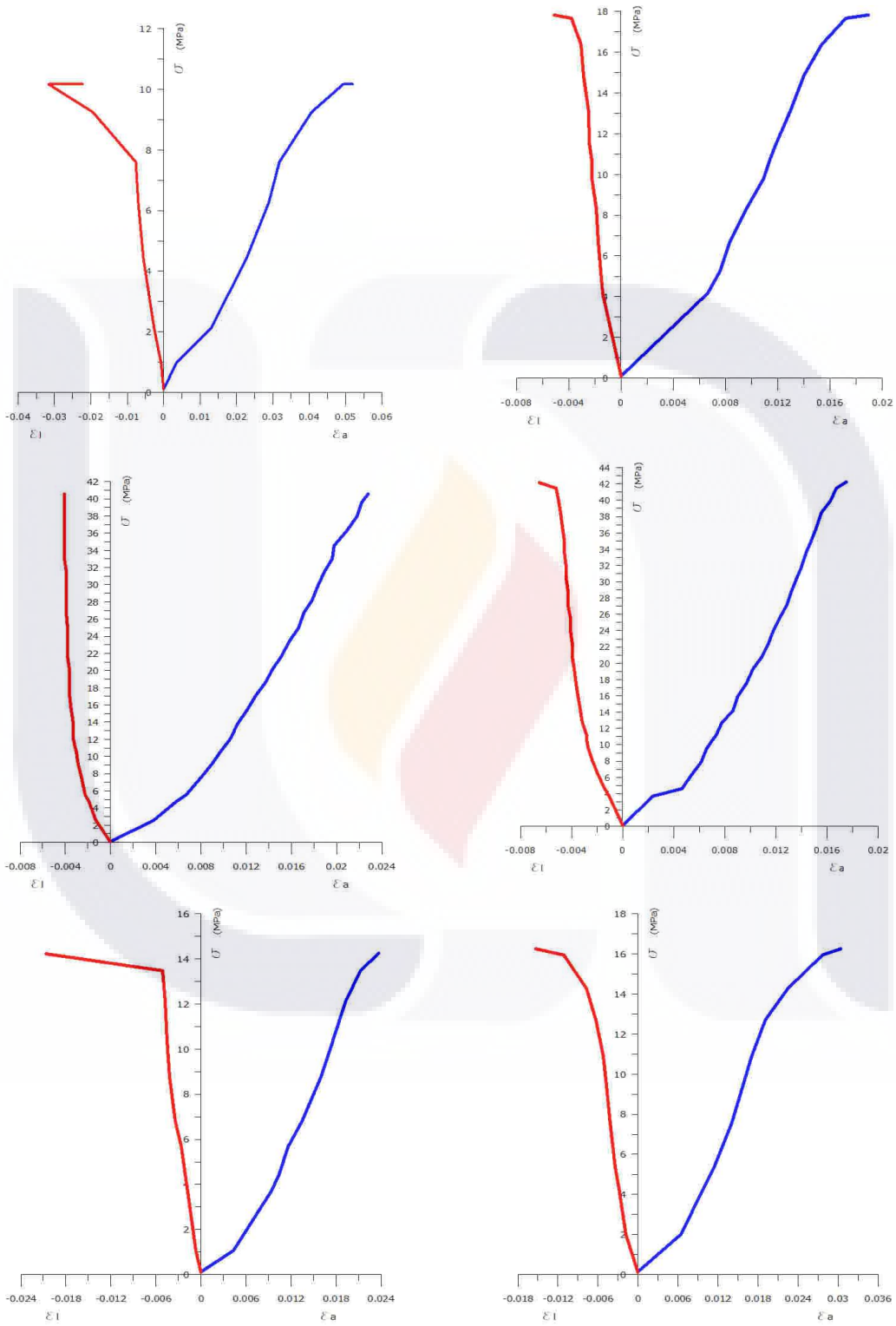
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 8.



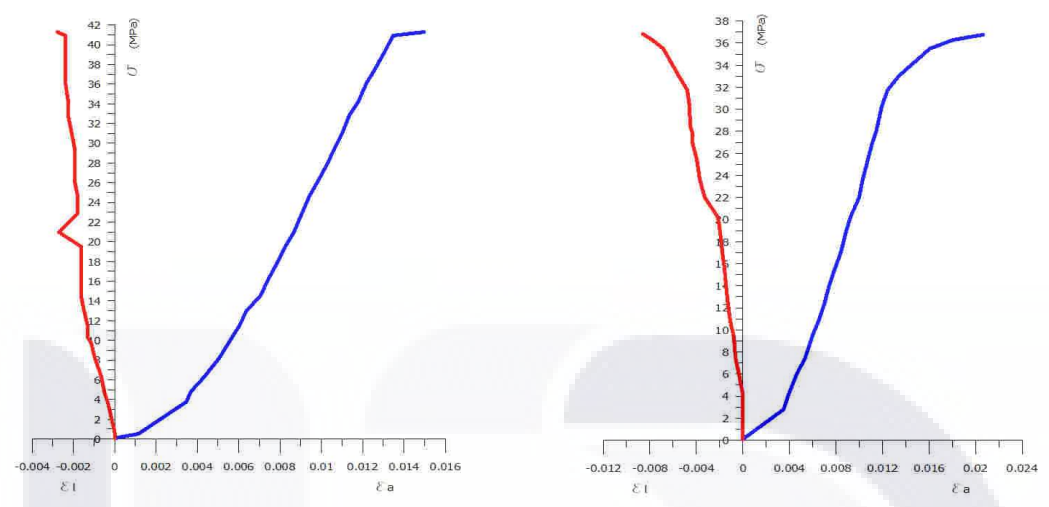
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 8.



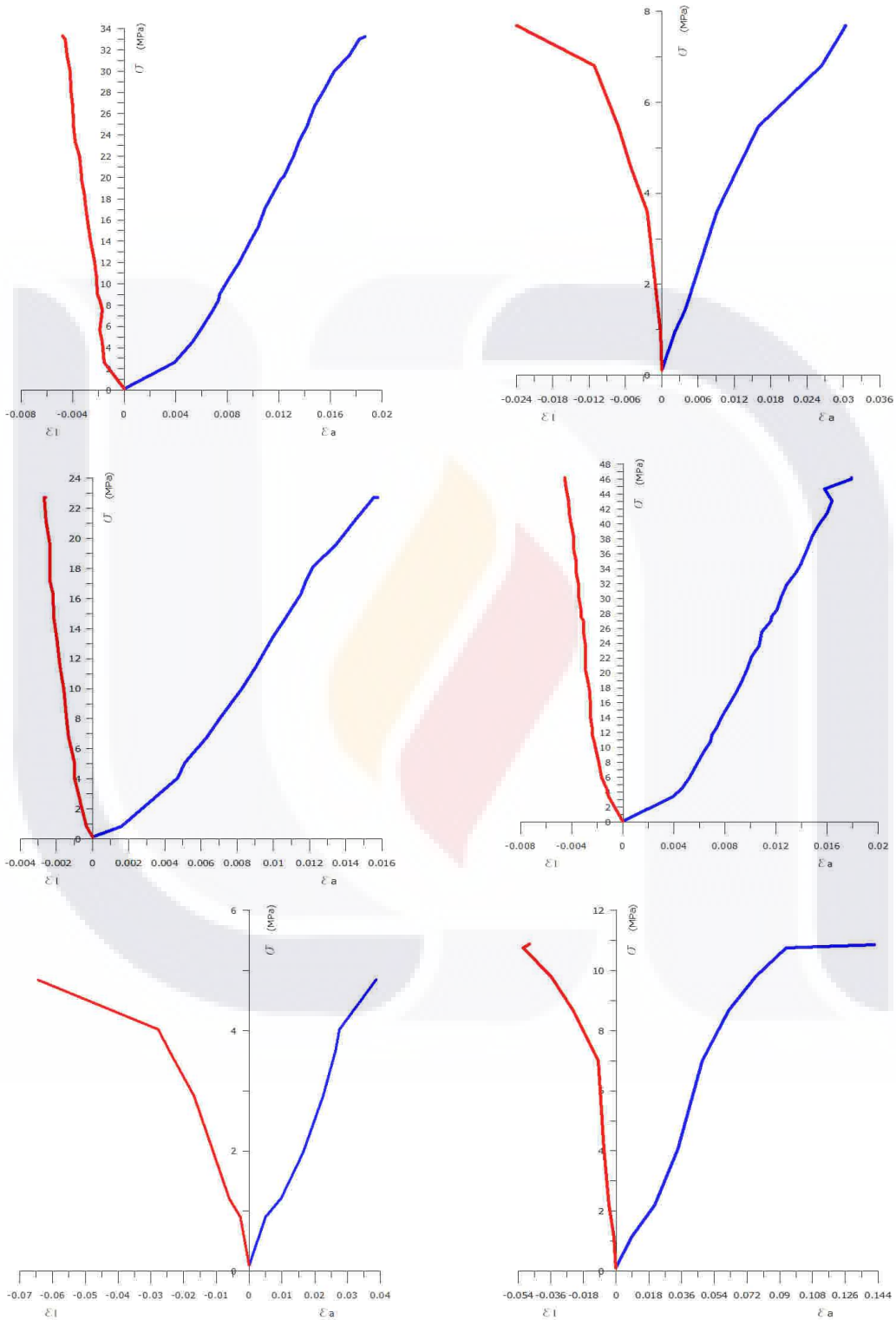
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 9.



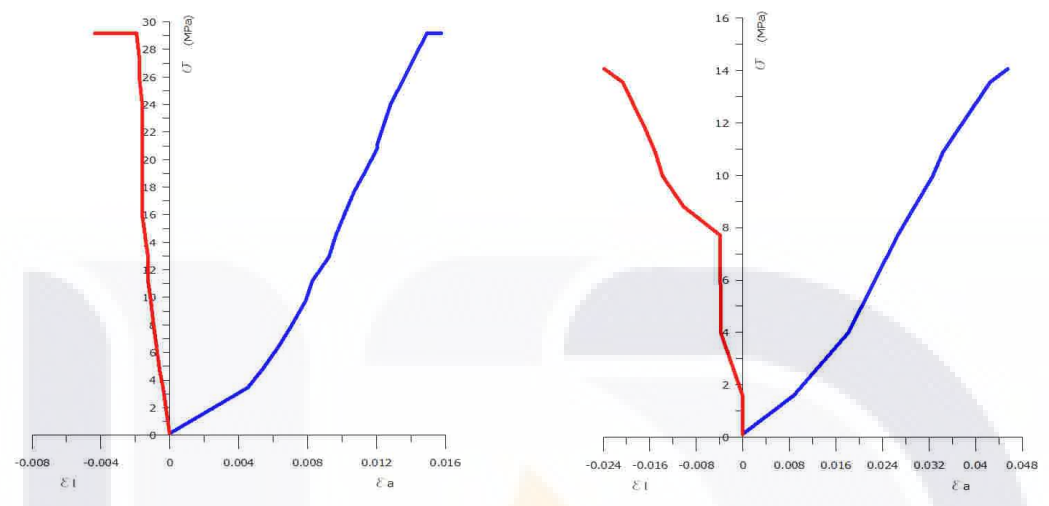
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 9.



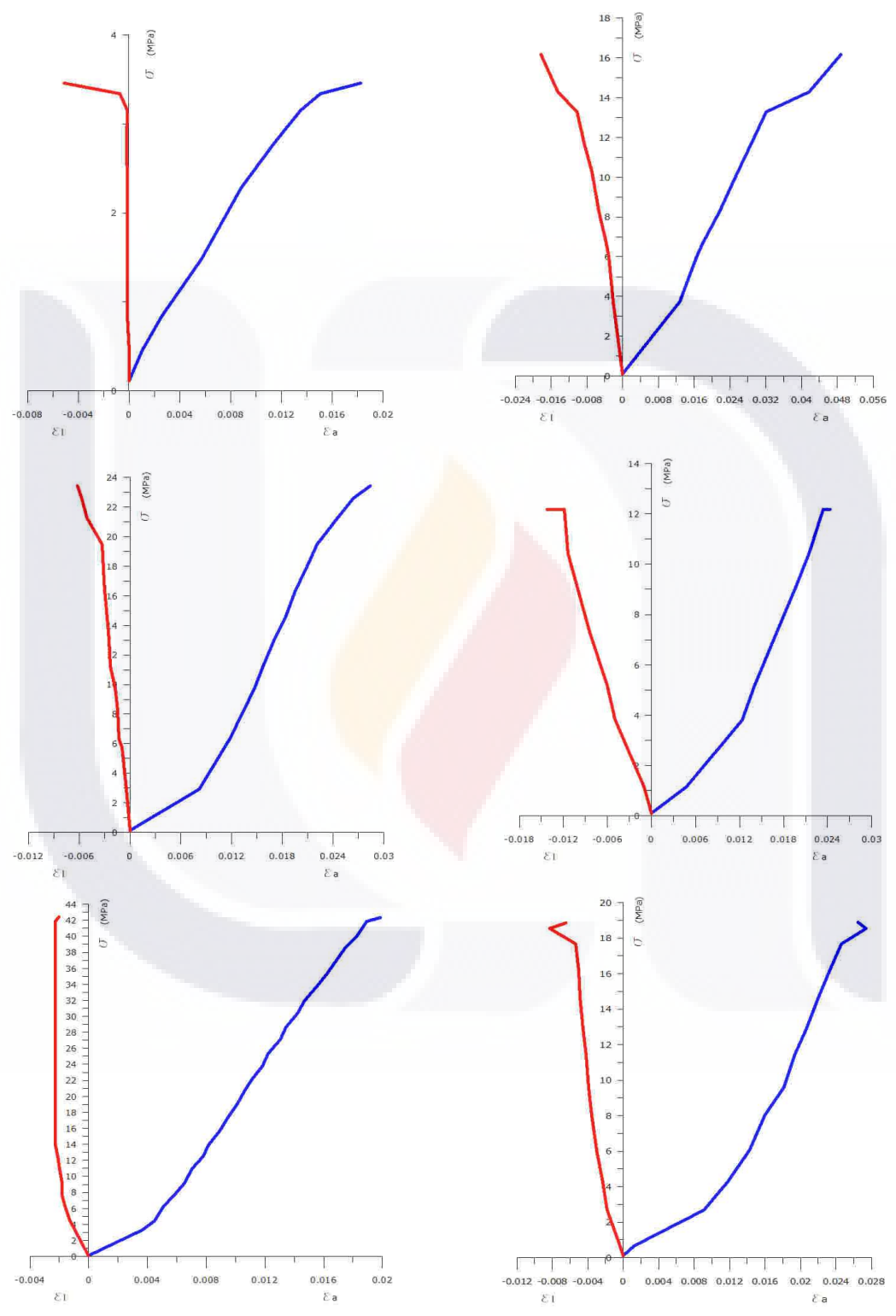
Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 10.



Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 10.



Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 11.



Gráfica de las deformaciones axiales y laterales de la cantera hermosa en el ciclo 11.

