

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE CIVIL**

**TESIS**

**Título:** Caracterización de los materiales de construcción en el centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito sometidos a envejecimiento acelerado.

**Disertación previa a la obtención del título:**

Ingeniero Civil

**Autor:** Diego Escalante

Quito, 11 de febrero del 2021

## **Agradecimiento**

A mis padres, Karina y Diego, por su apoyo incondicional durante toda mi carrera universitaria y esta disertación. Por su paciencia, consejos y enmiendas durante todos estos años, gracias, mamá y papá.

A mis amigos Paúl B., Diego B. y Enrique M., que se convirtieron en una segunda familia en las aulas. Gracias por su amistad y los buenos recuerdos durante todos estos semestres. Hasta dónde Ingeniería.

A mis docentes, de forma particular a mi director, el Dr. José Luis Piñeiros y a mis lectores, el Ing. Juan Carlos Montero y el Ing. Guillermo Realpe, por su retroalimentación y colaboración durante la realización de este trabajo.

Al Laboratorio de Materiales de Construcción de la PUCE, su director el Ing. Jorge Albuja y los laboratoristas, por proporcionar las instalaciones y la asistencia técnica para realizar esta investigación.

*An jedes Stoppschild und jede Schranke (danke).  
Ihr gehört dazu.*

## **Dedicatoria**

En primer lugar, quiero dedicar esta disertación a mis padres, quiénes me brindaron la oportunidad de poder estudiar y formarme como Ingeniero Civil, viajar a Alemania y conocer mi país por medio de las montañas. Gracias por su esfuerzo y amor, este trabajo es para ustedes.

A mis amigos Paúl B., Diego B. y Enrique M., por todos los momentos compartidos semestre a semestre, así como a: Carla, Victoria, Marcelo, Carlos, Daniela, Emilia y todos con los que compartí en la universidad.

A la Tuna Universitaria, por aquellas noches de luna que cantando con la Tuna me sentía yo feliz.

*Denn in Momenten wie diesen,  
spüre ich Ruhe und Frieden.  
Jedes Schrittchen war es wert,  
Alles führt hierher.*

## Tabla de contenido

Agradecimiento .....	2
Dedicatoria .....	2
1. Capítulo 1: Generalidades .....	11
1.1. Planteamiento del problema .....	11
1.2. Justificación .....	11
1.3. Objetivos.....	12
1.3.1. Objetivo General .....	12
1.3.2. Objetivos específicos.....	12
1.4. Hipótesis .....	12
1.5. Antecedentes.....	13
1.6. Alcance .....	14
2. Capítulo 2: Marco teórico .....	15
2.1. Cambio climático: Causas y efectos .....	15
2.1.1. Efectos del cambio climático en infraestructuras .....	16
2.2. Envejecimiento acelerado de los materiales y sus variables.....	17
2.2.1. Radiación Solar .....	17
2.2.2. Temperatura.....	18
2.2.3. Humedad .....	19
2.3. Estadísticas del clima en el DMQ .....	20
2.3.1. Proyecciones climáticas en el DMQ .....	20
3. Capítulo 3: Materiales y Métodos.....	21
3.1. Adobe .....	21
3.2. Cámara de envejecimiento acelerado .....	22
3.2.1. Descripción y funcionamiento .....	22

3.2.2.	Ciclos y secuencias de envejecimiento .....	24
3.3.	Caracterización de los adobes envejecidos aceleradamente.....	26
3.3.1.	Caracterización física.....	26
3.3.2.	Determinación de la resistencia a la compresión .....	31
3.3.3.	Determinación de la resistencia al corte.....	33
3.4.	Métodos de análisis estadístico.....	36
3.4.1.	Análisis de varianza .....	36
3.4.2.	Regresión y correlación .....	37
4.	Capítulo 4: Análisis y Discusión de resultados .....	38
4.1.	Caracterización física .....	38
4.1.1.	Granulometría .....	38
4.1.2.	Relaciones Fundamentales y Gravedad Específica .....	42
4.1.3.	Clasificación SUCS.....	43
4.2.	Resultados de la caracterización mecánica .....	46
4.2.1.	Resistencia a la compresión.....	46
4.2.2.	Resistencia al corte.....	56
4.3.	Análisis de correlación entre el envejecimiento acelerado y los resultados obtenidos .....	66
4.4.	Análisis de varianza (ANOVA) de los resultados obtenidos .....	71
4.5.	Discusión de resultados.....	72
5.	Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones .....	81
5.1.	Conclusiones .....	81
5.2.	Recomendaciones.....	85
6.	Anexos .....	87
6.1.	Relaciones Fundamentales y Gravedad Específica – Cálculos.....	87

6.2.	Granulometría y Clasificación SUCS – Cálculos.....	88
6.3.	Límites de Consistencia – Cálculos.....	93
6.4.	Resistencia a la compresión – Cálculos.....	99
6.5.	Resistencia al corte – Cálculos .....	102
6.6.	Análisis de Correlación – Cálculos.....	105
6.7.	Análisis Factorial (ANOVA) – Cálculos .....	113
7.	Bibliografía .....	115

## Tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la cámara de envejecimiento acelerado, (BIOBASE, s. f.).....	23
Tabla 2. Duración de los ciclos de envejecimiento acelerado.....	25
Tabla 3. Análisis Granulométrico – Resultados.....	40
Tabla 4. Resultados del análisis por hidrómetro.....	42
Tabla 5. Densidad Seca y GS.....	42
Tabla 6. Límites de Consistencia .....	43
Tabla 7. Humedades y densidades de ensayo (Compresión).....	46
Tabla 8. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 0 años .....	47
Tabla 9. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 5 años.....	48
Tabla 10. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 15 años .....	50
Tabla 11. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 15 años .....	52
Tabla 12. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 20 años.....	54
Tabla 13. Datos de ensayo triaxial - 0 años de envejecimiento acelerado .....	56
Tabla 14. Datos de ensayo triaxial - 10 años de envejecimiento acelerado .....	60
Tabla 15. Datos de ensayo triaxial - 15 años de envejecimiento acelerado.....	62
Tabla 16. Datos de ensayo triaxial - 10 años de envejecimiento acelerado.....	64
Tabla 17. ANOVA - Resistencia a la compresión.....	71

## **Ilustraciones**

Ilustración 1. Atmósfera Estándar, a partir de Marti, 2014 .....	18
Ilustración 2. Clasificación SUCS, a partir de (D18 Committee, s. f.-a).....	30
Ilustración 3. Análisis Granulométrico .....	40
Ilustración 4. Análisis por Hidrómetro - Muestra 1 .....	41
Ilustración 5. Ilustración 4. Análisis por Hidrómetro - Muestra 2.....	41
Ilustración 6. Límite Líquido - Muestra 1.....	43
Ilustración 7. Límite Líquido - Muestra 2.....	44
Ilustración 8. Límite Líquido - Muestra 3.....	44
Ilustración 9. Límite Líquido - Muestra 4.....	45
Ilustración 10. Límite Líquido - Muestra 5 .....	45
Ilustración 11. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 0 años.....	47
Ilustración 12. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 5 años.....	48
Ilustración 13. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 10 años....	50
Ilustración 14. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 15 años ...	52
Ilustración 15. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 20 años...	54
Ilustración 16. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 0 años.....	57
Ilustración 17. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 5 años.....	59
Ilustración 18. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 10 años .....	61
Ilustración 19. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 15 años .....	63
Ilustración 20. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 20 años.....	65
Ilustración 21. Resistencia a la Compresión - Tendencia .....	67
Ilustración 22. Cohesión - Tendencia.....	68
Ilustración 23. Ángulo de Fricción - Tendencia.....	70
Ilustración 24. Resistencia a la compresión - Tendencia.....	74

Ilustración 25. Ángulo de Fricción - Valores obtenidos .....	76
Ilustración 26. Ángulo de fricción - Tendencia.....	78
Ilustración 27. Cohesión - Tendencia .....	79
Ilustración 28. Cohesión - Valores obtenidos. ....	80
Ilustración 29. Composición granulométrica del Adobe .....	81
Ilustración 30. Carta de plasticidad del Adobe.....	81
Ilustración 31. Diagrama de cajas - Resistencia a la compresión .....	82
Ilustración 32. Resistencia a la compresión - Valores obtenidos.....	84
Ilustración 33. Prueba de plasticidad y cohesión, imagen a partir de Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems .....	85
Ilustración 34. Prueba de dureza, imagen a partir de Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems.....	86

## **Imágenes**

Imagen 1. Unidades originales de Adobe.....	22
Imagen 2. Determinación del GS, según la norma ASTM D-854 .....	27
Imagen 3. Muestras recubiertas de parafina.....	29
Imagen 4. Refrentado de las muestras de adobe .....	32
Imagen 5. Equipo usado para determinar la resistencia a la compresión.....	33
Imagen 6. Tallado de las muestras para ensayos triaxiales U-U. ....	34
Imagen 7. Probeta tallada lista para ser ensayos triaxiales U-U. ....	34
Imagen 8. Cámara triaxial. ....	35
Imagen 9. Equipo usado para determinar la resistencia al corte. ....	35
Imagen 10. Material retenido en el tamiz 4.75mm (#4) .....	38
Imagen 11. Material retenido en el tamiz 2mm (#10) .....	39
Imagen 12. Material retenido en el tamiz 0.425mm (#40) .....	39
Imagen 13. Material retenido en el tamiz 75um (#200) .....	40
Imagen 14. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 0 años de envejecimiento acelerado .....	56
Imagen 15. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 5 años de envejecimiento acelerado .....	58
Imagen 16. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 10 años de envejecimiento acelerado .....	60
Imagen 17. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 15 años de envejecimiento acelerado .....	62
Imagen 18. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 20 años de envejecimiento acelerado .....	64
Imagen 19. Fibras de carrizo y paja en el adobe.....	73

## **Ecuaciones**

Ecuación 1. Cálculo de la gravedad específica de una muestra de suelo, a partir de (D18 Committee, s. f.).....	27
Ecuación 2. Corrección de la gravedad específica por la temperatura del agua, a partir de (D18 Committee, s. f.).....	28
Ecuación 3. Cálculo de la densidad seca, a partir de.....	28
Ecuación 4. Cálculo del Esfuerzo de Compresión en Unidades de Mampostería Maciza, a partir de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2019) .....	32
Ecuación 5. Cuadrados Medios Totales = Cuasivarianza Total (varianza muestral total).....	37
Ecuación 6. Cuadrados Medios del Factor = Intervarianza (varianza entre las medias de los distintos niveles). .....	37
Ecuación 7. Cuadrados Medios del Error = Intravarianza (varianza dentro de los niveles, conocida como varianza residual o de error). .....	37
Ecuación 8. Estadístico F Fisher-Snedecor con k-1 y N-t grados de libertad. ....	37
Ecuación 9. Ecuación de regresión lineal.....	38
Ecuación 10. Ecuación de regresión polinomial.....	38
Ecuación 11. Ecuación de tendencia de la resistencia a compresión .....	67
Ecuación 12. Ecuación de tendencia de la cohesión en función del tiempo. ....	69
Ecuación 13. Ecuación de tendencia del ángulo de fricción en función del tiempo. ..	70
Ecuación 14. Criterio de falla Mohr-Coulomb.....	75
Ecuación 15. Relación entre el ángulo de falla y el ángulo de fricción del material .	75

# **1. Capítulo 1: Generalidades**

## **1.1. Planteamiento del problema**

Quito, capital de la República del Ecuador fue fundada en 1534, es una de las capitales más antiguas de América Latina, declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad en 1978, posee el centro histórico de mayor extensión, mejor conservado y menos alterado en Latinoamérica. Son 376 hectáreas entre el núcleo central y el área de amortiguamiento, que contiene 40 iglesias, 16 conventos y monasterios y 4.286 inmuebles patrimoniales (Carrión Game, 2019).

Sin embargo, el paso del tiempo, así como el deterioro físico y los cambios en la ciudad exponen la integridad y conservación de sus edificaciones patrimoniales y hacen preciso una intervención en las mismas. Cada año, un gran número de eventos naturales potencialmente peligrosos afectan a la ciudad: niveles de radiación solar muy alta, lluvias, inundaciones, derrumbes y sismos (Primicias, 2020), influenciados por una cantidad innumerable de variables que afectan su frecuencia y severidad, las cuales pueden modificarse por patrones de comportamiento y actividad humana (Bilsborrow, 1992).

El efecto que las actividades humanas -y sus incidencias en el clima del Distrito Metropolitano de Quito- tiene en el casco histórico de la ciudad, motiva a ampliar el entendimiento del comportamiento mecánico de los sistemas constructivos basados en tierra y sus posibles cambios, como propuesta para proponer soluciones enfocadas a la conservación de las estructuras patrimoniales del centro histórico.

## **1.2. Justificación**

El cambio climático desempeña un papel importante en la planificación urbana a futuro, dado que tiende a incrementar la frecuencia e intensidad de los desastres naturales, además de que este pone en riesgo a la población y puede provocar la destrucción de capital físico y natural, de los cuales la población depende para su estilo y calidad de vida (Ibarrarán et al., 2007).

Alrededor del planeta muchas construcciones antiguas y contemporáneas han sido elaboradas a partir de tierra como material base. En muchos de estos casos estas

estructuras pueden ser apreciadas hoy en día, las cuales pueden tener siglos de vida útil y que mucho más impresionante aún, no fueron diseñadas bajo criterios técnicos, sino probablemente como un conocimiento empírico basado en la prueba y error durante generaciones, como es el caso del casco colonial la ciudad de Quito.

Por estas razones se propone como eje central de esta disertación investigar la incidencia de las variaciones climáticas en las propiedades mecánicas de los adobes del centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Comprobar si las variaciones de los factores ambientales: radiación solar, humedad y temperatura experimentadas en la ciudad de Quito afectan significativamente las propiedades mecánicas de los materiales de construcción del Centro Histórico de la ciudad.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Basados en las características mecánicas de los materiales del centro histórico de Quito en su estado original, analizar si un proceso de envejecimiento acelerado influye cambios en las características mecánicas de los materiales del centro histórico de Quito.
- Identificar la existencia o no, de una correlación entre el envejecimiento acelerado y las variaciones en las propiedades mecánicas e ingenieriles de los materiales del centro histórico de Quito.

### **1.4. Hipótesis**

Identificar la existencia o no, de una correlación entre el período de envejecimiento acelerado y las variaciones en las propiedades mecánicas e ingenieriles de los materiales del centro histórico de Quito

## 1.5. Antecedentes

El cambio climático es un desafío que la sociedad actual debe enfrentar debido a sus efectos en el acceso de la población a elementos como agua, vivienda, alimento y salud (OCDE, 2011). De ahí que los países en desarrollo sean los más vulnerables a las consecuencias del cambio climático, por su carencia de infraestructura adecuada para afrontar estos desafíos.

Tradicionalmente, el diseño estructural se ha sustentado en el análisis de patrones climáticos pasados, donde si bien los eventos naturales extremos que vulneraban la integridad de las edificaciones, como: vientos, inundaciones o precipitaciones eran considerados dentro del proceso de análisis y diseño estructural, la consideración adoptada usaba un período de retorno relativamente largo. Sin embargo, estos eventos extremos ahora presentan períodos de retorno más frecuentes según los registros recientes y mayores intensidades (De Matteis, 2017).

Distintas evaluaciones llevadas a cabo por el Municipio de Quito (*Atlas Ambiental Quito Sostenible 2016, 2016*) determinan un cambio en los parámetros atmosféricos de la ciudad, debido a múltiples factores, entre ellos el crecimiento de la población, cambios en el uso del suelo y el incremento del parque automotor.

Estas variaciones de las condiciones atmosféricas y climáticas pueden reducir la vida útil de una estructura. A su vez el desgaste de los materiales que la componen es mucho mayor, afectando así a sus capacidades mecánicas y seguridad. Por ello, implementar cambios prácticos en la forma de como evaluamos y mantenemos nuestras estructuras se convierte en una necesidad de primer nivel para la resiliencia y sostenibilidad de nuestras ciudades (Alencastro, 2014).

En Colombia se han llevado a cabo investigaciones para la caracterización de unidades de adobe sometidas a radiación UVA (Uribe Kaffure et al., 2015), en Perú sobre su comportamiento en caso de eventos sísmicos (Blondet et al., 2011) y en Cuenca se tiene investigaciones sobre la caracterización mecánica del adobe (Aguilar & Quezada, 2017), sin embargo, no se han realizado estudios de caracterización mecánica del adobe usado en las construcciones patrimoniales del

centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito, ni la influencia de la variación de los factores ambientales en su comportamiento y propiedades.

### **1.6. Alcance**

Esta disertación tiene un carácter teórico-experimental, puesto que se busca identificar una correlación entre la variación del clima en el tiempo con la alteración de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de construcción del centro histórico del DMQ, como elementos extraídos individuales y no extrapolables a las estructuras completas.

El material para investigar será el adobe, el cual fue proporcionado por la Facultad de Arquitectura de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en el proyecto "Impactos en la infraestructura patrimonial del centro histórico de la ciudad de Quito ocasionado por actividades antropogénicas", en coordinación con el INPC y el Ministerio de Cultura.

Para emular el período de exposición de 20 años, se utilizará una cámara de envejecimiento que expone los especímenes de adobe a ciclos alternados de luz UV, humedad y temperatura, en condiciones controladas. La radiación solar y temperatura se simulan mediante el uso de lámparas UV y la humedad se controla mediante la condensación de agua destilada.

## **2. Capítulo 2: Marco teórico**

Esta investigación contempla un intervalo de 20 años para analizar el efecto de las variaciones climáticas que afectarán a la ciudad de Quito que, a su vez, producirán cambios en las propiedades en los materiales y estructuras de su centro histórico. De ahí que los indicadores obtenidos a partir de ensayos normados pueden ayudar a comprender y predecir el grado de afectación, que el clima podría producir en las edificaciones y sus componentes.

A partir de investigaciones antecedentes, (Rivera Torres & Muñoz Díaz, 2005); (Aguilar & Quezada, 2017), se caracterizará el adobe a partir de pruebas físicas de granulometría, peso específico, contenido de materia orgánica, humedad natural y límites de Atterberg, así como pruebas mecánicas de compresión simple. Uribe Kaffure et al., (2015) evalúan también su esfuerzo máximo de compresión no confinada y resistencia al corte mediante un criterio de falla de Mohr-Coulomb.

No existe evidencia de una correlación entre la condensación del adobe y su exposición acelerada a radiación UV (Uribe Kaffure et al., 2015), sin embargo, esta técnica es muy utilizada para evaluar el comportamiento de distintos materiales a lo largo del tiempo, dado que este proceso puede incidir en cambios en la estructura cristalina del material y por consiguiente en su resistencia mecánica.

### **2.1. Cambio climático: Causas y efectos**

Dada la cantidad de variables que intervienen en el clima y el tiempo atmosférico, esclarecer una razón o causa exacta del cambio climático es una incógnita permanente. Sin embargo, existe el consenso científico que concuerda en que los patrones de comportamiento y actividad humana -especialmente los relacionados a la emisión de gases de efecto invernadero, aerosoles y el uso del suelo- han demostrado ser más influyentes que componentes naturales, en el aumento de las temperaturas globales (De Matteis, 2017).

Otro parámetro que tenderá a modificarse en el futuro son las precipitaciones en zonas tropicales, así como en el Océano Pacífico ecuatorial (Miller et al., 2014), cuyos patrones son sensibles al incremento de la temperatura y la radiación neta en la

superficie (Held & Soden, 2006). La recopilación de datos estadísticos de los últimos 20 años indica que la mayor parte de los desastres debido a amenazas naturales, han sido causados principalmente por eventos meteorológicos e hidrológicos (Bollinger et al., 2013).

En Ecuador se espera un mayor aumento de las precipitaciones e inundaciones en zonas urbanas, disminución de glaciares y niveles en embalses y un aumento de hasta 0.82m del nivel del mar en las zonas costeras (Peña et al., 2014).

### **2.1.1. Efectos del cambio climático en infraestructuras**

La vulnerabilidad al cambio climático se define como la capacidad de los sistemas socioeconómicos, geofísicos y biológicos para enfrentar los impactos negativos del cambio climático (Peña et al., 2014). A nivel regional, América Latina y el Caribe han sufrido y sufrirán los efectos del cambio climático, cuyas repercusiones económicas podrían alcanzar hasta los USD 30 mil millones para países de la Comunidad Andina (Ecuador, Bolivia, Perú y Colombia) al año 2025.

Las estrategias de adaptación al cambio climático a nivel nacional incluyen varias líneas de acción, destacando la incorporación de criterios de adaptación al cambio climático y rehabilitación de infraestructura en las carteras de turismo, energía, hidroelectricidad, transporte e industria (Alencastro, 2014).

Estudios a nivel regional indican que a futuro, los sectores de la infraestructura pública más afectados por las precipitaciones y su variabilidad son los de las carreteras, puentes y sistemas de drenaje y alcantarillado (Neumann et al., 2014). Un colapso del sistema de desagüe y alcantarillado puede generar inundaciones que afecten directamente a la infraestructura urbana residencia, comercial, productiva y turística. Así también los caudales generados en las inundaciones vuelven propensas a socavamiento o deslizamientos a las estructuras ubicadas en zonas de riesgo y laderas.

El aumento de las temperaturas, así como la aparición de olas de calor con mayor frecuencia puede generar mayores deformaciones por temperatura a las

edificaciones, hace más comunes las épocas de sequía, así como incendios forestales y estructurales.

A nivel del Distrito Metropolitano de Quito, las amenazas antrópicas y naturales que pueden afectar directamente a la población e infraestructura en los sectores vulnerables son los movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales. Estas amenazas tienen su origen principalmente por fenómenos hidro-climáticos y morfodinámicos (*Atlas Ambiental Quito Sostenible 2016, 2016*).

## **2.2. Envejecimiento acelerado de los materiales y sus variables.**

### **2.2.1. Radiación Solar**

La mayor parte de la radiación solar se emite en formas visibles como luz, con fracciones más pequeñas en longitudes de onda más cortas que se conocen como la radiación ultravioleta y longitudes de onda más amplias que toman la forma de calor y radiación infrarroja (Marti, 2014)

Parte de esta energía es absorbida por la superficie terrestre y la atmósfera, mientras que otra parte se refleja de vuelta hacia el espacio exterior. Sin embargo, ciertos gases atmosféricos como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>) absorben esta radiación y la devuelven hacia la superficie, en el fenómeno conocido como efecto invernadero, el cual aumenta la temperatura de la superficie terrestre en aproximadamente 32°C, haciendo al planeta apto para la vida, pero generando efectos adversos en el clima debido al aumento de la concentración de gases producto de la actividad humana (Marti, 2014).

Se estima que un promedio de 40% de la energía recibida en la Tierra se refleja de vuelta al espacio y del 50% restante, 43% es absorbido por la superficie terrestre, mientras que un 17% se retiene en la atmósfera (Ayllón, 2013).

La forma de medir la radiación solar es mediante la heliofanía, que consiste en la intensidad de la radiación solar en un intervalo de tiempo determinado, la cual se mide a través de un heliógrafo o un piranómetro (Alarcón, 2017).

## 2.2.2. Temperatura

Es la propiedad física de los sistemas que determina el flujo de energía -en forma de calor- entre objetos en contacto. La temperatura se mide con un termómetro con una escala térmica como la escala Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) o Rankine ( $^{\circ}\text{R}$ ) y se expresa como la diferencia relativa de la energía térmica entre dos objetos (Whitmer, 2014).

En el campo de la meteorología, la temperatura atmosférica se estima a través distintas variables como son: la altitud, posición geográfica, época del año, hora del día y la distribución de las masas de agua y tierra (Ayllón, 2013). El promedio de las temperaturas atmosféricas a lo largo de las latitudes durante un año genera un perfil vertical promedio de temperatura atmosférica, también conocido como atmósfera estándar.

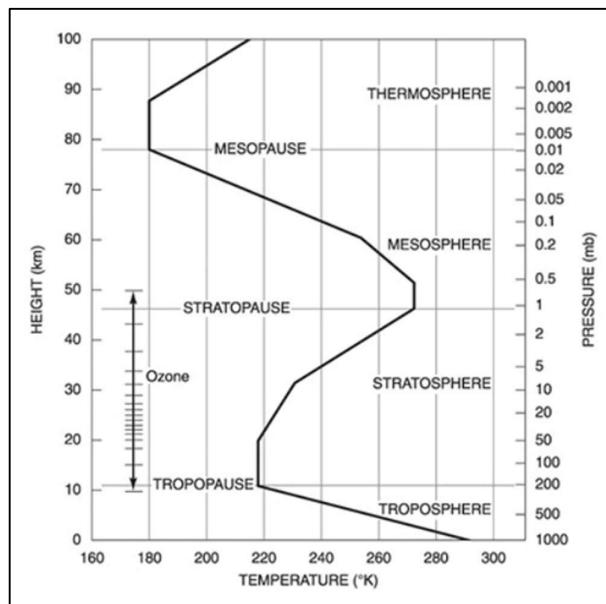


Ilustración 1. Atmósfera Estándar, a partir de Marti, 2014

La primera zona, se conoce como tropósfera, es donde se desarrollan las actividades humanas cotidianas, con una temperatura de aproximadamente  $17^{\circ}\text{C}$  ( $290\text{K}$ ) en la superficie y que desciende gradualmente conforme incrementa la altitud, hasta  $-53^{\circ}\text{C}$  ( $220\text{K}$ ) a una altitud de  $10\text{km}$  (Whitmer, 2014).

### **2.2.3. Humedad**

Se entiende como humedad a la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Esta puede variar de acuerdo con la época del año, así como en el transcurso del día. La humedad tiende a incrementar de forma directamente proporcional a la temperatura (Ayllón, 2013).

Usualmente la medida de humedad más usada en la meteorología es la humedad relativa, que describe la relación de saturación del aire con vapor de agua. En términos porcentuales, la humedad relativa permite comparar la cantidad de vapor de agua en el aire, con la cantidad máxima de vapor de agua que representa la saturación de este, a una determinada temperatura (Lerner & Lerner, 2014).

El instrumento mediante el cual se estima la humedad del ambiente se llama psicrómetro, el cual consiste en un dispositivo que relaciona las temperaturas de dos termómetros y un depósito de telas saturadas, la cual se evapora al aumentar la temperatura del aire circundante (Alarcón, 2017).

### **2.3. Estadísticas del clima en el DMQ.**

Al encontrarse en la región interandina y en la zona ecuatorial templada, Quito posee una humedad relativa promedio del 75% con temperaturas medias de unos 15°C, con precipitaciones comprendidas entre los 400 mm/año hasta los 4500 mm/año dependiendo de la zona de la ciudad. Se estima que actualmente entre los años de 1891 y 1999 la temperatura media del perímetro urbano del Distrito Metropolitano de Quito aumentó entre 1.2°C y 1.4°C, mientras que la precipitación registró una tendencia de disminución de hasta el 8% (*Atlas Ambiental Quito Sostenible 2016, 2016*).

#### **2.3.1. Proyecciones climáticas en el DMQ.**

Hasta el año 2050 se estima un aumento de temperatura entre 2.3°C a 2.5°C, mientras que no se espera una variación representativa de la precipitación. Aunque los datos de precipitaciones a futuro no son concluyentes, se observa que existe la tendencia a ciclos sucesivos de sequía durante el período 2007-2050 cada 4 a 5 años (*Atlas Ambiental Quito Sostenible 2016, 2016*).

Así también en la década 2040-2050 se estima escenarios extremos de un déficit de cobertura del 90% de agua potable en la ciudad, debido al crecimiento poblacional, aumento de la temperatura, períodos más prolongados de sequía, cambios en el uso del suelo y pérdida de los páramos aledaños a Quito.

### 3. Capítulo 3: Materiales y Métodos.

#### 3.1. Adobe

La etimología del término adobe proviene del árabe *albut*, el cual es un material conformado por barro humedecido, mezclado con paja o fibras naturales y moldeado en bloques sólidos que se deja secar al aire libre o al sol (Aguilar & Quezada, 2017) y aglutinadas con barro como mortero.

A nivel mundial aproximadamente un 30% de la población habita en viviendas construidas a base de tierra, así como un 70% de las construcciones con tierra en Latinoamérica tienen un carácter histórico y un 50% de estas tiene una función residencial (Gandreau & Delboy, 2012).

El sistema estructural de las edificaciones patrimoniales construidas con tierra consiste en muros portantes los cuales resisten la acción de cargas gravitacionales y de servicio, sin embargo, en su diseño no se contempla los efectos sísmicos. Además, estas estructuras pueden constituirse por unidades de mampostería que pueden ser colocados en diferentes formas y tener trabazón entre sí (Rivera Torres & Muñoz Díaz, 2005).

#### **Muestreo:**

Los adobes fueron obtenidos mediante una colaboración del Instituto Nacional de Patrimonio con el Ministerio de Cultura y la Pontificia Universidad Católica a través de la Facultad de Arquitectura de la PUCE, dentro del marco del proyecto de investigación: *"Impactos en la infraestructura patrimonial del Centro Histórico de la Ciudad de Quito ocasionado por actividades antropogénicas"*.

El INPC donó los adobes para la investigación a partir del antiguo edificio de Ferrocarriles del Ecuador, ubicado en la calle Bolívar Oe5-43, con rumbo oeste-este, cerca de la Plaza de San Francisco, luego de una remodelación a finales del 2017. Se entregaron 5 muestras iniciales de dimensiones aproximadas de 40x20x10 cm en buenas condiciones y una muestra más pequeña, la cual media aproximadamente 20x20x10 cm.

Se desconoce el protocolo de extracción, manipulación y la localización de las muestras dentro de la edificación de donde fueron obtenidas, sin embargo, para fines de investigación, se considera que los 5 bloques corresponden a un lote.



*Imagen 1. Unidades originales de Adobe.*

A partir de estas muestras se extrajeron las probetas necesarias para los ensayos de compresión y triaxiales. Se procedió a cortar los bloques iniciales en 4 pedazos de 10x20x10cm y finalmente en muestras cúbicas de 10x10x10cm para los ensayos de compresión o bien para la talla de triaxiales. En total, cada muestra inicial de 40x20x10cm se obtuvieron 8 probetas de 10x10x10cm, con un total de 40 especímenes, de las cuales 25 se sometieron a ensayos de compresión y 15 para ensayos triaxiales. El material sobrante de los cortes fue empleado para los análisis granulométricos y clasificaciones físicas respectivas.

### **3.2. Cámara de envejecimiento acelerado.**

#### **3.2.1. Descripción y funcionamiento**

El envejecimiento acelerado se refiere al deterioro de un material en función del tiempo debido principalmente a efectos del clima. El proceso de envejecimiento artificial consiste en imitar las condiciones de radiación solar, temperatura y humedad relativa que se pueden generar en una locación específica a lo largo de un intervalo determinado de tiempo. Como resultado de este proceso se puede estudiar los efectos físicos, químicos, mecánicos de un material sometido a ciertas condiciones de exposición en intervalos de tiempo dados como días, meses o años, en un período mucho más corto por el proceso de deterioro acelerado.

<b>CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO</b>	
Capacidad	450 L
Rango de humedad	50-90% de humedad relativa
Estabilidad de la humedad	± 5%-7% de humedad relativa
Rango de temperatura	10 a 65° C con iluminación 4 a 65° C sin iluminación
Fluctuaciones de temperatura	±2°C
Intensidad luminosa	0 a 20000LX
Medidas internas de bandeja(cm)	70x55x120
Medidas externas de bandeja(cm)	101x78x186
Número de bandejas	4
Horas de trabajo	0 a 99 ciclos 30 secuencias en cada ciclo Rango de ajuste de tiempo de 0 a 99 h
Requerimiento eléctrico	220V-60Hz
Potencia necesaria	2130 w
Consta de 3 lámparas para iluminación a cada lado de la cámara	
Tiene una pequeña cámara de almacenamiento de agua para generar vapor de agua en la cámara y poder simular la humedad necesaria.	
Consta de un panel de control en el cual se inserta los ciclos, secuencias, temperatura y humedad.	

*Tabla 1. Especificaciones técnicas de la cámara de envejecimiento acelerado, (BIOBASE, s. f.).*

### 3.2.2. Ciclos y secuencias de envejecimiento

El proceso de envejecimiento de las muestras consiste en colocar los especímenes a ensayar dentro de una cámara controlada que puede ajustar los niveles de humedad, temperatura y radiación ultravioleta en ciclos de ensayo.

Las condiciones y el tiempo de cada ciclo han sido determinados por la investigación previa realizada por Alarcón (2017) mediante el software *Solver*, que permite programar los diferentes parámetros de temperatura, humedad y radiación de la máquina, que supondrían un período de exposición a cambios climáticos, en Quito, en un período de 20 años a partir del año 2019. Cada ciclo consta de tres partes. En el primer subciclo, la cámara se mantuvo a una temperatura de 25°C al 70% de humedad relativa durante 1200 minutos. Luego la temperatura sube a 35°C, la humedad baja al 50% y se mantiene durante 800 minutos. Finalmente, el ciclo finaliza a 1250 C y 50% de humedad. La carga de radiación que recibe la muestra depende de varios componentes: la radiación emitida por 6 lámparas (4050 W / m<sup>2</sup>), las condiciones de luz diurna y la temperatura ambiente. Teniendo esto en cuenta, se ha determinado que el período de 19,25 días equivale a 5 años.

Debido a que no se dispone evidencia ni datos que permitan verificar y calibrar el efecto del tiempo de envejecimiento establecido en la predicción analizada por Alarcón (2017), se ha decidido usar el mismo proceso de manera relativa para medir su efecto en las propiedades mecánicas.

De forma resumida, el proceso sugerido consiste en:

- Primera fase: La temperatura se mantiene constante a 25°C, con una humedad relativa del 70% por 1200 minutos.
- Segunda fase: La temperatura de la cámara aumenta a 35°C y la humedad relativa disminuye al 50% por 800 minutos.
- Tercera fase: La temperatura desciende a 20°C con una humedad relativa del 50% para mantenerse así durante 1250 minutos.

<b>Tiempo dentro de la cámara (días)</b>	<b>Envejecimiento acelerado simulado (años)</b>
0,00	0
19,25	5
38,50	10
57,75	15
77,00	20

*Tabla 2. Duración de los ciclos de envejecimiento acelerado.*

### **3.3. Caracterización de los adobes envejecidos aceleradamente.**

Los ensayos realizados en el Laboratorio de Suelos de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador se enfocaron en identificar las características físicas principales del adobe como un material conformado a partir de suelo. Estas son:

- Granulometría
- Límites de consistencia
- Peso específico y densidad seca.
- Contenido de humedad

Al ser el suelo utilizado en el proceso de elaboración de los adobes un material previamente manipulado, alterado, humedecido, secado, mezclado y compactado se puede comprender que el proceso de caracterización física es particular e inherente a este tipo de unidades de mampostería de tierra, además de que estos elementos tienen un período particular de consolidación y exposición a agentes externos como pocos materiales en la actualidad.

#### **3.3.1. Caracterización física**

##### **Gravedad Específica – Norma ASTM D-854**

Este ensayo contempla la estimación de la gravedad específica de partículas sólidas menores al tamiz 4.75mm (No.4), mediante el uso de un picnómetro de agua. La gravedad específica de los sólidos se define como la relación entre la masa de una unidad de volumen un suelo con la masa del mismo volumen de agua destilada a 20°C (D18 Committee, s. f., p. 854). Este parámetro es útil para calcular las relaciones de fase en el suelo, como es la relación de vacíos, saturación, entre otras.

El procedimiento del ensayo consiste en:

- Determinar la masa de un picnómetro calibrado, lleno de un volumen de 500mL de agua destilada ( $W_1$ ).
- Determinar la temperatura del agua en el picnómetro ( $T_1$ ).
- Colocar aproximadamente 100g de suelo seco al aire en un recipiente.

- Si el suelo es cohesivo añadir agua destilada hasta formar una pasta suave, de lo contrario este paso no es necesario.
- Transferir el suelo o la pasta al picnómetro.
- Llenar hasta dos terceras partes de su capacidad al picnómetro con agua destilada.
- Remover el aire de la mezcla suelo-agua, agitando y girando el frasco levemente dentro de un baño maría o bien usando una bomba de vacío.
- Permitir a la mezcla alcanzar la temperatura ambiente del laboratorio y medir esta temperatura ( $T_2$ ).
- Añadir agua destilada y desairada al picnómetro hasta que esta llegue a la marca de 500mL.
- Secar bien el exterior del picnómetro, así como el interior del cuello sobre el menisco formado por el agua.
- Determinar la masa combinada del picnómetro con la mezcla agua-suelo ( $W_2$ ).
- Colocar el suelo y agua en un recipiente a evaporar, cuidando de no dejar partículas de suelo dentro.
- Determinar la masa de la muestra seca ( $W_S$ ).

Una vez realizado este procedimiento la gravedad específica del suelo se calcula como:

$$G_s = \frac{W_S}{(W_1 + W_S) - W_2}$$

*Ecuación 1. Cálculo de la gravedad específica de una muestra de suelo, a partir de (D18 Committee, s. f.)*



*Imagen 2. Determinación del  $G_s$ , según la norma ASTM D-854*

Se sugiere presentar la gravedad específica corregida a una temperatura de 20°C.

$$G_{S_{20}} = G_S * \left( \frac{\rho_{w_{T1}}}{\rho_{w_{20^\circ C}}} \right)$$

*Ecuación 2. Corrección de la gravedad específica por la temperatura del agua, a partir de (D18 Committee, s. f.)*

### **Relaciones Fundamentales – Norma ASTM D7263-09**

Este ensayo contempla la estimación de densidad seca del adobe, empleando el método de desplazamiento de agua, establecido en la norma ASTM D7263-09. Este parámetro es útil para calcular las relaciones de fase en el suelo, como es la relación de vacíos, saturación, entre otras.

El procedimiento del ensayo consiste en:

- Tallar una muestra de suelo con forma regular.
- Determinar la masa de la muestra en estado natural ( $W_1$ ).
- Recubrir con parafina la superficie de la muestra evitando dejar vacíos o huecos, para evitar que el agua ingrese a la muestra cuando esta se sumerja.
- Determinar la masa de la muestra recubierta con parafina ( $W_2$ ).
- Sumergir la muestra en agua y determinar el peso sumergido del conjunto suelo y parafina ( $W_3$ ).
- Retirar la capa de parafina y determinar la humedad de la muestra.

Una vez realizado este procedimiento la densidad seca del suelo se calcula como:

$$\gamma_s = \frac{W_1}{\left( \frac{W_2 - W_3}{\rho_w} - \frac{W_2 - W_1}{\rho_p} \right)}$$

*Ecuación 3. Cálculo de la densidad seca, a partir de*



*Imagen 3. Muestras recubiertas de parafina*

### **Clasificación SUCS (Unified Soil Classification System) – Norma ASTM D-2487**

Es un método físico que clasifica los suelos en dos grandes categorías:

- Suelos granulares gruesos: Conformados en forma predominante por gravas y arenas con un porcentaje de material que pasa el tamiz 75 $\mu$ m (No.200) menor al 50%. Este grupo recibe un prefijo con la letra S (Sand/Arena) o G (Gravelly/Grava).
- Suelos granulares finos: Aquellos que más del 50% de material pasa el tamiz 75 $\mu$ m (No. 200), formados por materiales como limos, arcillas o materia orgánica. Pueden recibir los prefijos M (Moh/Limo inorgánico), C (Clay/Arcilla inorgánica) u O (Organic silts and clays/Suelos orgánicos arcillosos o limosos).

Con base en lo señalado anteriormente, se requiere de los ensayos de granulometría por tamizado mediante la norma ASTM D6913 y Límites de Atterberg mediante la norma ASTM D4318.

En forma resumida el procedimiento de clasificación consiste en:

- Obtener una muestra de aproximadamente 500g de suelo.
- Determinar el porcentaje de grava de la muestra: Material pasante al tamiz 76.2mm y retenido en el tamiz 4.75mm (No. 4).

- Determinar el porcentaje de arena: Material comprendido entre el tamiz 4.75mm (No.4) y retenido en el tamiz 75um (No. 200).
- Determinar el porcentaje de Arcillas y Limos: Fracción de material más fina que el tamiz 75um (No. 200).
- Calcular el Coeficiente de uniformidad  $C_u$  y Coeficiente de gradación  $C_c$  de la muestra.
- Determinar el Límite Líquido e Índice de Plasticidad de la porción menor al tamiz No. 40.



TABLE 1 Soil Classification Chart

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests <sup>a</sup>				Soil Classification	
				Group Symbol	Group Name <sup>b</sup>
COARSE-GRAINED SOILS	Gravels (More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve)	Clean Gravels (Less than 5 % fines <sup>c</sup> )	$C_u \geq 4.0$ and $1 \leq C_c \leq 3.0$ <sup>d</sup>	GW	Well-graded gravel <sup>e</sup>
		Gravels with Fines (More than 12 % fines <sup>c</sup> )	$C_u < 4.0$ and/or $[C_c < 1 \text{ or } C_c > 3.0]$ <sup>d</sup>	GP	Poorly graded gravel <sup>e</sup>
	More than 50 % retained on No. 200 sieve	Clean Sands (Less than 5 % fines <sup>f</sup> )	Fines classify as ML or MH	GM	Silty gravel <sup>e,f,g</sup>
		Sands with Fines (More than 12 % fines <sup>f</sup> )	Fines classify as CL or CH	GC	Clayey gravel <sup>e,f,g</sup>
FINE-GRAINED SOILS	Sands (50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve)	Clean Sands (Less than 5 % fines <sup>f</sup> )	$C_u \geq 6.0$ and $1.0 \leq C_c \leq 3.0$ <sup>d</sup>	SW	Well-graded sand <sup>f</sup>
		Sands with Fines (More than 12 % fines <sup>f</sup> )	$C_u < 6.0$ and/or $[C_c < 1.0 \text{ or } C_c > 3.0]$ <sup>d</sup>	SP	Poorly graded sand <sup>f</sup>
	50 % or more passes the No. 200 sieve	Sands with Fines (More than 12 % fines <sup>f</sup> )	Fines classify as ML or MH	SM	Silty sand <sup>f,g,h</sup>
		Silts and Clays inorganic	Fines classify as CL or CH	SC	Clayey sand <sup>f,g,h</sup>
HIGHLY ORGANIC SOILS	Liquid limit less than 50	inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line <sup>i</sup>	CL	Lean clay <sup>k,l,m</sup>
		organic	$PI < 4$ or plots below "A" line <sup>i</sup>	ML	Silt <sup>k,l,m</sup>
	50 % or more passes the No. 200 sieve	inorganic	$Liquid\ limit - oven\ dried < 0.75$ $Liquid\ limit - not\ dried$	OL	Organic clay <sup>k,l,m,n</sup> Organic silt <sup>k,l,m,o</sup>
		organic	$PI$ plots on or above "A" line	CH	Fat clay <sup>k,l,m</sup>
Liquid limit 50 or more	inorganic	$PI$ plots below "A" line	MH	Elastic silt <sup>k,l,m</sup>	
	organic	$Liquid\ limit - oven\ dried < 0.75$ $Liquid\ limit - not\ dried$	OH	Organic clay <sup>k,l,m,p</sup> Organic silt <sup>k,l,m,o</sup>	
Primarily organic matter, dark in color, and organic odor				PT	Peat

<sup>a</sup>Based on the material passing the 3-in. (75-mm) sieve.

<sup>b</sup>If field sample contained cobbles or boulders, or both, add "with cobbles or boulders, or both" to group name.

<sup>c</sup>Gravels with 5 to 12 % fines require dual symbols:

- GW-GM well-graded gravel with silt
- GW-GC well-graded gravel with clay
- GP-GM poorly graded gravel with silt
- GP-GC poorly graded gravel with clay

$${}^d C_u = D_{60} / D_{10} \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

<sup>e</sup>If soil contains  $\geq 15$  % sand, add "with sand" to group name.

<sup>f</sup>If fines classify as CL-ML, use dual symbol GC-GM, or SC-SM.

<sup>g</sup>If fines are organic, add "with organic fines" to group name.

<sup>h</sup>Sands with 5 to 12 % fines require dual symbols:

- SW-SM well-graded sand with silt
- SW-SC well-graded sand with clay
- SP-SM poorly graded sand with silt
- SP-SC poorly graded sand with clay

<sup>i</sup>If soil contains  $\geq 15$  % gravel, add "with gravel" to group name.

<sup>j</sup>If Atterberg limits plot in hatched area, soil is a CL-ML, silty clay.

<sup>k</sup>If soil contains 15 to  $< 30$  % plus No. 200, add "with sand" or "with gravel," whichever is predominant.

<sup>l</sup>If soil contains  $\geq 30$  % plus No. 200, predominantly sand, add "sandy" to group name.

<sup>m</sup>If soil contains  $\geq 30$  % plus No. 200, predominantly gravel, add "gravelly" to group name.

<sup>n</sup> $PI \geq 4$  and plots on or above "A" line.

<sup>o</sup> $PI < 4$  or plots below "A" line.

<sup>p</sup> $PI$  plots on or above "A" line.

<sup>q</sup> $PI$  plots below "A" line.

Ilustración 2. Clasificación SUCS, a partir de (D18 Committee, s. f.-a)

### **Granulometría por hidrómetro – Norma ASTM D-7928**

El análisis por hidrómetro permite analizar la fracción del suelo compuesta por partículas menores que el tamiz 75  $\mu\text{m}$  (No. 200) hasta un límite de 1  $\mu\text{m}$ . El procedimiento consiste en:

- Dispersar una fracción de material pasante del tamiz 0.425 mm (No. 40) en una solución de agua y un agente dispersante ( $\text{NaPO}_3$ ), en una probeta graduada.
- Se sumerge un hidrómetro en la solución. El mismo, permite estimar la densidad de la solución en la cual se encuentra inmerso. Conforme la muestra se sedimenta en el fondo de la solución, la densidad de la misma y por lo tanto la lectura del hidrómetro van a variar.
- Se toman lecturas periódicas de la temperatura ambiente y la lectura del hidrómetro sumergido en la solución.
- Completadas las 48h del ensayo, se procede a calcular y reportar el porcentaje de partículas de suelo que pasan determinados diámetros.

### **3.3.2. Determinación de la resistencia a la compresión**

#### **Resistencia a la compresión – Norma NTE INEN 3049-5**

La resistencia a la compresión se entiende como el esfuerzo producido por la carga máxima (o de rotura) en una superficie promedio del área bruta del espécimen.

El procedimiento del ensayo consiste en:

- Obtener 5 unidades de ensayo con una longitud igual a la mitad de la longitud de la pieza completa  $\pm 25\text{mm}$  de tolerancia y no menor a una tercera parte de la longitud de la pieza completa, con una superficie mínima de  $90\text{cm}^2$ .
- Estas muestras se obtienen a partir de cualquier método de corte que no produzca fisuras, despostillados o fragmentación de las caras del espécimen y permita obtener caras opuestas relativamente planas y paralelas.
- Refrentar las caras con una capa de mortero de yeso no mayor a 3.2mm de espesor, la cual debe ser lo suficientemente rígida, de modo que no produzca deformaciones medibles durante el ensayo, y permita obtener una superficie

de contacto lisa entre los cabezales de la máquina y la muestra. Este paso debe realizarse al menos 24h antes del ensayo de la muestra.

- Registrar las dimensiones de las caras en contacto con los cabezales de la máquina de ensayo ( $A$ ).
- Aplicar la carga a una velocidad uniforme en un tiempo comprendido entre 60s y 120s.
- Registrar la carga de rotura ( $F$ ) al momento de fractura de la muestra.

Una vez realizado este procedimiento la resistencia a la compresión del adobe se calcula como:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

*Ecuación 4. Cálculo del Esfuerzo de Compresión en Unidades de Mampostería Maciza, a partir de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2019)*



*Imagen 4. Refrentado de las muestras de adobe*



*Imagen 5. Equipo usado para determinar la resistencia a la compresión*

### **3.3.3. Determinación de la resistencia al corte.**

#### **Resistencia al corte – Ensayo Triaxial U-U – Norma ASTM D2850-15.**

La resistencia al corte se define como la capacidad interna por unidad de área para oponerse a la falla y deslizamiento en un plano cualquiera dentro de una masa de suelo.

Para ello, se ha considerado un criterio de falla acorde a la teoría de Mohr-Coulomb, que establece que un material frágil, falla por una combinación crítica de esfuerzos normales y cortantes, mas no por un esfuerzo normal o cortante máximo por sí solo.

El procedimiento del ensayo consiste en:

- Obtener unidades de ensayo cilíndricas con una relación altura/diámetro comprendida entre 2 a 2.5. En esta investigación las muestras fueron talladas manualmente, a partir de las unidades de adobe originales.
- Colocar la muestra cilíndrica en la cámara triaxial, con una piedra porosa en cada extremo. Posteriormente se recubre el conjunto con una membrana plástica de forma que no se filtre agua en la muestra en ninguna dirección.
- Llenar la cámara triaxial con agua, proporcionando una presión de confinamiento. En esta investigación la presión de confinamiento fue de 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa.

- Aplicar la carga a una velocidad uniforme, de forma que la deformación se encuentre entre un 0.3% a 1% por minuto, sin exceder un tiempo de ensayo de 15 minutos.
- Registrar la carga aplicada y la deformación hasta que la deformación haya alcanzado un 15% de la longitud inicial de la probeta o el esfuerzo desviador haya disminuido más del 20%.
- Retirar la muestra de la cámara triaxial y determinar el contenido de humedad de esta.



*Imagen 6. Tallado de las muestras para ensayos triaxiales U-U.*



*Imagen 7. Probeta tallada lista para ser ensayos triaxiales U-U.*



*Imagen 8. Cámara triaxial.*



*Imagen 9. Equipo usado para determinar la resistencia al corte.*

### **3.4. Métodos de análisis estadístico**

#### **3.4.1. Análisis de varianza**

El propósito del análisis de varianza (ANOVA) es para probar si dos medias poblacionales difieren, mediante el análisis de las varianzas de una muestra de cada población. Esto es de especial uso cuando se aplica un "tratamiento" especial a una población.

Para poder emplear el análisis de varianza se deben realizar 3 suposiciones iniciales:

- En cada población la variable de respuesta sigue una distribución normal.
- La varianza de la variable de respuesta es la misma para todas las poblaciones.
- Las observaciones deben ser independientes.

Por lo tanto, cuando se desea comparar las medias de dos o más grupos, esta técnica se puede utilizar para estudiar la posible influencia de factores en la varianza de variables.

Un análisis de varianza parte de dos premisas: La hipótesis alternativa es que al menos dos medias son significativamente diferentes. Por el contrario, la hipótesis nula es que la media de las variables de investigación en diferentes grupos es la misma.

El estadístico usado en ANOVA (llamado F) es la relación entre la varianza de la media del grupo y la media de la varianza dentro del grupo. Estos datos estadísticos siguen una distribución denominada "F de Fisher-Snedecor". Si se satisface la hipótesis nula, el estadístico F obtendrá un valor de 1, porque la intravarianza será igual a la intervarianza. Cuanto mayor sea la diferencia entre las medias del grupo, la varianza entre las medias y la media de la varianza dentro del grupo, el valor F obtenido es mayor que 1, por lo que es menos probable que la distribución obtenga valores tan extremos (valor p más bajo).

Generalmente se llama como análisis de varianza, pero en el sentido estadístico ANOVA se trata de una suma de cuadrados:

$$S_T^2 = \frac{TSS}{N - 1}$$

*Ecuación 5. Cuadrados Medios Totales = Cuasivarianza Total (varianza muestral total).*

$$S_t^2 = \frac{SST}{k - 1}$$

*Ecuación 6. Cuadrados Medios del Factor = Intervarianza (varianza entre las medias de los distintos niveles).*

$$S_E^2 = \frac{SSE}{N - k}$$

*Ecuación 7. Cuadrados Medios del Error = Intravarianza (varianza dentro de los niveles, conocida como varianza residual o de error).*

$$F = \frac{S_T^2}{S_t^2}$$

*Ecuación 8. Estadístico F Fisher-Snedecor con  $k-1$  y  $N-t$  grados de libertad.*

### **3.4.2. Regresión y correlación**

La regresión y correlación son dos herramientas estadísticas que se utilizan para identificar y solucionar problemas comunes en los negocios e ingeniería, partiendo de la premisa de que se puede encontrar una relación funcional entre dos o más variables.

Generalmente se establece la relación entre una variable dependiente (que se trata de predecir) y una variable independiente antes de realizar el modelo de regresión.

La correlación cuantifica la correlación entre dos variables, y la regresión lineal implica generar una ecuación (modelo) basada en la relación entre dos variables, que puede predecir el valor de una variable en función de otra variable. A nivel experimental, la correlación se suele emplear cuando ninguna de las variables se ha controlado, simplemente se han medido ambas y se desea saber si están relacionadas. En el caso de estudios de regresión lineal, es más común que una de las variables se controle (tiempo, concentración de reactivo, temperatura...) y se mida la otra.

A nivel experimental se suele utilizar la correlación cuando no se controla ninguna variable, ambas variables simplemente se han medido y se desea saber si están relacionadas. En la investigación de regresión lineal, es más común controlar una

variable (tiempo, concentración de reactivo, temperatura, entre otros) mientras se mide otra variable respuesta.

En general se emplearán dos tipos de regresiones en el presente trabajo:

- Regresión lineal:

$$y = \beta_0 + \beta_1x$$

*Ecuación 9. Ecuación de regresión lineal.*

- Regresión polinomial:

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \dots + \beta_nx^n$$

*Ecuación 10. Ecuación de regresión polinomial.*

## 4. Capítulo 4: Análisis y Discusión de resultados

### 4.1. Caracterización física

#### 4.1.1. Granulometría



*Imagen 10. Material retenido en el tamiz 4.75mm (#4)*

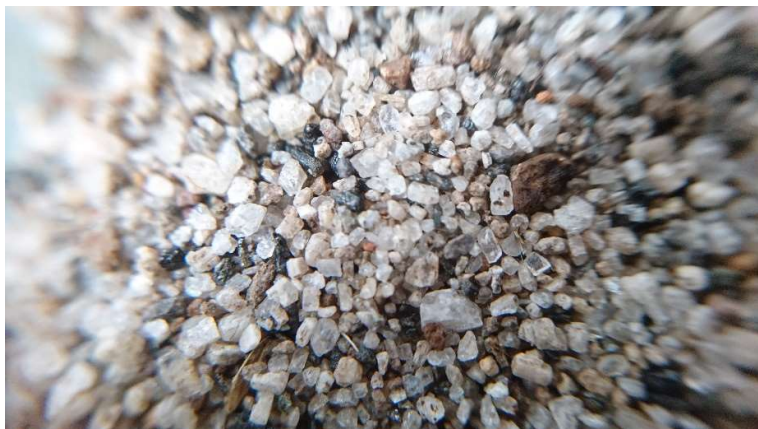


*Imagen 11. Material retenido en el tamiz 2mm (#10)*

El suelo presenta en promedio un 95.93% de material pasante del tamiz 4.75mm (No.4), y un 50.85% de material pasante de la abertura de tamiz 75um (No.200). El material grueso retenido en el tamiz 4.75mm (No.4) en su mayoría consiste en pedazos de pómez y ladrillo machacado.

El material retenido en el tamiz 2mm (#10) presenta una textura rugosa y subangular, conformado por rocas pequeñas disgregadas, -probablemente andesitas- y pedazos de pómez, ladrillo machacado y basalto, dados los concentraciones de compuestos a base de sílice encontrados por Salgado (2019),

El material retenido entre los tamices 0.425mm (#40) y 75um (#200) presenta una textura rugosa y de apariencia similar al cuarzo.



*Imagen 12. Material retenido en el tamiz 0.425mm (#40)*



Imagen 13. Material retenido en el tamiz 75um (#200)

% Pasante							
TAMIZ N°	Abertura (mm)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Promedio
N° 4	4.75	96.86	96.37	91.23	96.02	99.15	95.93
N° 10	2.00	95.55	95.24	90.41	94.59	98.38	94.83
N° 40	0.425	82.75	83.20	74.41	80.24	89.79	82.08
N° 200	0.075	52.15	51.86	43.53	50.75	55.98	50.85

Tabla 3. Análisis Granulométrico - Resultados

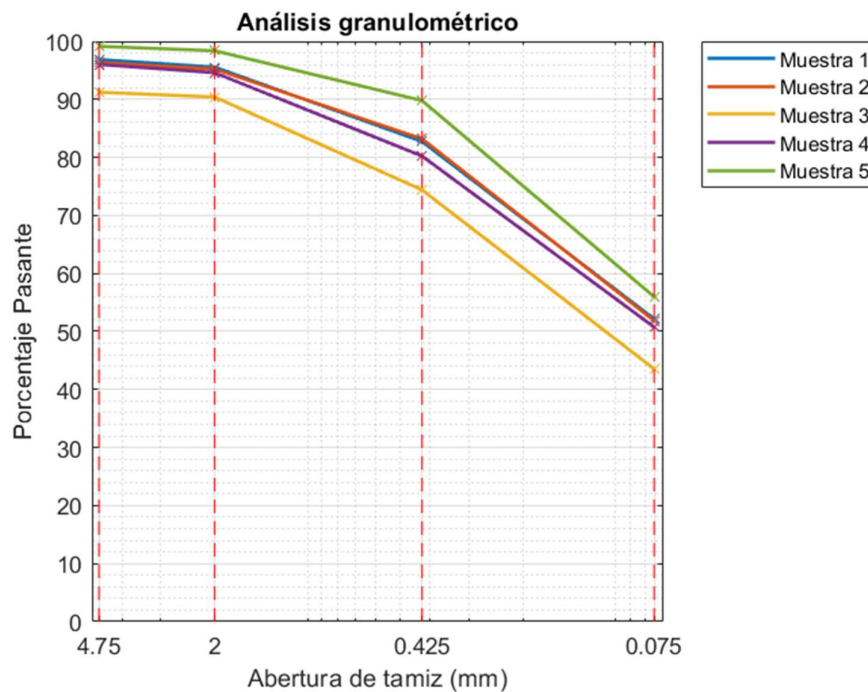
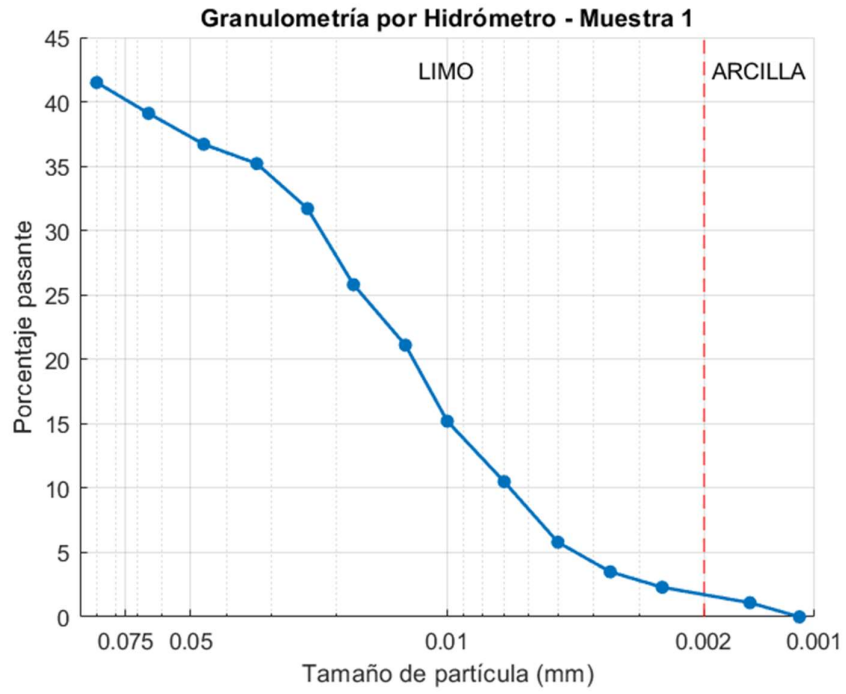
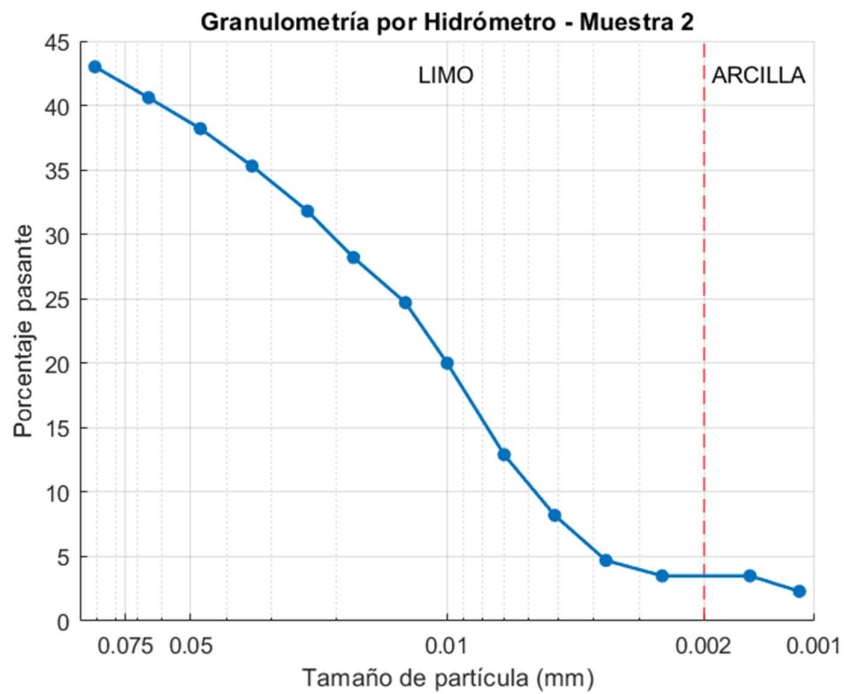


Ilustración 3. Análisis Granulométrico



*Ilustración 4. Análisis por Hidrómetro - Muestra 1*



*Ilustración 5. Ilustración 4. Análisis por Hidrómetro - Muestra 2*

Por su parte, el análisis por hidrómetro mostró que la fracción de finos pasante del tamiz 0.425mm (No.40), en su mayor parte se conforma por limo.

% Pasante		
Abertura (mm)	Muestra 1	Muestra 2
0.075	41.5	43.0
0.005	5.8	8.0
0.002	1.5	2.6

Tabla 4. Resultados del análisis por hidrómetro

#### 4.1.2. Relaciones Fundamentales y Gravedad Específica

La densidad seca del adobe fue de  $15.29\text{kN/m}^3$  en promedio, para lo cual se analizó una muestra al azar, de cada intervalo de años de envejecimiento simulado, de igual forma la humedad natural promedio del adobe fue de 2.90%. Por su parte, la gravedad específica de las partículas sólidas que conforman la matriz de adobe fueron de 2.65 en promedio, con una relación de vacíos de 0.68.

	Muestra en el aire (g)	Muestra + parafina en el aire (g)	Muestra + parafina sumergida (g)	Densidad seca ( $\text{kN/m}^3$ )
<b>Muestra 1</b>	271.03	285.95	110.12	16.75
<b>Muestra 2</b>	94.11	100.81	34.74	15.81
<b>Muestra 3</b>	90.4	97.36	30.28	15.01
<b>Muestra 4</b>	50.99	56.91	13.66	13.72
<b>Muestra 5</b>	162.08	178.88	54.68	15.15
<b>Densidad seca promedio (<math>\text{kN/m}^3</math>):</b>				15.29
	Masa Suelo (g)	Masa Matraz + agua (g)	Masa Matraz + agua + suelo (g)	GS
<b>Muestra 1</b>	46.2	647.82	676.59	2.65
<b>Muestra 2</b>	47.9	646.05	675.75	2.63
<b>Muestra 3</b>	51.23	650.74	682.48	2.63
<b>Muestra 4</b>	50.53	655.5	686.93	2.65
<b>Muestra 5</b>	46.32	648.32	677.44	2.69
<b>GS promedio:</b>				2.65

Tabla 5. Densidad Seca y GS.

### 4.1.3. Clasificación SUCS

Los resultados de los límites de consistencia presentaron un límite líquido (LL) promedio de 26.0%, mientras que el límite plástico (LP) promedio fue de 20.2%, teniendo por consiguiente un índice de plasticidad (IP) del 5.8%.

	LL (%)	LP (%)	IP (%)
<b>Muestra 1</b>	24.5	18.9	5.6
<b>Muestra 2</b>	25.8	19.8	6.0
<b>Muestra 3</b>	26.6	20.5	6.1
<b>Muestra 4</b>	26.0	21.5	4.5
<b>Muestra 5</b>	27.4	20.4	7.0
<b>Promedio:</b>	26.0	20.2	5.8

Tabla 6. Límites de Consistencia

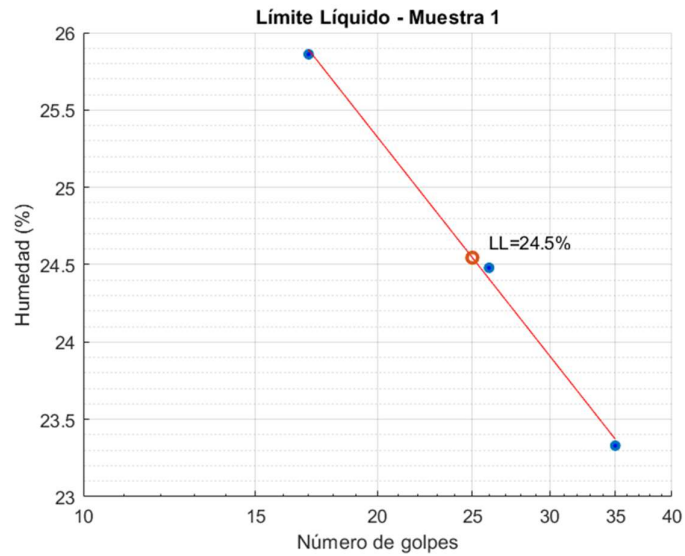
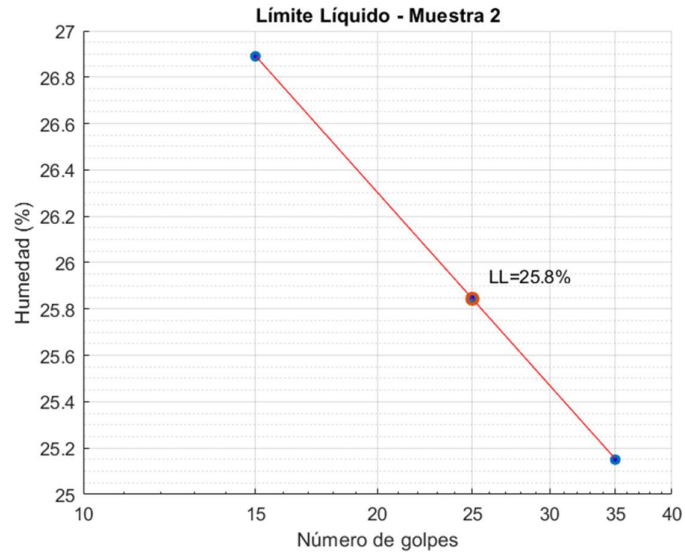
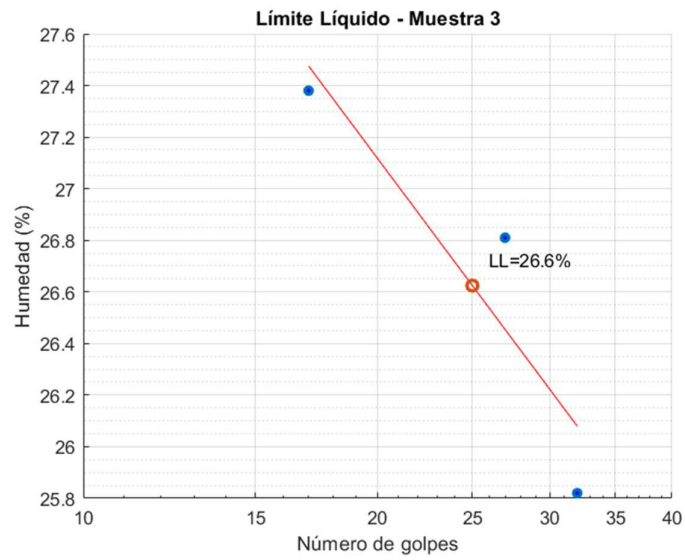


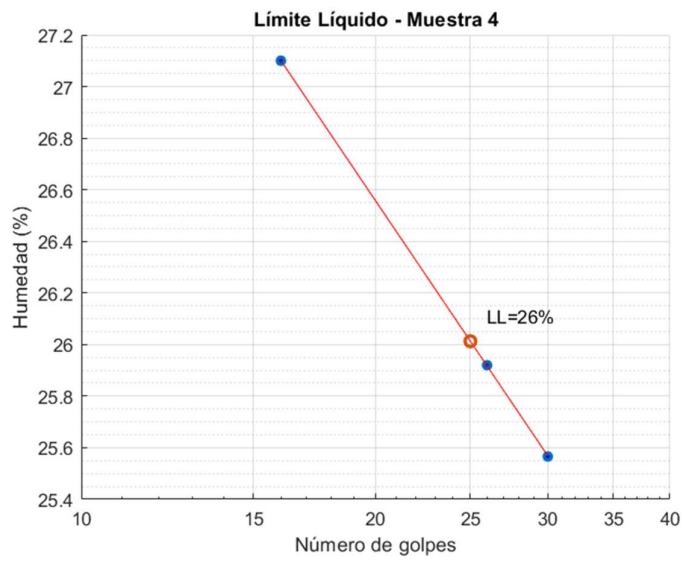
Ilustración 6. Límite Líquido - Muestra 1



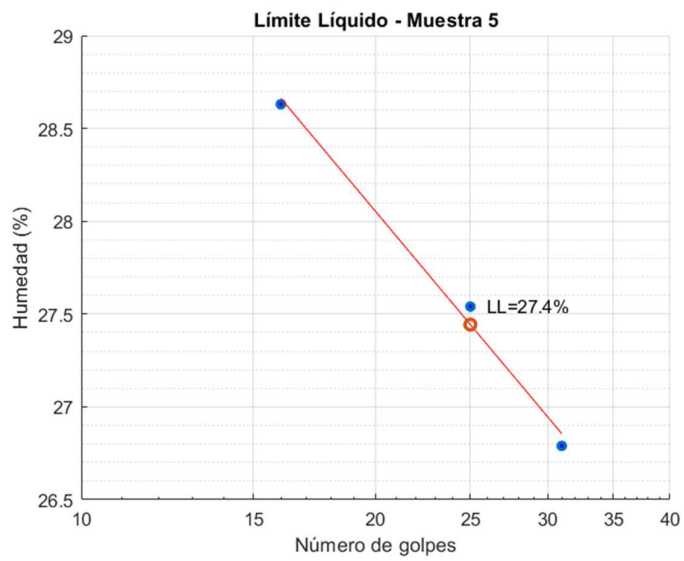
*Ilustración 7. Límite Líquido - Muestra 2*



*Ilustración 8. Límite Líquido - Muestra 3*



*Ilustración 9. Límite Líquido - Muestra 4*



*Ilustración 10. Límite Líquido - Muestra 5*

## 4.2. Resultados de la caracterización mecánica

### 4.2.1. Resistencia a la compresión

Las muestras fueron ensayadas luego de un lapso de 7 días finalizado el refrentado esto con el fin de permitir que el adobe pueda alcanzar de nuevo la humedad natural de las muestras con 0 años de envejecimiento acelerado. Las humedades de ensayo se presentan en la siguiente tabla:

0 años de envejecimiento acelerado			5 años de envejecimiento acelerado		
Muestra	Humedad (%)	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Muestra	Humedad (%)	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )
1	3.11	15.45	1	2.83	13.32
2	3.39	15.40	2	3.06	13.34
3	2.83	16.21	3	2.49	14.01
4	4.01	15.43	4	2.63	16.02
5	3.23	15.54	5	3.71	14.55
10 años de envejecimiento acelerado			15 años de envejecimiento acelerado		
Muestra	Humedad (%)	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Muestra	Humedad (%)	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )
1	3.56	12.53	1	3.12	15.41
2	2.94	14.90	2	2.23	13.73
3	3.65	12.25	3	3.26	12.92
4	2.91	12.41	4	3.09	11.32
5	2.66	12.29	5	2.66	12.78
20 años de envejecimiento acelerado					
Muestra	Humedad (%)	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )			
1	3.61	13.46			
2	3.39	13.14			
3	3.28	12.57			
4	2.99	12.44			
5	5.64	11.54			

Tabla 7. Humedades y densidades de ensayo (Compresión).

#### 4.2.1.1. 0 años de envejecimiento acelerado:

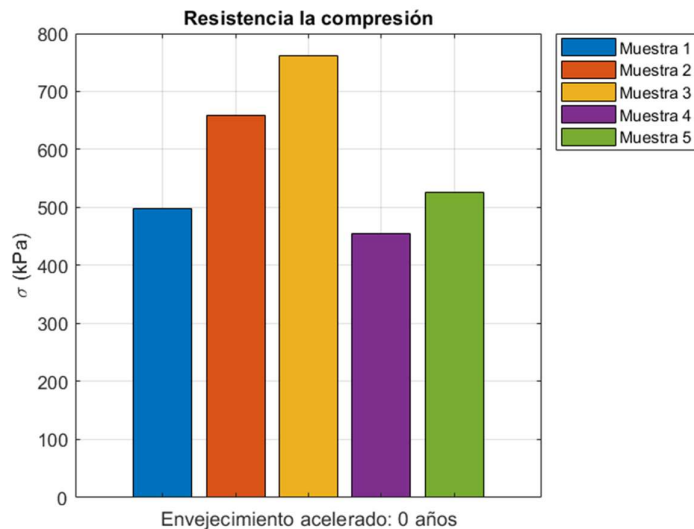


Ilustración 11. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 0 años.

Las muestras de adobe con 0 años de envejecimiento acelerado, ensayadas de acuerdo con el procedimiento estipulado en la norma NTE INEN 3049-5, presentaron una resistencia a la compresión promedio de 580.1 kPa. El valor máximo de esfuerzos últimos fue de 761.9 kPa para la muestra 3 y el valor mínimo fue de 454.6 kPa para la muestra 4.

Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 0 años	
Muestra	Esfuerzos últimos (kPa)
1	498.2
2	659.7
3	761.9
4	454.6
5	526.2
<b>Promedio</b>	580.1
<b>Desviación Estándar</b>	127.2
<b>Máximo</b>	761.9
<b>Mínimo</b>	454.6

Tabla 8. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 0 años

#### 4.2.1.2. 5 años de envejecimiento acelerado:

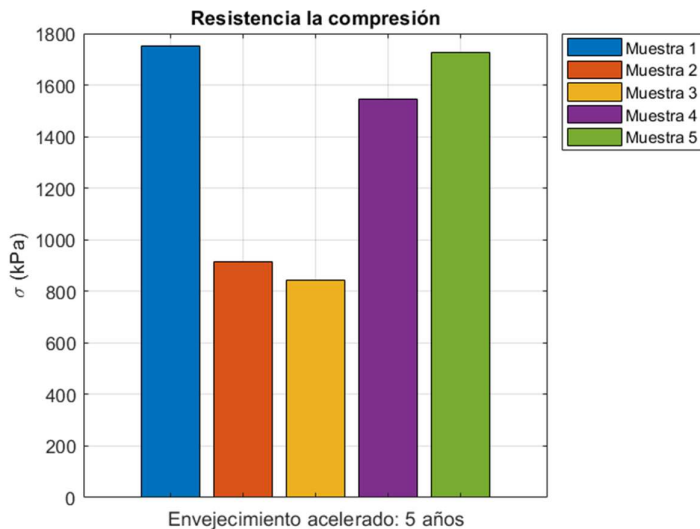


Ilustración 12. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 5 años.

Las muestras de adobe con 5 años de envejecimiento acelerado, ensayadas de acuerdo con el procedimiento estipulado en la norma NTE INEN 3049-5, presentaron una resistencia a la compresión promedio de 1355.9 kPa. El valor máximo de esfuerzos últimos fue de 1751.7 kPa para la muestra 1 y el valor mínimo fue de 841.8 kPa para la muestra 3.

Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 5 años	
Muestra	Esfuerzos últimos (kPa)
1	1751.7
2	914.1
3	841.8
4	1545.0
5	1726.8
<b>Promedio</b>	1355.9
<b>Desviación Estándar</b>	444.3
<b>Máximo</b>	1751.7
<b>Mínimo</b>	841.8

Tabla 9. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 5 años

A diferencia de las muestras con 0 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 5 años de envejecimiento acelerado presentan un mayor incremento de la resistencia a la compresión, por una diferencia de 1171 kPa en total, lo que representa un aumento del 200%, comparado con el promedio de resistencia de los adobes con 0 años de envejecimiento acelerado.

#### 4.2.1.3. 10 años de envejecimiento acelerado

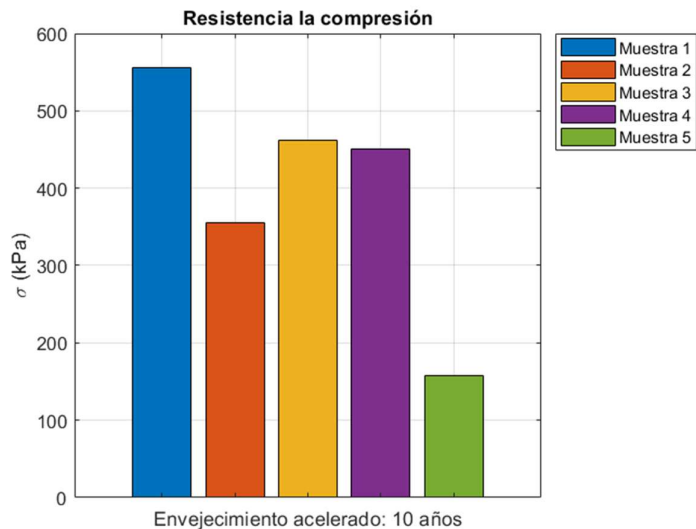


Ilustración 13. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 10 años

Las muestras de adobe con 10 años de envejecimiento acelerado, ensayadas de acuerdo con el procedimiento estipulado en la norma NTE INEN 3049-5, presentaron una resistencia a la compresión promedio de 396.1 kPa. El valor máximo de esfuerzos últimos fue de 555.5 kPa para la muestra 1 y el valor mínimo fue de 157.6 kPa para la muestra 5.

Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 10 años	
Muestra	Esfuerzos últimos (kPa)
1	555.5
2	355.0
3	461.7
4	450.7
5	157.6
<b>Promedio</b>	396.1
<b>Desviación Estándar</b>	151.0
<b>Máximo</b>	555.5
<b>Mínimo</b>	157.6

Tabla 10. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 15 años

A diferencia de las muestras con 0 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 10 años de envejecimiento acelerado presentan una disminución de la resistencia a la compresión, por una diferencia de 184 kPa en total, lo que representa una pérdida del 68%, comparado con el promedio de resistencia de los adobes con 0 años de envejecimiento acelerado.

Comparadas con las muestras con 5 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 10 años de envejecimiento acelerado presentaron una disminución de la resistencia a la compresión promedio de 960 kPa, lo que representa una pérdida del 70% de la resistencia.

#### 4.2.1.4. Envejecimiento acelerado: 15 años

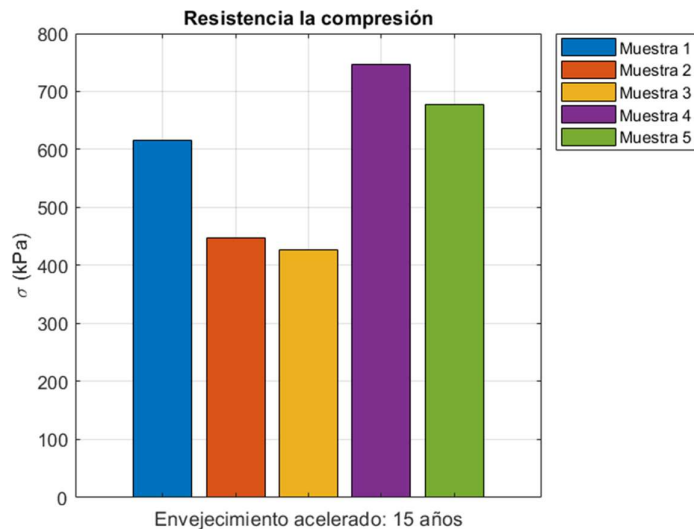


Ilustración 14. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 15 años

Las muestras de adobe con 15 años de envejecimiento acelerado, ensayadas de acuerdo con el procedimiento estipulado en la norma NTE INEN 3049-5, presentaron una resistencia a la compresión promedio de 583.2 kPa. El valor máximo de esfuerzos últimos fue de 746.6 kPa para la muestra 4 y el valor mínimo fue de 427.7 kPa para la muestra 3.

Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 15 años	
Muestra	Esfuerzos últimos (kPa)
1	615.3
2	447.9
3	427.7
4	746.6
5	678.4
<b>Promedio</b>	583.2
<b>Desviación Estándar</b>	140.8
<b>Máximo</b>	746.6
<b>Mínimo</b>	427.7

Tabla 11. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 15 años

A diferencia de las muestras con 0 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 10 años de envejecimiento acelerado presentan una resistencia a la compresión

promedio similar, por una diferencia de 3.1, lo que representa un aumento del 0.5%, comparado con el promedio de resistencia de los adobes con 0 años de envejecimiento acelerado.

Comparadas con las muestras con 5 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 15 años de envejecimiento acelerado presentaron una disminución de la resistencia a la compresión promedio de 773 kPa, lo que representa una pérdida del 57% de la resistencia.

Comparadas con las muestras con 10 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 15 años de envejecimiento acelerado presentaron un aumento de la resistencia a la compresión promedio de 187 kPa, lo que representa un incremento del 47% de la resistencia.

#### 4.2.1.5. Envejecimiento acelerado: 20 años

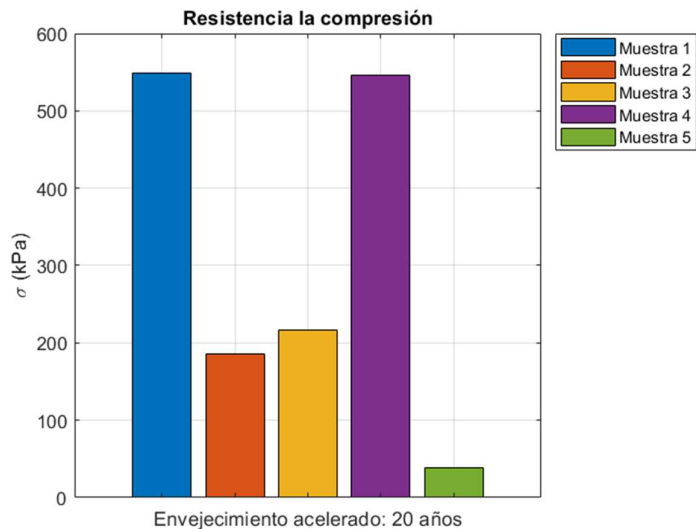


Ilustración 15. Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 20 años

Las muestras de adobe con 20 años de envejecimiento acelerado, ensayadas de acuerdo con el procedimiento estipulado en la norma NTE INEN 3049-5, presentaron una resistencia a la compresión promedio de 306.9 kPa. El valor máximo de esfuerzos últimos fue de 548.4 kPa para la muestra 1 y el valor mínimo fue de 38.1 kPa para la muestra 5.

Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 20 años	
Muestra	Esfuerzos últimos (kPa)
1	548.4
2	186.0
3	216.1
4	546.1
5	38.1
<b>Promedio</b>	306.9
<b>Desviación Estándar</b>	229.5
<b>Máximo</b>	548.4
<b>Mínimo</b>	38.1

Tabla 12. Resistencia a la compresión - Envejecimiento Acelerado: 20 años

A diferencia de las muestras con 0 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 20 años de envejecimiento acelerado presentan la mayor disminución de

resistencia a la compresión promedio, por una diferencia de 273 kPa, lo que representa una pérdida del 47%, comparado con el promedio de resistencia de los adobes con 0 años de envejecimiento acelerado.

Comparadas con las muestras con 5 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 20 años de envejecimiento acelerado presentaron una disminución de la resistencia a la compresión promedio de 1049 kPa, lo que representa una pérdida del 77% de la resistencia.

Comparadas con las muestras con 10 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 20 años de envejecimiento acelerado presentaron una disminución de la resistencia a la compresión promedio de 89 kPa, lo que representa una pérdida del 47% de la resistencia.

Comparadas con las muestras con 10 años de envejecimiento acelerado, las muestras con 20 años de envejecimiento acelerado presentaron una disminución de la resistencia a la compresión promedio de 89 kPa, lo que representa una pérdida del 23% de la resistencia.

## 4.2.2. Resistencia al corte

### 4.2.2.1. 0 años de envejecimiento acelerado

Las muestras ensayadas en estado natural, es decir con 0 años de envejecimiento acelerado, presentaron las siguientes propiedades físicas iniciales:

Triaxiales U-U - Envejecimiento acelerado: 0 años						
Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Humedad (%)	Saturación (%)	Densidad seca (kN/m <sup>3</sup> )	Masa seca (g)
1	49.71	101.16	2.23	7.41	14.48	289.79
2	49.50	100.42	2.32	8.09	14.78	291.16
3	49.47	100.54	2.54	8.88	14.79	291.35

Tabla 13. Datos de ensayo triaxial - 0 años de envejecimiento acelerado

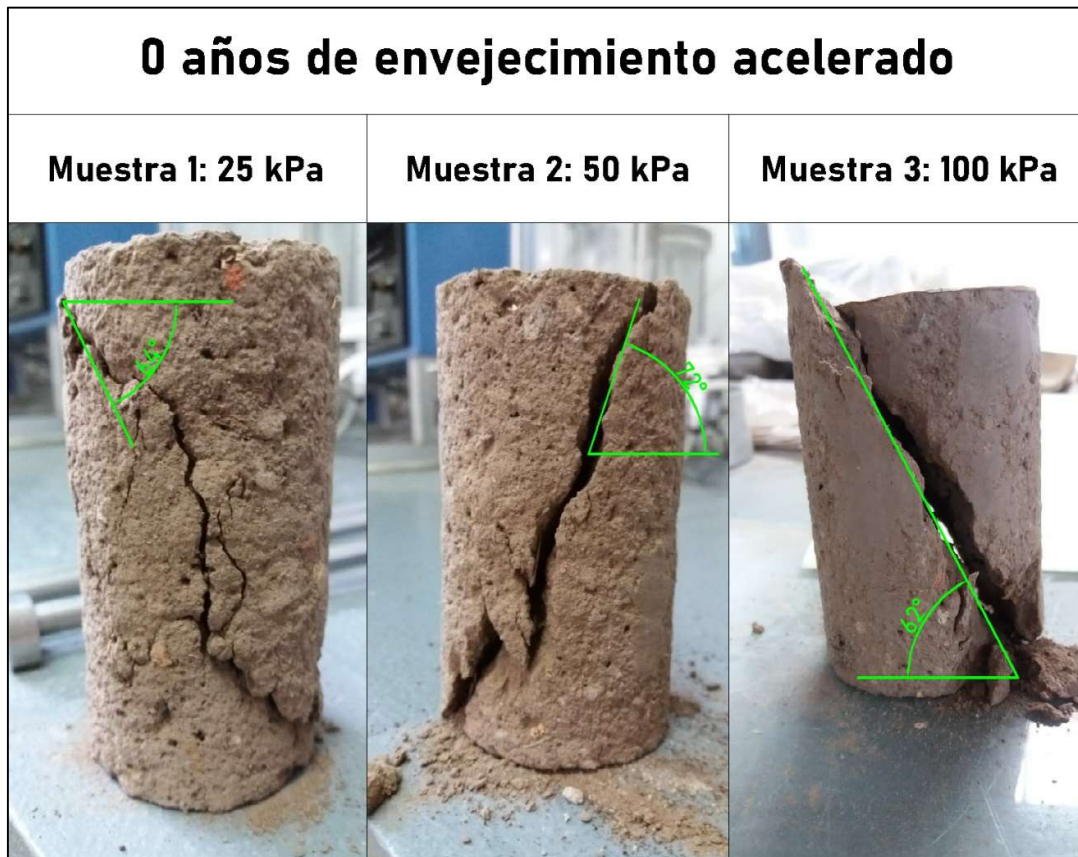
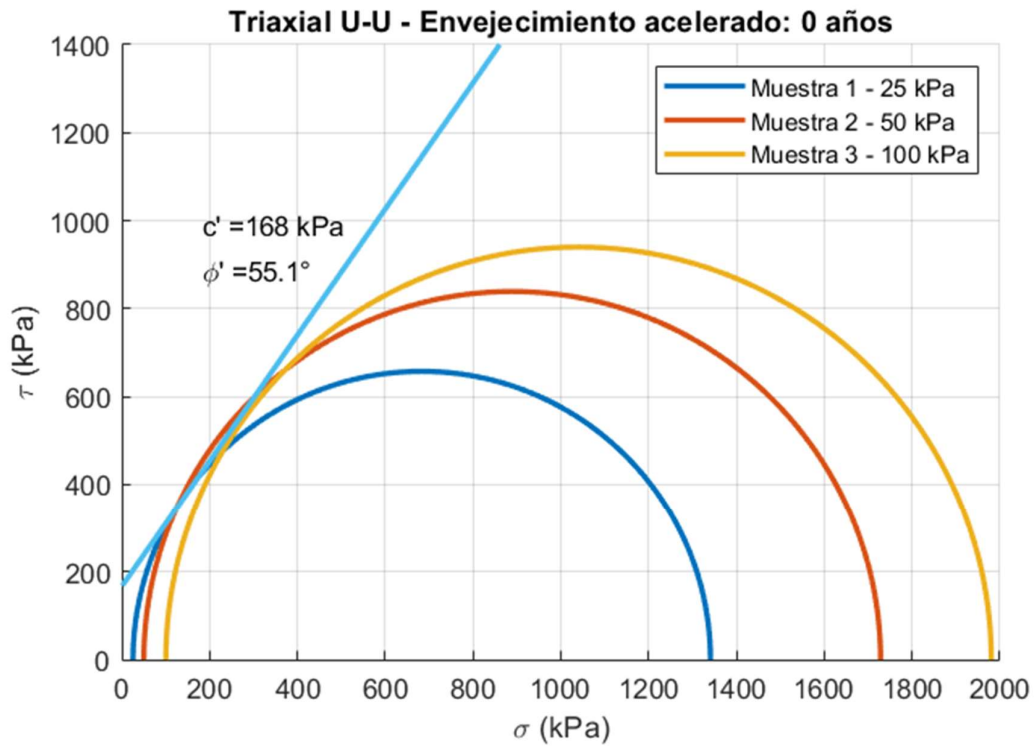


Imagen 14. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 0 años de envejecimiento acelerado



*Ilustración 16. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 0 años*

En la Ilustración 16 podemos apreciar los círculos de Mohr, trazados para los ensayos triaxiales realizados en las muestras sometidas a 0 años de envejecimiento acelerado, de las cuales se trazó la envolvente con los círculos correspondientes a la presión de confinamiento de 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa, obteniendo así una cohesión de 168 kPa y un ángulo de fricción de 55.1°.

#### 4.2.2.2. 5 años de envejecimiento acelerado

Las muestras ensayadas con 5 años de envejecimiento acelerado presentaron las siguientes propiedades físicas iniciales:

Triaxiales U-U - Envejecimiento acelerado: 5 años						
Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Humedad (%)	Saturación (%)	Densidad seca (kN/m <sup>3</sup> )	Masa seca (g)
1	49.48	95.83	2.10	6.79	14.29	268.42
2	49.42	96.56	1.80	6.06	14.56	274.91
3	49.58	100.55	2.04	6.90	14.57	288.32

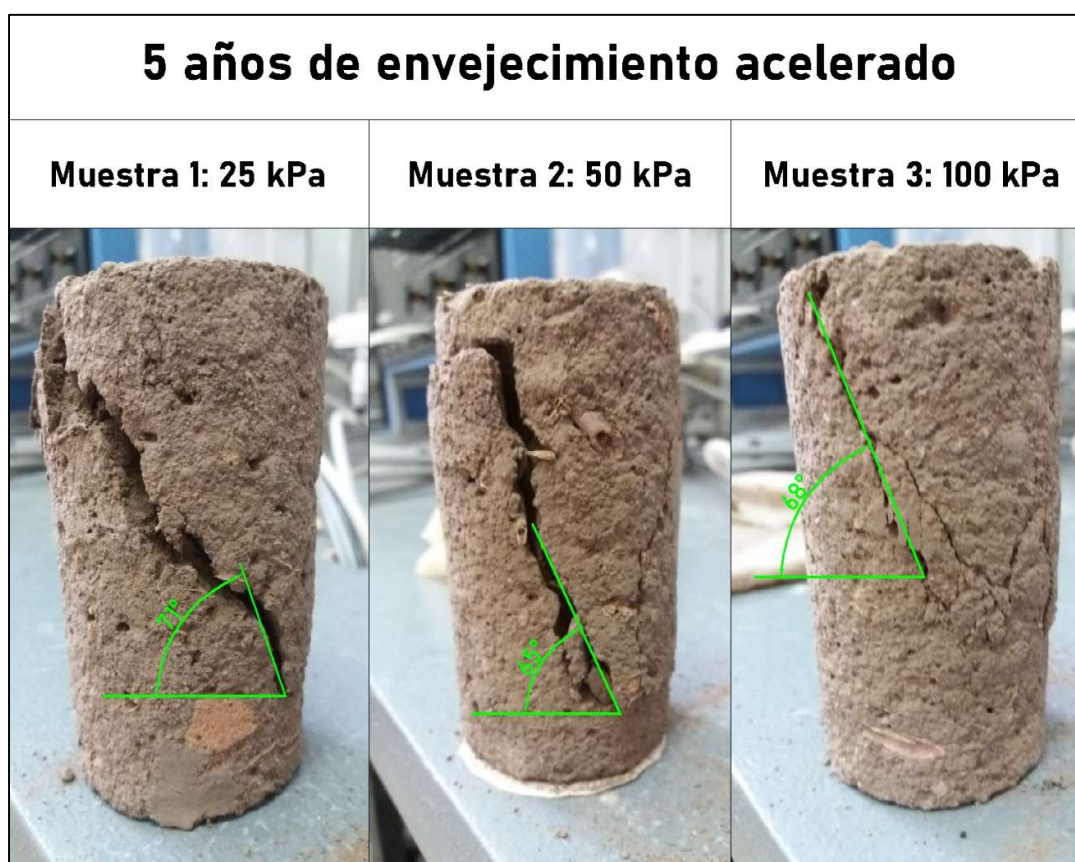
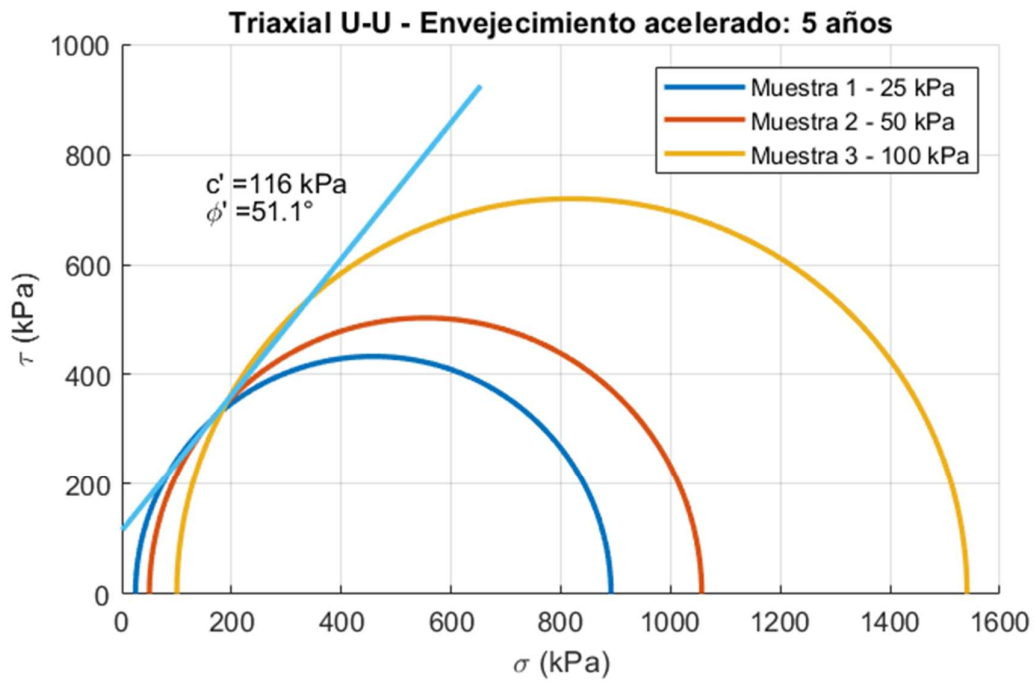


Imagen 15. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 5 años de envejecimiento acelerado



*Ilustración 17. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 5 años*

En la Ilustración 17 podemos apreciar los círculos de Mohr, trazados para los ensayos triaxiales realizados con las muestras con 5 años de envejecimiento acelerado, de las cuales se trazó la envolvente con los círculos correspondientes a la presión de confinamiento de 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa, obteniendo así una cohesión de 120 kPa y un ángulo de fricción de  $51.5^\circ$ .

#### 4.2.2.3. 10 años de envejecimiento acelerado

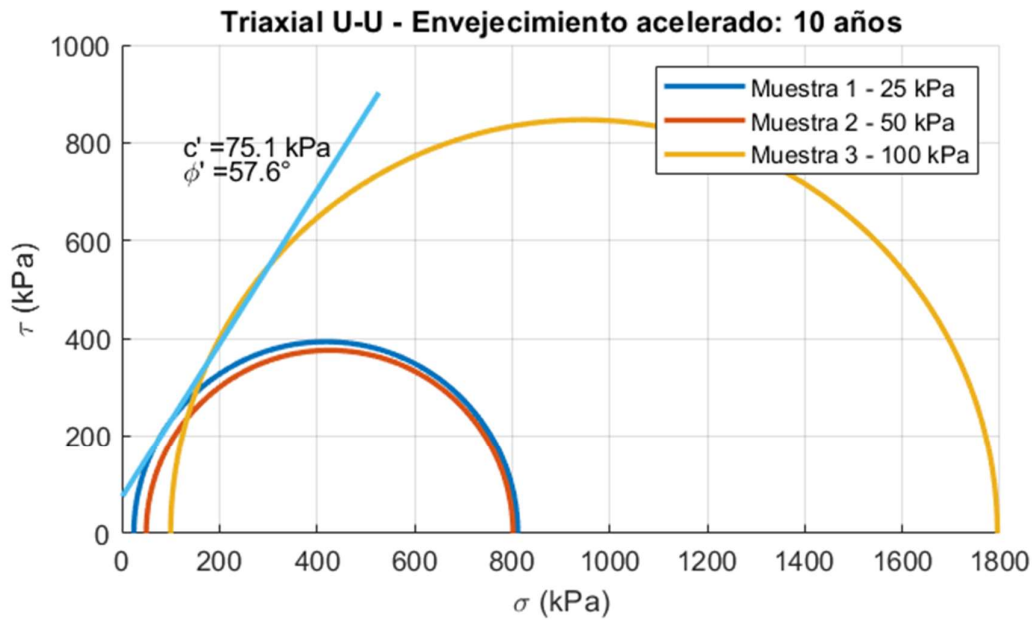
Las muestras ensayadas con 10 años de envejecimiento acelerado presentaron las siguientes propiedades físicas iniciales:

Triaxiales U-U - Envejecimiento acelerado: 10 años						
Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Humedad (%)	Saturación (%)	Densidad seca (kN/m <sup>3</sup> )	Masa seca (g)
1	47.48	99.79	3.17	10.17	14.23	256.29
2	49.78	97.57	2.16	7.09	14.39	278.55
3	49.78	99.45	2.51	8.58	14.64	288.85

Tabla 14. Datos de ensayo triaxial - 10 años de envejecimiento acelerado



Imagen 16. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 10 años de envejecimiento acelerado



*Ilustración 18. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 10 años*

En la Ilustración 18 podemos apreciar los círculos de Mohr, trazados para los ensayos triaxiales realizados con las muestras con 10 años de envejecimiento acelerado, de las cuales se trazó la envolvente con los círculos correspondientes a la presión de confinamiento de 25 kPa y 100 kPa, obteniendo así una cohesión de 75.1 kPa y un ángulo de fricción de 57.6°. El círculo de Mohr correspondiente a la presión de 50 kPa no se consideró para trazar la envolvente por su tendencia a arrojar una cohesión negativa y los valores bajos arrojados.

#### 4.2.2.4. 15 años de envejecimiento acelerado

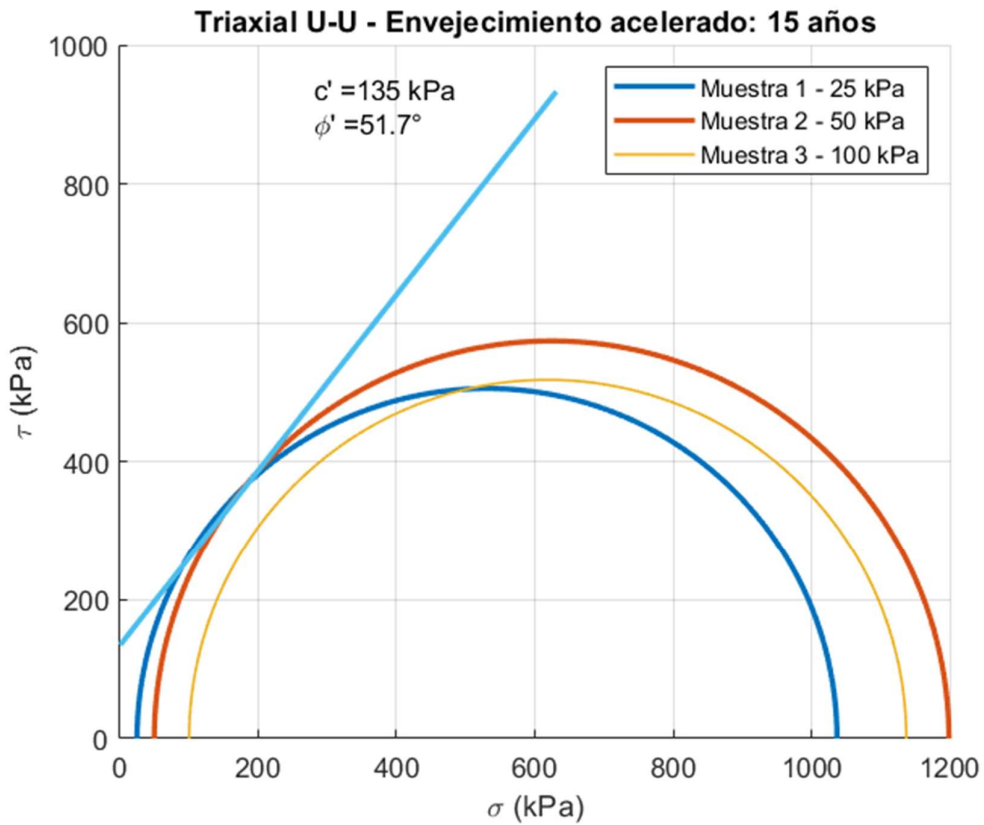
Las muestras ensayadas con 15 años de envejecimiento acelerado presentaron las siguientes propiedades físicas iniciales:

Triaxiales U-U - Envejecimiento acelerado: 15 años						
Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Humedad (%)	Saturación (%)	Densidad seca (kN/m <sup>3</sup> )	Masa seca (g)
1	49.60	99.59	2.50	8.47	14.59	286.19
2	49.72	99.71	2.92	9.95	14.62	288.52
3	49.70	100.31	2.51	8.31	14.44	286.45

Tabla 15. Datos de ensayo triaxial - 15 años de envejecimiento acelerado



Imagen 17. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 15 años de envejecimiento acelerado



*Ilustración 19. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 15 años*

En la Ilustración 19 podemos apreciar los círculos de Mohr, trazados para los ensayos triaxiales realizados con las muestras con 15 años de envejecimiento acelerado, de las cuales se trazó la envolvente con los círculos correspondientes a la presión de confinamiento de 25 kPa y 50 kPa, obteniendo así una cohesión de 135 kPa y un ángulo de fricción de 51.7°. El círculo de Mohr correspondiente a la presión de 100 kPa no se consideró para trazar la envolvente por su tendencia a arrojar una cohesión negativa.

#### 4.2.2.5. 20 años de envejecimiento acelerado

Las muestras ensayadas con 15 años de envejecimiento acelerado presentaron las siguientes propiedades físicas iniciales:

Triaxiales U-U - Envejecimiento acelerado: 20 años						
Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Humedad (%)	Saturación (%)	Densidad seca (kN/m <sup>3</sup> )	Masa seca (g)
1	49.56	91.35	3.28	9.30	13.44	241.43
2	47.51	100.06	2.28	8.98	15.56	281.36
3	49.52	99.66	2.18	8.70	15.61	305.43

Tabla 16. Datos de ensayo triaxial - 10 años de envejecimiento acelerado

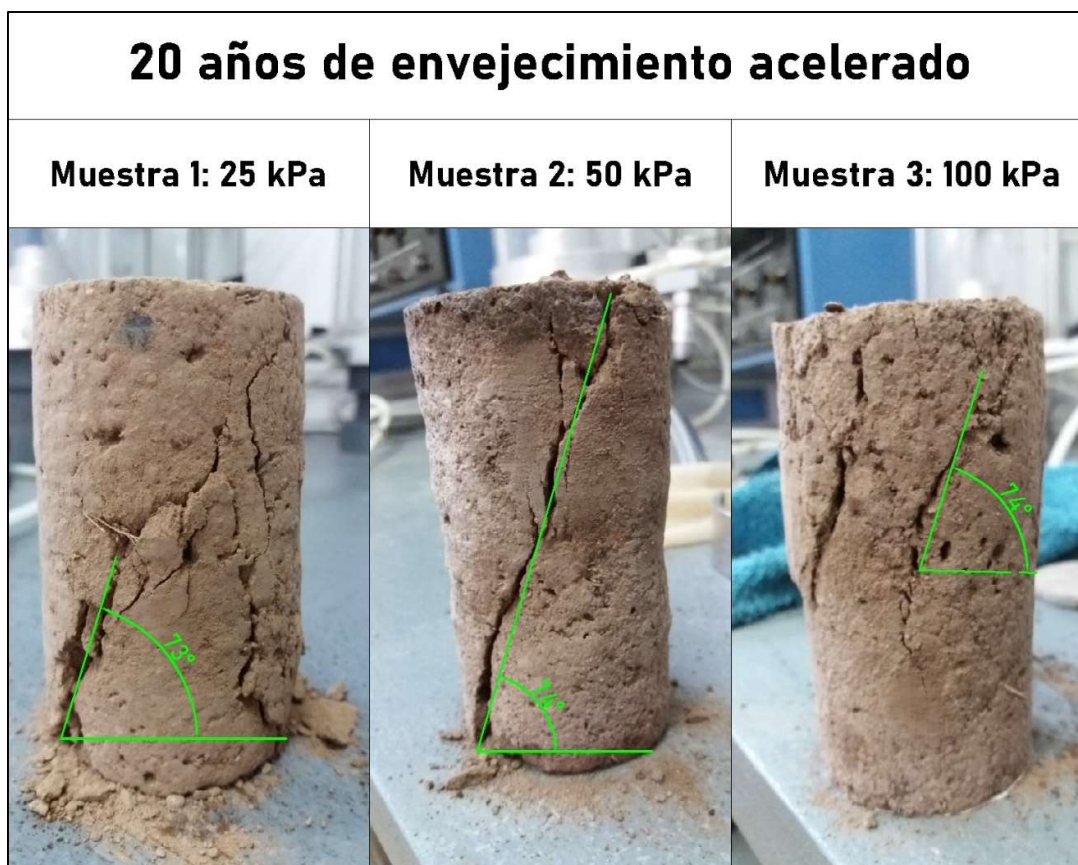
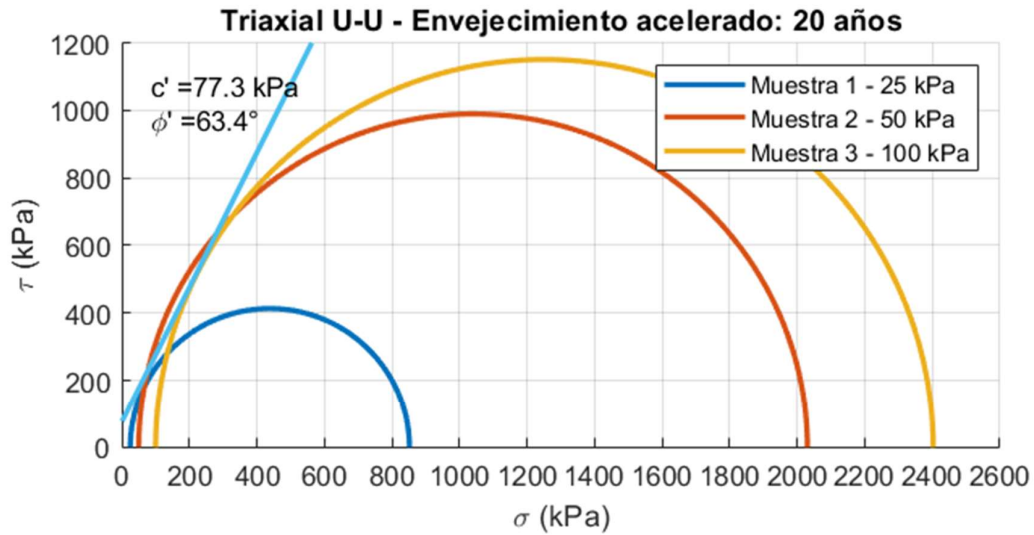


Imagen 18. Ángulos de falla - Ensayo triaxial - 20 años de envejecimiento acelerado



*Ilustración 20. Círculos de Mohr - Envejecimiento acelerado: 20 años*

En la Ilustración 20 podemos apreciar los círculos de Mohr, trazados para los ensayos triaxiales realizados con las muestras con 20 años de envejecimiento acelerado, de las cuales se trazó la envolvente con los círculos correspondientes a la presión de confinamiento de 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa, obteniendo así una cohesión de 44 kPa y un ángulo de fricción de 65.9°.

### 4.3. Análisis de correlación entre el envejecimiento acelerado y los resultados obtenidos

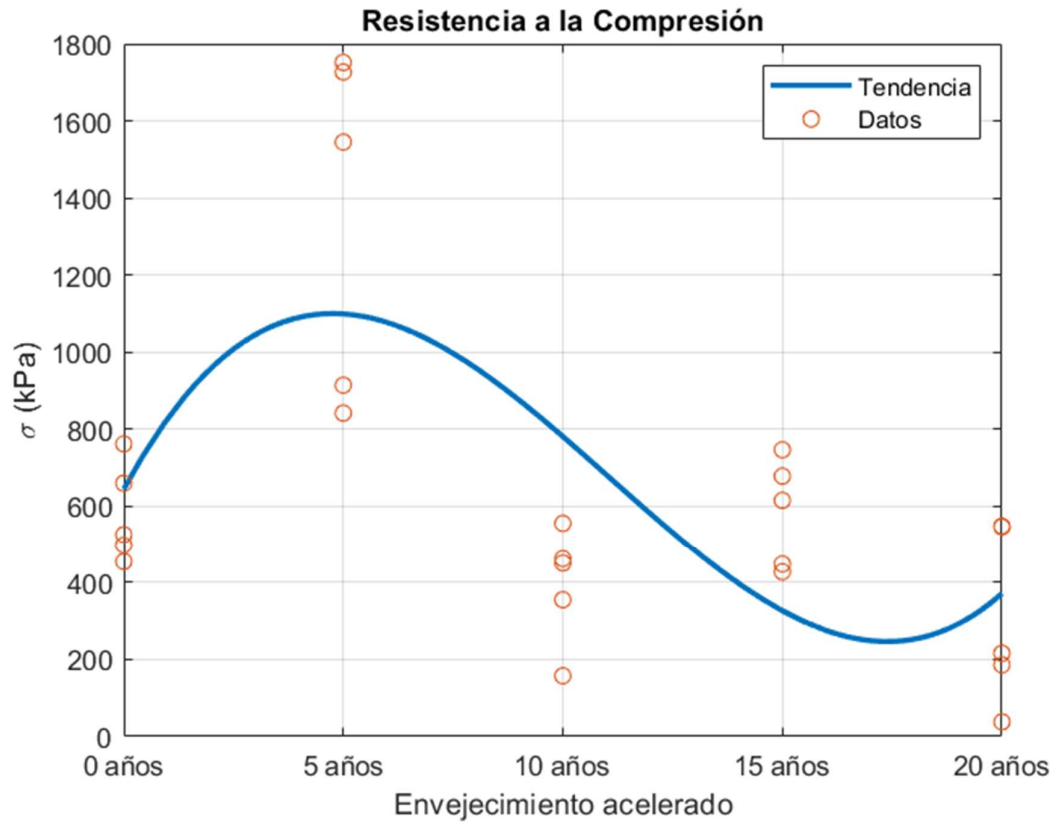
Se analizó la correlación entre el envejecimiento acelerado al que se expusieron las muestras y los resultados obtenidos para comprobar la hipótesis planteada en esta investigación (véase 1.4).

Esto se puede analizar mediante dos parámetros, la suma de cuadrados debido al error (SSE) y el estadístico R-cuadrado. El SSE es el error de mínimos cuadrados del ajuste, con un valor más cercano a cero que indica un mejor ajuste. El estadístico R-cuadrado es generalmente el mejor indicador de la calidad del ajuste, si tiende a tomar valores cercanos a 1.

#### Resistencia a la compresión:

En el caso de la resistencia a la compresión el valor del estadístico R fue de 0.4284, lo que indica un mal ajuste de la correlación *Envejecimiento Acelerado – Resistencia a la Compresión*.

```
f =  
Linear model Poly3:  
fitresult(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4  
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
  p1 =      0.8482  (0.1481, 1.548)  
  p2 =     -28.18  (-49.48, -6.88)  
  p3 =      210.7  (42.93, 378.4)  
  p4 =      644.3  (314.6, 974)  
gof = struct with fields:  
      sse: 2.6772e+06  
      rsquare: 0.4284  
      dfe: 21  
      adjrsquare: 0.3467  
      rmse: 357.0487
```



*Ilustración 21. Resistencia a la Compresión - Tendencia*

La ecuación de la tendencia de la resistencia a la compresión tiene la siguiente forma:

$$\sigma_c(0 \leq x \leq 20) = 0.8482x^3 - 28.18x^2 + 210.7x + 644.3 \text{ (kPa)}$$

$$R^2 = 0.4284$$

*Ecuación 11. Ecuación de tendencia de la resistencia a compresión*

donde  $x$  = tiempo de exposición al envejecimiento acelerado (en años).

## Cohesión:

Se analizó la relación entre el envejecimiento acelerado al que se expuso las muestras, y la cohesión obtenida a partir de la envolvente de las diferentes presiones de confinamiento aplicadas. Los resultados fueron los siguientes:

```
f =  
Linear model Poly2:  
f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3  
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 =      6.386  (-38.24, 51.01)  
p2 =     -54.55  (-327.5, 218.4)  
p3 =     207.7  (-150.4, 565.8)  
gof = struct with fields:  
    sse: 3.0124e+03  
    rsquare: 0.5157  
    dfe: 2  
    adjrsquare: 0.0315  
    rmse: 38.8101
```

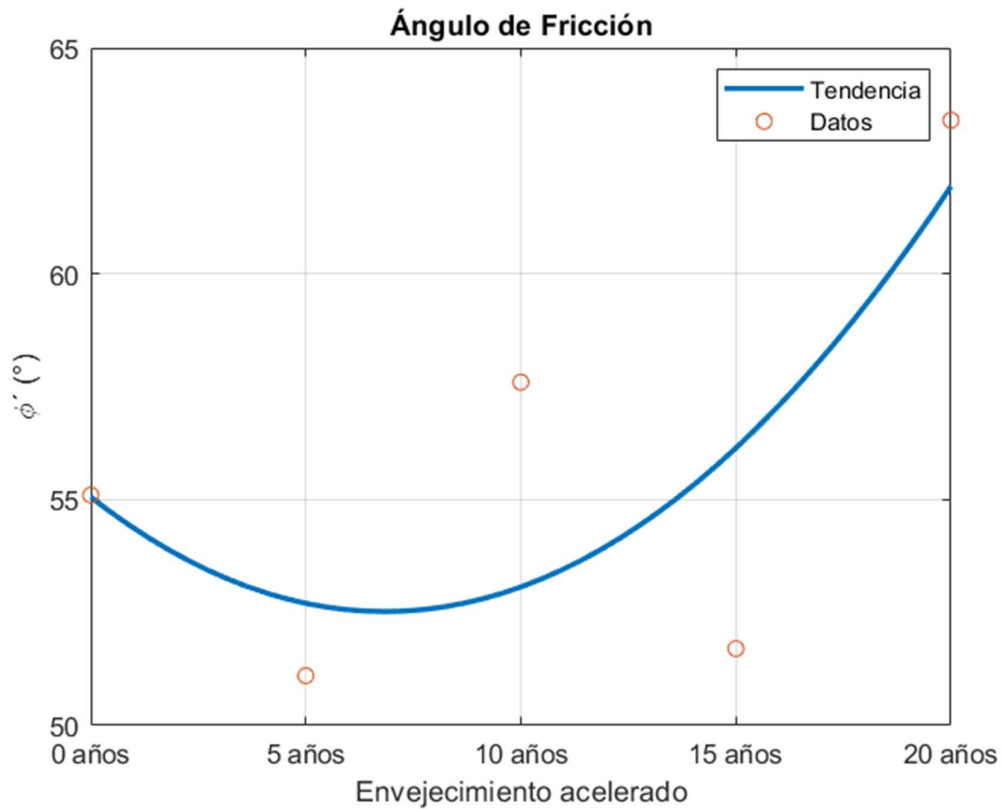


Ilustración 22. Cohesión - Tendencia

La ecuación de la tendencia de la cohesión tiene la siguiente forma:

$$c(0 \leq x \leq 20) = 6.386x^2 - 54.55x + 207.7 \text{ (kPa)}$$
$$R^2 = 0.5157$$

*Ecuación 12. Ecuación de tendencia de la cohesión en función del tiempo.*

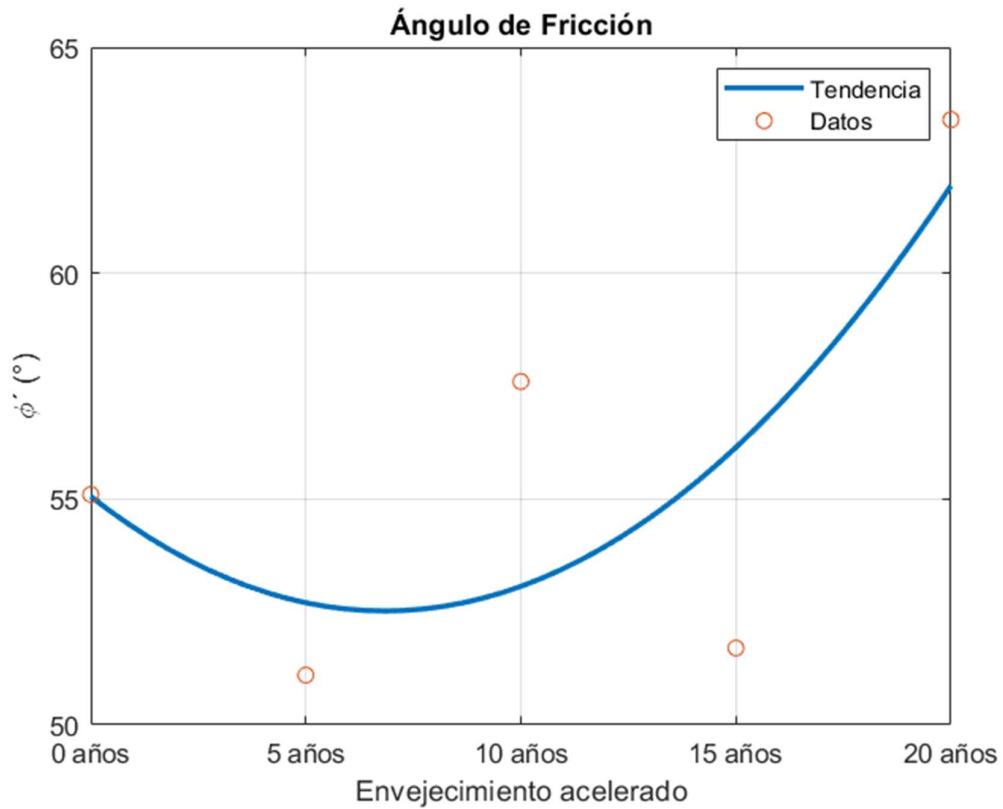
donde  $x$  = tiempo de exposición al envejecimiento acelerado (en años).

### Ángulo de fricción:

Se analizó la relación entre el ángulo de fricción y el envejecimiento acelerado al que se expusieron las muestras, para las diferentes presiones de confinamiento aplicadas.

Los resultados fueron los siguientes:

```
f =  
  Linear model Poly2:  
  f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3  
  Coefficients (with 95% confidence bounds):  
    p1 =      1.357  (-4.099,  6.813)  
    p2 =     -6.423  (-39.79,  26.94)  
    p3 =     60.12  (16.34, 103.9)  
gof = struct with fields:  
      sse: 45.0183  
      rsquare: 0.5516  
      dfe: 2  
      adjrsquare: 0.1031  
      rmse: 4.7444
```



*Ilustración 23. Ángulo de Fricción - Tendencia*

La ecuación de la tendencia del ángulo de fricción tiene la siguiente forma:

$$\phi(0 \leq x \leq 20) = 1.357x^2 - 6.423x + 60.12 \text{ (deg)}$$

$$R^2 = 0.5516$$

*Ecuación 13. Ecuación de tendencia del ángulo de fricción en función del tiempo.*

donde  $x$  = tiempo de exposición al envejecimiento acelerado (en años).

#### 4.4. Análisis de varianza (ANOVA) de los resultados obtenidos

El análisis de varianza (ANOVA) se realizó para comprobar la hipótesis planteada en esta investigación (véase 1.4), mediante la comparación de las medias de los parámetros mecánicos de los grupos estudiados para cada período de envejecimiento acelerado. El nivel de significancia asumido es del 5%. Se considera que la hipótesis nula planteada se puede rechazar cuando el valor del estadístico “p” es menor al nivel de significancia.

En el caso de la resistencia a la compresión, se realizó un análisis de varianza unidireccional (ANOVA), considerando como los grupos estudiados al período de envejecimiento acelerado. La hipótesis nula que se asume es que el envejecimiento no tiene un efecto significativo en la resistencia a la compresión.

Para el caso de la cohesión y fricción obtenidas de los ensayos triaxiales, no había suficientes muestras para realizar un análisis de varianza, dado que se necesitan al menos 2 elementos por grupo, considerando como los grupos estudiados al período de envejecimiento acelerado al que se expusieron las muestras.

ANOVA - Resistencia a la compresión						
1	Fuente	SS	GDL	MS	F	p
2	Envejecimiento	3448100	4	862020	13.955	1.364E-05
3	Error	1235400	20	61771		
4	Total	4683500	24			

Tabla 17. ANOVA - Resistencia a la compresión

#### **4.5. Discusión de resultados**

Para poder comprender los efectos sucedidos en el material luego de los períodos de envejecimiento a los que fue expuesto, se debe explicar los fenómenos físicos y químicos que se pudieron haber suscitado en el material, de manera que produzcan una alteración de sus propiedades mecánicas.

Partiendo desde la caracterización física, la granulometría no presentó variaciones significativas dependiendo del período de envejecimiento acelerado al que fueron expuestas las muestras. Visualmente se puede identificar la presencia de materiales de origen volcánico, como pómez, pedazos de andesita y basalto en la granulometría del adobe, mientras que la caracterización química presenta un contenido mayoritario de compuestos a base de sílice en la composición química del adobe (Salgado, 2019), sin embargo, el análisis mineralógico es necesario para determinar con certitud los materiales presentes.

Los resultados obtenidos para las caracterizaciones realizadas para obtener los límites de consistencia, gravedad específica y densidad seca del adobe, los cuales no presentan una variación significativa en función del envejecimiento acelerado al que fueron expuestos, por lo que probablemente las diferencias entre los valores obtenidos sean resultado del muestreo y obtención de los adobes, más que un error de ensayo.

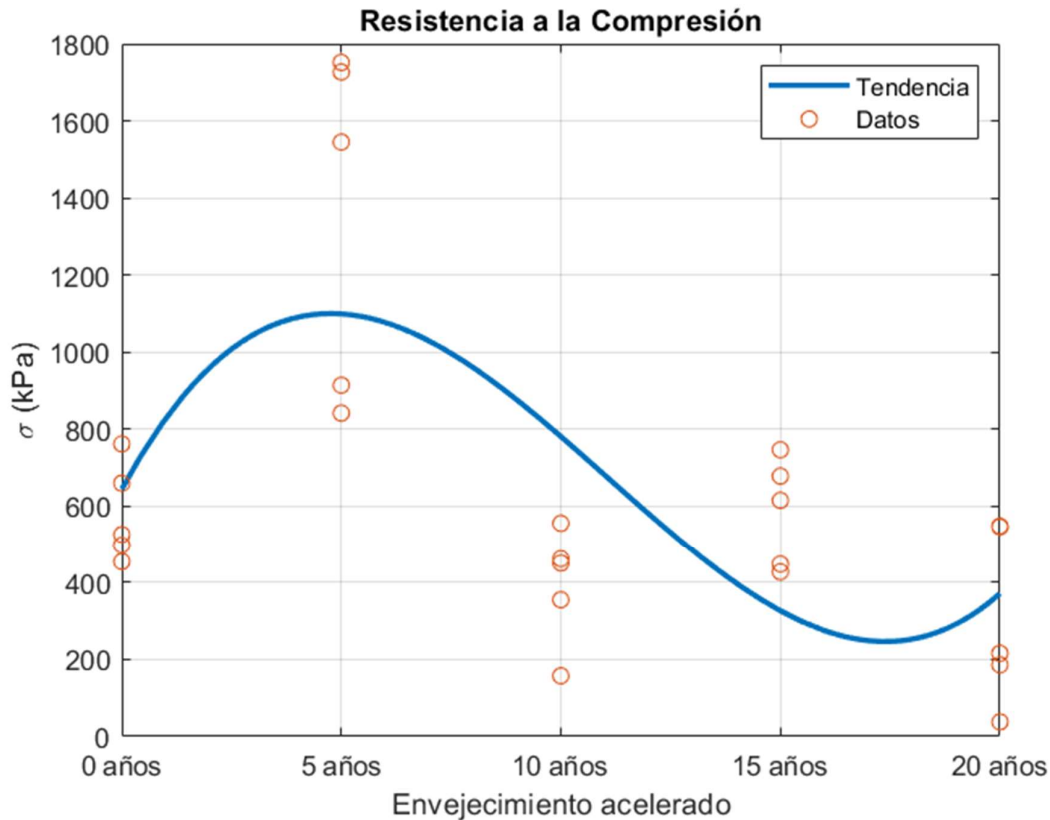
El carrizo y paja encontrados en el adobe pueden proporcionar cierta ductilidad adicional al adobe así como una resistencia adicional a esfuerzos externos, como las sollicitaciones por dilatación y contracción térmica (Jäger & Braun, 2010), sin embargo, este aspecto requiere más investigación.



*Imagen 19. Fibras de carrizo y paja en el adobe*

En el caso de la resistencia a la compresión si se pudo identificar una variación significativa e importante de las medias de resistencia obtenidas por efecto del período de envejecimiento acelerado al que se sometieron las muestras. Este fenómeno puede tener varias explicaciones, que se discuten a continuación.

En general se aprecia una tendencia de aumento de la resistencia a la compresión en los 5 años de envejecimiento acelerado, para luego decaer de forma abrupta y mantenerse a niveles similares a los del material sin exposición al envejecimiento acelerado. La correlación múltiple realizada, refleja un coeficiente de determinación  $R=0.42$ , lo que indica una bondad de ajuste baja entre los resultados obtenidos para cada intervalo de envejecimiento acelerado.



*Ilustración 24. Resistencia a la compresión - Tendencia*

Otro fenómeno que puede explicar el comportamiento de la resistencia mecánica a la compresión es la humedad presente en el adobe. En los primeros ciclos de envejecimiento acelerado, el incremento de la temperatura puede producir un fenómeno de secado y pérdida de la humedad presente en el adobe, lo cual incrementa su resistencia mecánica, pero a su vez la fragiliza el material por la formación de grietas por retracción y dilatación térmica. Así también, el aumento de la humedad tiende a disminuir la resistencia mecánica del suelo en general (Das, 2014), lo que podría explicar el comportamiento mecánico a la compresión evidenciado en los últimos ciclos de envejecimiento. Sin embargo, la humedad de las muestras analizadas en los ensayos a compresión tiene a permanecer en valores equilibrados y similares.

Por último, la resistencia a la compresión también puede verse influida por la presencia de óxidos de calcio y magnesio, los cuales (especialmente el óxido de calcio, más conocido como cal) son empleados como un estabilizante de suelos, y en

otras formas químicas ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca(OH)}$ ) se emplean también como materia prima para la elaboración de yeso, clinker y cemento. Estos compuestos tienen una fuerte cohesión química que se ve disminuida con la presencia de humedad que disminuye su atracción electromagnética (Salgado, 2019), la cual influye en la resistencia a compresión de la matriz de suelo del adobe.

Por su parte, para analizar el comportamiento de la resistencia al corte, se realizaron ensayos triaxiales U-U, para cada ciclo de envejecimiento, aplicando 3 presiones de confinamiento ( $\sigma_3$ ), 25kPa, 50kPa y 100kPa, esto con la finalidad de poder determinar el ángulo de fricción interno del adobe, mediante un modelo de falla Mohr-Coulomb, según el cual la resistencia al corte de un material de comportamiento frágil -como es el caso del adobe- está determinada por la combinación de esfuerzos tangenciales y normales, expresadas como una combinación de su cohesión y fricción interna, expresada de la siguiente forma:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

*Ecuación 14. Criterio de falla Mohr-Coulomb*

$$\theta = 45 + \frac{\phi}{2}$$

*Ecuación 15. Relación entre el ángulo de falla y el ángulo de fricción del material*

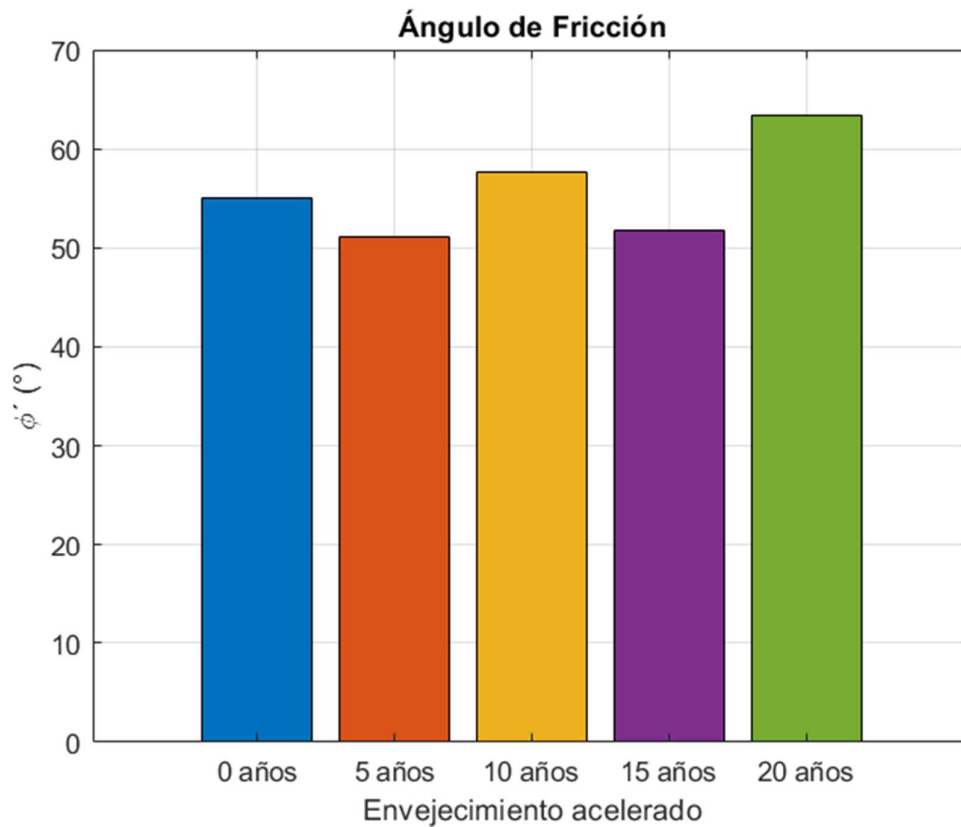
Se ensayaron 3 muestras por cada período de envejecimiento acelerado, cada una con una distinta presión de confinamiento, realizando 15 ensayos triaxiales U-U en total y registrando el esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ),.

Se escogió un método de ensayo triaxial U-U (no consolidado-no drenado) y no saturado en el caso de esta investigación, puesto que en condiciones naturales el adobe presenta una muy baja humedad, razón por la cual se puede considerar que el incremento de la presión de poro causado por la fase líquida del adobe es despreciable por su baja humedad, además de que una condición de saturación en el adobe causaría la disgregación del material, y por consiguiente la pérdida de sus propiedades mecánicas (Das & Sobhan, 2014). Otra de las razones por las cuales se realizó el ensayo triaxial U-U, es que, a diferencia del ensayo de corte directo, el suelo no es forzado a fallar en un plano necesariamente horizontal, ni se presenta

una distribución de esfuerzos irregular entre los bordes y el centro de la muestra sometida a un corte directo.

Las muestras fueron talladas manualmente a partir de los bloques envejecidos artificialmente, en una relación altura/diámetro igual a 2, con un diámetro de 5 cm aproximadamente, con ligeras variaciones debido a la irregularidad de las partículas que conforman el adobe.

Se midió el ángulo de falla presentado en cada probeta ensayada y finalmente, se trazó la línea de falla con los círculos de Mohr obtenidos para las presiones de confinamiento de 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa, respectivamente, así como la línea del plano de falla respectivo para cada grupo.



*Ilustración 25. Ángulo de Fricción - Valores obtenidos*

La cohesión y ángulo de fricción de cada intervalo de envejecimiento acelerado fueron interpretados como la recta entre los puntos con mejor ajuste

correspondientes a las tangentes de la línea del plano de falla de cada círculo de Mohr obtenidos para las presiones de confinamiento de 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa.

El ángulo de fricción del suelo determinado por las pruebas de laboratorio está influenciado por dos factores principales. La energía aplicada a un suelo por la carga externa se utiliza tanto para superar la resistencia a la fricción entre las partículas del suelo como para expandir el suelo contra la presión de confinamiento. Los granos del suelo son altamente de forma irregular y deben levantarse uno sobre otro para que se produzca el deslizamiento. Este comportamiento se llama dilatancia. El otro factor que afecta el ángulo de fricción del suelo es el grado de acomodo o entrelazamiento de las partículas, dado por la densidad relativa del material (Das, 2008).

De aquí podemos inferir, que la fricción entre las partículas granulares del adobe sufre poca o ninguna alteración, ya que la estructura básica de los compuestos de sílice permanece relativamente constante durante el envejecimiento acelerado, dada la buena tolerancia de los silicatos a condiciones climáticas extremas (Salgado, 2019).

Sin embargo, los ciclos consecutivos de humedecimiento, secado y gradientes térmicas que se generan en las condiciones *in-situ* del adobe generan grietas y fisuras en el material que afectan el grado de entrelazamiento de las partículas del adobe, de ahí que se puedan esperar resultados distintos del ángulo de fricción, por la pérdida del acomodo entre partículas separadas por las grietas o fisuras del adobe. Así también la localización del adobe en la estructura durante su vida útil puede generar efectos de mayor concentración de esfuerzos por el uso de la edificación, cambios de temperatura, eventos naturales, entre otros, los que a su vez generan fisuras y grietas internas en la matriz de suelo.

El efecto que tiene el confinamiento aplicado en el adobe se puede describir por el comportamiento curvilíneo de la envolvente de los círculos de Mohr, pues al aplicar una presión de confinamiento mayor, se tiende a obtener ángulos de fricción más reducidos (Das, 2008). Esta tendencia se repitió en general para las muestras

analizadas dentro del presente trabajo, siendo las presiones de confinamiento de 100 kPa, las que menores valores del ángulo de fricción arrojaron en general.

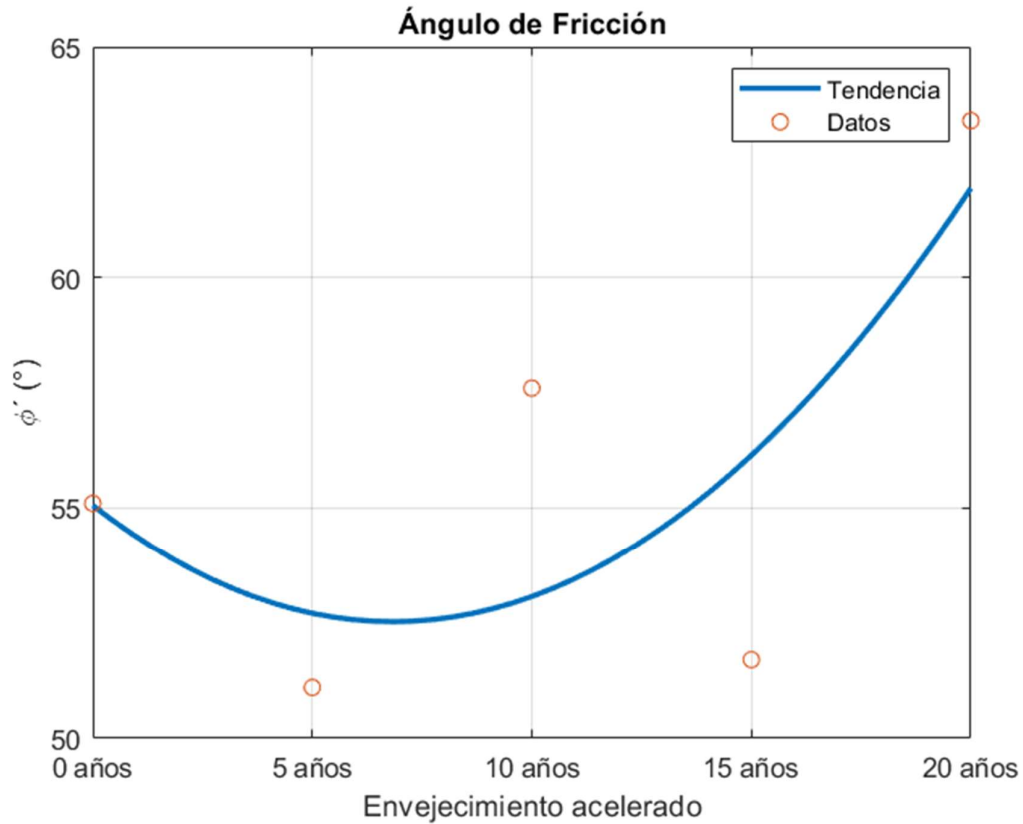
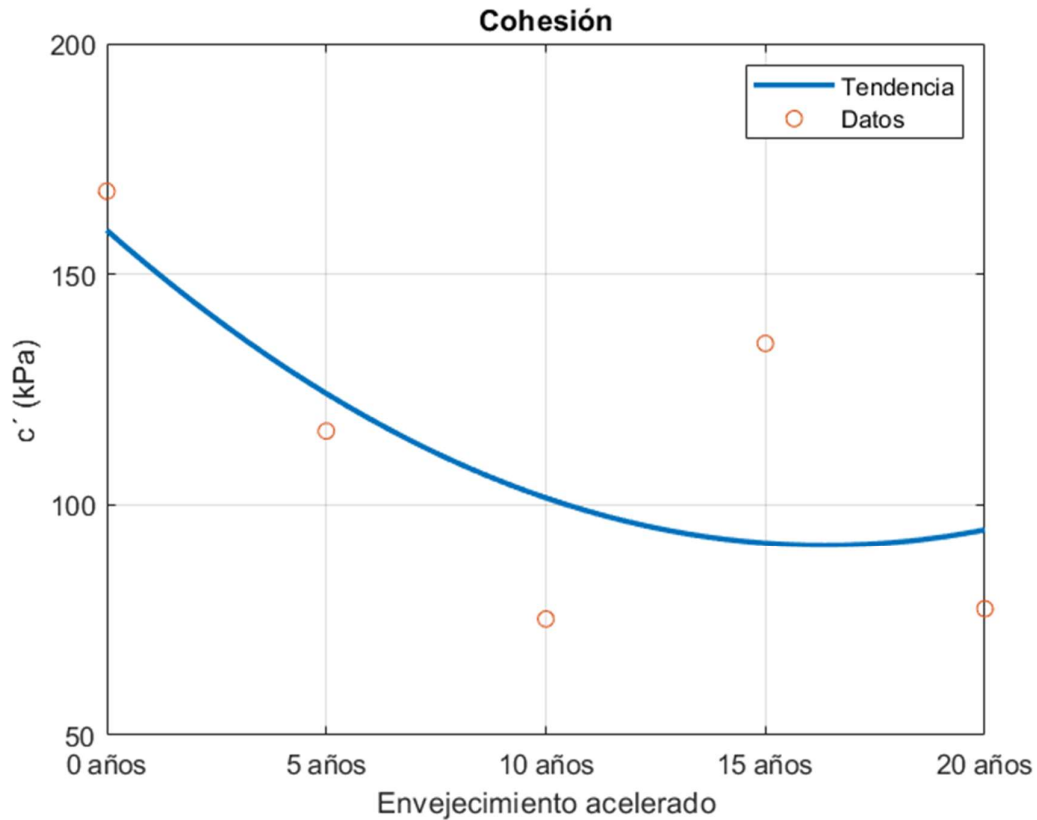


Ilustración 26. Ángulo de fricción - Tendencia

En general la tendencia del ángulo de fricción es de aumentar hasta el ciclo de 10 años de envejecimiento acelerado, para luego decaer y sufrir una ligera recuperación hasta sus valores iniciales.

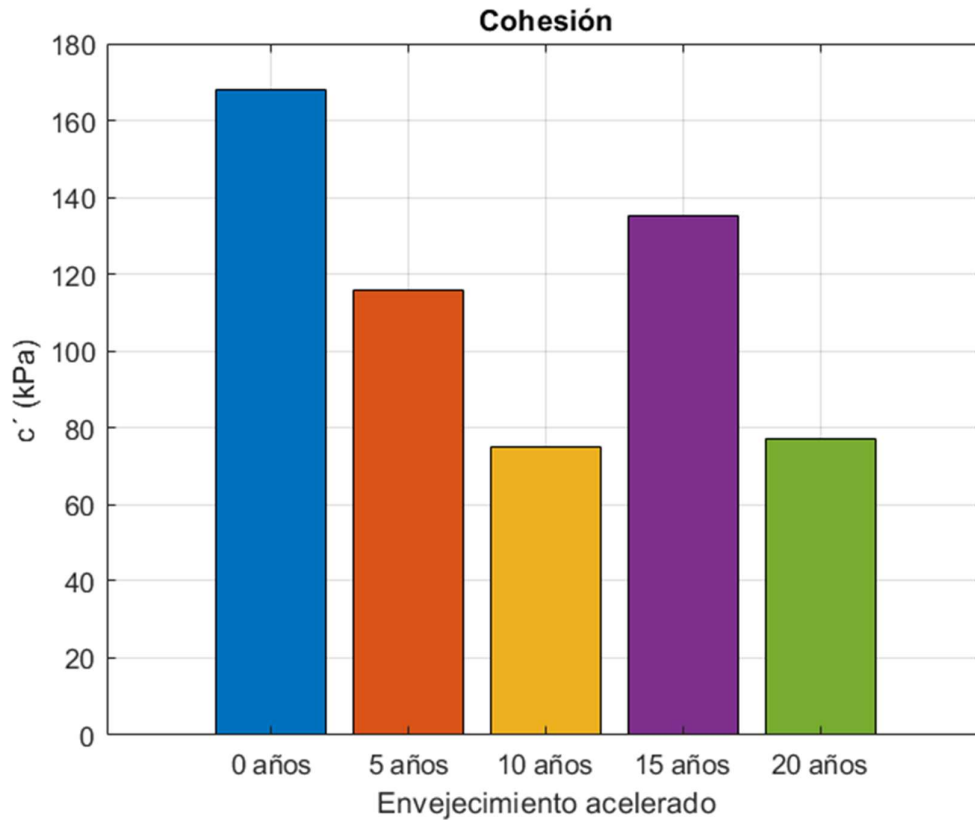
Sin embargo, la variabilidad de los materiales empleados en la elaboración del adobe (sobre todo las partículas mayores al tamiz #10), la manipulación de las muestras y el método de ensayo aplicado pueden explicar las variaciones de los ángulos de fricción observadas entre períodos de envejecimiento acelerado.



*Ilustración 27. Cohesión - Tendencia*

La tendencia en la cohesión del adobe es al descenso hasta los 5 años de envejecimiento acelerado, para luego aumentar y recuperar sus valores iniciales hasta los 20 años de envejecimiento acelerado.

Este comportamiento podría tener una explicación similar al caso de los ensayos de compresión simple, donde la cohesión química de los óxidos de calcio y magnesio presentes en el adobe puede verse modificada con la presencia de humedad que modifica su atracción electromagnética (Salgado, 2019), por lo cual el parámetro de control para evaluar y comparar la cohesión sería el grado de humedad y saturación de la muestra ensayada (Das, 2014). En forma general, los ensayos triaxiales se realizaron en muestras con un 2% a 3% de humedad y una saturación entre el 7% y 10%.



*Ilustración 28. Cohesión - Valores obtenidos.*

Sin embargo, la composición química de las partículas menores a 0.075 mm y los compuestos minerales presentes en el adobe, la manipulación de las muestras durante el muestreo y el método de ensayo aplicado pueden explicar las variaciones de los valores de cohesión observados entre períodos de envejecimiento acelerado.

## 5. Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- En función de los resultados analizados se puede acotar que el adobe presenta una composición del 3.79% de grava, 28.6% arena y 67.61% finos y se clasifica como un suelo tipo CL-ML, limo-arcilloso con arena, según la carta de plasticidad y su granulometría de acuerdo con la norma ASTM D-2487. En su mayoría los finos (partículas menores a 0.075 mm) están conformados por limo (véase 4.1.1).

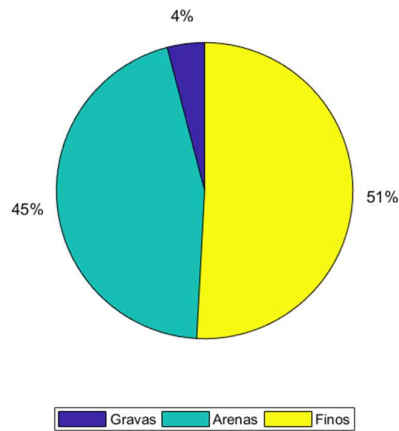


Ilustración 29. Composición granulométrica del Adobe

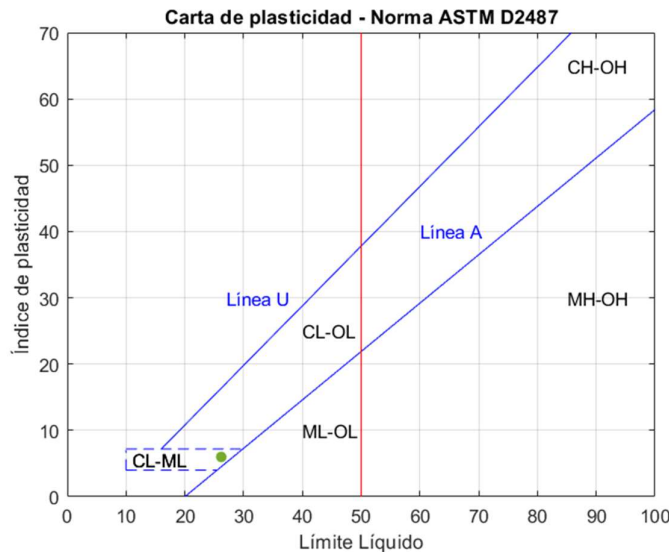
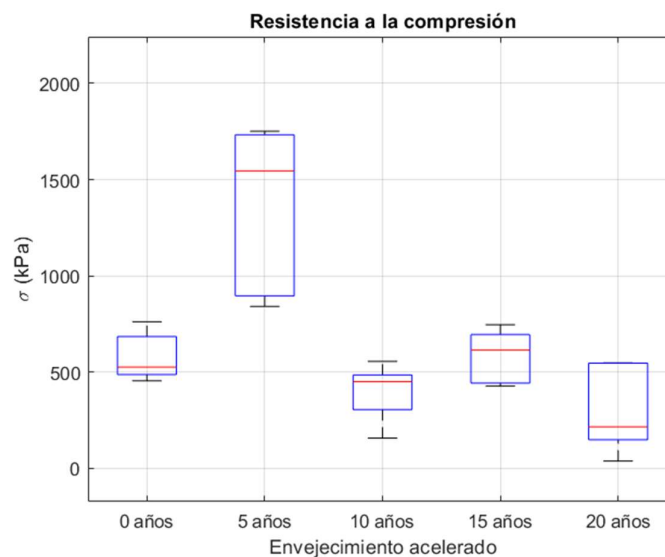


Ilustración 30. Carta de plasticidad del Adobe

- Con base en la correlación múltiple realizada para los resultados obtenidos de los ensayos a compresión (véase Ilustración 21), se obtuvo un valor  $R=0.43$ , por lo cual se puede establecer que no existe evidencia suficiente para sostener la hipótesis de una tendencia definida para la variación de la resistencia a la compresión en función del período de envejecimiento acelerado al que se sometieron las muestras.
- Con base en el análisis factorial unidireccional realizado para los resultados obtenidos de los ensayos a compresión (véase Ilustración 24, Tabla 17), se obtuvo un valor  $p = 1.364e-05$ , por lo cual podemos inferir con certitud existe evidencia suficiente para corroborar que una de las medias de resistencia a la compresión varía significativamente en comparación a los demás grupos. en la resistencia a la compresión media del material.



*Ilustración 31. Diagrama de cajas - Resistencia a la compresión*

- Con base en los resultados obtenidos, podemos inferir que los elementos estructurales estudiados no pueden ser representativos de una estructura o un conjunto de estructuras, puesto que se desconoce su método de extracción, localización, y condiciones previas a la obtención de las muestras en general. Sin embargo, los resultados obtenidos se pueden validar como un modelo independiente del comportamiento mecánico del adobe, como elemento individual.

- El esfuerzo de confinamiento real del adobe también va a depender de, entre otras variables, de la geometría y uso de las estructuras del centro histórico. Cabe recordar, que hasta mediados del siglo pasado la mayoría de las edificaciones del centro histórico tenían un uso residencial y religioso. De ahí que el uso actual de estas estructuras como locales comerciales, hoteles, museos y oficinas gubernamentales, puedan incidir en las cargas y solicitaciones que experimentan los muros de adobe.
- El estudio de este tipo de sistemas constructivos se podría realizar mediante una valoración de la evolución del daño y del estado actual de las edificaciones, con miras a poder identificar la serviciabilidad de la edificación y la condición de seguridad y estabilidad que esta puede presentar al presente o futuro. Los resultados de esta investigación pueden servir como referentes para futuras evaluaciones y proyectos de restauración, conservación y reforzamiento del patrimonio cultural inmueble de Quito.
- En comparación a los resultados obtenidos por Uribe Kaffure et al., (2015), se puede identificar que el adobe analizado de la Capilla Doctrinera de Tausa tiene propiedades físicas similares al estudiado en el presente trabajo, como una clasificación de limo de baja plasticidad (CL) y un límite plástico similar (véase Tabla 6. Límites de Consistencia).
- En comparación a los resultados obtenidos por Uribe Kaffure et al., (2015), se puede identificar que el adobe analizado de la Capilla Doctrinera de Tausa presentó valores de esfuerzo de compresión entre 1.2 a 1.0 MPa, los cuales son ligeramente superiores a la mayoría de las resistencias a la compresión promedio en el presente trabajo (véase Ilustración 32).

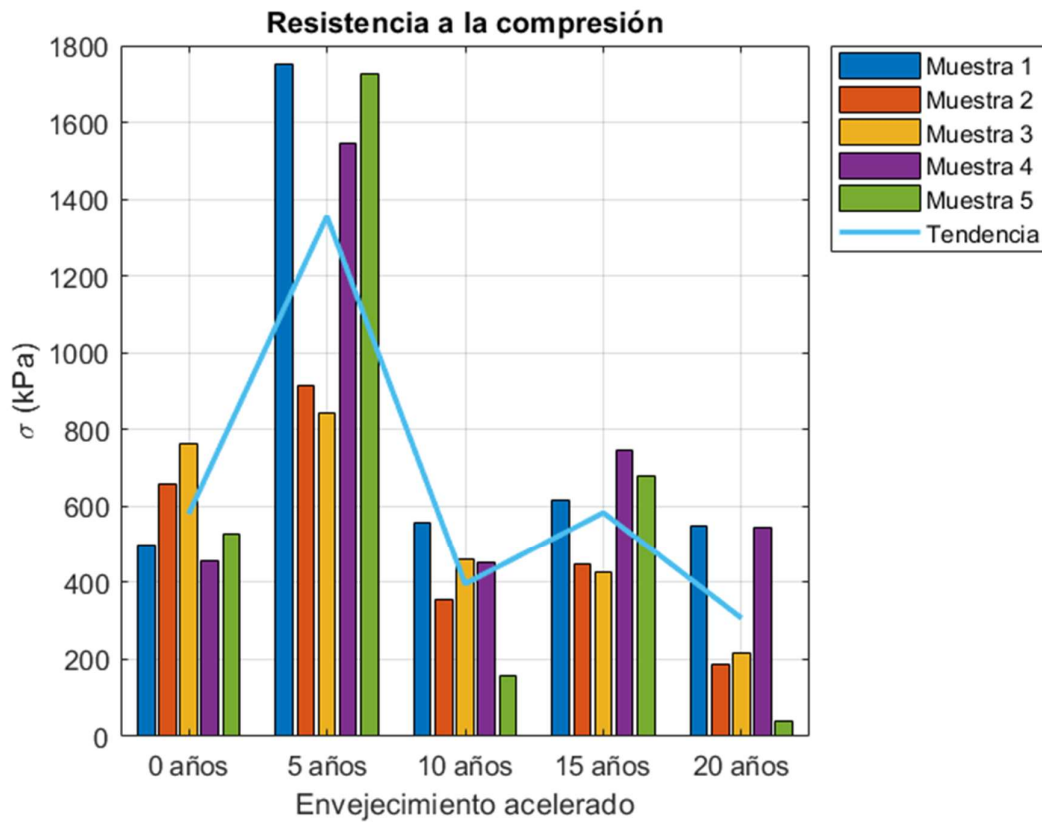


Ilustración 32. Resistencia a la compresión – Valores obtenidos

- En comparación a los resultados obtenidos por Aguilar Alberca & Quezada Zambrano, (2017) se puede identificar que el adobe analizado en la ciudad de Cuenca, Ecuador presentó valores de esfuerzo de compresión promedio entre 0.6 a 1.44 MPa, los cuales son similares a la mayoría de las resistencias a la compresión promedio en el presente trabajo (véase Ilustración 32).
- Los valores del estadístico R obtenidos para los resultados de los ensayos a compresión y triaxiales realizados (véase Ecuación 11, Ecuación 12, Ecuación 13) indican un pobre o nulo ajuste de la correlación entre un tiempo de envejecimiento y las características mecánicas observadas, por lo cual, no se dispone de evidencia suficiente para sustentar una relación entre ambas variables.

## 5.2. Recomendaciones

- Los resultados obtenidos de la realización de ensayos triaxiales U-U, dan cierto indicio del que el adobe puede ser un material fuertemente preconsolidado, tanto por la historia y tiempo de esfuerzos que ha tenido dentro de las edificaciones, así como por la forma de elaborar las unidades de mampostería. Si bien no existe un procedimiento estandarizado para elaborar unidades de adobe, se recomienda que el suelo a partir del cual se elabore el adobe debe ser lo suficientemente plástico para formar una tira de unos 7.5 cm de largo sin romperse al sostenerse en la palma de la mano.



*Ilustración 33. Prueba de plasticidad y cohesión, imagen a partir de Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

También se recomienda formar pequeñas bolas de 2 cm que al secarse al sol no se puedan romper con los dedos, con la finalidad de verificar la dureza del suelo seco.



*Ilustración 34. Prueba de dureza, imagen a partir de Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*

Una vez validados estas dos características de forma empírica, se recomienda que las unidades de adobe secas no presenten grietas mayores de 7.5 cm de largo, menores a 3 mm de ancho y menos de 10 mm de profundidad.

- Si bien, se pudo determinar que el período de envejecimiento simulado no tuvo efectos significativos en la variación del ángulo de fricción y la cohesión del adobe -y por consiguiente en su resistencia al corte-, se podrían considerar otros modelos de análisis sobre el comportamiento al corte de la mampostería de adobe, en las edificaciones del centro histórico, como el que establece la norma DIN 1053.
- Se recomienda profundizar el estudio respecto al comportamiento del módulo elástico del adobe, en función de la humedad y el grado de saturación de la muestra.
- Gran parte de las viviendas y edificios del centro histórico de la ciudad de Quito, están conformados por muros portantes elaborados con adobe, los cuales a veces prescinden de un elemento protector a la intemperie, de ahí que sea recomendable aplicar un recubrimiento o dar cierta protección ante la radiación solar y precipitaciones, para prolongar la durabilidad del material.

## 6. Anexos

Los cálculos, tablas y gráficas fueron realizadas en el software MATLAB®. Las ilustraciones, imágenes, tablas y demás gráficas en el presente trabajo son de autoría propia, a menos que se indique lo contrario en la descripción.

### 6.1. Relaciones Fundamentales y Gravedad Específica – Cálculos

```
%PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
%FACULTAD DE INGENIERÍA
%ESCUELA DE CIVIL
%TESIS: Caracterización de los materiales de construcción en
%el centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito sometidos a
%envejecimiento acelerado
%DIEGO ESCALANTE
clear, clc
%DENSIDAD SECA
%[Muestra en el aire    Muestra + parafina en el aire    Muestra+parafina en el
%agua]
datos=[271.03      285.95 110.12
       94.11      100.81 34.74
       90.40 97.36 30.28
       50.99      56.91 13.66
       162.08     178.88 54.68]

datos = 5x3
       271.03      285.95      110.12
       94.11      100.81      34.74
       90.40      97.36      30.28
       50.99      56.91      13.66
       162.08     178.88      54.68

pw=1; %densidad del agua
pp=0.872; %densidad de la parafina
ma=datos(:,1);
mpa=datos(:,2);
mpw=datos(:,3);
for i=1:5
    ds(i,1)=ma(i,1)/(((mpa(i,1)-mpw(i,1))/pw)-((mpa(i,1)-ma(i,1))/pp));
end
format bank
    ds=ds*9.81 % GS en kN/m3
ds = 5x1
       16.75
       15.81
       15.01
       13.72
       15.15

    dsm=mean(ds)
dsm =
       15.29

%GS
%[Suelo    Matraz + agua    Suelo + matraz + agua]
datos=[46.2 647.82 676.59]
```

```

47.9 646.05 675.75
51.23    650.74 682.48
50.53    655.5 686.93
46.32    648.32 677.44]
datos = 5x3
    46.20    647.82    676.59
    47.90    646.05    675.75
    51.23    650.74    682.48
    50.53    655.50    686.93
    46.32    648.32    677.44
s=datos(:,1);
ma=datos(:,2);
sma=datos(:,3);
for i=1:5
    gs(i,1)=s(i,1)/((ma(i,1)+s(i,1))-sma(i,1));
end
gs
gs = 5x1
    2.65
    2.63
    2.63
    2.65
    2.69
gsm=mean(gs)
gsm =
    2.65

```

## 6.2. Granulometría y Clasificación SUCS – Cálculos

```

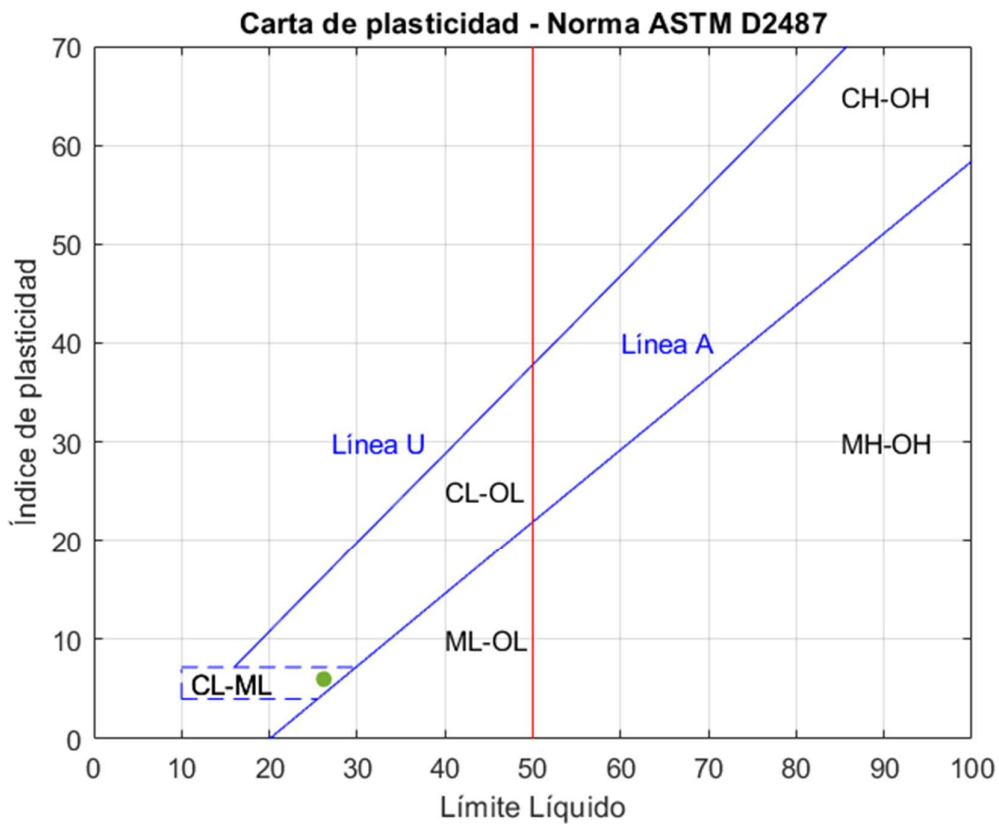
%PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
%FACULTAD DE INGENIERÍA
%ESCUELA DE CIVIL
%TESIS: Caracterización de los materiales de construcción en
%el centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito sometidos a
%envejecimiento acelerado
%DIEGO ESCALANTE
clear, clc
%CARTA DE PLASTICIDAD
fplot(@(x) 0.9*(x-8),[16 100], 'b')
hold on
fplot(@(x) 0.73*(x-20),[20 100], 'b')
fplot(@(x) 7.2,[10 29.86], 'b', 'LineStyle', '--')
fplot(@(x) 4,[10 25.47], 'b', 'LineStyle', '--')
hold on
grid on
figure(gcf)
x=50;
x1=[x x];
y1=[0, 70];
plot(x1,y1, 'r')
hold on
figure(gcf)
x=10;
x2=[x x];
y=[4, 7];
plot(x2,y, 'b', 'LineStyle', '--')

```

```

LL=26.2
LL =
    26.20
LP=20.2
LP =
    20.20
IP=LL-LP
IP =
    6.00
scatter(LL,IP,'filled')
text(11,5.5,0,'CL-ML')
text(40,25,0,'CL-OL')
text(40,10,0,'ML-OL')
text(85,65,0,'CH-OH')
text(11,5.5,0,'CL-ML')
text(85,30,0,'MH-OH')
text(27,30,0,'Línea U','color','b')
text(60,40,0,'Línea A','color','b')
xlabel('Límite Líquido')
ylabel('Índice de plasticidad')
title('Carta de plasticidad - Norma ASTM D2487')
xlim([0 100]);
ylim([0 70])
hold off

```



```

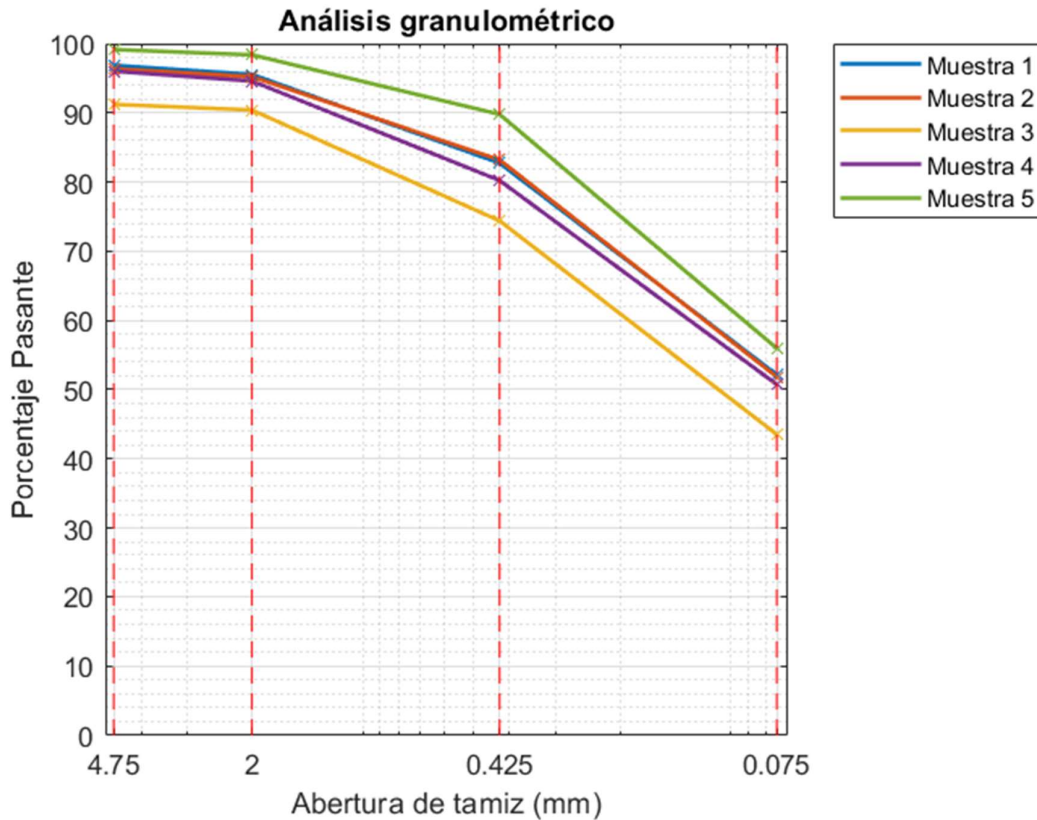
%GRANULOMETRÍA
%Masa húmeda de la muestra y humedad
datos=[135.09    145.19164.72136.28147.09
       1.861.89    1.83    2.89    4.34

```

```

        4.43 5.12  12.36 5.61  1.20
        6.27 6.71  13.52 7.62  2.28
        24.32   23.68 36.08 27.86 14.39
        67.46   67.87 79.61 69.43 62.06];
format bank
%Masas húmedas
mh= datos(1,1:5);
%Humedad
h= datos(2,1:5);
%Masas secas
for i=1:length(h)
    ms(1,i)=mh(1,i)/(1+h(1,i)/100);
end
%Masas retenidas acumuladas
mra= datos(3:6,1:5);
%Aberturas de los tamices
t=[4.75; 2.00; 0.425; 0.075];
for i=1:4
%Porcentaje retenido acumulado
for j=1:5
pra(i,:)=mra(i,+)/ms(1,j)*100;
%Porcentaje pasante
pp(i,:)=100-pra(i,);
end
end
for i=1:5
semilogx(t,pp,'linewidth',1.5)
hold on
set(gca,'xDir','reverse')
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.ColorOrderIndex = 1;
for j=1:5
scatter(t,pp(:,j),'x')
end
%INTERVALOS DE LOS TAMICES
xlim([0.07 5])
ylim([0 100])
%VERTICALES DE TAMICES
for i=1:length(t)
figure(gcf)
x=t(i,1);
x=[x x];
y=[0, 100];
plot(x,y,'r','LineStyle','--')
end
xticks([0.075 0.425 2.00 4.75])
title('Análisis granulométrico')
xlabel('Abertura de tamiz (mm)')
ylabel('Porcentaje Pasante')
hold off
end
legend ('Muestra 1','Muestra 2','Muestra 3','Muestra 4','Muestra
5','Location','bestoutside')

```



`%Tabla Tamices/Porcentaje pasante de cada muestra`

`table(t,pp)`

`ans = 4x2 table`

	t	pp				
1	4.75	96.86	96.37	91.23	96.02	99.15
2	2.00	95.55	95.24	90.41	94.59	98.38
3	0.42	82.75	83.20	74.41	80.24	89.79
4	0.07	52.15	51.86	43.53	50.75	55.98

`%DATOS INICIALES (GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO)`

`%MUESTRA 1`

`d=[0.09,0.065,0.046,0.033,0.024,0.018,0.013,0.010,0.007,0.005,0.0036,0.0026,0.0015,0.0011]; % DIÁMETROS`

`p=[41.5,39.1,36.7,35.2,31.7,25.8,21.1,15.2,10.5,5.8,3.5,2.3,1.1,0.0]; % PASANTE`

`PASANTE`

`scatter(d,p,'filled')`

`set(gca,'xscale','log','Xdir','reverse')`

`grid on`

`xlabel('Tamaño de partícula (mm)')`

`ylabel('Porcentaje pasante')`

`title('Granulometría por Hidrómetro - Muestra 1')`

`hold on`

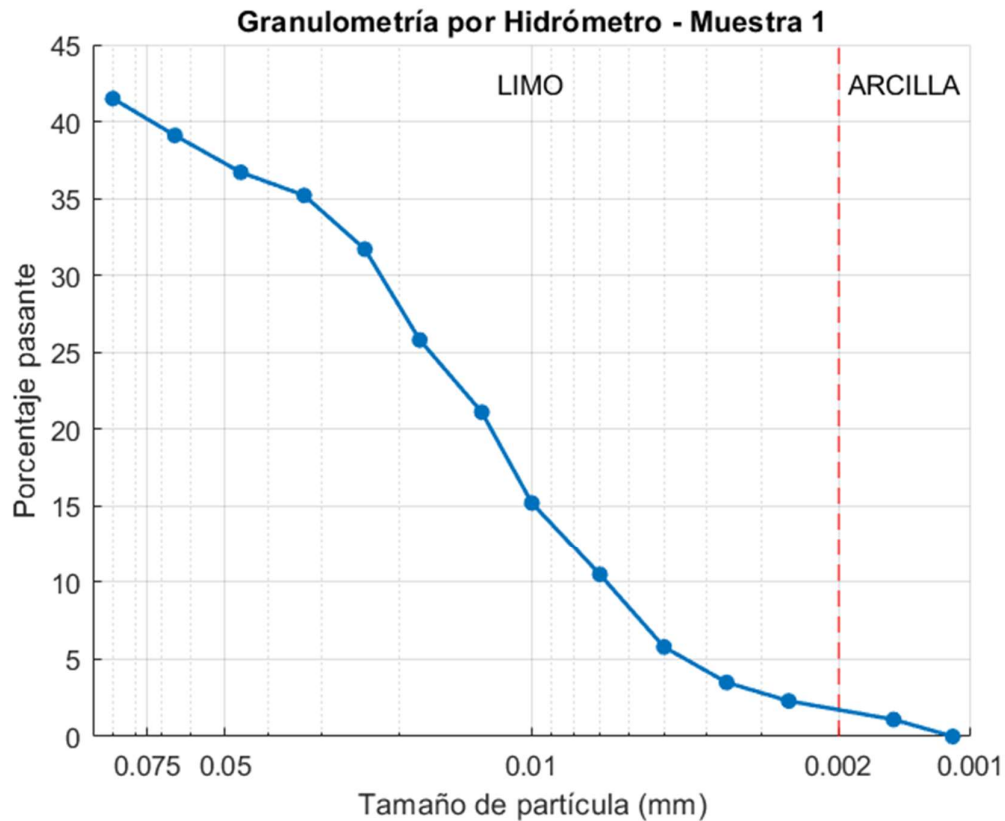
`x=0.002;`

`x1=[x x];`

```

y1=[0, 45];
plot(x1,y1,'r','LineStyle','--')
text(0.012,42.5,0,'LIMO')
text(0.0019,42.5,0,'ARCILLA')
for i=1:length(d)
semilogx(d,p,'linewidth',1.5)
xticks([0.001 0.002 0.01 0.05 0.075])
end
hold off

```



```

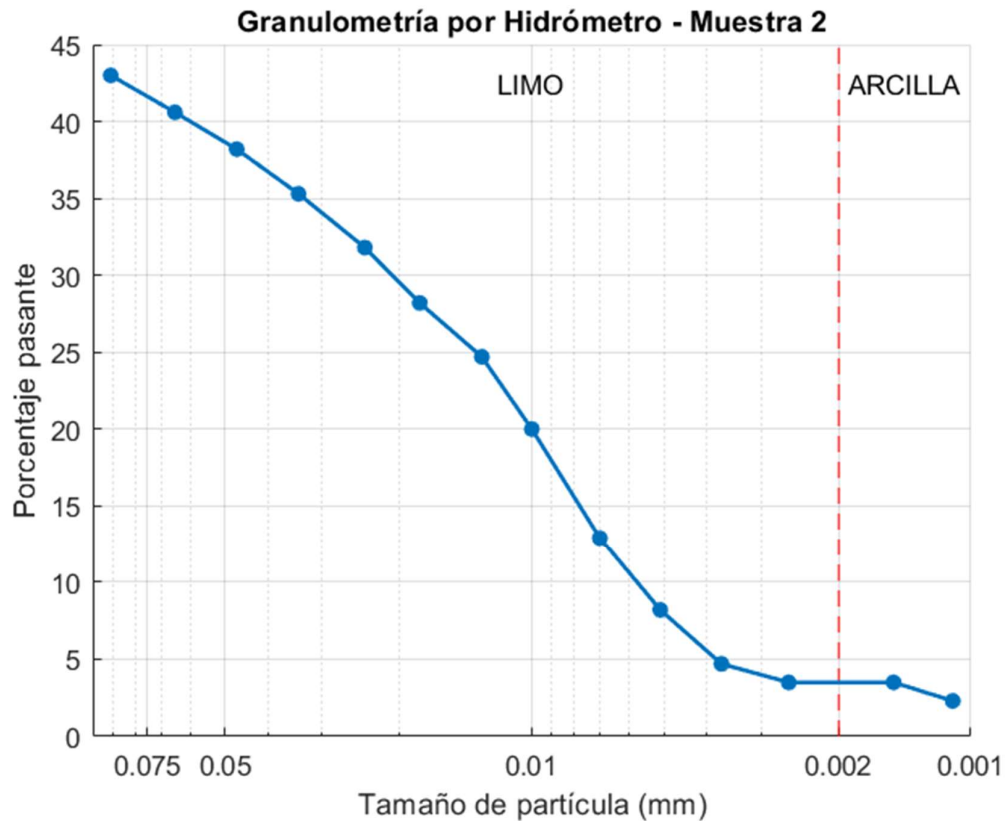
%DATOS INICIALES (GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO)
%MUESTRA 2
d=[0.091,0.065,0.047,0.034,0.024,0.018,0.013,0.010,0.007,0.0051,0.0037,0.0026,
0.0015,0.0011]; % DIÁMETROS
p=[43,40.6,38.2,35.3,31.8,28.2,24.7,20.0,12.9,8.2,4.7,3.5,3.5,2.3]; % PASANTE
scatter(d,p,'filled')
set(gca,'xscale','log','Xdir','reverse')
grid on
xlabel('Tamaño de partícula (mm)')
ylabel('Porcentaje pasante')
title('Granulometría por Hidrómetro - Muestra 2')
hold on
x=0.002;
x1=[x x];
y1=[0, 45];
plot(x1,y1,'r','LineStyle','--')
text(0.012,42.5,0,'LIMO')
text(0.0019,42.5,0,'ARCILLA')
for i=1:length(d)

```

```

semilogx(d,p,'linewidth',1.5)
xticks([0.001 0.002 0.01 0.05 0.075])
end
hold off

```



### 6.3. Límites de Consistencia - Cálculos

```

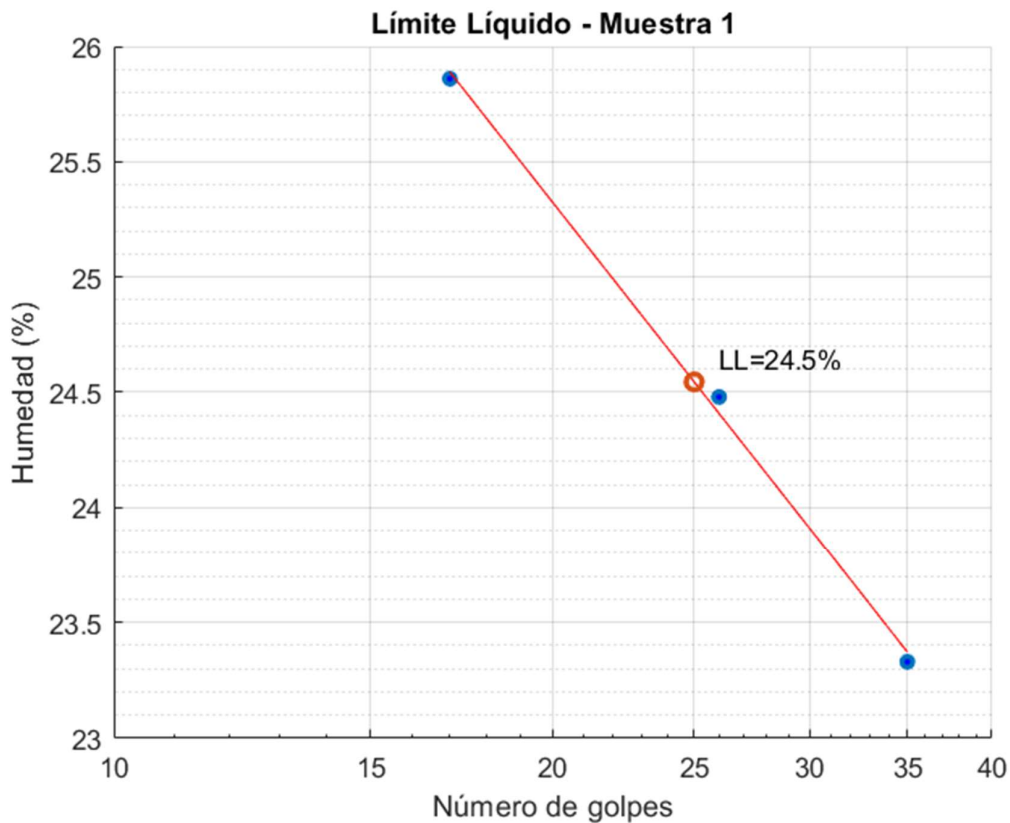
%PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
%FACULTAD DE INGENIERÍA
%ESCUELA DE CIVIL
%TESIS: Caracterización de los materiales de construcción en
%el centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito sometidos a
%envejecimiento acelerado
%DIEGO ESCALANTE
clc, clear;
%DATOS INICIALES (NÚMERO DE GOLPES Y CONTENIDO DE HUMEDAD)
%MUESTRA 1
n=[35;26;17]; % NÚMERO DE GOLPES
h=[23.33;24.48;25.86]; % CONTENIDO DE HUMEDAD
[xData, yData] = prepareCurveData( n, h );
ft = fitype( 'a+b*log(x)', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
Warning: Start point not provided, choosing random start point.
scatter(n,h,'filled'), hold on

```

```

h_1 = plot( fitresult, xData, yData );
set(gca,'xscale','log'), grid on
xlim([10 40]);
legend off
LL=fitresult.a+fitresult.b*log(25);
scatter(25,LL,'LineWidth',2)
txt01=['LL=',num2str(LL,3),'%'];
text(25+1,LL+0.1,0,txt01)
lp=[18.97;18.90];
LP=mean(lp)
LP = 18.9350
IP=LL-LP
IP = 5.6101
xlabel('Número de golpes')
ylabel('Humedad (%)')
title('Límite Líquido - Muestra 1')
grid on
grid minor
hold off

```



```

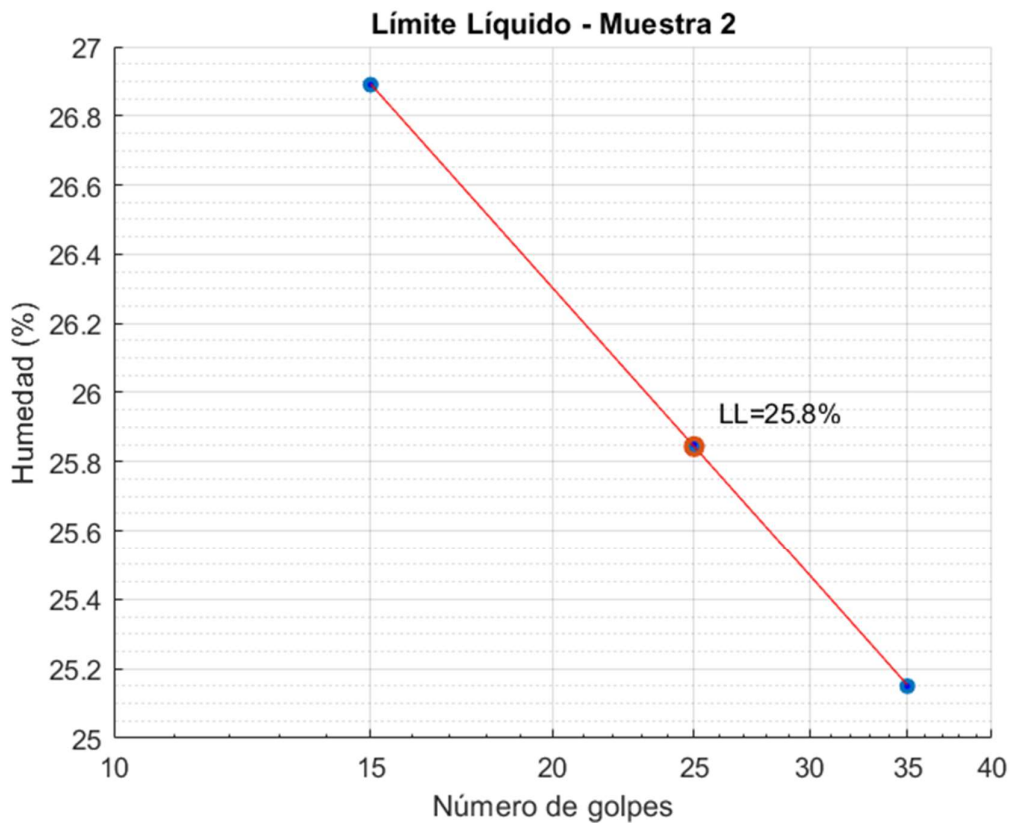
%DATOS INICIALES (NÚMERO DE GOLPES Y CONTENIDO DE HUMEDAD)
%MUESTRA 2
n=[35;25;15]; % NÚMERO DE GOLPES
h=[25.15;25.85;26.89]; % CONTENIDO DE HUMEDAD
[xData, yData] = prepareCurveData( n, h );
ft = fittype( 'a+b*log(x)', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
Warning: Start point not provided, choosing random start point.

```

```

scatter(n,h,'filled'), hold on
h_1 = plot( fitresult, xData, yData );
set(gca,'xscale','log'), grid on
xlim([10 40]);
legend off
LL=fitresult.a+fitresult.b*log(25);
scatter(25,LL,'LineWidth',2)
txt01=['LL=',num2str(LL,3),'%'];
text(25+1,LL+0.1,0,txt01)
%LP e IP
lp=[7.57;32.08];
LP=mean(lp)
LP = 19.8250
IP=LL-LP
IP = 6.0191
xlabel('Número de golpes')
ylabel('Humedad (%)')
title('Límite Líquido - Muestra 2')
grid on
grid minor
hold off

```



```

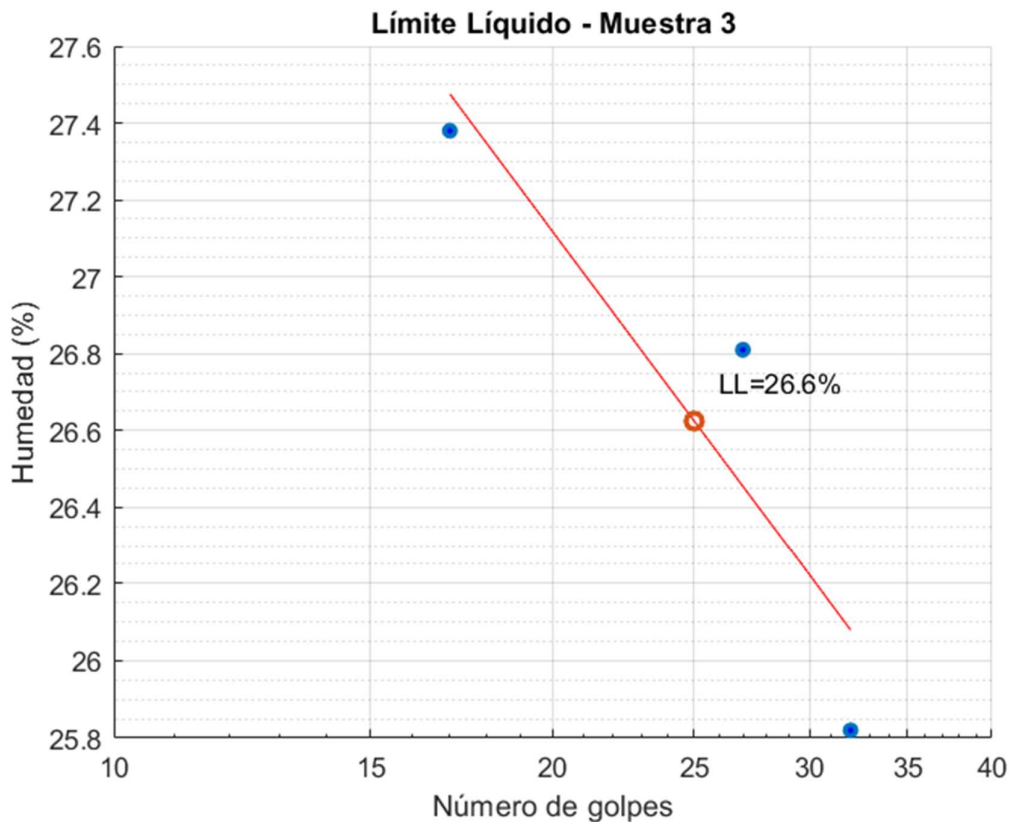
%DATOS INICIALES (NÚMERO DE GOLPES Y CONTENIDO DE HUMEDAD)
%MUESTRA 3
n=[32;27;17]; % NÚMERO DE GOLPES
h=[25.82;26.81;27.38]; % CONTENIDO DE HUMEDAD
[xData, yData] = prepareCurveData( n, h );
ft = fitype( 'a+b*log(x)', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );

```

```

[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
Warning: Start point not provided, choosing random start point.
scatter(n,h,'filled'), hold on
h_1 = plot( fitresult, xData, yData );
set(gca,'xscale','log'), grid on
xlim([10 40]);
legend off
LL=fitresult.a+fitresult.b*log(25);
scatter(25,LL,'LineWidth',2)
txt01=['LL=',num2str(LL,3),'%'];
text(25+1,LL+0.1,0,txt01)
%LP e IP
lp=[21.16;19.80];
LP=mean(lp)
LP = 20.4800
IP=LL-LP
IP = 6.1445
xlabel('Número de golpes')
ylabel('Humedad (%)')
title('Límite Líquido - Muestra 3')
grid on
grid minor
hold off

```



```

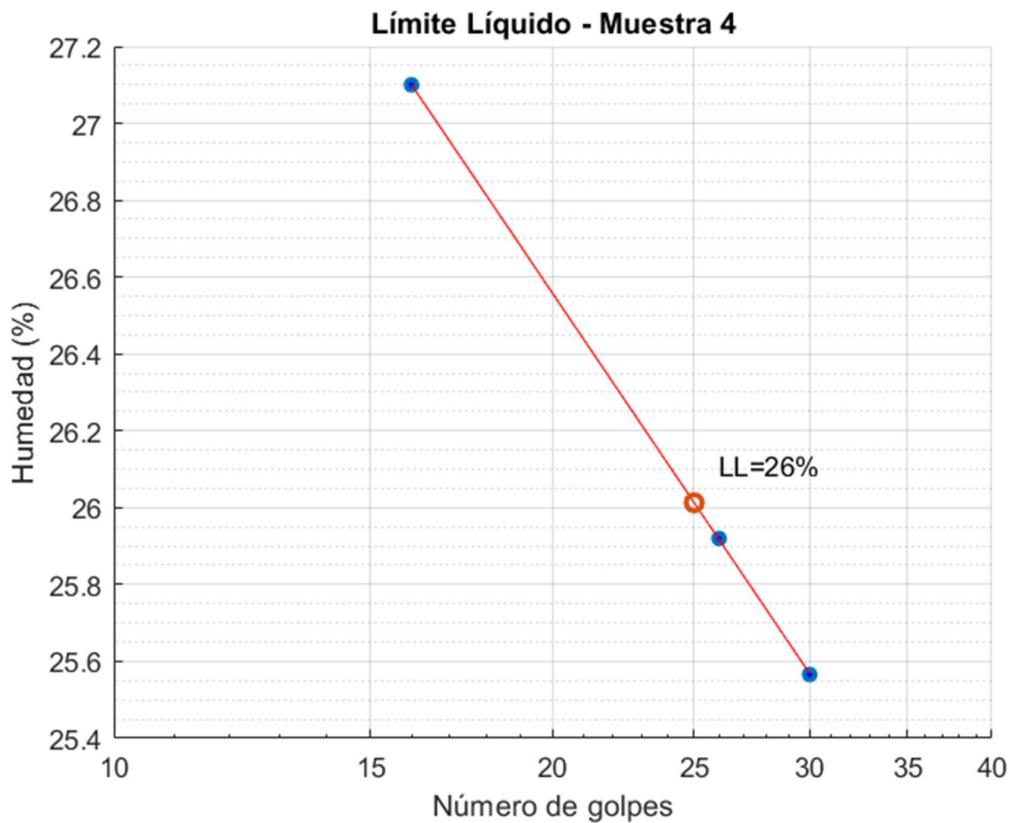
%DATOS INICIALES (NÚMERO DE GOLPES Y CONTENIDO DE HUMEDAD)
%MUESTRA 4
n=[30;26;16]; % NÚMERO DE GOLPES
h=[25.566;25.92;27.1]; % CONTENIDO DE HUMEDAD
[xData, yData] = prepareCurveData( n, h );

```

```

ft = fitype( 'a+b*log(x)', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
Warning: Start point not provided, choosing random start point.
scatter(n,h,'filled'), hold on
h_1 = plot( fitresult, xData, yData );
set(gca,'xscale','log'), grid on
xlim([10 40]);
legend off
LL=fitresult.a+fitresult.b*log(25);
scatter(25,LL,'LineWidth',2)
txt01=['LL=',num2str(LL,3),'%'];
text(25+1,LL+0.1,0,txt01)
%LP e IP
lp=[19.27;23.83];
LP=mean(lp)
LP = 21.5500
IP=LL-LP
IP = 4.4627
xlabel('Número de golpes')
ylabel('Humedad (%)')
title('Límite Líquido - Muestra 4')
grid on
grid minor
hold off

```



```

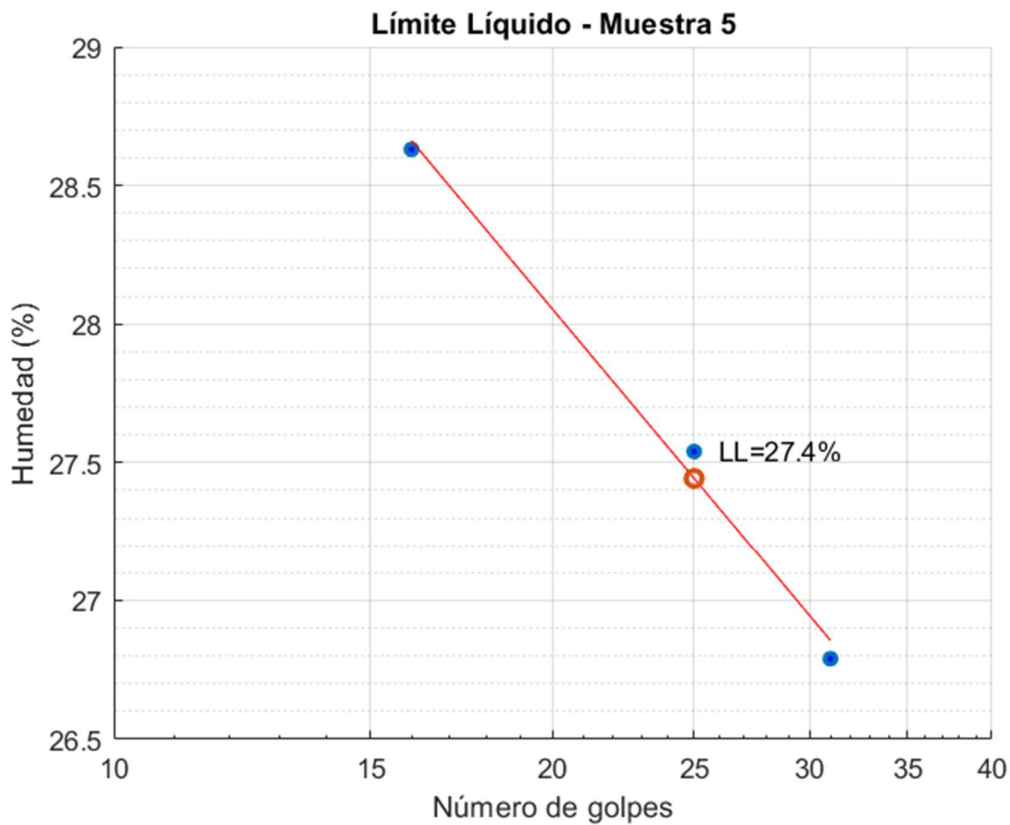
%DATOS INICIALES (NÚMERO DE GOLPES Y CONTENIDO DE HUMEDAD)
%MUESTRA 5
n=[31;25;16]; % NÚMERO DE GOLPES

```

```

h=[26.79;27.54;28.63]; % CONTENIDO DE HUMEDAD
[xData, yData] = prepareCurveData( n, h );
ft = fitype( 'a+b*log(x)', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
Warning: Start point not provided, choosing random start point.
scatter(n,h,'filled'), hold on
h_1 = plot( fitresult, xData, yData );
set(gca,'xscale','log'), grid on
xlim([10 40]);
legend off
LL=fitresult.a+fitresult.b*log(25);
scatter(25,LL,'LineWidth',2)
txt01=['LL=',num2str(LL,3),'%'];
text(25+1,LL+0.1,0,txt01)
%LP e IP
lp=[20.39;20.42];
LP=mean(lp)
LP = 20.4050
IP=LL-LP
IP = 7.0379
xlabel('Número de golpes')
ylabel('Humedad (%)')
title('Límite Líquido - Muestra 5')
grid on
grid minor
hold off

```



## 6.4. Resistencia a la compresión – Cálculos

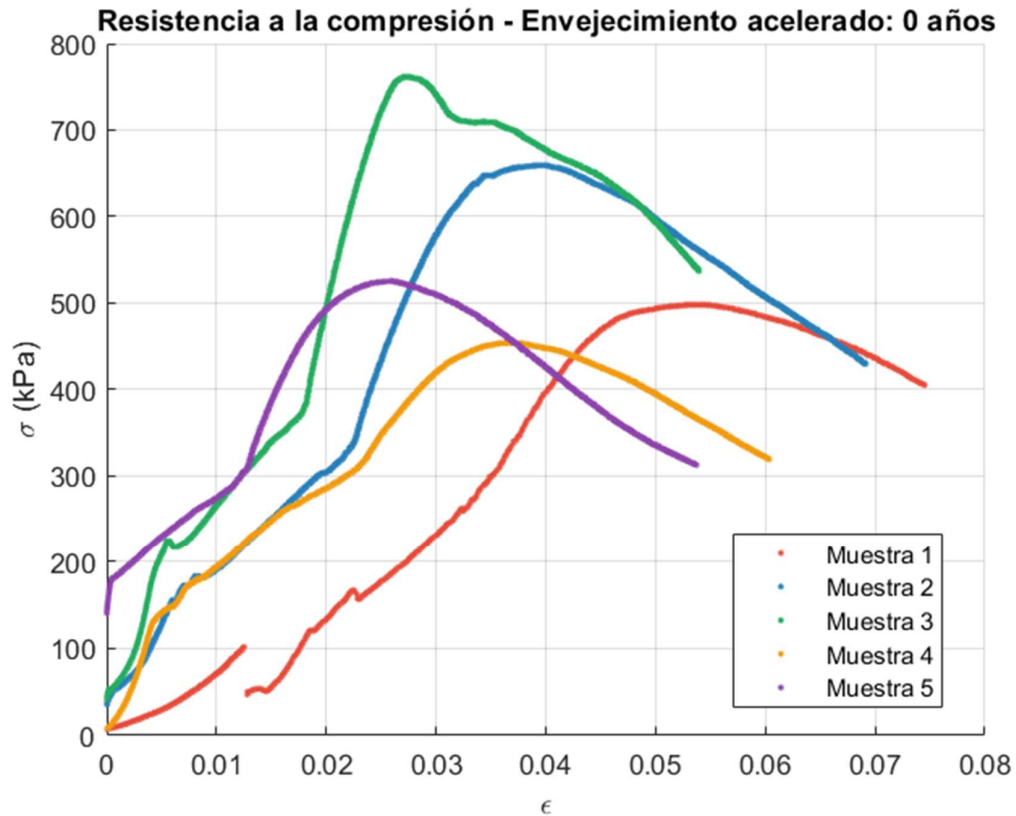
Por extensión de las rutinas, solo se va a colocar una a manera de ejemplo ilustrativo, puesto que lo único que varía es los archivos de origen de datos correspondientes a las dimensiones de las muestras, deformación y carga registradas.

```
%PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
%FACULTAD DE INGENIERÍA
%ESCUELA DE CIVIL
%TESIS: Caracterización de los materiales de construcción en
%el centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito sometidos a
%envejecimiento acelerado
%DIEGO ESCALANTE
%GRÁFICAS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN EN ADOBES
%DATOS DE DIMENSIONES (l*b*h)
dim=importdata('dimensiones.txt');
l=dim(:,1);
b=dim(:,2);
h=dim(:,3);
a=l.*b;
%DATOS DE FUERZA/DEFORMACIÓN
%Adobe 1
adobe1=importdata('adobe1.txt');
d1=adobe1(:,1);
F1=adobe1(:,2);
%Adobe 2
adobe2=importdata('adobe2.txt');
d2=adobe2(:,1);
F2=adobe2(:,2);
%Adobe 3
adobe3=importdata('adobe3.txt');
d3=adobe3(:,1);
F3=adobe3(:,2);
%Adobe 4
adobe4=importdata('adobe4.txt');
d4=adobe4(:,1);
F4=adobe4(:,2);
%Adobe 5
adobe5=importdata('adobe5.txt');
d5=adobe5(:,1);
F5=adobe5(:,2);
%ESFUERZOS DE COMPRESIÓN
sigma1=F1*1000/a(1,1);
sigma2=F2*1000/a(2,1);
sigma3=F3*1000/a(3,1);
sigma4=F4*1000/a(4,1);
sigma5=F5*1000/a(5,1);
%DEFORMACIÓN UNITARIA
strain1=d1/h(1,1);
strain2=d2/h(2,1);
strain3=d3/h(3,1);
```

```

strain4=d4/h(4,1);
strain5=d5/h(5,1);
%GRÁFICAS ESFUERZO/DEFORMACIÓN UNITARIA
format bank
scatter(strain1,sigma1, '.', 'MarkerEdgeColor', '[0.91, 0.30, 0.24]'),hold on
scatter(strain2,sigma2, '.', 'MarkerEdgeColor', '[0.16, 0.5, 0.73]'),hold on
scatter(strain3,sigma3, '.', 'MarkerEdgeColor', '[0.15, 0.68, 0.38]'),hold on
scatter(strain4,sigma4, '.', 'MarkerEdgeColor', '[0.95,0.61,0.07]'),hold on
scatter(strain5,sigma5, '.', 'MarkerEdgeColor', '[0.56,0.27,0.68]'),hold on
grid on
xlabel('\epsilon')
ylabel('\sigma (kPa)')
title('Resistencia a la compresión - Envejecimiento acelerado: 0 años')
legend('Muestra 1', 'Muestra 2', 'Muestra 3', 'Muestra 4', 'Muestra
5', 'location', 'best')
%VALORES MÁXIMOS
%ADOBE 1
[M,I]=max(sigma1);
s1=M;
d1=strain1(I,:);
%ADOBE 2
[M,I]=max(sigma2);
s2=M;
d2=strain2(I,:);
%ADOBE 3
[M,I]=max(sigma3);
s3=M;
d3=strain3(I,:);
%ADOBE 4
[M,I]=max(sigma4);
s4=M;
d4=strain4(I,:);
%ADOBE 5
[M,I]=max(sigma5);
s5=M;
d5=strain5(I,:);
sigma = [s1;s2;s3;s4;s5];
delta = [d1;d2;d3;d4;d5];
hold off

```



```
table(sigma,delta)
```

```
ans = 5x2 table
```

	sigma	delta
1	498.18	0.05
2	659.30	0.04
3	761.88	0.03
4	454.55	0.04
5	526.18	0.03

```
sigmat=sigma';
```

```
ax = gca;
```

```
ax.ColorOrderIndex = 1;
```

```
a=[1:1:5];
```

```
for i=1:5
```

```
bar(a(1,i),sigmat(1,i)), hold on
```

```
end
```

```
set(gca,'XTick',a)
```

```
X = {'Muestra 1','5 años','10 años','15 años','20 años'};
```

```
set(gca,'XTickLabel','')
```

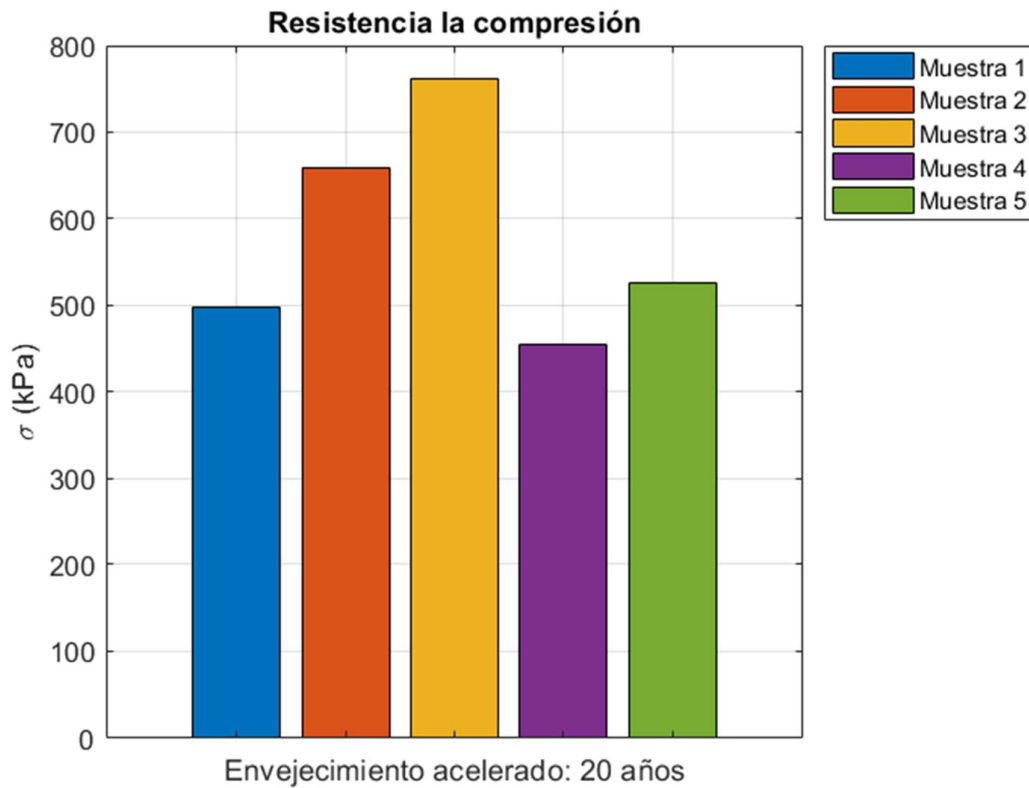
```
title('Resistencia la compresión')
```

```
ylabel('\sigma (kPa)')
```

```
xlabel('Envejecimiento acelerado: 20 años')
```

```
legend('Muestra 1','Muestra 2','Muestra 3','Muestra 4','Muestra 5','Tendencia','location','bestoutside')
```

```
hold off
grid on
hold off
```



### 6.5. Resistencia al corte – Cálculos

Por extensión de las rutinas, solo se va a colocar una a manera de ejemplo ilustrativo, puesto que lo único que varía son los datos correspondientes a los esfuerzos aplicados y los ángulos de falla.

```
%PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
%FACULTAD DE INGENIERÍA
%ESCUELA DE CIVIL
%TESIS: Caracterización de los materiales de construcción en
%el centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito sometidos a
envejecimiento acelerado
%DIEGO ESCALANTE
clc, clear;
%GRÁFICAS DE CÍRCULOS DE MOHR - TRIAXIAL U-U EN ADOBES
th=0:pi/100:pi; %Intervalo de graficación
%CÍRCULO 1 - 25 kPa de confinamiento
s3_1=25.2; %Sigma 3
s1_1=851.8; %Sigma 1
x1=s3_1+(s1_1-s3_1)/2; % Coord. X del centro del círculo
y1=0;% Coord. Y del centro del círculo
r1=(s1_1-s3_1)/2; % Radio del círculo
```

```

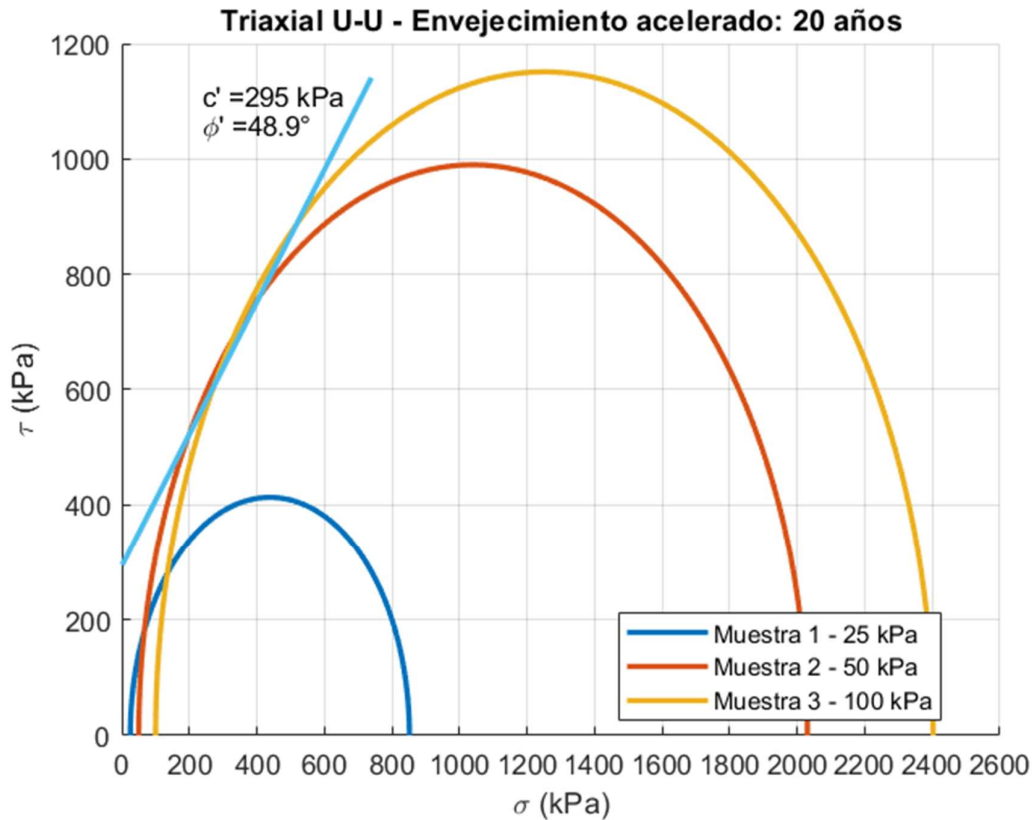
a1 = r1*cos(th)+x1;
b1 = r1*sin(th)+y1;
hold on
plot(a1,b1,'linewidth',2)
%CÍRCULO 2 - 50 kPa de confinamiento
s3_2=50.2; %Sigma 3
s1_2=2030.1; %Sigma 1
x2=s3_2+(s1_2-s3_2)/2; % Coord. X del centro del círculo
y2=0; % Coord. Y del centro del círculo
r2=(s1_2-s3_2)/2; % Radio del círculo
a2 = r2*cos(th)+x2;
b2 = r2*sin(th)+y2;
plot(a2,b2,'linewidth',2)
%CÍRCULO 3 - 100 kPa de confinamiento
s3_3=100.2; %Sigma 3
s1_3=2402.5; %Sigma 1
x3=s3_3+(s1_3-s3_3)/2; % Coord. X del centro del círculo
y3=0; % Coord. Y del centro del círculo
r3=(s1_3-s3_3)/2; % Radio del círculo
a3 = r3*cos(th)+x3;
b3 = r3*sin(th)+y3;
plot(a3,b3,'linewidth',2)
grid on
xlabel('\sigma (kPa)')
ylabel('\tau (kPa)')
title('Triaxial U-U - Envejecimiento acelerado: 20 años')
hold on
ax = gca;
ax.ColorOrderIndex = 1;
%ÁNGULOS DE FALLA
%MUESTRA 1
t1=73; %Ángulo de falla theta 1
t1=2*t1*pi/180;
p1=[x1 r1+r1*cos(t1)+s3_1];
p2=[y1 r1*sin(t1)];
%plot(p1,p2,'--','LineWidth',1);
hold on
%MUESTRA 2
t2=74; %Ángulo de falla theta 2
t2=2*t2*pi/180;
p1=[x2 r2+r2*cos(t2)+s3_2];
p2=[y2 r2*sin(t2)];
%plot(p1,p2,'--','LineWidth',1.5);
%MUESTRA 3
t3=74; %Ángulo de falla theta 3
t3=2*t3*pi/180;
p1=[x3 r3+r3*cos(t3)+s3_3];
p2=[y3 r3*sin(t3)];
%plot(p1,p2,'--','LineWidth',1.5);
%LÍNEA ENVOLVENTE
r=[r2;r3]; %Radios de cada círculo
t=[t2;t3]; %2*Theta de cada círculo
s3=[s3_2;s3_3]; %Sigma3 de cada muestra
for i=1:2
xt(i,1)=r(i,1)+r(i,1)*cos(t(i,1))+s3(i,1);

```

```

yt(i,1)=r(i,1)*sin(t(i,1));
ct(i,1)=1/tan(t(i,1)/2)*(0-xt(i,1))+yt(i,1);
fi(i,1)=2*tan(t(i,1)/2-45*pi/180); %Ángulos de fricción a partir del ángulo de
falla
end
%Coordenadas (X,Y) del punto tangente de la envolvente para cada círculo
table(xt,yt);
%Regresión lineal para hallar la recta con mejor ajuste entre los 3 círculos
[f,gof]=fit(xt,yt,'poly1')
f =
    Linear model Poly1:
    f(x) = p1*x + p2
    Coefficients:
        p1 =      1.147
        p2 =     294.5
gof = struct with fields:
    sse: 0
    rsquare: 1
    dfe: 0
    adjrsquare: NaN
    rmse: NaN
ax = gca;
ax.ColorOrderIndex = 1;
%Cohesión y fricción de la envolvente para cada círculo
fi=atan(fi)*180/pi;
table(ct,fi);
%COHESIÓN Y FRICCIÓN mediante regresión lineal
c=f.p2; %Cohesión
phi=atan(f.p1)*180/pi; %Ángulo de fricción
txt01=['c' '=' ,num2str(c,3), ' kPa'];
txt02=['\phi' '=' ,num2str(phi,3), '°'];
x=0:x1+300;
env=f.p2+f.p1*x;
plot(env,'linewidth',2,'color',[ 0.3010    0.7450    0.9330])
text(x2-800,max(yt)+500,0,txt01)
text(x2-800,max(yt)+450,0,txt02)
legend('Muestra 1 - 25 kPa','Muestra 2 - 50 kPa','Muestra 3 - 100
kPa','location','best')
xlim([0 2600])
ax.XTick = 0:200:3000;
ax.XTickLabelRotation =0;
ax.YTick = 0:200:3000;
hold off

```

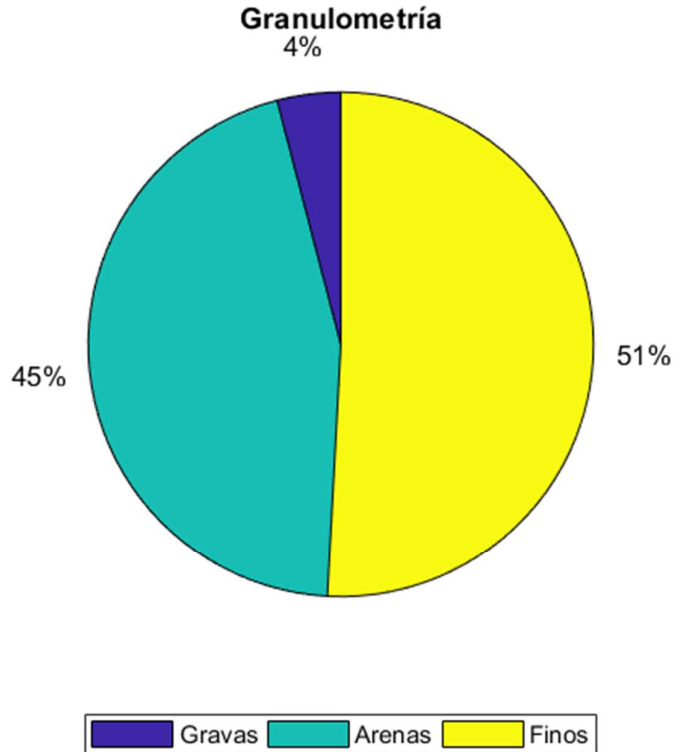


## 6.6. Análisis de Correlación – Cálculos

```

%PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
%FACULTAD DE INGENIERÍA
%ESCUELA DE CIVIL
%TESIS: Caracterización de los materiales de construcción en
%el centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito sometidos a
%envejecimiento acelerado
%DIEGO ESCALANTE
clc, clear;
envejecimiento={'0 años','5 años','10 años','15 años','20 años'};
%PASTEL GRANULOMETRÍA
x=[4.07 45.08 50.85];
p=pie(x);
title('Granulometría')
labels={'Gravas','Arenas','Finos'};
legend(labels,'Location','bestoutside','Orientation','horizontal')
hold off

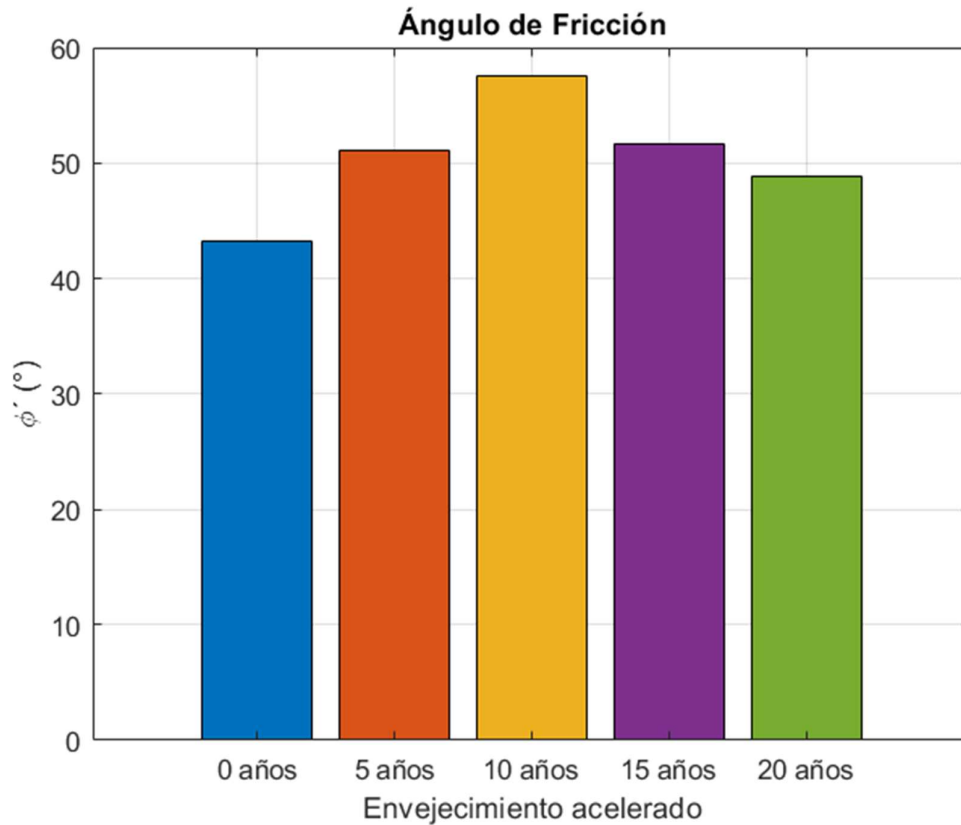
```



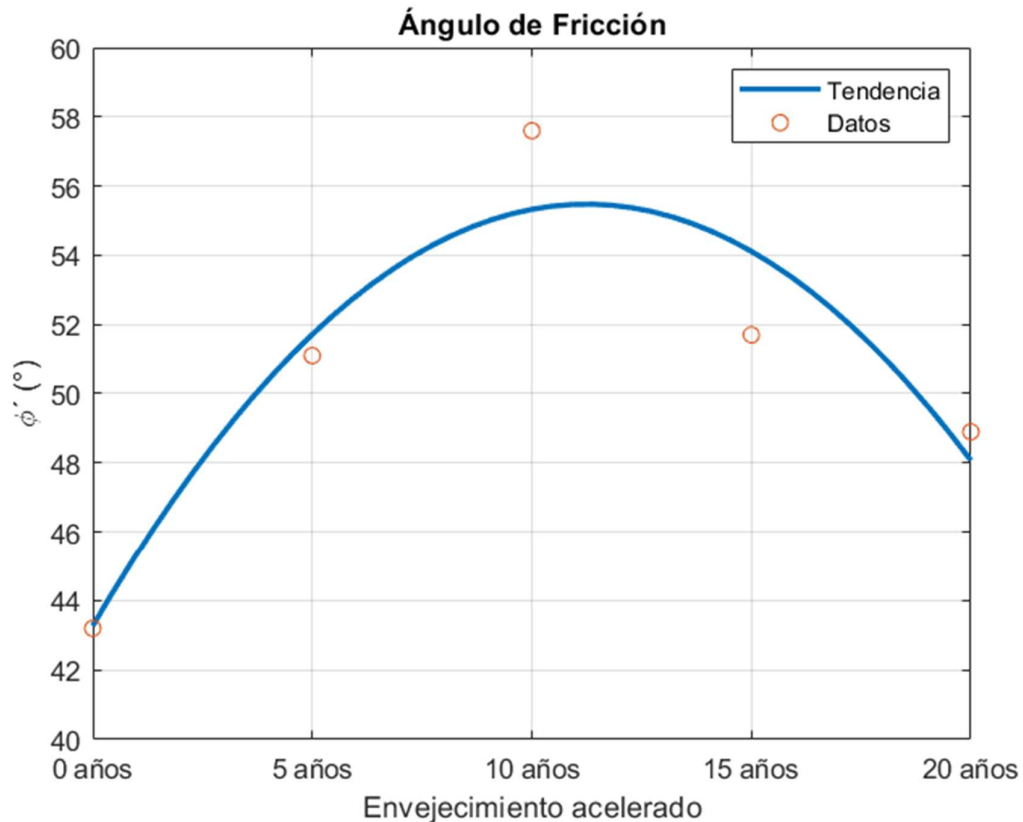
```

clc, clear;
%FRICCIÓN
phi=[43.2 51.1 57.6 51.7 48.9];
ax = gca;
ax.ColorOrderIndex = 1;
a=[1:1:5];
[f,gof]=fit(a',phi','poly2')
f =
    Linear model Poly2:
    f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3
    Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =      -2.414   (-5.238, 0.4092)
    p2 =      15.69   (-1.581, 32.95)
    p3 =         30   (7.342, 52.66)
gof = struct with fields:
    sse: 12.0571
    rsquare: 0.8884
    dfe: 2
    adjrsquare: 0.7768
    rmse: 2.4553
for i=1:5
bar(a(1,i),phi(1,i)), hold on
end
%plot(a,phi,'LineWidth',2)
set(gca,'XTick',a)
X = {'0 años','5 años','10 años','15 años','20 años'};
set(gca,'XTickLabel',X)
title('Ángulo de Fricción')
ylabel('\phi` (°)')
  
```

```
xlabel ('Envejecimiento acelerado')
grid on
hold off
```



```
fplot(@(x) f(x), [1 5], 'Linewidth',2), hold on
ylim([40 60])
scatter(a',phi')
legend('Tendencia','Datos')
set(gca,'XTick',a)
X = {'0 años','5 años','10 años','15 años','20 años'};
set(gca,'XTickLabel',X)
title ('Ángulo de Fricción')
ylabel ('\phi' (°))
xlabel ('Envejecimiento acelerado')
grid on
hold off
```

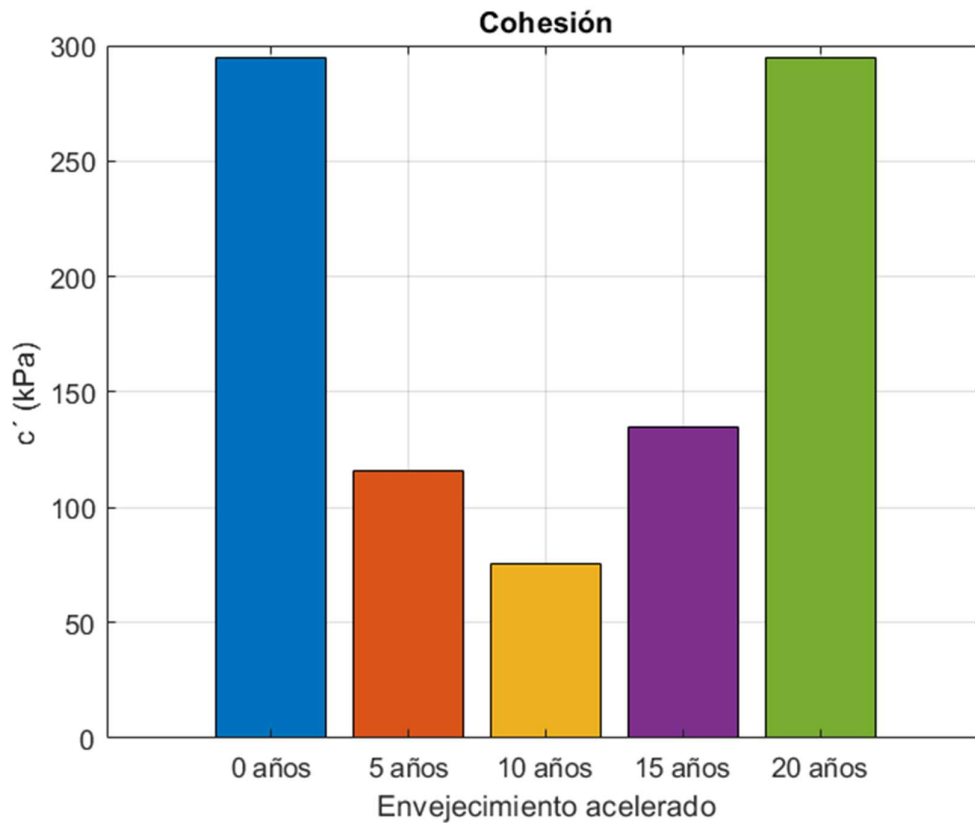


```

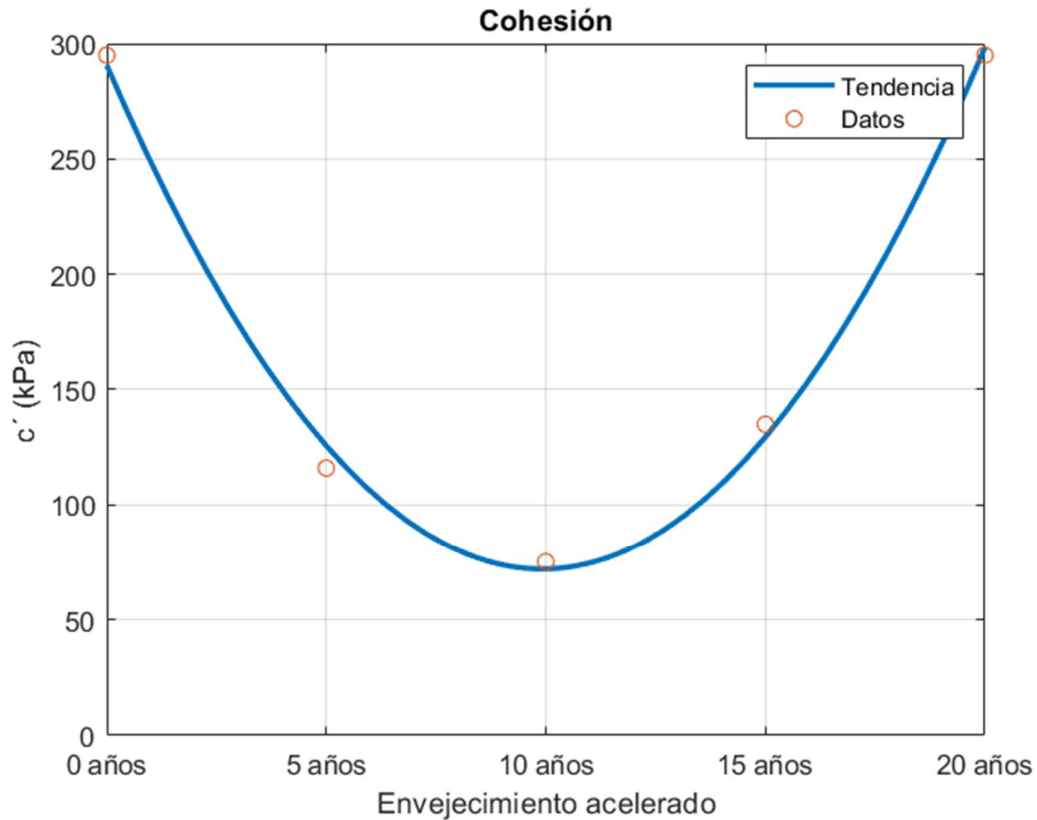
clc, clear;
%COHESIÓN
c=[295 116 75.1 135 295];
ax = gca;
ax.ColorOrderIndex = 1;
a=[1:1:5];
[f,gof]=fit(a',c', 'poly2')
f =
    Linear model Poly2:
    f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3
    Coefficients (with 95% confidence bounds):
        p1 =      55.63  (45.23, 66.03)
        p2 =     -331.9  (-395.5, -268.3)
        p3 =      566.9  (483.5, 650.4)
gof = struct with fields:
    sse: 163.5366
    rsquare: 0.9962
    dfe: 2
    adjrsquare: 0.9925
    rmse: 9.0426
for i=1:5
bar(a(1,i),c(1,i)), hold on
end
%plot(a,c,'LineWidth',2)
set(gca,'XTick',a)
X = {'0 años','5 años','10 años','15 años','20 años'};
set(gca,'XTickLabel',X)
title ('Cohesión')
ylabel('c' (kPa))

```

```
xlabel ('Envejecimiento acelerado')
grid on
hold off
```



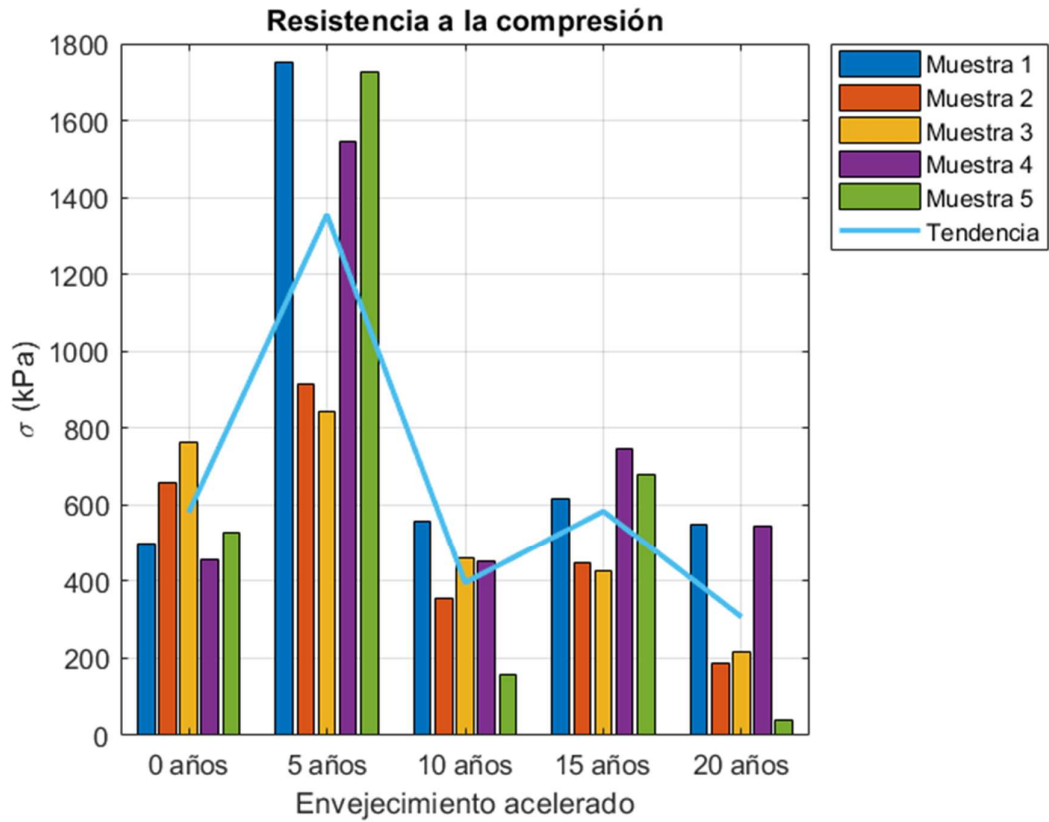
```
fplot(@(x) f(x), [1 5], 'Linewidth',2), hold on
ylim([0 300])
scatter(a',c')
legend('Tendencia','Datos')
set(gca,'XTick',a)
X = {'0 años','5 años','10 años','15 años','20 años'};
set(gca,'XTickLabel',X)
title ('Cohesión')
ylabel('c' (kPa))
xlabel ('Envejecimiento acelerado')
grid on
hold off
```



```

%COMPRESIÓN
s=[498.2    1751.7555.5 615.3 548.4
   659.7    914.1 355.0 447.9 186.0
   761.9    841.8 461.7 427.7 216.1
   454.6    1545.0450.7 746.6 546.1
   526.2    1726.8157.6 678.4 38.1];
for i=1:1:5
mr(:,i)=mean(s(:,i));
end
X = {'0 años','5 años','10 años','15 años','20 años'};
st = transpose(s);
bar(st)
grid on
title ('Resistencia a la compresión')
xticklabels(X)
xlabel('Envejecimiento acelerado')
ylabel('\sigma (kPa)')
hold on
plot(1:5,mr,'LineWidth',2)
hold on
legend('Muestra 1','Muestra 2','Muestra 3','Muestra 4','Muestra
5','Tendencia','location','bestoutside')
hold off

```



```
%data = [envejecimiento sigmaC]
```

```
data= [0 498.18
```

```
0 659.68
0 761.88
0 454.55
0 526.18
5 1751.68
5 914.09
5 841.81
5 1545
5 1726.83
10 555.49
10 355
10 461.74
10 450.68
10 157.6
15 615.32
15 447.93
15 427.69
15 746.6
15 678.38
20 548.44
20 186.02
20 216.06
20 546.13
20 38.07];
```

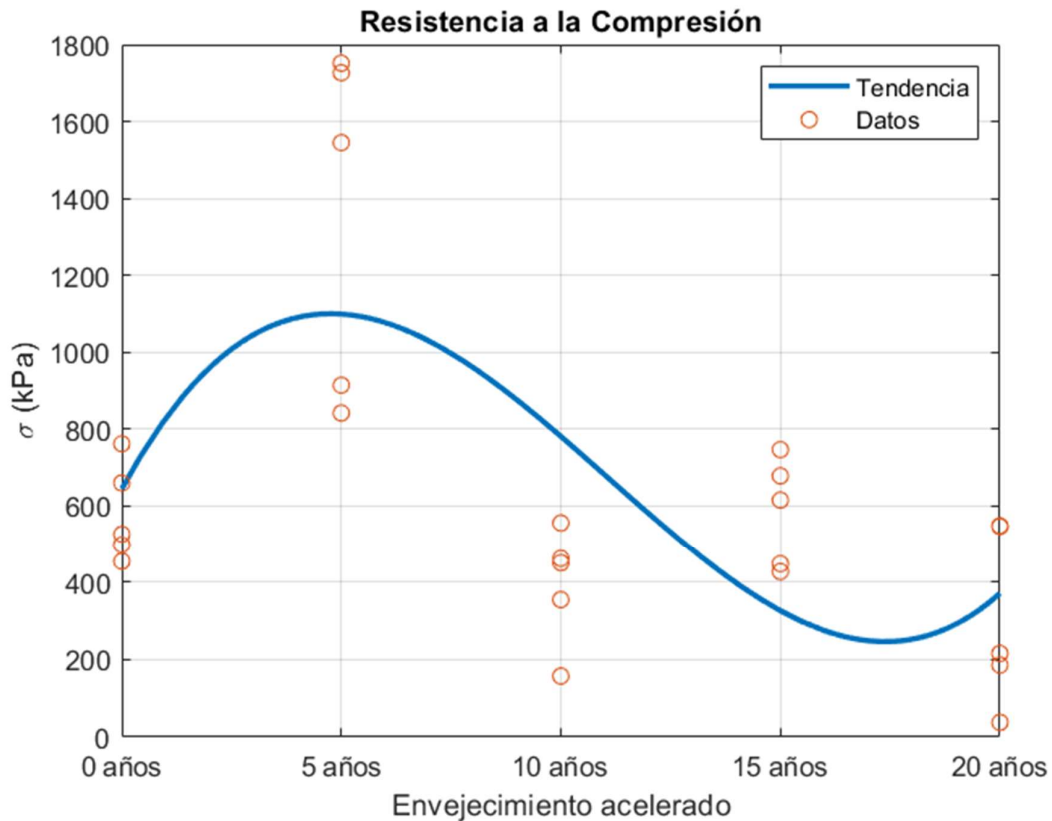
```
t=data(1:25,1);
```

```
s=data(1:25,2);
```

```

[f, gof] = fit( t, s, 'poly3')
f =
  Linear model Poly3:
  f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =      0.8482 (0.1481, 1.548)
    p2 =     -28.18 (-49.48, -6.88)
    p3 =     210.7 (42.93, 378.4)
    p4 =     644.3 (314.6, 974)
  gof = struct with fields:
    sse: 2.6772e+06
    rsquare: 0.4284
    dfe: 21
    adjrsquare: 0.3467
    rmse: 357.0487
  fplot(@(x) f(x), [0 20], 'Linewidth',2), hold on
  ylim([0 1800])
  scatter(t,s)
  legend('Tendencia', 'Datos')
  xticks(0:5:20)
  ax.XTick = 0:5:20;
  X = {'0 años', '5 años', '10 años', '15 años', '20 años'};
  set(gca, 'XTickLabel', X)
  title ('Resistencia a la Compresión')
  ylabel ('\sigma (kPa)')
  xlabel ('Envejecimiento acelerado')
  grid on
  hold off

```



## 6.7. Análisis Factorial (ANOVA) - Cálculos

```

%PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
%FACULTAD DE INGENIERÍA
%ESCUELA DE CIVIL
%TESIS: Caracterización de los materiales de construcción en
%el centro histórico del Distrito Metropolitano de Quito sometidos a
envejecimiento acelerado
%DIEGO ESCALANTE
clc, clear
alpha=0.05 %Nivel de significancia
alpha =
    0.05
%ANOVA UNIDIRECCIONAL - RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
%Grupos
envejecimiento={'0 años','5 años','10 años','15 años','20 años'};
%Esfuerzos de compresión máximos registrados para cada grupo
s=[498.2    1751.7555.5 615.3 548.4
   659.7    914.1 355.0 447.9 186.0
   761.9    841.8 461.7 427.7 216.1
   454.6    1545.0450.7 746.6 546.1
   526.2    1726.8157.6 678.4 38.1];
format shortG
[p1,tbl,stats]=anova1(s,envejecimiento,'off')
p1 =
    1.3638e-05
tbl = 4x6 cell array
    {'Source' }    {'SS'      }    {'df'     }    {'MS'     }    {'F'      }    {'Prob>F'
}
    {'Columns' }    {[3.4481e+06]}    {[ 4]}    {[8.6202e+05]}    {[ 13.955]}    {[1.3638e-
05]}
    {'Error' }    {[1.2354e+06]}    {[20]}    {[ 61771]}    {0x0 double}    {0x0
double }
    {'Total' }    {[4.6835e+06]}    {[24]}    {0x0 double }    {0x0 double}    {0x0
double }
stats = struct with fields:
    gnames: {5x1 cell}
        n: [5 5 5 5 5]
    source: 'anova1'
    means: [580.12 1355.9 396.1 583.18 306.94]
    df: 20
    s: 248.54
table(tbl)
ans = 4x1 table

```

	tbl					
1	'Source'	'SS'	'df'	'MS'	'F'	'Prob>F'
2	'Columns'	3.4481e+06	4	8.6202e+05	13.955	1.3638e-05
3	'Error'	1.2354e+06	20	61771	[]	[]
4	'Total'	4.6835e+06	24	[]	[]	[]

```

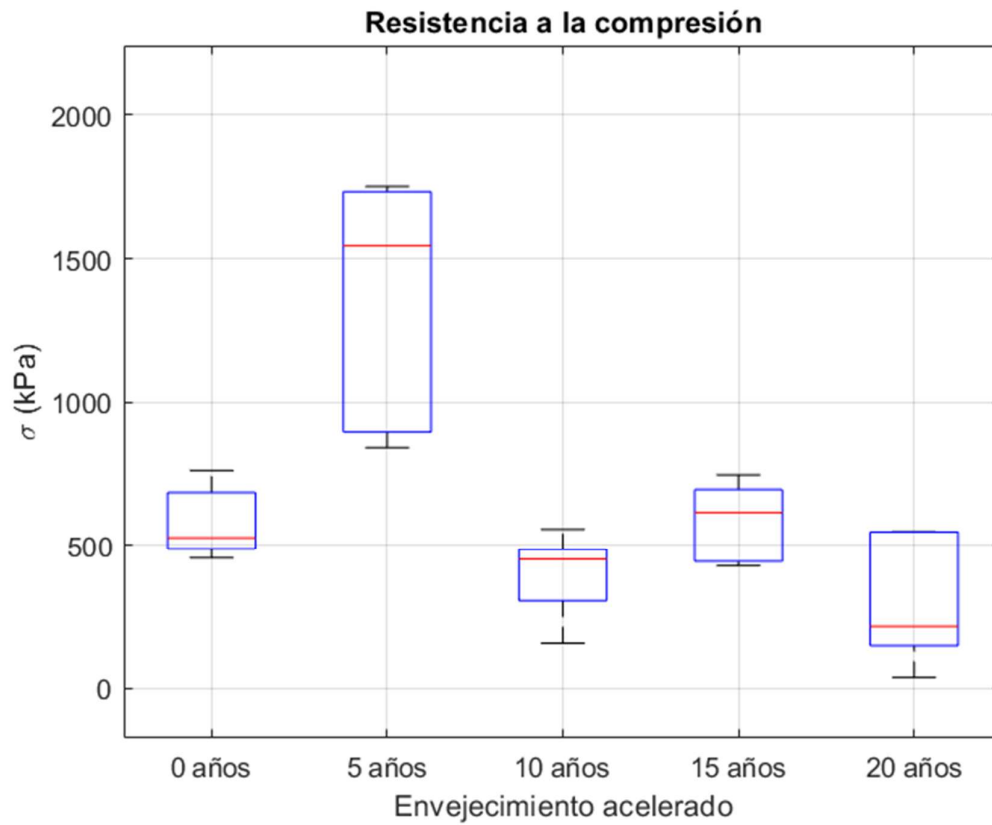
if p1<alpha
    disp('Podemos concluir que al menos una de las medias de resistencia
difiere significativamente de las demás')
else

```

```

disp('Podemos concluir que ninguna una de las medias de resistencia
difiere significativamente de las demás')
end
Podemos concluir que al menos una de las medias de resistencia difiere significativamente
de las demás
boxplot(s,envejecimiento)
title ('Resistencia a la compresión')
xlabel('Envejecimiento acelerado')
ylabel('\sigma (kPa)')
grid on

```



## 7. Bibliografía

- Aguilar Alberca, E. D., & Quezada Zambrano, R. A. (2017). *Caracterización física y mecánica del adobe en el cantón Cuenca*.  
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28143>
- Alarcón, J. (2017). *Análisis, diseño y desarrollo de un solver para variables climáticas. Datos de estudio: Quito Distrito Metropolitano* [Grado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Atlas Ambiental Quito Sostenible 2016 / Fondo Ambiental*. (s. f.). Recuperado 11 de diciembre de 2020, de <http://www.fondoambientalquito.gob.ec/noticia/atlas-ambiental-quito-sostenible-2016>
- Ayllón, T. (2013). *Elementos de meteorología y climatología* (3.<sup>a</sup> ed.). Trillas.
- Bilsborrow, R. E. (1992). Population growth, internal migration, and environmental degradation in rural areas of developing countries. *European Journal of Population / Revue européenne de Démographie*, 8(2), 125-148.  
<https://doi.org/10.1007/BF01797549>
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., & Iwaki, C. (2011). Construcción sismorresistente en tierra: La gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523), 41-50.  
<https://doi.org/10.3989/ic.10.017>
- Bollinger, L. A., Bogmans, C. W. J., Chappin, E. J. L., Dijkema, G. P. J., Huibregtse, J. N., Maas, N., Schenk, T., Snelder, M., van Thienen, P., de Wit, S., Wols, B., & Tavasszy, L. A. (2014). Climate adaptation of interconnected infrastructures: A

framework for supporting governance. *Regional Environmental Change*, 14(3), 919-931. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0428-4>

Caribe, C. E. para A. L. y el. (2014). *Gasto público y adaptación al cambio climático: Análisis de Colombia, el Ecuador, Nicaragua y el Uruguay*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37625-gasto-publico-adaptacion-al-cambio-climatico-analisis-colombia-ecuador-nicaragua>

Centro Histórico, mitos y realidades. (s. f.). *Mundo Constructor*. Recuperado 11 de diciembre de 2020, de <https://www.mundoconstructor.com.ec/centro-historico-mitos-y-realidades/>

D18 Committee. (s. f.-a). *Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>

D18 Committee. (s. f.-b). *Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>

D18 Committee. (2020). *Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/D2166\\_D2166M-16](https://doi.org/10.1520/D2166_D2166M-16)

De Matteis, A. (2019). Decomposing the anthropogenic causes of climate change. *Environment, Development and Sustainability*, 21(1), 165-179. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0028-4>

Gama-Castro, J. E., Cruz y Cruz, T., Pi-Puig, T., Alcalá-Martínez, R., Cabadas-Báez, H., Jasso-Castañeda, C., Díaz-Ortega, J., Sánchez-Pérez, S., López-Aguilar, F., & Vilanova de Allende, R. (2012). *Arquitectura de tierra: El adobe como material*

de construcción en la época prehispánica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 177-188.

Gandreau, D., & Delboy, L. (2012). *Inventory of earthen architecture* (1.ª ed.). Unesco.

Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686-5699.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>

Ibarrarán, M. E., Ruth, M., Ahmad, S., & London, M. (2009). Climate change and natural disasters: Macroeconomic performance and distributional impacts. *Environment, Development and Sustainability*, 11(3), 549-569.  
<https://doi.org/10.1007/s10668-007-9129-9>

Jäger, W., & Braun, J. (2010). *Improving the shear resistance of adobe masonry for rebuilding and new construction purposes*. 493-502.  
<https://doi.org/10.2495/ARC100421>

Kaffure, C. U., Cañón, A. M. R., & Tauta, J. F. C. (2015). CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES DE ADOBE SOMETIDAS A RADIACIÓN UVA. *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 28(1), Article 1.  
<https://doi.org/10.11144/Javeriana.apc28-1.cuas>

La temperatura en Quito no deja de subir desde 2004. (s. f.). *Primicias*. Recuperado 11 de diciembre de 2020, de <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/temperatura-quito-calor-calentamiento-global/>

- Lerner, K. L., & Lerner, B. W. (Eds.). (2014). Humidity. En *The Gale Encyclopedia of Science* (5th ed., Vol. 4, p. 2238). Gale; Gale Academic OneFile. [https://link.gale.com/apps/doc/CX3727801253/AONE?u=puce\\_cons&sid=AONE&xid=850ffc88](https://link.gale.com/apps/doc/CX3727801253/AONE?u=puce_cons&sid=AONE&xid=850ffc88)
- López Alarcón, J. E. (2017). *Análisis, diseño y desarrollo de un solver para variables climáticas. Datos de estudio: Quito Distrito Metropolitano*. <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/14549>
- Marti, J. (2014). Atmospheric temperature. En K. L. Lerner & B. W. Lerner (Eds.), *The Gale Encyclopedia of Science* (5th ed.). Gale; Gale Academic OneFile. [https://link.gale.com/apps/doc/CV2644030200/AONE?u=puce\\_cons&sid=AONE&xid=5cac5954](https://link.gale.com/apps/doc/CV2644030200/AONE?u=puce_cons&sid=AONE&xid=5cac5954)
- Miller, R. L., Schmidt, G. A., Nazarenko, L. S., Tausnev, N., Bauer, S. E., DelGenio, A. D., Kelley, M., Lo, K. K., Ruedy, R., Shindell, D. T., Aleinov, I., Bauer, M., Bleck, R., Canuto, V., Chen, Y., Cheng, Y., Clune, T. L., Faluvegi, G., Hansen, J. E., ... Zhang, J. (2014). CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(2), 441–478. <https://doi.org/10.1002/2013MS000266>
- Neumann, J. E., Price, J., Chinowsky, P., Wright, L., Ludwig, L., Streeter, R., Jones, R., Smith, J. B., Perkins, W., Jantarasami, L., & Martinich, J. (2015). Climate change risks to US infrastructure: Impacts on roads, bridges, coastal development, and urban drainage. *Climatic Change*, 131(1), 97–109. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1037-4>

OCDE. (2011). *Hacia el crecimiento verde Un resumen para los diseñadores de políticas*. <https://www.oecd.org/greengrowth/49709364.pdf>

Pazos Castillo, C. A. (2018). *Determinación del grado de deterioro producido por la acción del clima en diferentes materiales de construcción utilizados en edificaciones de la ciudad de Quito* [Grado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Peña, L. C., Miranda Velázquez, A., & Gómez Torres, M. (2015). *IDEAL 2014. La infraestructura en el desarrollo de América Latina. Infraestructura y cambio climático*. CAF. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/748>

Salgado Gaspar, B. (2020). *Estudio del grado de deterioro por envejecimiento en materiales de construcción (adobe, ladrillos y tejas) del Centro Histórico de Quito*. <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/18073>

Semana de la Ciencia y la Tecnología. (2004). *Meteorología y climatología: Unidad didáctica: Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004*. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.

*Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems.*

*Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis.*

Torres, R., & Carlos, J. (2012). El adobe y otros materiales de sistemas constructivos en tierra cruda: Caracterización con fines estructurales. *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 25(2), 164-181.

Uribe Kaffure, C., Ramos Cañón, A. M., & Camacho Tauta, J. F. (2015). Caracterización de unidades de adobe sometidas a radiación UVA. *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 28(1), Article 1. <https://doi.org/10.11144/javeriana.apc28-1.cuas>

Whitmer, J. C. (2014). Temperature. En K. L. Lerner & B. W. Lerner (Eds.), *The Gale Encyclopedia of Science* (5th ed., Vol. 8, pp. 4345-4348). Gale; Gale Academic OneFile. [https://link.gale.com/apps/doc/CX3727802404/AONE?u=puce\\_cons&sid=AONE&xid=ad375747](https://link.gale.com/apps/doc/CX3727802404/AONE?u=puce_cons&sid=AONE&xid=ad375747)