



SIMULACIÓN DE ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE. ANÁLISIS DE GEOMATERIALES.

PROYECTO FINAL DE GRADO

Alumna: Candelaria Carminatti.

Carrera: Ingeniería Civil.

Unidad académica: Universidad Católica de Salta, Facultad de ingeniería.

Año lectivo: 2025.

**SIMULACIÓN DE
ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE.
ANÁLISIS DE GEOMATERIALES.**
PROYECTO FINAL DE GRADO

Profesor guía: Ingeniero Fernando Javier Albarracín.

Integrantes del tribunal evaluador:

Fecha de exposición del trabajo:

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente a mi familia por su incondicional amor y apoyo. Gracias por acompañarme en este proceso de aprendizaje y crecimiento, por sostenerme ante los desafíos y por confiar en mi capacidad. Ustedes son el mejor equipo que me pudo haber tocado. También quiero recordar y agradecer a aquellos que ya no están; aunque físicamente ausentes, los siento conmigo en este momento y recibo todo su amor. Agradezco tanto a mi familia, porque es más fácil asumir nuevos retos sabiendo que siempre voy a tener un abrazo al cual volver, los amo.

Gracias a mis amigos por regalarme su amor y tiempo, por estar presentes en cada paso que doy y por motivarme a seguir caminando.

Mi agradecimiento se extiende a la Universidad Católica de Salta y al Banco Macro, por haber invertido en mi educación y brindarme la oportunidad de cumplir mi objetivo de convertirme en ingeniera. En particular, deseo reconocer al departamento de becas, que ha estado tan presente a lo largo de los años y me ha ofrecido un trato tan humano, haciendo que mi experiencia educativa sea aún más valiosa.

Agradezco a mi director de proyecto final, Fernando Javier Albarracín, por confiarme su programa y por todo el tiempo que me dedicó.

También agradezco a la empresa TecnoSuelo por realizar los ensayos de compresión simple, con la mejor disposición y sin costo alguno. El agradecimiento se extiende por parte de la Facultad de Ingeniería, y en especial por mi profesor guía, jefe de la carrera de Ingeniería Civil, el Ingeniero Fernando Javier Albarracín. Su aporte contribuyó notablemente a nuestro proyecto.

No puedo dejar de mencionar a todos los profesores, técnicos, administrativos y personal de maestría, quienes han contribuido desde sus diferentes roles a mi formación como profesional.

Finalmente, gracias a mis compañeros y amigos, por hacer de esta experiencia un sinfín de hermosos recuerdos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
1. INTRODUCCIÓN	5
2. ESTADO DEL ARTE	6
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	8
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	8
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
3.3. ALCANCE.....	8
3.4. LÍMITES DEL TRABAJO	8
4. SOLUCIÓN PROPUESTA	10
5. DESARROLLO DEL SOFTWARE	11
6. EJECUCIÓN DE ENSAYOS FÍSICOS	27
7. CALIBRACIÓN Y SIMULACIÓN.....	36
8. RESULTADOS DE SIMULACIÓN	39
9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	47
9.1. CONCLUSIONES	47
9.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	48
10. BIBLIOGRAFÍA.....	49
11. ANEXOS	50
11.1. ANEXO I	50
11.2. ANEXO II	51
11.3. ANEXO III	51
11.4. ANEXO IV	52

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una herramienta computacional de código abierto para simular el ensayo de compresión simple de probetas cilíndricas. El programa generará una curva tensión-deformación específica, permitiendo analizar y predecir el comportamiento de los materiales ante la aplicación de cargas. De esta manera se reducirá la necesidad de realizar numerosos ensayos físicos para obtener un diagrama representativo, haciendo el proceso de análisis de materiales más eficiente y sencillo.

En este trabajo, se utilizará el software desarrollado para analizar geomateriales locales. Esta aplicación resulta especialmente relevante, ya que, a pesar del impacto positivo de las construcciones de barro y la gran cantidad de viviendas existentes fabricadas con dicho material, en Argentina no existe una normativa vigente para este tipo de edificaciones. Esta ausencia de regulación no solo limita el reconocimiento del material, sino que también representa un desafío para la labor de ingenieros civiles, cuyo deber es garantizar la seguridad y el confort de las personas.

El proyecto combina el desarrollo de un código con la realización de ensayos físicos. El éxito de la implementación del software se evaluará comparando la similitud entre las curvas generadas por el programa y los gráficos obtenidos en los ensayos físicos.

2. ESTADO DEL ARTE

El diagrama tensión-deformación específica de un material es fundamental en ingeniería, ya que describe su comportamiento bajo la aplicación de cargas. Permite conocer propiedades fundamentales como el módulo de elasticidad, el límite elástico, la resistencia máxima y el punto de rotura. A partir de estos gráficos, los ingenieros pueden clasificar los materiales y seleccionar aquellos que mejor cumplan con los requisitos de sus proyectos. Además, el calculista cuenta con datos para diseñar estructuras que sean seguras y eficientes, resultando en costos más bajos.

Como expone Castellanos (2023), el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales se realiza con ensayos destructivos, como el ensayo de compresión. Sin embargo, este proceso se puede simplificar por medio del uso de métodos de análisis de simulación (pág. 1).

En el ensayo de compresión simple, se coloca una probeta entre dos placas y se aplica un desplazamiento progresivo y uniforme, aumentando poco a poco la presión hasta que la probeta falla, es decir, se rompe. Durante el proceso, se registran el desplazamiento aplicado y la fuerza producida y finalmente, se procesan estos datos y se genera el diagrama tensión-deformación específica. Para simular este tipo de ensayo de manera precisa, resulta esencial aplicar métodos numéricos y modelos constitutivos.

Las limitaciones de la mente humana son tales que no puede captar el comportamiento del complejo mundo que la rodea en una sola operación global. Por ello, una forma natural de proceder de ingenieros, científicos, e incluso economistas, consiste en separar los sistemas en sus componentes individuales, o “elementos”, cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad, y a continuación reconstituir el sistema original para estudiarlo a partir de dichos componentes. (Zienkiewicz, 1980, pág. 1)

La cita anterior describe la naturaleza del Método de Elementos Finitos, procedimiento fundamental en el desarrollo de este software de simulación. Gracias a los avances en la capacidad computacional, su aplicación se ha convertido en una práctica habitual en el análisis de materiales.

La aplicación del software se realiza a un geomaterial, y tal como señala de M. Teixeira et al. (2009), si se quiere obtener una mayor cantidad y mejor calidad en la información del comportamiento del suelo, se debe recurrir a modelos complejos de tipo no lineal con plasticidad. Esto se denomina modelo constitutivo y permite relacionar las tensiones con las deformaciones unitarias producidas en el interior de un material en función de un número determinado de parámetros que dependen de las propiedades mecánicas del suelo (pág. 3).

El ingenio humano ha permitido desarrollar diversos softwares que posibilitan la simulación del ensayo de compresión y generan el diagrama tensión-deformación específica. Entre ellos se destacan Ansys, Abaqus, Comsol Multiphysics y MSC Marc, ampliamente utilizados en el ámbito industrial para analizar el comportamiento de materiales. Sin embargo, estos programas suelen ser de código cerrado, lo que significa que su código fuente es inaccesible e inmodificable. Además, su uso requiere la compra de costosas licencias, lo que restringe su acceso a quienes no pueden solventar estos costos, limitando así el estudio, desarrollo y aplicación de materiales en diversos contextos.

Existen muy pocos softwares de código abierto, como OpenSees. Estos programas cuentan con un código fuente accesible al público, lo que permite su descarga, ejecución y uso libremente. Además, facilitan el estudio de su funcionamiento, permitiendo su modificación para adaptarlo a necesidades específicas y su redistribución. Este modelo fomenta la

colaboración y la transparencia, promoviendo un continuo desarrollo impulsado por una comunidad global de desarrolladores y garantizando una mayor disponibilidad de uso.

Por otro lado, dado que la aplicación del código se orienta al análisis de geomateriales, resulta relevante abordar sus características y propiedades. Las construcciones de barro ofrecen múltiples ventajas en comparación con las realizadas con materiales industriales. Este material natural regula la humedad ambiental, posee una excelente inercia térmica, es reutilizable, requiere poca energía en su elaboración y permite reducir significativamente los costos de construcción. No obstante, también presenta desventajas, como la falta de estandarización, su baja impermeabilidad y su alta contracción (Minke, 2008).

Actualmente, en Argentina no existe una normativa específica para este tipo de construcciones, lo que dificulta su reconocimiento y regulación. Por ello, resulta fundamental desarrollar un software que permita analizar las propiedades del material de forma sencilla y rápida, disminuyendo la necesidad de realizar numerosos ensayos físicos y aportando herramientas para generar futuras normativas.

La importancia de optimizar el estudio de este material cobra aún más sentido si consideramos su relevancia a nivel global. Como señala Minke (2008) “un tercio de la humanidad vive en viviendas de tierra, y en países en vías de desarrollo esto representa más de la mitad.” (pág. 13) Esto es un dato relevante, puesto que el Ministerio de Desarrollo Productivo (2020) afirma que Argentina pertenece a los países categorizados en vías de desarrollo (pág. 24).

En este contexto, el presente proyecto adquiere un valor significativo, ya que no solo busca ofrecer una herramienta de código abierto accesible a investigadores y profesionales, sino que también está diseñado para fomentar el análisis de geomateriales locales, contribuyendo al desarrollo de soluciones constructivas más sustentables y adaptadas a las necesidades regionales.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Argentina, no existe una normativa específica para construcciones de geomateriales, lo que dificulta su regulación y reconocimiento formal. Esto representa una limitación significativa, considerando que la construcción con barro es una técnica ampliamente utilizada en diversas regiones del país debido a su bajo costo y beneficios ambientales. Sin embargo, la falta de estándares dificulta la evaluación de resistencia de estos materiales, lo que impide garantizar la seguridad y durabilidad de las construcciones.

Actualmente, el estudio de geomateriales requiere ensayos físicos que pueden resultar costosos, demandan tiempo y no siempre son accesibles para investigadores o constructores. Además, la mayoría de las herramientas computacionales disponibles para modelar el comportamiento de estos materiales son de código cerrado y requieren licencias de gran valor económico, lo que limita su aplicación en contextos de menor presupuesto.

Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar un software de código abierto y gratuito, que permita simular el ensayo de compresión simple de geomateriales, generando curvas tensión-deformación específica. Este tipo de herramienta facilitaría el análisis del comportamiento mecánico de geomateriales locales sin la necesidad de realizar múltiples ensayos físicos, optimizando recursos y promoviendo la investigación y aplicación de construcciones en barro de manera más segura y eficiente.

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un software de código abierto que permita simular el ensayo de compresión simple de probetas cilíndricas de geomateriales, generando curvas tensión-deformación específica. Si bien en este trabajo se aplica a materiales de la Quebrada del Toro, Salta, la herramienta está diseñada para ser utilizada en cualquier contexto, facilitando el análisis del comportamiento de distintos materiales, optimizando recursos y reduciendo la necesidad de ensayos físicos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Crear algoritmo de mallador del método de elementos finitos en lenguaje C++ en el software DEV C++ y generar archivos de datos.
- Modificar el código de análisis del estado de tensiones y deformaciones planas del Ingeniero Fernando Albarracín, adaptándolo al análisis de sólidos de revolución, en lenguaje interpretado de GNU Octave.
- Fabricar probetas talladas y reconstituidas provenientes de ladrillos de adobe de La Quebrada del Toro, Salta.
- Ensayar probetas en máquina de ensayo de compresión simple y obtener diagramas carga-desplazamiento.
- Calibrar el modelo constitutivo Drucker-Prager.

3.3. ALCANCE

El proyecto se centra en la elaboración de un software que permita simular el ensayo de compresión simple de probetas cilíndricas, obteniendo como resultado el diagrama tensión-deformación específica. El código está diseñado para estudiar materiales elastoplásticos, y en particular, en este trabajo se aplica al análisis de geomateriales de La Quebrada del Toro, departamento de Rosario de Lerma, Salta.

3.4. LÍMITES DEL TRABAJO

Este proyecto no aborda la representación 3D de la probeta ni de su proceso de falla. Tampoco se diseña una interfaz de usuario, lo que condiciona la realización de las modificaciones necesarias dentro del código. Además, en este trabajo no se explora a fondo la

integración numérica ni el ensamblaje de matrices, que son procesos parte del Método de Elementos Finitos.

Respecto al material estudiado, los mampuestos de adobe utilizados en los ensayos fueron fabricados por constructores locales en sus respectivas comunidades, por lo que no contamos con la dosificación de los elementos constitutivos. Tampoco se realizaron los ensayos de granulometría, límite líquido, límite plástico, y contenido de humedad, por lo que la solución propuesta no abarca una clasificación del material.

Por último, los resultados obtenidos con la aplicación del modelo responden exclusivamente al material ensayado, por lo tanto, no pueden ser extrapolados en forma directa a materiales provenientes de otras zonas de estudio.

Es decir, no se busca generar un resultado representativo y normalizado, sino crear una herramienta que permita analizar los materiales elastoplásticos y aportar su diagrama tensión-deformación específica.

4. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para afrontar la escasez de herramientas computacionales accesibles para investigadores y profesionales que permitan obtener el diagrama tensión-deformación específica de materiales elastoplásticos, sin necesidad de realizar numerosos ensayos físicos, se propone desarrollar un software de código abierto y gratuito capaz de simular el ensayo de compresión simple en probetas cilíndricas. Además, con el propósito de resaltar la importancia del barro como material de construcción y fomentar su estudio, se aplica la simulación a geomateriales provenientes de La Quebrada del Toro, del departamento de Rosario de Lerma, Salta.

El desarrollo de la solución se estructura en los siguientes ejes:

- Desarrollo del software: se presenta la teoría que sustenta el proyecto y su aplicación en el programa.
- Ejecución de ensayos físicos: se detalla el proceso de fabricación de probetas y la realización de los ensayos.
- Calibración y simulación: se describen la obtención de los parámetros necesarios para la calibración y las simulaciones realizadas.

Para el desarrollo de este trabajo, la teoría del Método de Elementos Finitos se basa en (Zienkiewicz, 1980), mientras que los fundamentos de plasticidad y el modelo constitutivo Drucker-Prager provienen de (Chakrabarty, 2006). A lo largo del apartado, se hará referencia a estos conceptos sin repetir la cita en cada mención, salvo cuando se requiera mayor precisión.

Las hipótesis de trabajo consideradas son las siguientes:

- Materiales isótropos y continuos.
- Pequeñas deformaciones.
- Tensiones iniciales y deformaciones iniciales nulas.
- Peso propio despreciable.
- Desplazamientos y deformaciones siguen una relación lineal.
- Relación de dimensiones de probetas físicas y simuladas: $\frac{Altura}{Diámetro} \geq 2$ (1)

5. DESARROLLO DEL SOFTWARE

En este apartado se presenta el desarrollo del software, basado en un modelo elastoplástico. Se entiende el comportamiento elástico lineal como aquel en el que las deformaciones son proporcionales a las tensiones y el material recupera completamente su forma al eliminar la carga, mientras que el comportamiento plástico ocurre cuando, tras superar el límite de fluencia, el material sufre deformaciones permanentes incluso al retirar la carga.

Inicialmente, el material se analiza en régimen elástico y, una vez que se cumple la condición del criterio de Drucker-Prager, la evaluación continúa en régimen plástico. Para implementar este modelo, se tomó como base un código desarrollado por el Ing. Fernando Albarracín, director de este proyecto. Dicho programa emplea el Método de Elementos Finitos para estudiar el estado de tensiones y deformaciones planas bajo el criterio de Drucker-Prager. Sin embargo, dado que el objetivo es analizar probetas cilíndricas, resulta más práctico abordar la teoría de sólidos de revolución, y es por ello que se realizan las modificaciones necesarias a este código base, para arribar a esta teoría. Además, para agilizar la generación de datos, se crea un mallador automático que, a partir de ciertos parámetros de entrada, genera la malla del Método de Elementos Finitos y entrega los archivos necesarios para iniciar la simulación.

La filosofía del Método de Elementos Finitos propone que, para resolver un sistema complejo, se lo puede separar en elementos cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad, y a continuación reconstituir el sistema original para comprenderlo a partir de dichos componentes.

Se llama sistema discreto a aquel compuesto por un número finito de elementos bien definidos, mientras que un sistema continuo se conforma por un número infinito de elementos. En este proyecto se trabaja con sistemas continuos, los cuales se representan mediante ecuaciones diferenciales. Resolver estas ecuaciones de forma exacta puede ser complejo y engorroso, por lo que se recurre a métodos de discretización. Estos permiten obtener una solución aproximada que se va refinando a medida que aumenta la cantidad de elementos considerados.

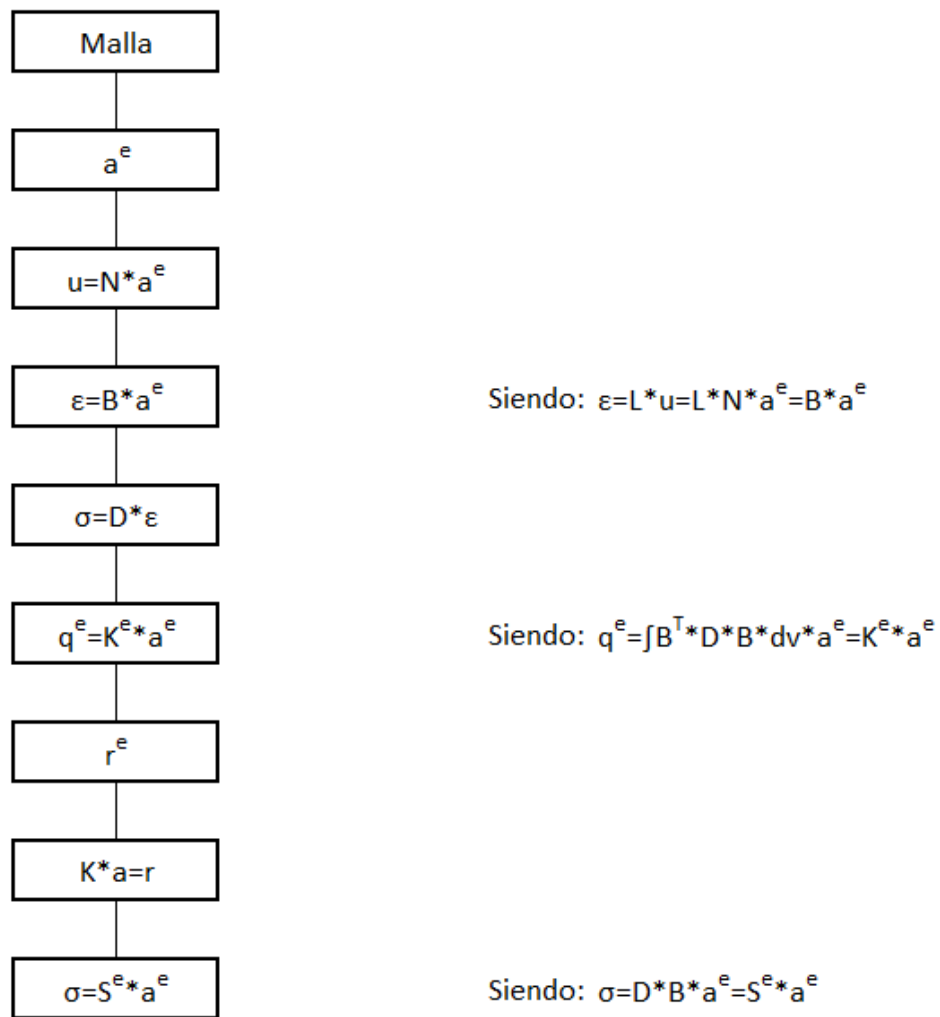
Se define el Método de Elementos Finitos como un procedimiento de discretización de problemas continuos formulados matemáticamente. Para ello, se divide el continuo en un número finito de elementos mediante líneas imaginarias. Estos elementos se conectan entre sí a través de puntos discretos llamados nodos, situados en sus contornos.

A partir de los desplazamientos nodales, que son las incógnitas fundamentales, se establece un conjunto de ecuaciones que describe el campo de desplazamientos dentro de cada elemento. Con estos valores, se determina su estado de deformación y, posteriormente, se formula el sistema de ecuaciones que define el estado de tensiones. Luego, se expresa estas tensiones en términos de un sistema de fuerzas nodales equivalentes.

Finalmente, asegurando la coherencia en las coordenadas o aplicando las transformaciones necesarias, se ensamblan todos los elementos para obtener un resultado global. Se establece el equilibrio interno y externo, y como el estado de cargas externas es conocido y se asume aplicado en los nodos, se resuelve el sistema para obtener los desplazamientos nodales. A partir de ellos, se calculan los desplazamientos internos de los elementos, luego las deformaciones específicas y, por último, las tensiones.

El proceso descripto previamente se sistematiza en el Diagrama 1 que observamos a continuación:

Diagrama 1. Diagrama de flujo del Método de Elementos Finitos.



Fuente: elaboración propia.

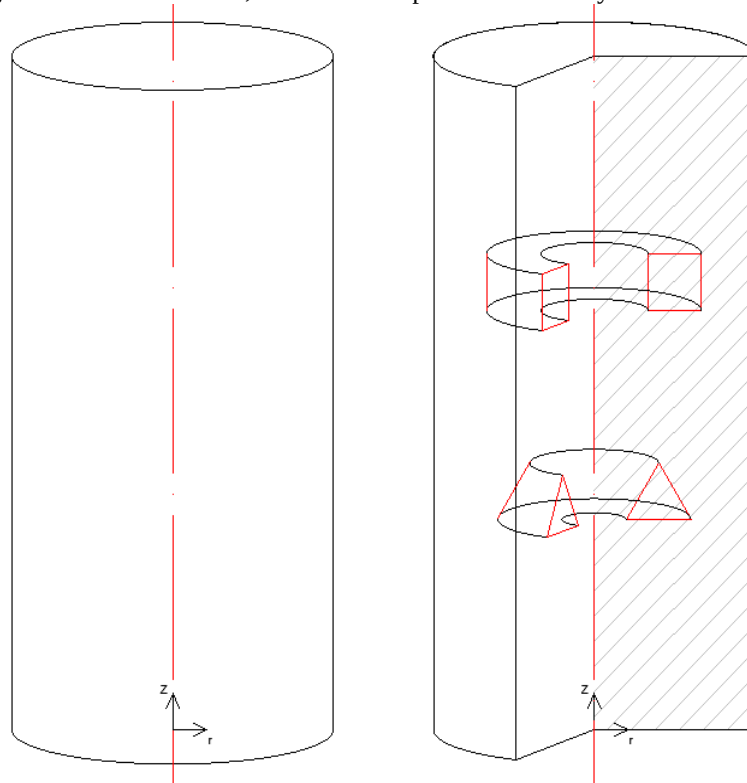
Referencia: a^e : desplazamiento del elemento en función de los desplazamientos nodales
 u : desplazamiento de cualquier punto del elemento.
 N : función de forma de desplazamientos.
 ε : deformación específica de cualquier punto del elemento
 L : operador lineal.
 B : función de forma de deformaciones.
 σ : tensiones en cualquier punto del elemento.
 D : matriz de elasticidad en función de propiedades del material.
 q^e : fuerzas equivalentes nodales.
 K^e : matriz de rigidez del elemento.
 r^e : carga externa del elemento aplicada en los nodos.
 K : matriz global de rigidez.
 a : matriz global de desplazamientos.
 r : matriz global de fuerzas externas.
 S^e : matriz de tensiones.

El sistema continuo que se estudia es la probeta cilíndrica previamente mencionada, que puede ser representada geométricamente como un sólido de revolución. Se define sólido de revolución a un cuerpo tridimensional generado al rotar una región en el espacio alrededor de un eje fijo. En el caso de la probeta, se obtiene al rotar un rectángulo alrededor de su eje longitudinal, generando un cuerpo simétrico en el cual todas las secciones transversales perpendiculares al eje son circunferencias de igual radio.

La hipótesis de la relación de dimensiones de altura y diámetro de las probetas (ecuación 1.) garantiza que el esfuerzo aplicado en la dirección longitudinal se distribuya de manera uniforme en el volumen de la probeta. La fricción entre los extremos de la probeta y las placas de compresión puede restringir la deformación lateral, lo que causa una distribución no uniforme de los esfuerzos. Considerando la relación de lados propuesta, se concentran estos efectos en las zonas cercanas a los extremos, permitiendo que la parte central de la probeta represente mejor el comportamiento del material.

Debido a la naturaleza geométrica, el volumen asociado a cada elemento, considerado en las integrales de las ecuaciones que se plantean en una siguiente etapa, corresponde al anillo de material definido al barrer el elemento alrededor del eje de revolución, tal como se observa en la Imagen 1.

Imagen 1. Sistema continuo, definición del plano de análisis y volumen a integrar.

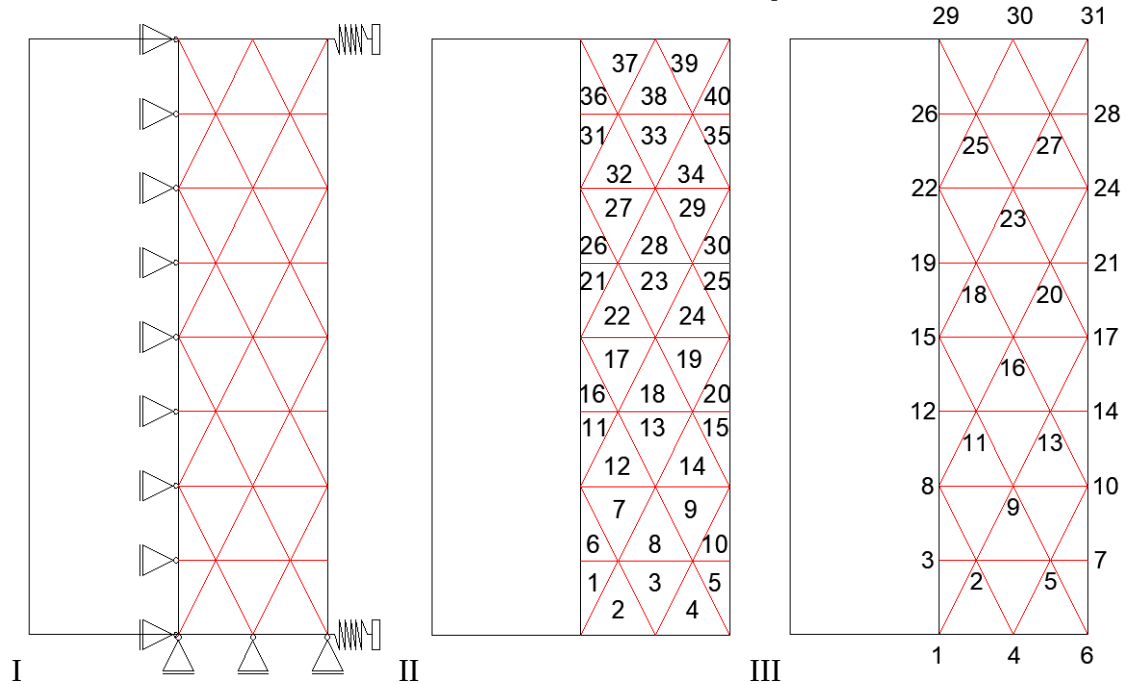


Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, se define el área de análisis con el plano $(r; z)$, donde r es el radio y z la altura de la probeta.

Para crear el mallador automático se desarrolla un algoritmo en lenguaje C++ utilizando el software DEV C++. Aunque la forma de los elementos puede variar, se ofrecen al usuario dos opciones: una malla conformada por elementos poligonales de tres nodos (Imagen 2) o una de cuatro nodos (Imagen 3).

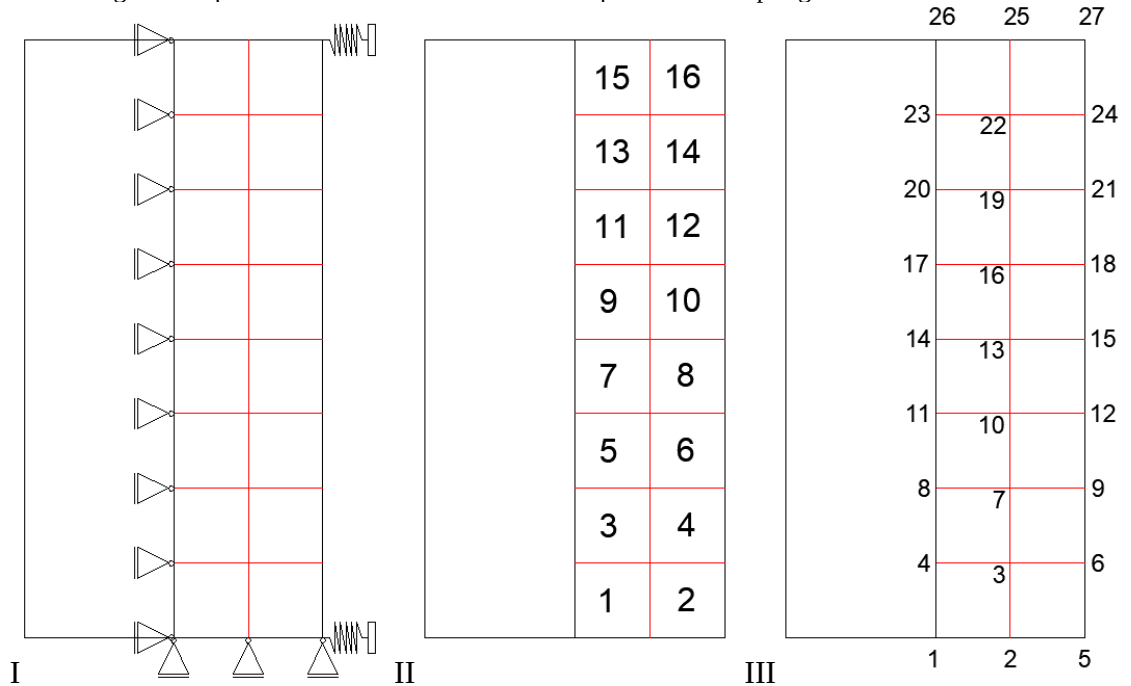
Imagen 2. Representación de sistema constituido por elementos poligonales de tres nodos.



Fuente: elaboración propia.

Referencia: I. Sistema y sus vínculos. II. Elementos. III. Nodos.

Imagen 3. Representación de sistema constituido por elementos poligonales de cuatro nodos.



Fuente: elaboración propia.

Referencia: I. Sistema y sus vínculos. II. Elementos. III. Nodos.

Para utilizar el mallador, se le solicita al usuario que ingrese el diámetro y la altura de la probeta, la cantidad de elementos deseados en sentido radial, el tipo de elemento poligonal que desea (tres o cuatro nodos) y la carga de resistencia última obtenida mediante ensayos físicos.

Haciendo uso del dato “cantidad de elementos deseados en sentido radial”, el cual se llama factor de mallado, el programa calcula el paso en sentido radial y longitudinal, es decir, la distancia de avance entre nodos. El sentido de creación de nodos en dirección horizontal es

de izquierda a derecha y en dirección vertical es de abajo hacia arriba. Inicialmente, el programa trabaja con las tres primeras líneas horizontales, las cuales se denominan línea inferior, media y superior.

Línea inferior: se posiciona en la coordenada radial igual a menos el paso y la coordenada de altura igual a cero, desde allí, a través de un ciclo inicializado en cero hasta el factor de mallado, se crean los nodos sumando el paso. Con cada iteración se agregan datos al archivo generado llamado “nodos”, donde la primera columna indica las coordenadas en sentido radial y la segunda las coordenadas longitudinales de cada nodo. Además, se genera el archivo “ccontorno”, cuya primera columna indica el número de nodo, la segunda la condición de apoyo en dirección radial y la tercera la condición de apoyo en dirección longitudinal, significando 0 no restringido y 1 un apoyo móvil. Y finalmente, se crea el archivo “kresorte”, donde la primera columna indica el número de nodo, la segunda el amortiguamiento radial y la tercera el amortiguamiento longitudinal, significando 0 no modificar y 1 modificar en función de la diagonal principal de la matriz de rigidez. Cabe mencionar que se colocan los apoyos móviles en el extremo inferior de la probeta, simulando la mordaza inferior y a lo largo del eje de revolución. Mientras que, se colocan los resortes en los nodo inferior y superior del borde libre (Imágenes 2.I. y 3.I.).

Línea media: se incrementa la coordenada longitudinal igual al paso vertical. Si se trata de elementos de cuatro nodos, en sentido radial, se repite lo mencionado en la línea inferior. En caso de trabajar con elementos de tres nodos, se posiciona en la coordenada radial igual a menos el paso, y si se trata de la segunda o la penúltima iteración, se suma la mitad del paso, caso contrario, se suma el paso entero. Aquí se añaden datos a los archivos “nodos” y “ccontorno”; y además, haciendo uso de la línea inferior, se crea el archivo “elementos”. Si es una malla de cuatro nodos, se crean los elementos en sentido horario, iniciando siempre en el extremo inferior izquierdo. Este archivo tiene cinco columnas, de las cuales las cuatro primeras son los nodos y la última indica el material que se analiza. Si es una malla de tres nodos, el sentido también es horario e inicia siempre en el extremo inferior, ya sea la punta del triángulo o el nodo izquierdo. El archivo continúa teniendo cinco columnas, rellenando la cuarta con ceros porque los elementos en cuestión tienen tres nodos.

Línea superior: se genera aumentando un paso en sentido vertical y respecto al radial, se continúa de igual forma que en la inferior. Se aumentan datos en los archivos “nodos”, “ccontornos” y “elementos”, con la salvedad de que ahora se utilizan la línea media y la superior para generar los elementos.

Se crean el resto de las líneas mediante un ciclo que avanza en dirección vertical, arranca en la tercera línea horizontal y finaliza en la última. Para estas operaciones se usan de la línea media y de la superior.

Línea media: se genera de manera idéntica a la anterior, y se obtienen los datos para añadir a los archivos “nodos” y “ccontorno”. La diferencia yace en los elementos, ahora se construyen los mismos haciendo uso de la línea superior anterior y la línea media actual.

Línea superior: se produce de igual manera que la anterior, obteniendo los datos para añadir a los archivos “nodos”, “ccontornos” y “elementos”. Además, se genera un nuevo archivo llamado “qborde”, sujeto a la condición de tratarse de la última línea horizontal del sistema, y se aplica la carga superficial ingresada por el usuario, que simula de manera incremental, la carga aplicada por la máquina. Se trata de cuatro columnas, en la primera se coloca el elemento en cuestión, en la segunda el número de borde sobre el cual se aplica la carga considerando el sentido de creación de elementos, en la tercera columna la carga en dirección radial que resulta nula, y en la cuarta la carga en dirección longitudinal.

Al finalizar todas las iteraciones del ciclo, se generan los archivos de control. El archivo “pcontrolU” representa el punto de control de los desplazamientos en sentido longitudinal y se ubica en el nodo superior sobre el eje de revolución. La primera columna indica el número del nodo y la segunda la norma fijada para los desplazamientos longitudinales. Mientras que el archivo “Toecontrol” indica los elementos donde se van a trazar las curvas resultado. Se pueden tomar varios, particularmente en este proyecto se dan como opción los elementos ubicados en el centro de la probeta sobre el eje de revolución y sobre el borde libre.

Se presenta un detalle de los archivos generado automáticamente por el mallador en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Síntesis de archivos de datos generados por el mallador.

Archivo	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5
nodos	Coordenada radial	Coordenada longitudinal			
ccontorno	Número de nodo	Condición de apoyo en dirección radial	Condición de apoyo en dirección longitudinal		
Kresorte	Número de nodo	Amortiguamiento radial	Amortiguamiento longitudinal		
elementos	Número de nodo	Número de nodo	Número de nodo	Número de nodo	Material a analizar
qborde	Número de elemento	Número de borde del elemento	Carga en dirección radial	Carga en dirección longitudinal	
pcontrolU	Número de nodo	Norma fijada de desplazamientos longitudinales			
Toecontrol	Número de elemento				

Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso consistió en modificar el código original, diseñado para el análisis de tensiones y deformaciones en un régimen plano, escrito en GNU Octave, y adaptarlo al estudio de sólidos de revolución. Esta adaptación permitió considerar la geometría tridimensional de las probetas cilíndricas, haciendo que el análisis fuera más acorde a las necesidades del proyecto.

La diferencia fundamental entre el análisis en tensión y deformación plana y el de sólidos de revolución radica en la cantidad y el tipo de componentes de tensión y deformación involucradas.

En el caso de tensión y deformación plana, se consideran tres componentes de deformación y tres de tensión dentro del plano, mientras que las normales a este son nulas. Estas son:

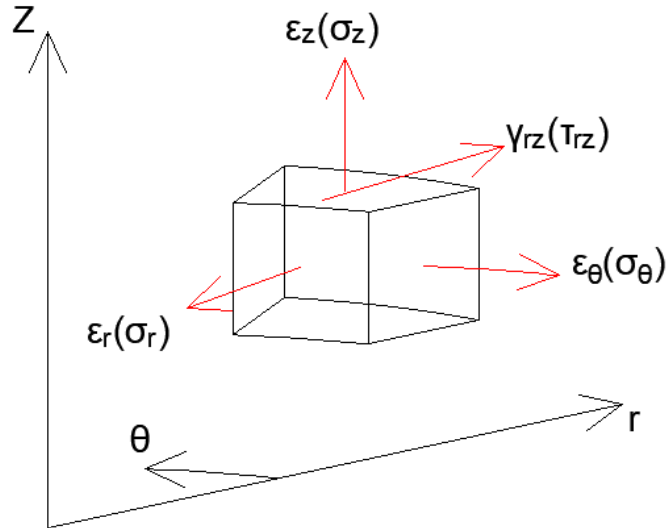
- Deformación: normal en el eje x , normal en el eje y y distorsión angular en el plano $(x; y)$
- Tensión: normal en el eje x , normal en el eje y y tangencial en el plano $(x; y)$

Por otro lado, en el análisis de sólidos de revolución, debido a la simetría en torno al eje de revolución, un desplazamiento en dirección radial genera una deformación circunferencial. Esto introduce una cuarta componente tanto en tensión como en deformación. En este caso, los componentes son:

- Deformación: normal en el eje r , normal en el eje z , circunferencial θ y distorsión angular en el plano $(r; z)$.
- Tensión: normal en el eje r , normal en el eje z , circunferencial θ y tangencial en el plano $(r; z)$.

Esta diferencia es clave para adaptar correctamente el modelo al estudio de sólidos de revolución y se aprecia en la Imagen 4.

Imagen 4. Deformaciones y tensiones de sólidos de revolución.



Fuente: elaboración propia.

Referencia: ϵ_r : deformación normal en eje r
 ϵ_z : deformación normal en eje z
 ϵ_θ : deformación circunferencial en eje θ
 γ_{rz} : distorsión angular en plano $(r; z)$
 σ_r : tensión normal en eje r
 σ_z : tensión normal en eje z
 σ_θ : tensión circunferencial en eje θ
 τ_{rz} : tensión tangencial en plano $(r; z)$

Para facilitar la comprensión de los cambios realizados, se formulan las ecuaciones en función de una malla compuesta por elementos poligonales de tres nodos. Como resumen, en el 11.2. ANEXO II se presenta un cuadro comparativo entre ambos estados. Además, se describe primero el comportamiento elástico lineal y, posteriormente, su adaptación al régimen plástico, permitiendo así un análisis adecuado del material elastoplástico.

El primer cambio que se efectuó fue renombrar las coordenadas. La dirección que se solía nombrar x ahora es r y representa el sentido radial de la probeta. Mientras que la dirección y , se llama z y representa la altura de la probeta. Reajustándose todas las expresiones a lo antes mencionado.

Funciones de desplazamientos: permanecen iguales en los nodos. Cada nodo cuenta con dos componentes, como se muestra en (2):

$$a_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Referencia: a_i : desplazamiento nodal.

u_i : componente de desplazamiento nodal en dirección r .

v_i : componente de desplazamiento nodal en dirección z .

Por lo que, los desplazamientos de los elementos vienen dados por el siguiente vector, en función de los desplazamientos de sus nodos (3):

$$a^e = \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \\ a_m \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Referencia: a^e : desplazamiento del elemento.

a_i : desplazamiento del elemento e actuando en el nodo i.

Por lo tanto, el desplazamiento de cada elemento se define a partir de seis componentes: tres correspondientes a u y otras tres a v. Una manera sencilla de representarlo es mediante polinomios de primer grado, como se muestra en las ecuaciones (4) y (5) para el nodo i. Este procedimiento debe repetirse para los demás nodos que conforman el elemento.

$$u_i = \alpha_1 + \alpha_2 * r_i + \alpha_3 * z_i \quad (4)$$

$$v_i = \alpha_4 + \alpha_5 * r_i + \alpha_6 * z_i \quad (5)$$

Referencia: u_i componente de desplazamiento nodal.

v_i : componente de desplazamiento nodal.

α_i : constantes.

r_i : coordenada nodal en dirección radial.

z_i : coordenada nodal en dirección longitudinal.

Se pueden conocer fácilmente los valores de las constantes α_i trabajando algebraicamente con las componentes u_i , u_j y u_m , lo que nos lleva a la ecuación (6). Luego se aplica el mismo procedimiento para v y se obtiene la ecuación (7):

$$u = \frac{1}{2*\Delta} * \{(a_i + b_i * r + c_i * z) * u_i + (a_j + b_j * r + c_j * z) * u_j + (a_m + b_m * r + c_m * z) * u_m\} \quad (6)$$

$$v = \frac{1}{2*\Delta} * \{(a_i + b_i * r + c_i * z) * v_i + (a_j + b_j * r + c_j * z) * v_j + (a_m + b_m * r + c_m * z) * v_m\} \quad (7)$$

Referencia: a , b y c : coeficientes en función de coordenadas.

Los coeficientes del nodo i se expresan en las ecuaciones (8), (9) y (10), mientras que los de los demás nodos se obtienen mediante la permutación cíclica de los subíndices i , j y m .

$$a_i = r_j * z_m - r_m * z_j \quad (8)$$

$$b_i = z_j - z_m = z_{jm} \quad (9)$$

$$c_i = r_m - r_j = r_{mj} \quad (10)$$

Además, se puede expresar el campo de los desplazamientos de la siguiente manera:

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = N * a^e = [I * N_I \quad I * N_J \quad I * N_m] * a^e \quad (11)$$

Referencia: u : vector de desplazamientos.

I : matriz identidad de 2x2.

N : función de forma de desplazamientos

Se define la función de forma de desplazamientos a continuación:

$$N_i = \frac{a_i + b_i * r + c_i * z}{2*\Delta} \quad (12)$$

El denominador de la ecuación (12) representa el área del elemento y se define según la expresión (13):

$$2 * \Delta = \det \begin{vmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_m & z_m \end{vmatrix} \quad (13).$$

Se realiza la misma álgebra para los nodos j y m.

Puesto que los desplazamientos varían linealmente, se cumple la condición de continuidad de desplazamientos entre elementos adyacentes.

Funciones de deformaciones: como dijimos previamente, se deben contemplar las deformaciones en dirección circunferencial introducidas por los desplazamientos radiales.

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \end{Bmatrix} = L * u \quad (14)$$

Referencia: ε : vector de deformaciones específicas.

Introduciendo las funciones de desplazamientos se puede definir:

$$\varepsilon = B * a^e = [B_i \quad B_j \quad B_m] * a^e \quad (15)$$

Referencia: B : función de forma de deformaciones.

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \\ \frac{1}{r} * N_i & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial r} \end{bmatrix} = \frac{1}{2 * \Delta} \begin{bmatrix} 0 & b_i & c_i \\ a_i & b_i & c_i \\ \frac{a_i}{r} + b_i + c_i \frac{z}{r} & 0 & 0 \\ c_i & b_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

A diferencia de las deformaciones planas, donde la matriz B es independiente de la posición del punto dentro del elemento, en sólidos de revolución las coordenadas r y z están presentes en la matriz. Esto provoca que las deformaciones no sean constantes dentro de cada elemento. Para resolver este problema, debemos garantizar que la componente u sea proporcional a r .

Matriz de elasticidad: vincula tensiones y deformaciones, por lo que también se aumenta su tamaño para contemplar las tensiones en sentido circunferencial. Considerando que el material de estudio es isótropo, se define la matriz simétrica:

$$D = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} * \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{(1-\mu)} & \frac{\mu}{(1-\mu)} & 0 \\ & 1 & \frac{\mu}{(1-\mu)} & 0 \\ Sim. & & 1 & 0 \\ & & & \frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Referencia: D : matriz de rigidez elástica.

E : módulo de Young.

μ : coeficiente de Poisson.

Tensiones: se establece la relación de tensiones y deformaciones, como se muestra a continuación en la expresión (18):

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = D * \varepsilon \quad (18)$$

Referencia: σ : vector de tensiones.

Matriz de rigidez: dado que la matriz B depende de las coordenadas, las submatrices K_{ij}^e se resuelven mediante integración numérica, considerando que el volumen de integración corresponde al anillo de material.

$$K_{ij}^e = 2 * \pi * \int B_i^T * D * B_j * r * dr * dz \quad (19)$$

Referencia: K_{ij}^e : submatriz de rigidez del elemento.

i : nodo analizado.

j : nodo donde sucede el desplazamiento.

De este modo, se define la matriz de rigidez, tal como se muestra en la expresión (20):

$$K^e = \begin{bmatrix} K_{ii}^e & \dots & K_{im}^e \\ \vdots & & \vdots \\ K_{mi}^e & \dots & K_{mm}^e \end{bmatrix} \quad (20)$$

Referencia: K^e : matriz de rigidez del elemento.

Fuerzas nodales equivalentes: representan la fuerza interna del sistema y mantiene su relación, como se muestra en la ecuación (21), con una variación en la expresión (19) previamente descrita.

$$q^e = K^e * a^e \quad (21)$$

Referencia: q^e : fuerzas nodales equivalentes del elemento.

Así mismo, las fuerzas del elemento, se expresan en función de sus componentes nodales, como se señala en la ecuación (22).

$$q^e = \begin{Bmatrix} q_i^e \\ q_j^e \\ q_m^e \end{Bmatrix} \quad (22)$$

Referencia: q_i^e : fuerza nodal equivalente del elemento e actuando en el nodo i .

Fuerzas externas: se trata de fuerzas nodales que representan un efecto combinado de la fuerza externa actuante a lo largo de toda la circunferencia del círculo que forma el nodo del elemento. De esta manera, sea $\bar{R}$ la componente radial de la fuerza por unidad de longitud, de la circunferencia de un radio promedio del elemento, la fuerza exterior es:

$$r_r^e = 2 * \pi * r * \bar{R} \quad (23)$$

Referencia: r_r^e : fuerza externa nodal del elemento.

r : radio promedio del elemento.

$\bar{R}$: componente radial de la fuerza externa.

Análogamente, en la dirección del eje el efecto combinado de las fuerzas axiales vendrá representado por la ecuación (24):

$$r_z^e = 2 * \pi * r * \bar{Z} \quad (24)$$

Referencia: r_z^e : fuerza externa nodal del elemento.
 r : radio promedio del elemento.
 $\bar{Z}$: componente radial de la fuerza externa.

Equilibrio de fuerzas: finalmente, se igualan fuerzas internas y externas para garantizar el equilibrio global del sistema. Como el estado de cargas externas es conocido, se resuelve el sistema para obtener los desplazamientos nodales.

$$K * a = r \quad (25)$$

Referencia: K : matriz global de rigidez.
 a : matriz global de desplazamientos.
 r : matriz global de fuerzas externas.

Una vez halladas las incógnitas fundamentales del problema, se pueden determinar los desplazamientos internos de los elementos y calcular las tensiones.

$$\sigma^e = S^e * a^e \quad (26)$$

Referencia: σ : tensiones del elemento.
 S^e : matriz de tensiones.

Donde la matriz de tensiones se compone de la siguiente manera:

$$S^e = D * B \quad (27)$$

Por un lado, se resuelve de este modo la parte elástica lineal del problema, cuya solución puede obtenerse mediante un proceso directo. Por otro lado, para abordar la parte plástica, se aplica de manera iterativa el mismo proceso planteado para elasticidad lineal, pero se ajusta la matriz D en cada iteración; y en este caso, la solución se obtiene mediante un método más complejo llamado Newton-Raphson. Esto se debe a que la plasticidad conlleva una variación en el límite elástico, es decir, la tensión de fluencia depende de un parámetro de endurecimiento k . Entendiendo el endurecimiento como la variación de la tensión de fluencia debido al proceso de plastificación.

Método Newton-Raphson: se reescribe el problema como el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\Psi(a) = P(a) = K(a) * a = 0 \quad (28)$$

El método es un algoritmo de iteración que se usa para encontrar las raíces de una función, es decir $\Psi(a^{n+1}) = 0$. Este método se basa en aproximar una función mediante una línea tangente en un punto cercano a la raíz, y luego usar esa tangente para acercarse más a la solución en cada iteración. Algebraicamente, el método plantea que, si se conoce una solución aproximada de la ecuación (28), tal como $a = a^n$, puede escribirse una solución mejorada mediante una Serie de Taylor limitada a dos términos:

$$\Psi(a^{n+1}) = \Psi(a^n) + \left(\frac{d\Psi}{da}\right)_n * \Delta a^n = 0 \quad (29)$$

Con

$$a^{n+1} = a^n + \Delta a^n \quad (30)$$

La derivada representa una matriz tangente, como se muestra en la ecuación (31):

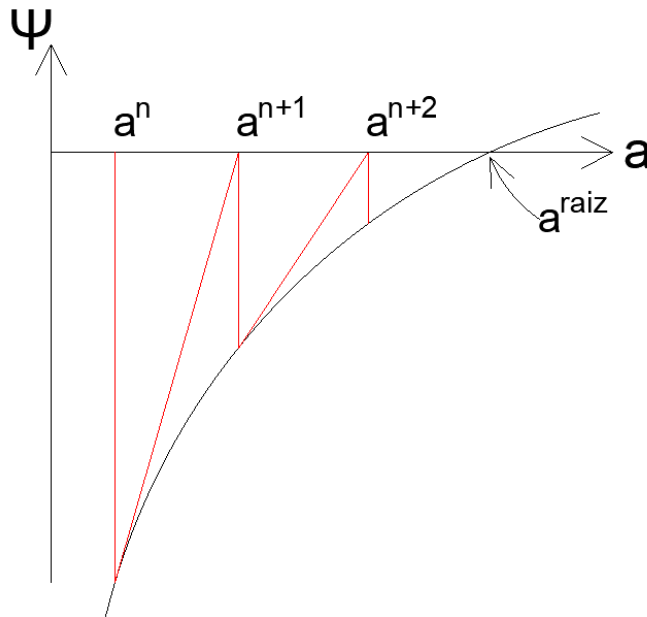
$$\frac{d\Psi}{da} = \frac{dP}{da} = K_T(a) \quad (31)$$

Finalmente, la solución mejorada se obtiene despejando la ecuación (29)

$$\Delta a^n = -(K_T^n)^{-1} * P^n \quad (32)$$

Gráficamente, se parte de un valor inicial a^n , que es una estimación inicial de la raíz de la función $\Psi(a)$. Luego se calcula la pendiente de la tangente en a^n , que es la derivada de la función en ese punto $\frac{d\Psi}{da}$ y se traza la tangente en ese punto. El siguiente punto se obtiene al hallar la intersección de la tangente con el eje a^{n+1} , es decir, el valor de a donde la tangente corta al eje horizontal. Se repite este proceso, usando a^{n+1} para calcular la tangente y encontrar el siguiente valor a^{n+2} , y así sucesivamente, hasta que el valor converja a la raíz de la función.

Imagen 5. Método Newton-Raphson aplicado en cada incremento.



Fuente: elaboración propia.
Referencia: a: desplazamientos. Ψ: carga.

Resulta oportuno mencionar que, en general el método suele ser convergente en las proximidades de la solución, pero si la solución de partida no es próxima a la verdadera, el proceso puede ser divergente.

Además de adoptar un nuevo método de solución, para analizar correctamente la plasticidad de un material, es necesario introducir nuevos conceptos:

Criterio de fluencia: es una condición matemática que describe el instante en el que el material cambia su comportamiento mecánico, pasando de estado elástico a plástico, bajo la aplicación de cargas externas. En otras palabras, define el estado de tensiones en el cual un material comienza a experimentar deformaciones permanentes.

En este proyecto, se utiliza el criterio de fluencia Drucker-Prager, que define una superficie de fluencia en el espacio de tensiones. Mientras el estado de tensiones del material permanezca dentro de esta superficie, el material se comporta de manera elástica. No obstante, cuando las tensiones alcanzan dicha superficie, el material comienza a deformarse plásticamente.

Drucker-Prager: la superficie de fluencia queda establecida por las ecuaciones (33) y (34):

$$F(\sigma; k) = 0 \quad (33)$$

$$F = 3 * \alpha' * \sigma_m + \bar{\sigma} - K = 0 \quad (34)$$

Referencia: α' y K : parámetros de endurecimiento por deformación.

$$\alpha' = \frac{2 * \text{sen}(\emptyset)}{\sqrt{3} * (3 - \text{sen}(\emptyset))} \quad (35)$$

$$K = \frac{6 * c * \cos(\emptyset)}{\sqrt{3} * (3 - \text{sen}(\emptyset))} \quad (36)$$

Referencia: $\emptyset$: ángulo de fricción.
 c : cohesión.

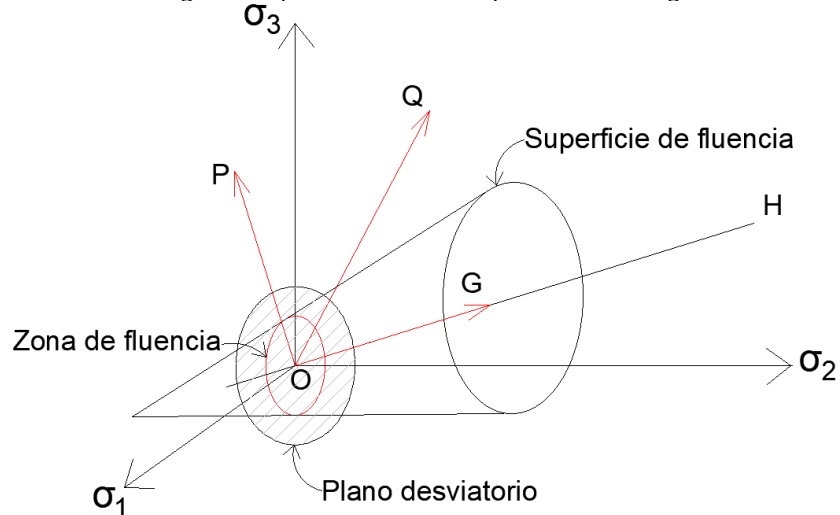
Los valores de $\emptyset$ y c tradicionalmente se obtienen a través de ensayos físicos según el tipo de suelo. Sin embargo, en este proyecto se utilizan valores derivados de datos teóricos extraídos de GeoStru, una empresa desarrolladora de software en ámbitos de ingeniería, geología y geotécnica; los cuales están especificados en las Tablas 1 y 2 respectivamente del 11.3. ANEXO III. Los valores corresponden a la arcilla arenosa, elegida por su similitud con el geomaterial analizado y son los siguientes:

$$\emptyset = 28^\circ \quad (37)$$

$$c = 0.2 \frac{kg}{cm^2} \quad (38)$$

La representación gráfica de la superficie de fluencia se asemeja a un cono en el espacio de tensiones y se esquematiza en la Imagen 6:

Imagen 6. Superficie de fluencia por Drucker-Prager.



Referencia: $(\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3)$: espacio tensorial. OH : vector de cosenos directores. OQ : vector de tensiones.
 OG : vector de tensiones hidrostáticas. OP : vector de tensiones desviadoras.

Fuente: elaboración propia

Se considera un sistema de tres ejes perpendiculares cuyas coordenadas rectangulares son las tensiones principales. Se puede representar el estado de tensión en cualquier punto del sólido mediante un vector que emana del origen O . Se supone una línea OH igualmente inclinada a los tres ejes, de modo que su dirección está definida por los cosenos directores, ellos son $(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}})$. El vector de tensión OQ , cuyos componentes son $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, se puede descomponer en un vector OG a lo largo de OH y un vector OP perpendicular a OH . El vector OG es de magnitud $\sqrt{3} * \sigma_0$ y representa la tensión hidrostática con componentes $(\sigma_0, \sigma_0, \sigma_0)$.

Y el vector OP representa la tensión desviadora con componentes (S_1, S_2, S_3) y su magnitud es $\sqrt{2} * J_2$.

Dado que una tensión hidrostática uniforme no tiene efecto sobre la fluencia, se deduce que ella puede depender sólo de la magnitud y dirección del vector de tensión desviadora OP . Para cualquier estado de tensión, el vector de tensión desviadora está en el plano que pasa por O y es perpendicular a OH . Este plano se conoce como plano desviador y su ecuación es $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ en el espacio de tensiones principales. La curva en que la superficie de fluencia es intersectada por el plano desviador se llama zona de fluencia. La ecuación de un posible lugar geométrico de fluencia, es un posible criterio de fluencia.

Los invariantes de tensiones son cantidades derivadas del tensor de tensiones que no cambian bajo rotaciones del sistema de coordenadas. Estos invariantes son fundamentales para describir el estado de tensiones en un punto de un material de forma independiente de la orientación. Por lo tanto, resulta conveniente expresar el criterio de fluencia en función de los invariantes del tensor de tensiones.

Se puede entonces, trabajar en un sistema de coordenadas cartesianas, donde el eje horizontal es el promedio del primer invariante (ecuación (39)) y el eje vertical es la raíz cuadrada del segundo invariante (ecuación (40)). De esta manera, se analiza una curva de fluencia y se arriba a expresiones útiles:

$$\sigma_m = \frac{J_1}{3} = \frac{\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta}{3} \quad (39)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{S_r^2 + S_z^2 + S_\theta^2}{2} + \tau_{rz}^2} \quad (40)$$

Siendo:

$$S_r = \sigma_r - \sigma_m \quad (41)$$

$$S_z = \sigma_z - \sigma_m \quad (42)$$

$$S_\theta = \sigma_\theta - \sigma_m \quad (43)$$

En el programa $p = \sigma_m$ y $q = \bar{\sigma}$ y la curva Drucker-Prager resulta $q(p)$.

A continuación, se determinan de manera sencilla los vectores gradientes $\left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\}$, empleando un software para realizar la derivación automáticamente. Estas expresiones serán utilizadas posteriormente, al constituir la matriz D .

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_r} = \alpha' + \frac{\left(\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{6} - \frac{\sigma_z}{6}\right)}{\sqrt{\tau_{rz}^2 + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} + \frac{2*\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} + \frac{2*\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{2*\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2}}} \quad (44)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_z} = \alpha' + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{6} - \frac{\sigma_\theta}{6} + \frac{\sigma_z}{3}\right)}{\sqrt{\tau_{rz}^2 + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} + \frac{2*\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} + \frac{2*\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{2*\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2}}} \quad (45)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_\theta} = \alpha' + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{6} + \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{6}\right)}{\sqrt{\tau_{rz}^2 + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} + \frac{2*\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} + \frac{2*\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{2*\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2}}} \quad (46)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \tau_{rz}} = \frac{\tau_{rz}}{\sqrt{\tau_{rz}^2 + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} + \frac{2*\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} + \frac{2*\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{2*\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2}}} \quad (47)$$

Potencial plástico: es una función que describe la dirección en la que ocurren las deformaciones plásticas una vez que el material ha alcanzado la superficie de fluencia, corrigiendo de esta manera, el valor de las tensiones. Se trabaja un criterio conocido como principio de ortogonalidad, ya que la dirección en la que se desarrollan las deformaciones plásticas es perpendicular a la curva de potencial plástico. Se define:

$$d\varepsilon_p = \lambda * \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (48)$$

Referencia: $d\varepsilon_p$: incremento de deformación plástica.

λ : constante de proporcionalidad.

El potencial plástico queda establecido por las ecuaciones (49) y (50):

$$Q = Q(\sigma; k) \quad (49)$$

$$Q = \eta * 3 * \alpha' * \sigma_m + \bar{\sigma} - K = 0 \quad (50)$$

Referencia: η : parámetro de calibración.

El valor del parámetro para calibrar la dirección del flujo plástico varía en el rango de $0 \leq \eta \leq 1$. Cuando $\eta = 1$, se está ante una plastificación asociada y $F = Q$. Esto significa que sus derivadas tienen la misma dirección y los materiales pueden mostrar un aumento de volumen significativo durante la deformación plástica, lo cual no siempre es realista. Caso contrario, la plastificación es no asociada y $F \neq Q$. Es decir, el flujo plástico sigue una dirección definida por un potencial distinto a la fluencia, lo que puede reflejar un comportamiento más complejo, tal es el caso de este proyecto.

En términos matemáticos, el gradiente del potencial plástico define la dirección de la tasa de deformación plástica en el espacio de tensiones. Se plantean entonces, los vectores gradientes $\left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\}$:

$$\frac{\partial Q}{\partial \sigma_r} = \eta * \alpha' + \frac{\left(\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{6} - \frac{\sigma_z}{6}\right)}{\sqrt{\tau_{rz}^2 + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} + \frac{2*\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} + \frac{2*\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{2*\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2}}} \quad (51)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \sigma_z} = \eta * \alpha' + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{6} - \frac{\sigma_\theta}{6} + \frac{\sigma_z}{3}\right)}{\sqrt{\tau_{rz}^2 + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} + \frac{2*\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} + \frac{2*\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{2*\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2}}} \quad (52)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \sigma_\theta} = \eta * \alpha' + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{6} + \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{6}\right)}{\sqrt{\tau_{rz}^2 + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} + \frac{2*\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} + \frac{2*\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{2*\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2}}} \quad (53)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau_{rz}} = \frac{\tau_{rz}}{\sqrt{\tau_{rz}^2 + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} + \frac{2*\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(-\frac{\sigma_r}{3} + \frac{2*\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2} + \frac{\left(\frac{2*\sigma_r}{3} - \frac{\sigma_\theta}{3} - \frac{\sigma_z}{3}\right)^2}{2}}} \quad (54)$$

Deformaciones totales: durante un incremento infinitesimal de tensiones, suponemos la variación de deformación constituida por una parte elástica y otra plástica, como se aprecia en la ecuación (55):

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p = D^{-1} * d\sigma + \lambda * \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (55)$$

Matriz elastoplástica: en los análisis de materiales, la matriz D desempeña un papel fundamental, ya que establece la relación entre los incrementos de tensiones y los incrementos de deformaciones, permitiendo describir el comportamiento del material bajo carga.

Para reflejar la transición entre el comportamiento elástico y el plástico, se introduce el concepto de matriz elastoplástica D_{ep} . Un aspecto clave de esta matriz es su variabilidad a lo largo del proceso iterativo: a medida que el análisis avanza y el material se somete a cargas mayores, D_{ep} debe recalcularse en cada iteración y para cada punto de integración. A diferencia de los materiales puramente elásticos, en los elastoplásticos las propiedades mecánicas evolucionan en función del estado de tensión y deformación en cada paso del análisis. En este contexto, se dice que la matriz elastoplástica se degrada con cada iteración, ya que el material pierde rigidez a medida que experimenta deformaciones plásticas. Este proceso se manifiesta en la modificación progresiva de los coeficientes de la matriz, los cuales disminuyen a medida que el material se ablanda, o aumentan si se produce endurecimiento.

La expresión de la matriz elastoplástica es:

$$D_{ep} = D - D \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T D \left[A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \right]^{-1} \quad (56)$$

Con:

$$A = -\frac{\partial F}{\partial k} * dk * \frac{1}{\lambda} \quad (57)$$

Referencia: D_{ep} : matriz elastoplástica.

D : matriz elástica.

dk : diferencial de parámetro de endurecimiento.

A : Parámetro en función del endurecimiento k .

λ : Constante de proporcionalidad.

La constante λ indeterminada debe eliminarse sin multiplicar o dividir por A . En este proyecto no se desarrolla dicho procedimiento, pero quien desee profundizar en el tema, puede hacerlo en Zienkiewicz (1980, pág. 531).

El parámetro de endurecimiento k , representa la cantidad de trabajo plástico que se disipa durante la deformación plástica y de él dependen los cambios de la superficie de fluencia, pudiendo expandirla o contraerla. Suponiendo una tensión de compresión en fluencia y una deformación plástica lateral, una ley de endurecimiento bajo carga sencilla puede ser:

$$dk = \sigma_z * d\varepsilon_{up} \quad (58)$$

Tensiones: debido a que la matriz tangente D_{ep} es conocida para valores definidos de tensión y de dirección de las fuerzas actuantes, la solución del problema se basa en la integración de la expresión (59):

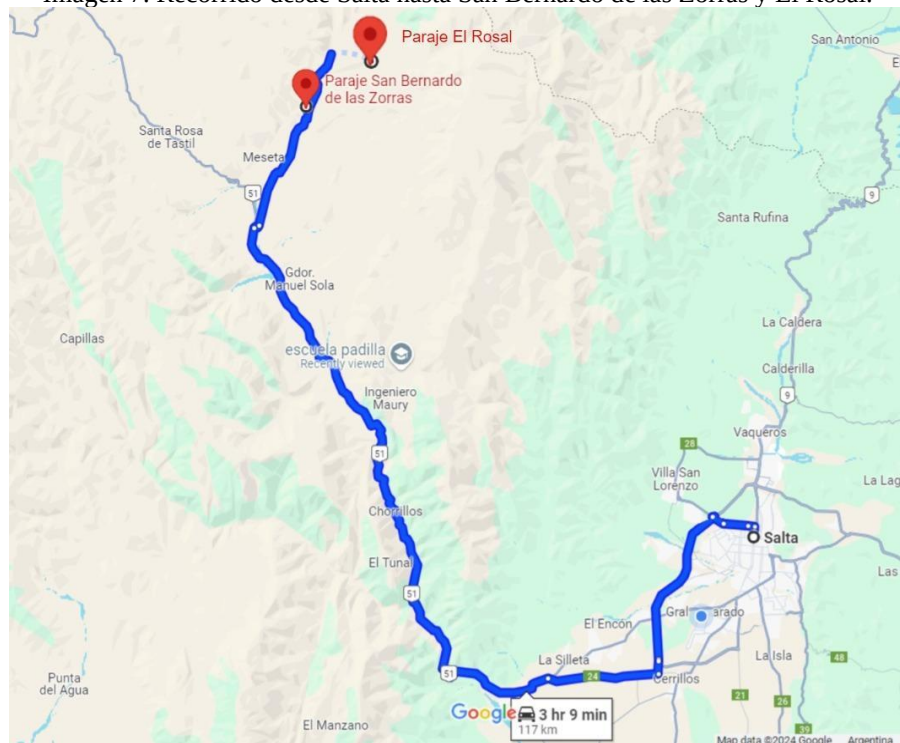
$$d\sigma = D_{ep} * d\varepsilon \quad (59)$$

6. EJECUCIÓN DE ENSAYOS FÍSICOS

El ensayo de compresión simple es una prueba de laboratorio utilizada para determinar la resistencia a la compresión de un material, es decir, la capacidad que tiene para soportar cargas aplicadas en dirección axial sin fallar. Este ensayo permite obtener propiedades mecánicas clave como la resistencia máxima a la compresión, el módulo de elasticidad, el diagrama tensión-deformación específica y el modo de falla del material. En el 11.1. ANEXO I se adjunta la lista de los recursos necesarios, tanto para los ensayos físicos como para el desarrollo del software.

La etapa inicial de los ensayos consistió en la adquisición de los mampuestos de adobe. Se consiguieron cuatro adobes provenientes de La Quebrada del Toro, específicamente dos mampuestos del paraje llamado San Bernardo de las Zorras y dos de El Rosal, ambos pertenecientes al departamento de Rosario de Lerma, en la provincia de Salta. Estas comunidades se ubican a aproximadamente 102 km y 107 km de la capital, respectivamente y fueron seleccionadas por el conocimiento previo de las mismas y por la accesibilidad de caminos.

Imagen 7. Recorrido desde Salta hasta San Bernardo de las Zorras y El Rosal.



Fuente: Google maps.

En la imagen 8. se puede apreciar uno de los mampuestos de adobe, los cuales son característicos de las viviendas tradicionales de la Quebrada del Toro. El adobe, elaborado a partir de barro, proporciona un excelente aislamiento térmico, manteniendo los espacios frescos en verano y cálidos en invierno, lo que lo hace ideal para las condiciones climáticas de la región. Además, sus propiedades acústicas contribuyen a la reducción de ruidos, favoreciendo ambientes más confortables y silenciosos. Asimismo, este material ayuda a regular la humedad del ambiente, mejorando la habitabilidad de las construcciones.

Desde una perspectiva sostenible, la construcción con geomateriales ofrece ventajas significativas. Al utilizar materiales locales y naturales, se minimiza el impacto ambiental asociado a su producción y transporte. Además, al ser un método constructivo de bajo costo,

reduce considerablemente los gastos de obra, promoviendo soluciones habitacionales más accesibles y ecológicas.

Imagen 8. Mampuesto de adobe de La Quebrada del Toro.



Fuente: elaboración propia.

El armado de las probetas se realizó en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Salta. Para garantizar la seguridad en dicha instalación, se utilizaron los elementos de protección personal adecuados, como guantes, gafas de seguridad y mascarillas.

Se enfrentó un proceso complejo debido a los inconvenientes que surgieron durante la preparación y manipulación de los materiales. Inicialmente se planteó la idea de tallar las probetas directamente de los mampuestos, pero se encontraron piedras, troncos y otras impurezas, tal como se observa en la Imagen 9. Su presencia dificultó la obtención de muestras con dimensiones uniformes convirtiendo el material en un cuerpo discontinuo, lo cual, no solo afecta la integridad de las probetas, sino que también incrementa el tiempo requerido para lograr resultados aceptables.

Imagen 9. Impurezas del material.



Fuente: elaboración propia.

A pesar de estos desafíos, se logró obtener tres muestras satisfactorias a partir de los bloques provenientes del paraje San Bernardo de las Zorras (Imagen 11), los cuales presentaban una menor cantidad de impurezas en comparación con los de El Rosal. Estos últimos no solo contenían una cantidad excesiva de partículas, sino que además muchas de ellas eran de gran tamaño. Y tras varios intentos fallidos, se decidió discontinuar el tallado de estos bloques.

Imagen 10. Proceso de tallado de probetas.



Fuente: elaboración propia.

Imagen 11. Probetas talladas, comunidad San Bernardo de las Zorras.



Fuente: elaboración propia.

Ante esta eventualidad, se planteó como alternativa crear probetas reconstituidas a partir del material de los mampuestos.

Para ello, se fabricaron tres moldes, utilizando un caño estructural cilíndrico, el cual se cortó longitudinalmente en dos mitades. A cada una de ellas se le soldaron tuercas que permiten unir y separar ambas partes con alambre cuando sea necesario. Además, se incorporaron orejas de agarre para fijar el molde a la base. Esta base fue construida con una chapa lisa, a la que se le soldó una varilla roscada que actúa como punto de sujeción para las orejas de los moldes.

El diseño resultante (Imagen 12) permite desmontar fácilmente el molde de su base y separar las mitades longitudinales sin necesidad de aplicar fuerza excesiva. De este modo, se garantiza la extracción de las muestras sin deformaciones ni daños, asegurando su integridad durante el proceso de desmolde.

Imagen 12. Moldes de probetas.



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se procedió a demoler los bloques de adobe, triturando el material hasta obtener una mezcla homogénea. Una vez finalizado este proceso, se colocó el material en bolsas impermeables, cada una debidamente identificada según su procedencia. Esto permitió mantener el material protegido de la humedad y evitar cualquier posible contaminación, asegurando así que los ensayos se llevaran a cabo con muestras representativas y en condiciones controladas.

Imagen 13. Demolición de ladrillos de adobe.



Fuente: elaboración propia.

La presencia de partículas grandes dentro de la mezcla puede generar zonas con distinta resistencia, afectando la distribución uniforme de tensiones dentro de la probeta. Además, podrían generar fracturas localizadas o afectar la forma en que se propagan las fisuras, alterando la interpretación de los resultados. Por lo cual, se decidió reconstituir las probetas sin su incorporación. Se colocó una porción del material en una bandeja y se realizó la separación manual de los componentes no deseados que resultaban grandes respecto al tamaño del molde (Imagen 14).

Imagen 14. Separación de elementos no deseados.



Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, se añadió agua de forma gradual, hasta obtener una consistencia trabajable, tal como se muestra en la Imagen 15:

Imagen 15. Adhesión de agua a la mezcla.



Fuente: elaboración propia.

Una vez que la mezcla estuvo lista, se prepararon los moldes recubriendo sus paredes internas con aceite quemado para evitar la adherencia de las probetas (Imagen 16). Luego, se procedió a colocar la mezcla en su interior, realizando el llenado en tres capas. Después de cada capa, se aplicaron suaves golpes laterales con una varilla metálica sobre el molde, para asegurar una distribución homogénea del material. Finalmente, se enrasó la superficie de cada molde (Imagen 17), y se dejó reposar durante una semana a temperatura ambiente en la sombra, permitiendo una pérdida de humedad uniforme a través de la cara superior de la probeta.

Imagen 16. Preparación de moldes.



Fuente: elaboración propia.

Imagen 17. Armado de probetas.



Fuente: elaboración propia.

Después de transcurrido el tiempo, se desmoldaron las probetas y se repitió este procedimiento con el material del otro paraje, tal como muestra la Imagen 18.

Imagen 18. Desmolde y conservación de probetas.



Fuente: elaboración propia.

De este modo, se obtuvieron tres probetas talladas del Paraje San Bernardo de las Zorras, tres reconstituidas de San Bernardo de las Zorras y tres reconstituidas del Paraje El Rosal. Se identificaron debidamente todas las probetas y se preservaron en profilácticos dentro de una caja hasta la fecha de los ensayos, a fin de garantizar su conservación (Imagen 19).

Imagen 19. Probetas listas para ensayo de compresión simple.

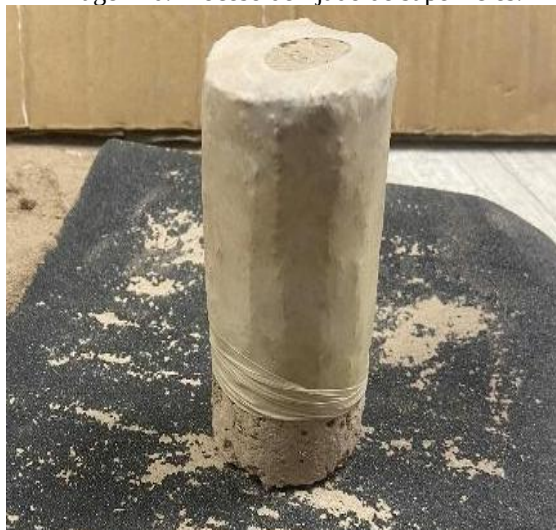


Fuente: elaboración propia.

A continuación, se llevaron las probetas a la empresa TecnoSuelo, quien amablemente se comprometió a realizar los ensayos de compresión simple sin costo alguno.

Previo a los ensayos, la empresa llevó a cabo un meticuloso proceso de lijado en las probetas para garantizar que todas presenten superficies uniformes (Imagen 20). Este lijado se realizó hasta alcanzar las dimensiones establecidas en la hipótesis, donde la altura es el doble del diámetro, expresada en la ecuación (1). Además, se prestó especial atención para asegurar que las caras que posteriormente apoyarían en los cabezales de la máquina, resulten paralelas entre sí. Esta medida es crucial para garantizar que la falla de la probeta ocurra por compresión pura y no por flexo-compresión.

Imagen 20. Proceso de lijado de superficies.

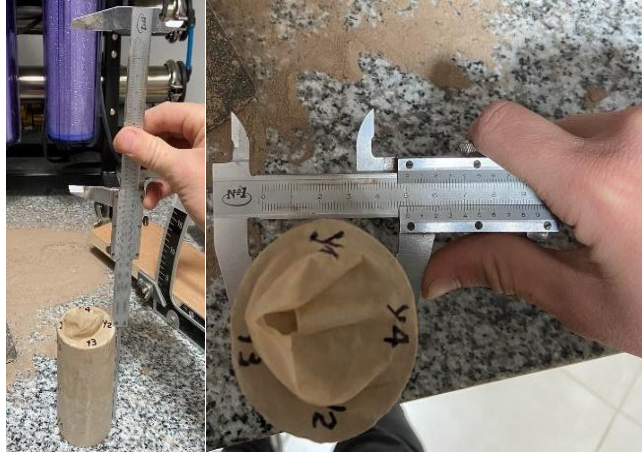


Fuente: elaboración propia.

Tras finalizar el lijado, los operarios procedieron a medir las dimensiones de cada probeta, verificando que todas tengan un diámetro de 3,5 cm y una altura de 7 cm, como así también, la verticalidad en dirección axial. Eso se muestra en la Imagen 21.

Este cuidadoso paso de preparación de muestras asegura una correcta ejecución del ensayo y por lo tanto, permite la obtención de resultados precisos y confiables, que describen adecuadamente el comportamiento elastoplástico del geomaterial en cuestión.

Imagen 21. Medición de dimensiones de probetas.



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se procedió a la ejecución de los ensayos, en el cual participaron varios colaboradores. Se contó con la ayuda de dos operarios, una geóloga y un ingeniero civil.

Imagen 22. Ejecución de ensayos de compresión en empresa Tecnosuelo.



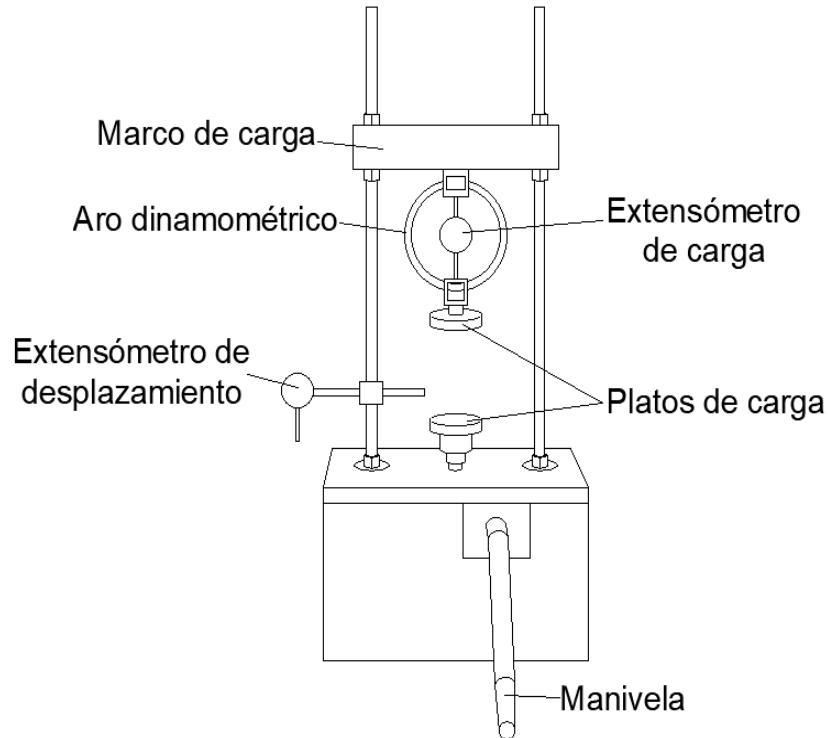
Fuente: elaboración propia.

Los ensayos de compresión simple se realizaron en una prensa mecánica (Imagen 23) y el procedimiento fue el siguiente:

1. Preparación de la máquina y colocación de la probeta: se calibró la máquina y luego se colocó la probeta centrada entre los platos de carga sin hacer uso de rótulas.
2. Aplicación de desplazamientos: girando una manivela, un operario aplicaba desplazamientos sobre la probeta, de manera controlada y continua a una velocidad constante.
3. Lectura de desplazamientos aplicados: dicho operario a su vez, observaba el extensómetro de desplazamiento y cuando detectaba el incremento previamente establecido, le avisaba al otro operario.
4. Lectura de cargas: el segundo operario observaba el extensómetro de carga y en el instante en que escuchaba la indicación, leía el valor de carga.

5. Registro de datos: la geóloga anotaba las lecturas dictadas, mientras el ingeniero supervisaba todo el procedimiento.
6. Desarrollo de ensayo: los pasos 2 al 5, se repitieron hasta que fallaba la probeta y no podía tomar más carga.
7. Procesamiento de datos: con estos datos la empresa generó los gráficos tensión-desplazamiento y entregó el informe adjunto en 11.4. ANEXO IV.

Imagen 23. Diagrama de máquina de ensayo de compresión simple.



Fuente: elaboración propia.

Imagen 24. Probetas luego de los ensayos de compresión en empresa Tecnosuelo.



Fuente: elaboración propia.

7. CALIBRACIÓN Y SIMULACIÓN

La calibración del software consiste en hallar por tanteo ciertos parámetros del material, hasta obtener una curva similar a la proporcionada por el ensayo físico. Puesto que la empresa TecnoSuelo entregó unas curvas de tensión-desplazamiento, el software se debe calibrar con los mismos valores, llamando a esas curvas carga-desplazamiento.

Para cada probeta, se debe correr una sola vez el mallador y cuantas veces sean necesarias el simulador, hasta obtener curvas aceptables. Se simularon un total de ocho probetas, ya que, en el ensayo físico de la cuarta probeta (reconstituida de San Bernardo de las Zorras), la máquina presentó una falla y no se obtuvo un resultado válido.

Para generar la malla, se requirieron los datos presentados en la Imagen 25. Para cada probeta, la única variable modificada fue la carga última de resistencia, ingresando la resistencia última a compresión obtenida en los ensayos físicos.

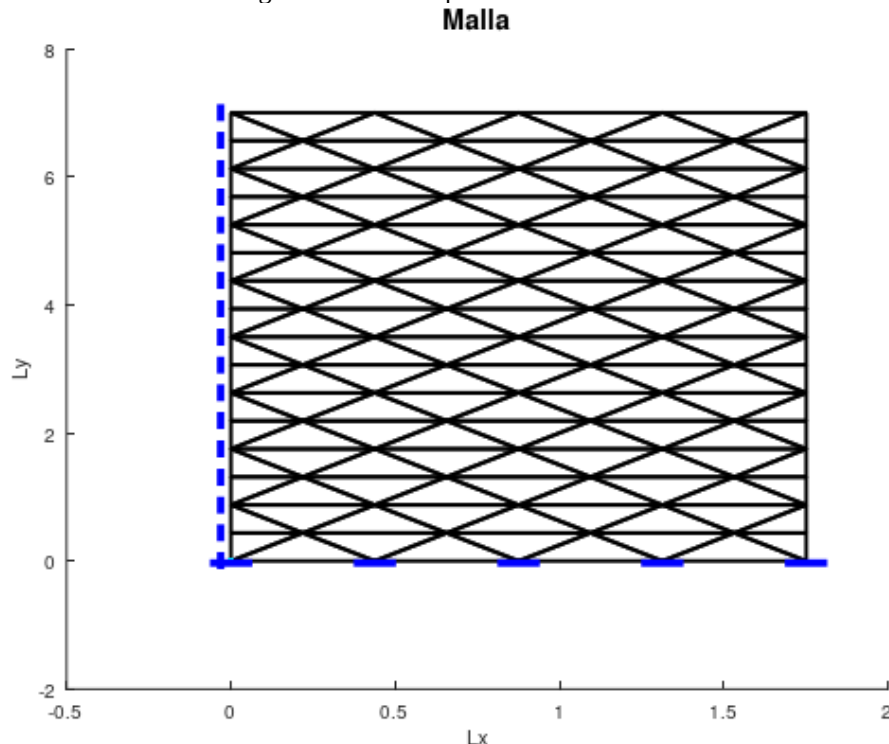
Imagen 25. Ingreso de datos del mallador.

```
Digite el diametro de la probeta [cm]: 3.5
Digite la altura de la probeta [cm]: 7
Digite la cantidad de elementos que desea tener en sentido radial: 4
Digite R para un mallador rectangular o T para uno triangular (o S salida): T
Digite la carga ultima de resistencia [kg/cm2]: |
```

Fuente: interfaz del software del mallador.

Es decir, en todas las simulaciones se utilizó la misma geometría, constituida por elementos de tres nodos, como se muestra en la Imagen 26:

Imagen 26. Malla empleada en simulaciones.



Fuente: resultado del software.

Y con cada malla, se generaron los archivos de datos mencionados en el Cuadro 1 del apartado 5. DESARROLLO DEL SOFTWARE.

Luego se trabaja en el software del simulador y se debe especificar la cantidad de incrementos de carga que se desean efectuar. Contemplando que a medida que aumentan los

incrementos, mejoran las aproximaciones, pero a su vez aumenta el tiempo requerido; en este proyecto se decidió adoptar el siguiente valor:

$$N_{increm} = 100 \quad (60)$$

En el Cuadro 2 se presentan los ocho parámetros del material requeridos, y a continuación se detalla la obtención de cada uno.

Cuadro 2. Parámetros del material.

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 7	Columna 8
Módulo de elasticidad E (kg/cm ²)	Coefficiente de Poisson μ	Peso específico γ (kg/cm ³)	Resistencia a compresión f_c (kg/cm ²)	Resistencia a tracción f_t (kg/cm ²)	Parámetro de potencial plástico η	Parámetro de endurecimiento k	Radio de la probeta r (cm)

Fuente: elaboración propia.

Módulo de elasticidad: se adopta un valor en función de datos teóricos (Tabla 3. del 11.3. ANEXO III) extraídos de GeoStru, una empresa que desarrolla y distribuye software en ámbitos de ingeniería, geología y geotécnica. En particular, debido a la similitud con el geomaterial analizado, se consideran los datos de una arcilla arenosa y se define el siguiente rango para el módulo elástico:

$$E = (255 - 2550) \quad (61)$$

Coefficiente de Poisson: también se considera una arcilla arenosa y se asume este valor en base a los datos teóricos de GeoStru, especificados en la Tabla 4. del 11.3. ANEXO III.

$$\mu = (0.2 - 0.3) \quad (62)$$

Peso específico: por hipótesis de trabajo, se desprecia el peso propio, por lo tanto, el peso específico se considera nulo.

Resistencia a la compresión: se emplean los valores de resistencia obtenidos en los ensayos físicos, los cuales pueden verificarse en informe adjuntado en el 11.4. ANEXO IV.

Resistencia a la tracción: dado que no se realizaron ensayos físicos para determinar este valor, se lo estima como un porcentaje de la resistencia a compresión. Esto se justifica en el hecho de que los materiales frágiles tienden a fallar primero por tracción, por lo que su resistencia a tracción es necesariamente menor. Esta relación se define mediante la siguiente ecuación:

$$f_t = 0.40 * f_c \quad (63)$$

Parámetro de potencial plástico: el parámetro puede variar entre $0 \leq \eta < 1$, si se trata de una plasticidad no asociada y $\eta = 1$ cuando es asociada. Los materiales elastoplásticos presentan un comportamiento no asociado, por lo que, el valor del parámetro resultó cercano a cero.

Parámetro de endurecimiento: también fue determinado mediante tanteo, asumiendo un valor elevado.

Radio de la probeta: queda establecido por el usuario del software en función de las dimensiones de la probeta y juega un rol fundamental en la geometría del modelo y en los cálculos asociados.

Todos los parámetros obtenidos deben ser cuidadosamente introducidos en el programa. Cada fila representa los parámetros de una probeta, mientras que las columnas responden al orden del Cuadro 2. El código lee únicamente la primera fila de este archivo, por lo que,

ubicamos la base de datos de las probetas a partir de la tercera fila. Para estudiar una probeta, se debe copiar su fila de parámetros y pegarla en la primera fila. Esto puede apreciarse en la Imagen 27:

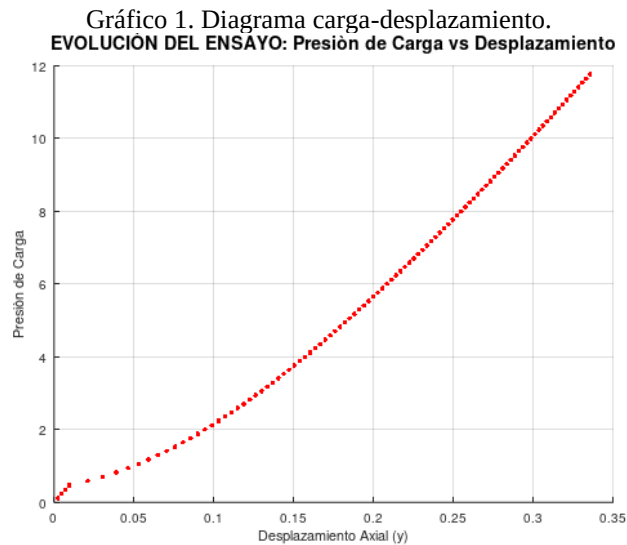
Imagen 27. Parámetros de materiales de software.

1	Aquí se copia y pega la fila de datos de la probeta que se desee analizar									
2										
3	369	0.3	0	11.76	4.70	0.2	160	1.75		
4	369	0.3	0	12.74	5.10	0.2	160	1.75		
5	420	0.3	0	15.12	6.05	0.2	400	1.75		
6	430	0.3	0	24.31	9.72	0.2	400	1.75		
7	450	0.3	0	25.48	10.19	0.2	440	1.75		
8	369	0.3	0	17.74	7.10	0.2	200	1.75		
9	420	0.3	0	22.15	8.86	0.2	400	1.75		
10	369	0.3	0	15.66	6.26	0.2	140	1.75		

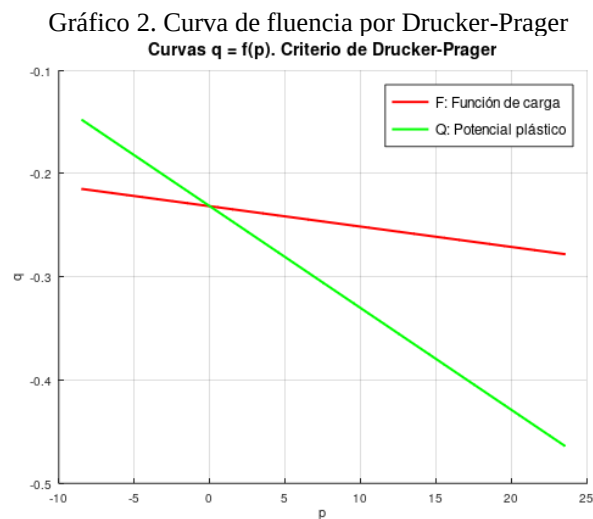
Fuente: archivos del software.

8. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Probeta N.º 1 – Tallada – San Bernardo de Las Zorras



Fuente: resultado del software.



Fuente: resultado del software.

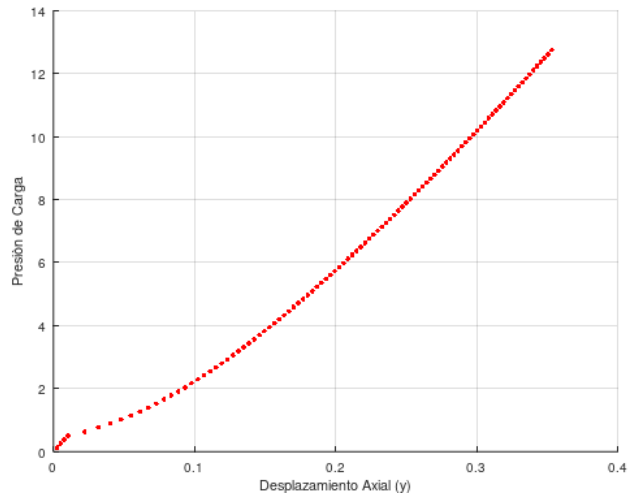
Referencia: p : primer invariante. q : raíz cuadrada del segundo invariante.



Fuente: resultado del software.

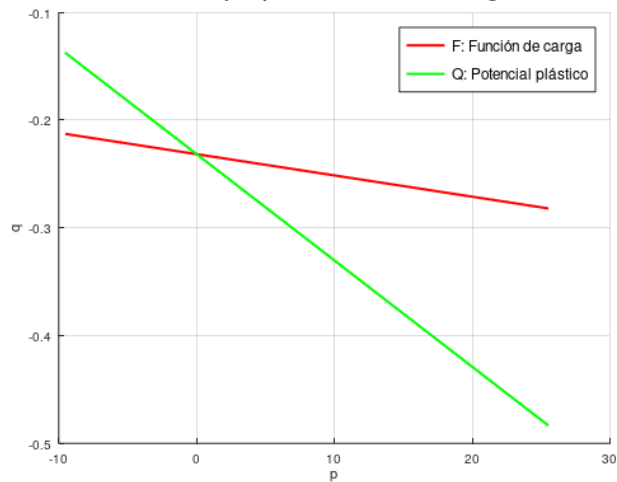
Probeta N.º 2 – Tallada – San Bernardo de Las Zorras

Gráfico 4. Diagrama carga-desplazamiento.
EVOLUCIÓN DEL ENSAYO: Presión de Carga vs Desplazamiento



Fuente: resultado del software.

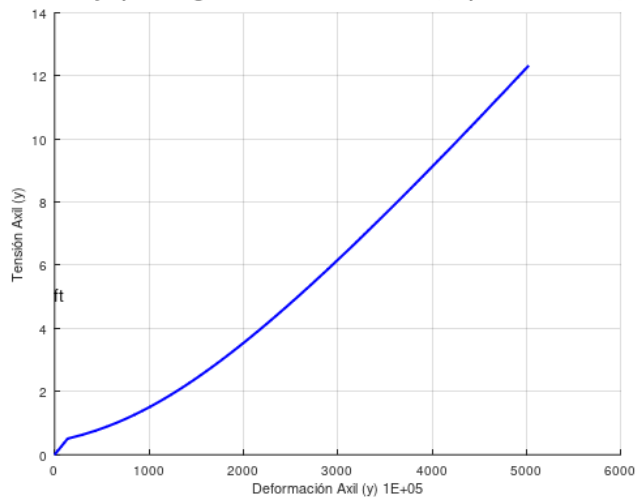
Gráfico 5. Curva de fluencia por Drucker-Prager
Curvas $q = f(p)$. Criterio de Drucker-Prager



Fuente: resultado del software.

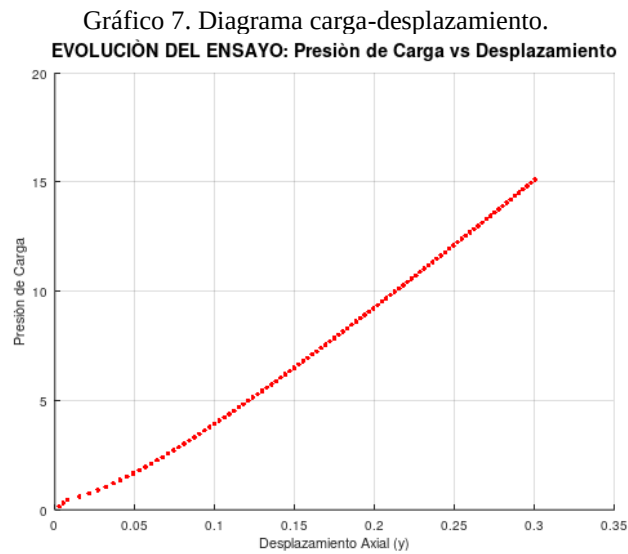
Referencia: p : primer invariante. q : raíz cuadrada del segundo invariante.

Gráfico 6. Diagrama tensión-deformación específica
Ensayo para carga incremental monótona (en punto de control)

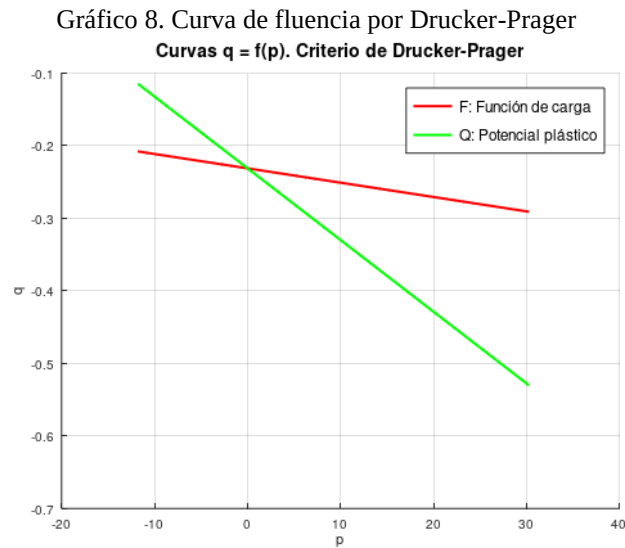


Fuente: resultado del software.

Probeta N.º 3 – Tallada – San Bernardo de Las Zorras

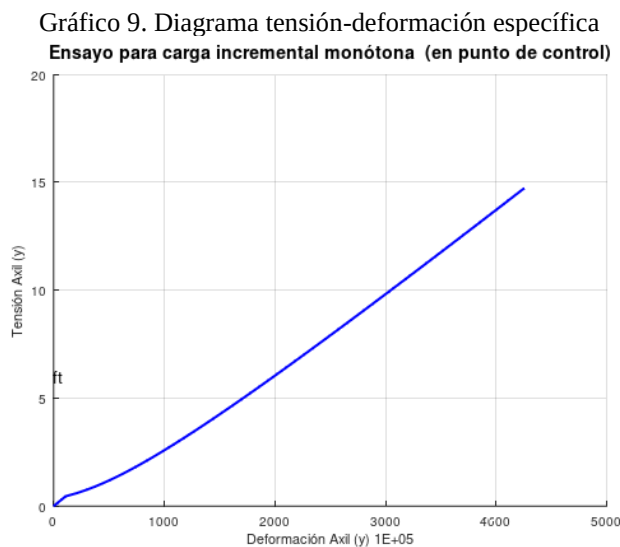


Fuente: resultado del software.



Fuente: resultado del software.

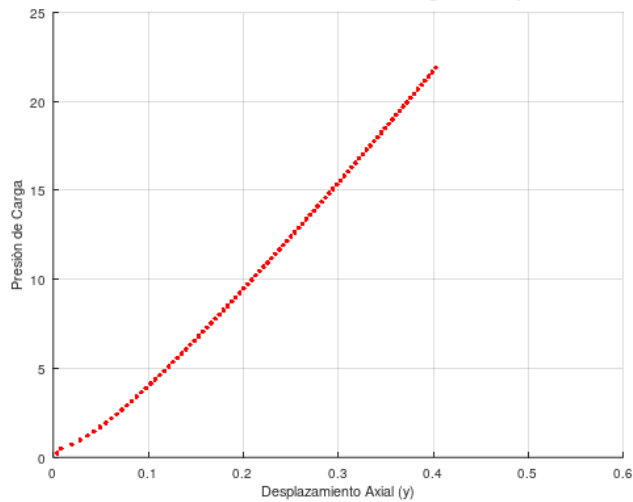
Referencia: p : primer invariante. q : raíz cuadrada del segundo invariante.



Fuente: resultado del software.

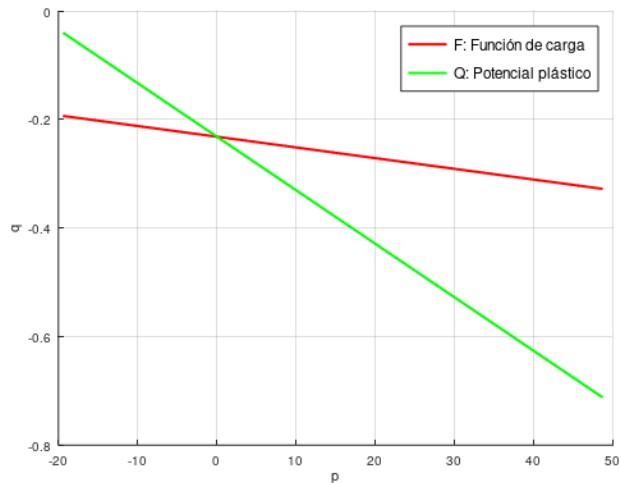
Probeta N.º 5 – Reconstituida – San Bernardo de Las Zorras

Gráfico 10. Diagrama carga-desplazamiento.
EVOLUCIÓN DEL ENSAYO: Presión de Carga vs Desplazamiento



Fuente: resultado del software.

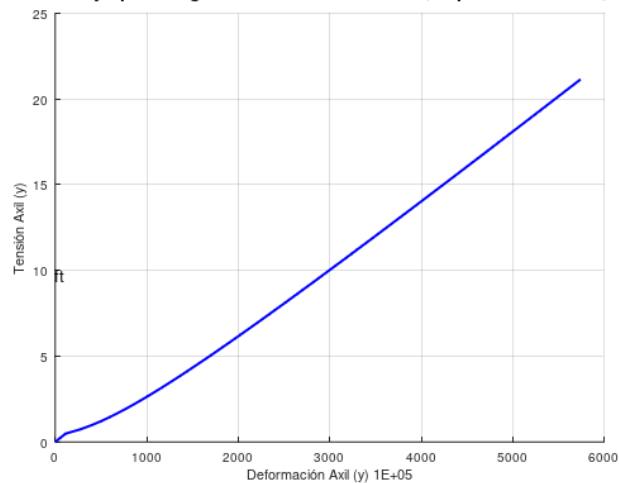
Gráfico 11. Curva de fluencia por Drucker-Prager
Curvas $q = f(p)$. Criterio de Drucker-Prager



Fuente: resultado del software.

Referencia: p : primer invariante. q : raíz cuadrada del segundo invariante.

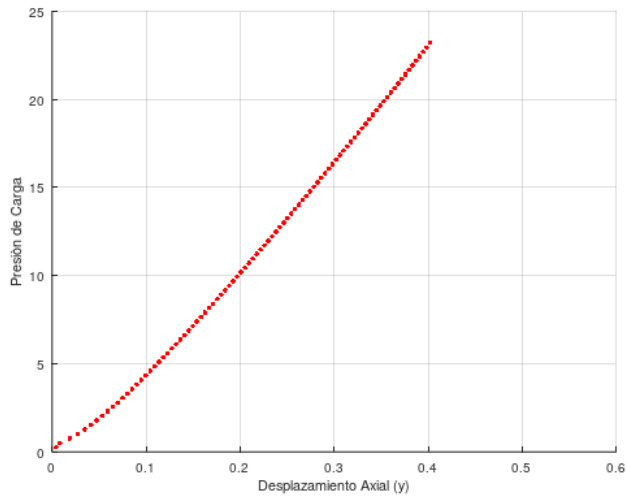
Gráfico 12. Diagrama tensión-deformación específica
Ensayo para carga incremental monótona (en punto de control)



Fuente: resultado del software.

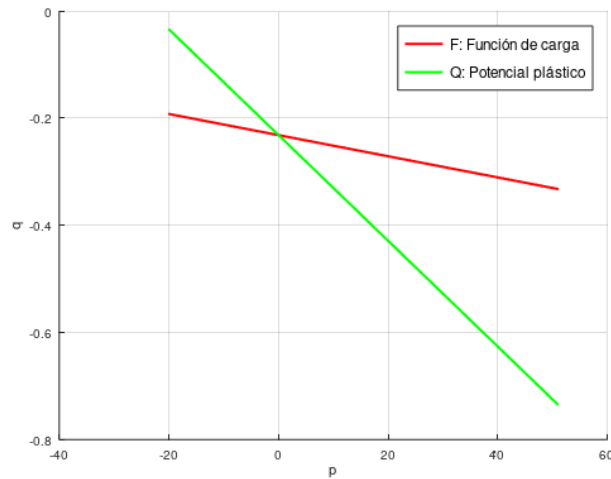
Probeta N.º 6 – Reconstituida – San Bernardo de Las Zorras

Gráfico 13. Diagrama carga-desplazamiento.
EVOLUCIÓN DEL ENSAYO: Presión de Carga vs Desplazamiento



Fuente: resultado del software.

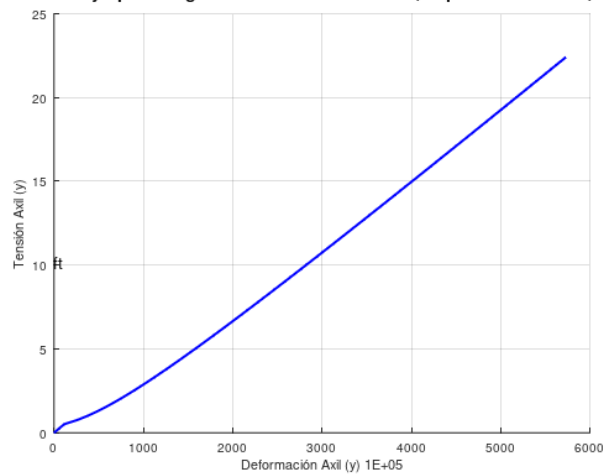
Gráfico 14. Curva de fluencia por Drucker-Prager
Curvas $q = f(p)$. Criterio de Drucker-Prager



Fuente: resultado del software.

Referencia: p : primer invariante. q : raíz cuadrada del segundo invariante.

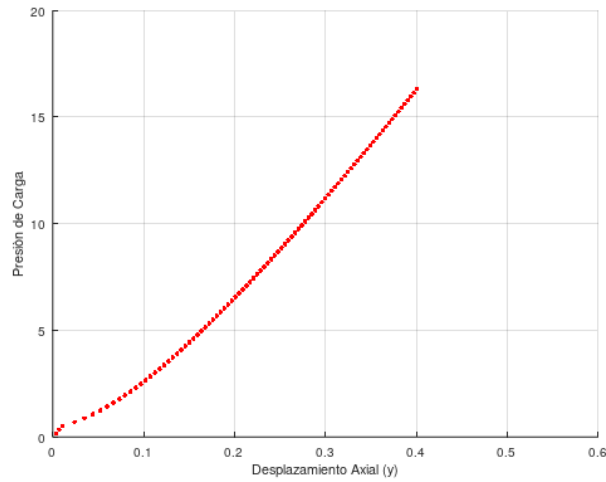
Gráfico 15. Diagrama tensión-deformación específica
Ensayo para carga incremental monótona (en punto de control)



Fuente: resultado del software.

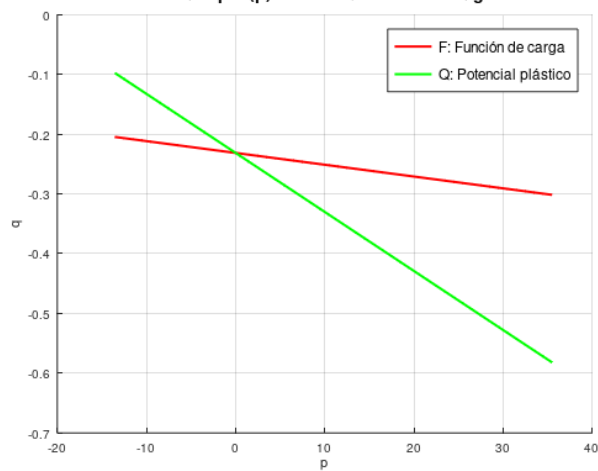
Probeta N.º 7 – Reconstituida – El Rosal

Gráfico 16. Diagrama carga-desplazamiento.
EVOLUCIÓN DEL ENSAYO: Presión de Carga vs Desplazamiento



Fuente: resultado del software.

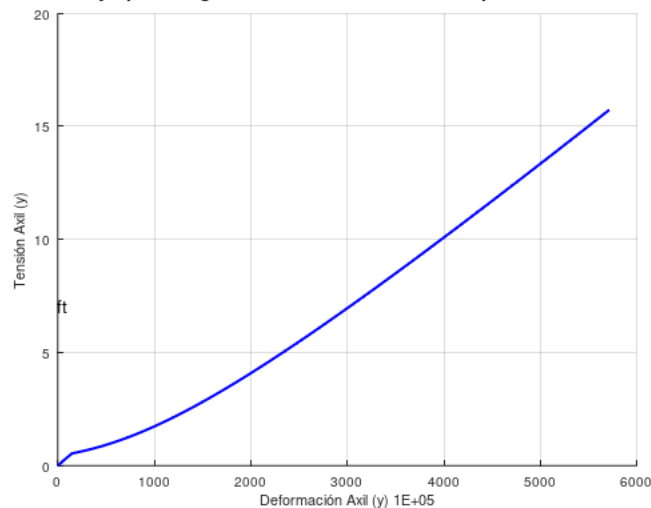
Gráfico 17. Curva de fluencia por Drucker-Prager
Curvas $q = f(p)$. Criterio de Drucker-Prager



Fuente: resultado del software.

Referencia: p : primer invariante. q : raíz cuadrada del segundo invariante.

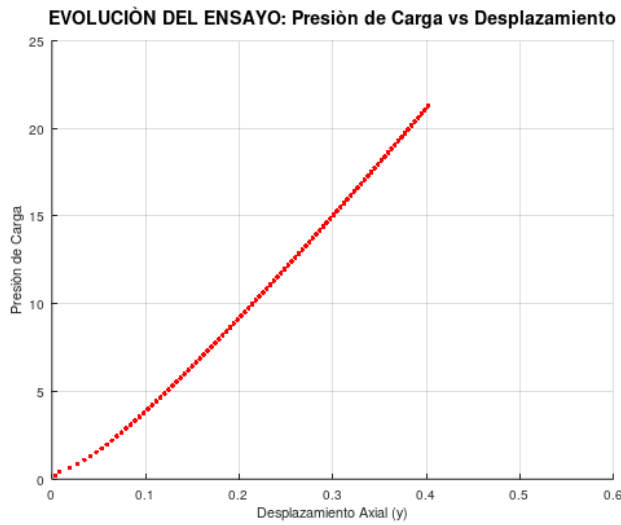
Gráfico 18. Diagrama tensión-deformación específica
Ensayo para carga incremental monótona (en punto de control)



Fuente: resultado del software.

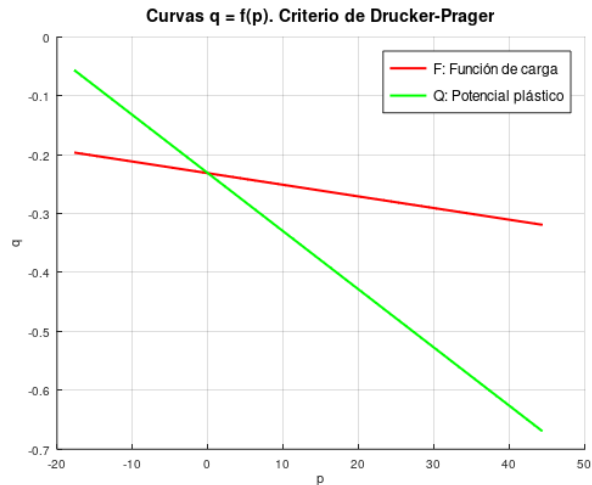
Probeta N.º 8 – Reconstituida – El Rosal

Gráfico 19. Diagrama carga-desplazamiento.



Fuente: resultado del software.

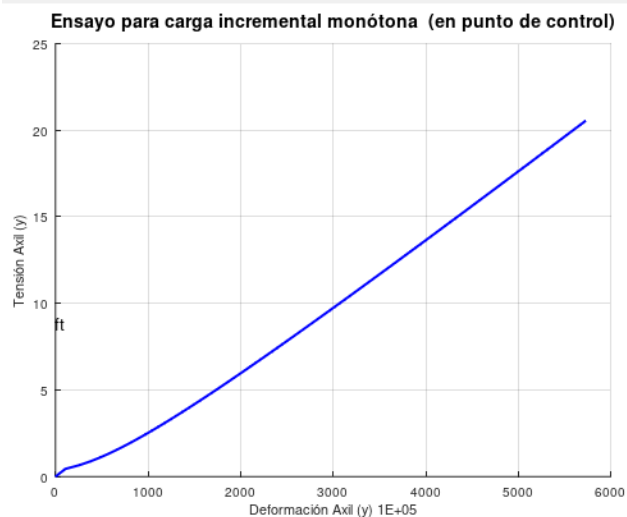
Gráfico 20. Curva de fluencia por Drucker-Prager



Fuente: resultado del software.

Referencia: p : primer invariante. q : raíz cuadrada del segundo invariante.

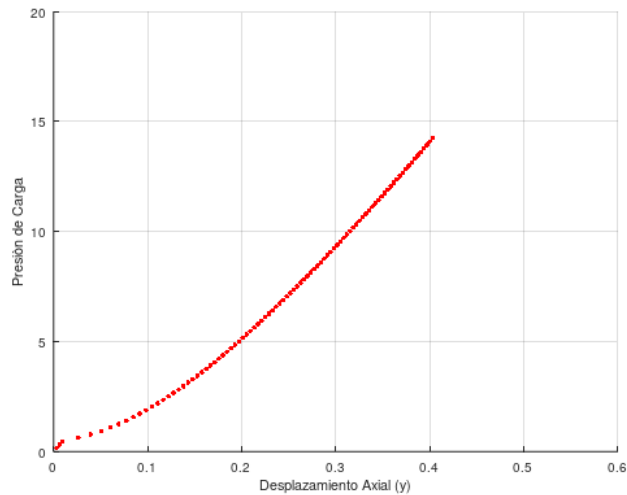
Gráfico 21. Diagrama tensión-deformación específica



Fuente: resultado del software.

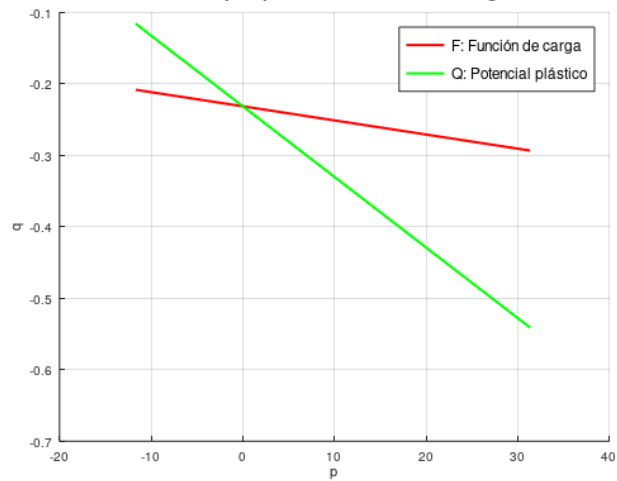
Probeta N.º 9 – Reconstituida – El Rosal

Gráfico 22. Diagrama carga-desplazamiento.
EVOLUCIÓN DEL ENSAYO: Presión de Carga vs Desplazamiento



Fuente: resultado del software.

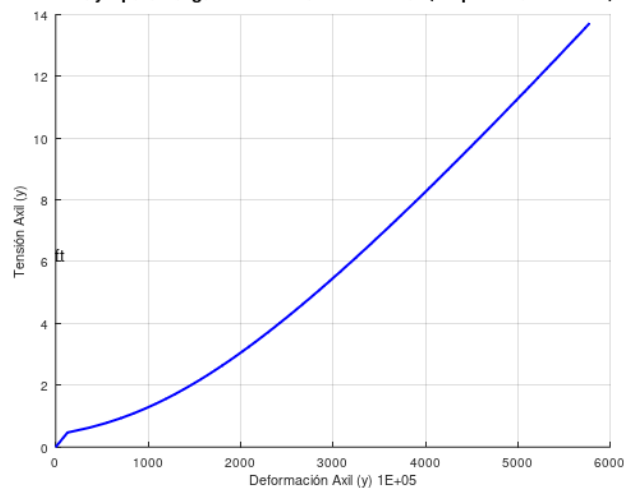
Gráfico 23. Curva de fluencia por Drucker-Prager
Curvas $q = f(p)$. Criterio de Drucker-Prager



Fuente: resultado del software.

Referencia: p : primer invariante. q : raíz cuadrada del segundo invariante.

Gráfico 24. Diagrama tensión-deformación específica
Ensayo para carga incremental monótona (en punto de control)



Fuente: resultado del software.

9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

9.1. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un mallador utilizado en el Método de Elementos Finitos, programado en lenguaje C++ mediante el software DEV C++, permitiendo la generación automática de archivos de datos. Además, se modificó el código original del ingeniero Fernando Albarracín, ajustándolo para el estudio de sólidos de revolución en lenguaje interpretado de GNU Octave, logrando un simulador del ensayo físico de compresión simple.

En cuanto a la experimentación física, se fabricaron probetas de adobe, tanto talladas como reconstituidas, a partir de ladrillos provenientes de la Quebrada del Toro, Salta. Posteriormente, se realizaron los ensayos de compresión simple, obteniendo los correspondientes diagramas carga-desplazamiento. Estos resultados experimentales fueron fundamentales para la calibración del modelo constitutivo Drucker-Prager, permitiendo ajustar los parámetros del material y evaluar su comportamiento mecánico bajo carga.

La comparación entre las curvas obtenidas por los ensayos físicos y por las simulaciones numéricas, mostró una correlación satisfactoria en las tendencias generales. Esto indica que la metodología aplicada logra representar de manera adecuada el comportamiento del material analizado, proporcionando diagramas tensión-deformación específica aceptables. De esta manera se define el software como la base de una herramienta útil para futuros estudios sobre geomateriales y posibles aplicaciones en el análisis estructural. Los resultados muestran un comportamiento característico de materiales elastoplásticos, se observa una fase inicial muy corta de deformación aparentemente elástica, seguida de una zona de plastificación con endurecimiento. Y también se evidencia la variabilidad de la resistencia de las probetas, lo cual era esperable debido a la heterogeneidad de composición de los geomateriales.

Se concluye el trabajo afirmando el cumplimiento del objetivo, desarrollar una herramienta accesible y práctica que proporcione resultados confiables. Esta solución no solo ahorra tiempo y recursos, sino que también ofrece flexibilidad para probar distintas condiciones del material.

Con el objetivo de fomentar el uso del simulador y futuras versiones mejoradas del mismo, se deja a disposición el código en un archivo Google Drive. Se puede acceder a través del siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/16qyaO-kDxhLkJigos6vdy2VQZc3Hrvds?usp=sharing>

O bien, escaneando el siguiente código:



Por el momento, puesto que está simulador está en período de prueba, se recomienda usarlo exclusivamente en ámbito académico.

9.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Una oportunidad a mejorar del simulador es la interfaz con el usuario. Se propone crear una, donde el software pida los datos requeridos para que el usuario no deba buscarlos dentro del algoritmo y modificarlos manualmente. Una opción sería utilizar el software DEV C++, donde se trabaja en lenguaje C++. El mallador del proyecto se desarrolló en el mismo, por lo cual podrían unificarse ambos softwares y además solucionar la situación de la interfaz

Un eje importante no abordado en este proyecto son los elementos constitutivos de los mampuestos de adobe utilizados y su dosificación, debido a que son fabricados de manera artesanal por constructores locales. No disponemos de datos como el límite líquido, límite plástico o contenido de humedad, lo cual impacta en la representatividad y normalización de los resultados obtenidos. En consecuencia, una futura línea de trabajo podría centrarse en realizar estudios más controlados en laboratorio, utilizando geomateriales cuya composición sea previamente conocida. Esto permitiría obtener resultados más precisos y extrapolables a otros contextos.

Otra recomendación sería explorar la posibilidad de desarrollar normas técnicas específicas para los geomateriales locales. Esto facilitaría tanto su análisis como su incorporación en prácticas constructivas más estandarizadas, promoviendo la construcción sostenible y segura en regiones rurales.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abaqus. (s.f.). Obtenido de <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>
- Ansys. (s.f.). Obtenido de <https://www.ansys.com/>
- Castellanos, C. G. (2023). Estudio simulación esfuerzos en acero AISI/SAE 1045 por medio modelación en SolidWorks. *InGente Americana*.
- Chakrabarty, J. (2006). *Theory of Plasticity*. Oxford: Elsevier.
- Comsol. (s.f.). Obtenido de <https://www.comsol.com/>
- Das, B. M. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica. En B. M. Das, *Fundamentos de ingeniería geotécnica Cuarta edición*. Mexico: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- de M. Teixeira, G. D. (2009). Aplicaciones mecánicas de la ley constitutiva de Drucker Prager. *Engineering Simulation and Scientific Software*, 2. *Engineering Simulation and Scientific Software*.
- de M. Teixeira, G., Del Bianchi da Silva Lima, L. G., & Toro F., J. M. (2009). Aplicaciones mecánicas de la ley constitutiva de Drucker Prager. *Engineering Simulation and Scientific Software*, 2.
- Dubos, A. D. (2020). Relevamiento y análisis de normas jurídicas y técnicas referidas a la construcción con tierra vigentes en la República Argentina. *Red Protierra Argentina*.
- GeoStru. (s.f.). *GeoStru*. Obtenido de https://help.geostru.eu/georock2d/es/database_terreni.htm
- Minke, G. (2008). *Manual de construcción en tierra*. Montevideo: Fin de siglo.
- MSC Marc. (s.f.). Obtenido de <https://hexagon.com/products/marc>
- OpenSees. (s.f.). Obtenido de <https://opensees.berkeley.edu/>
- Zienkiewicz, O. C. (1980). *El método de los elementos finitos*. Barcelona: REVITÉ S. A.

11. ANEXOS

11.1. ANEXO I

Durante el desarrollo del proyecto hicimos uso de diversos recursos, computacionales y físicos, que se detallarán a continuación.

Para efectuar el código necesitamos los siguientes recursos:

- Notebook Lenovo, Intel CORE i7 10TH GEN
- Compilador DEV – C++
- Compilador GNU Octave
- AUTODESK AUTOCAD

Además, para fabricar las probetas y realizar los ensayos físicos, empleamos las siguientes máquinas y herramientas:

- Soldadora ESAB HandyArc 160i
- Amoladora angular de 4-1/2" BLACK+DECKER
- Morsa manual artesanal
- Tenaza Biassoni mango largo
- Llave combinada de apriete fijo para tuercas
- Sierra dentada
- Espátula
- Escuadra
- Masa
- Punta
- Bandejas de laboratorio grandes y chicas
- Pinzas
- Calibre
- Máquina de ensayo de compresión (coef. del aro = 1)

Y los siguientes materiales:

- Electrodo 6013 punta azul x 2mm
- Disco de corte de 4-1/2"
- Caño estructural $\varnothing 2''$ x 2mm
- Chapa negra cal. 20
- Bulón hexagonal
- Tuerca hexagonal
- Alambre negro cal. 16
- Mampuestos de adobe de La Quebrada del Toro
- Bolsas impermeables
- Algodón
- Aceite de automóviles quemado
- Preservativos
- Lija
- Caja de cartón
- Cinta de papel
- Blook de notas
- Lapicera

11.2. ANEXO II

Cuadro 1. Comparación entre estado plano de tensiones y deformaciones, y análisis en sólidos de revolución.

Estado plano de tensiones y deformaciones	Análisis en sólidos de revolución
$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \{u \ v\}$	$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \end{Bmatrix} = L * u$
$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$	$B_i = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \\ \frac{1}{r} * N_i & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial r} \end{bmatrix}$
$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$	$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix}$
$D = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} * \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{(1-\mu)} & 0 \\ & 1 & 0 \\ Sim. & & \frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)} \end{bmatrix}$	$D = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} * \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{(1-\mu)} & \frac{\mu}{(1-\mu)} & 0 \\ & 1 & \frac{\mu}{(1-\mu)} & 0 \\ Sim. & & 1 & 0 \\ & & & \frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)} \end{bmatrix}$
$K_{ij}^e = \int B_i^T D B_j t \, dx \, dy$	$K_{ij}^e = 2\pi \int B_i^T D B_j r \, dr \, dz$
$\bar{X} \ ; \ \bar{Y}$	$2\pi r \bar{R} \ ; \ 2\pi r \bar{Z}$

Fuente: elaboración propia.

11.3. ANEXO III

Tabla 1. Ángulo de fricción en grados.

Suelo	Valor
Gravas compactas	35
Gravas sueltas	34 - 35
Arena compacta	35 - 45
Arena suelta	25 - 35
Marga arenosa	22 - 29
Marga grasa	16 - 22
Arcilla grasa	0 - 30
Arcilla arenosa	16 - 28
Limo	20 - 27

Fuente: GeoStru.

Tabla 2. Cohesión en $\frac{kg}{cm^2}$.

Suelo	Valor
Arcilla arenosa	0.2
Arcilla blanda	0.1
Arcilla plástica	0.25
Arcilla semisólida	0.5
Arcilla sólida	1
Arcilla tenaz	0.2
Limo compacto	0.1

Fuente: GeoStru.

Tabla 3. Módulo de elasticidad en $\frac{kg}{cm^2}$.

Suelo	Valor
Arcilla muy blanda	20.4 - 153
Arena blanda	51 - 255
Arcilla media	153 - 510
Arcilla dura	510 - 1020
Arcilla arenosa	255 - 2550
Loess	153 - 612
Arena limosa	51 - 204
Arena suelta	102 - 255
Arena compacta	510 - 816
Pizarra	1530 - 51000
Limo	20.4 - 204
Arena y grava sueltas	510 - 1530
Arena y grava compactas	1020 - 2040

Fuente: GeoStru.

Tabla 4. Coeficiente de Poisson.

Suelo	Valor
Arcilla saturada	0.4 - 0.5
Arcilla no saturada	0.1 - 0.3
Arcilla arenosa	0.2 - 0.3
Limo	0.3 - 0.35
Arena	0.1 - 1
Arena gravosa	0.3 - 0.4
Loess	0.1 - 0.3

Fuente: GeoStru.

11.4. ANEXO IV

Informe de ensayos de compresión simple efectuados por empresa TecnoSuelo.

REGISTRO DE PLANILLAS

-

ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE

-

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

**COMITENTE: Ing. CANDELARIA
CARMINATTI**

-

SEPTIEMBRE – 2024

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

DATOS DE LA MUESTRA

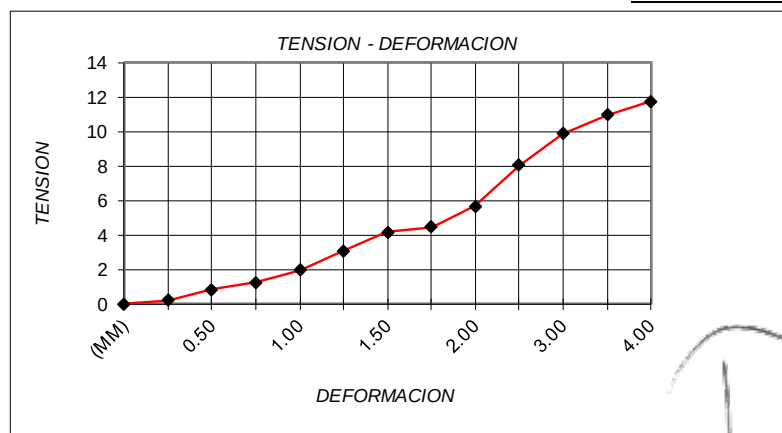
MUESTRA N°: 1

PROBETA TALLADA DE SAN BERNARDO DE LAS ZORRAS

DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm2): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFOMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM2)	(KG/CM2)
0.25	2.00	2.00	9.66	0.21
0.50	8.00	8.00	9.69	0.83
0.75	12.00	12.00	9.73	1.23
1.00	19.00	19.00	9.76	1.95
1.25	30.00	30.00	9.80	3.06
1.50	41.00	41.00	9.83	4.17
1.75	44.00	44.00	9.87	4.46
2.00	56.00	56.00	9.90	5.65
2.50	80.00	80.00	9.98	8.02
3.00	99.00	99.00	10.05	9.85
3.50	111.00	111.00	10.13	10.96
4.00	120.00	120.00	10.20	11.76
4.50			10.28	
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

$q_u = 11.76$



$C_u = q_u/2 = 5.88 \text{ Kg / cm}^2$

[Signature]
ING. OSCAR A. ORELLANA
TECNOSUELO

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

DATOS DE LA MUESTRA

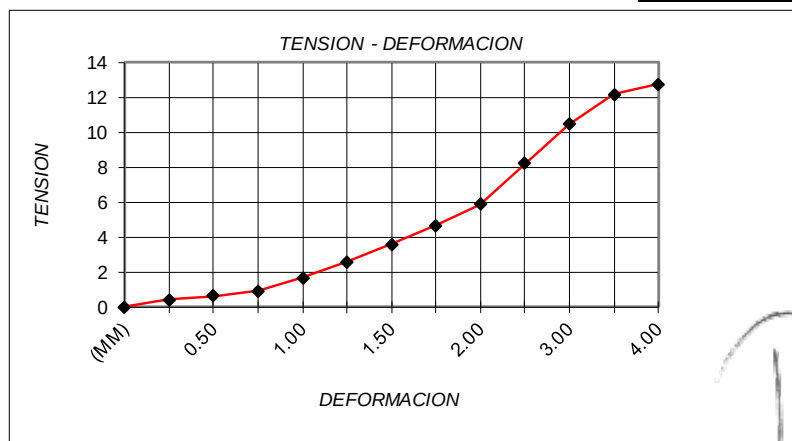
MUESTRA N°: 2

PROBETA TALLADA DE SAN BERNARDO DE LAS ZORRAS

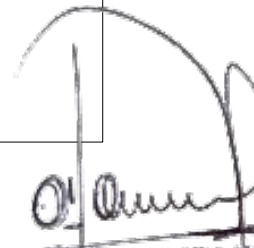
DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm2): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFOMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM2)	(KG/CM2)
0.25	4.00	4.00	9.66	0.41
0.50	6.00	6.00	9.69	0.62
0.75	9.00	9.00	9.73	0.93
1.00	16.00	16.00	9.76	1.64
1.25	25.00	25.00	9.80	2.55
1.50	35.00	35.00	9.83	3.56
1.75	46.00	46.00	9.87	4.66
2.00	58.00	58.00	9.90	5.86
2.50	82.00	82.00	9.98	8.22
3.00	105.00	105.00	10.05	10.45
3.50	123.00	123.00	10.13	12.15
4.00	130.00	130.00	10.20	12.74
4.50			10.28	
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

$q_u = 12.74$



$C_u = q_u/2 = 6.37 \text{ Kg / cm}^2$


Ing. OSCAR A. ORELLANA
TECNOSUELO

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

DATOS DE LA MUESTRA

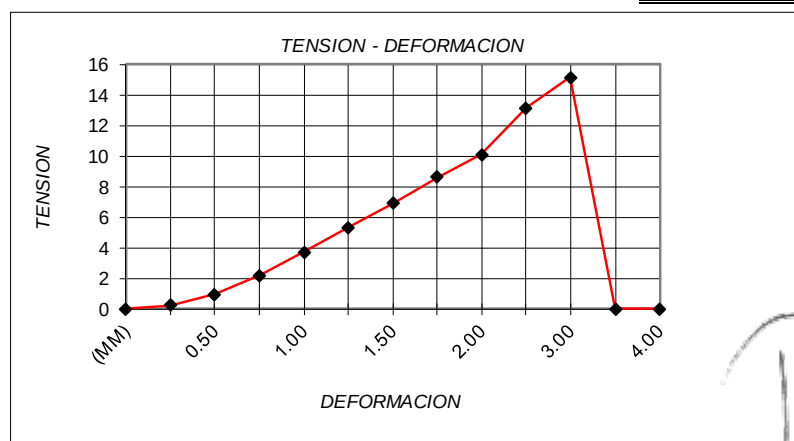
MUESTRA Nº: 3

PROBETA TALLADA DE SAN BERNARDO DE LAS ZORRAS

DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm2): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFORMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM2)	(KG/CM2)
0.25	2.00	2.00	9.66	0.21
0.50	9.00	9.00	9.69	0.93
0.75	21.00	21.00	9.73	2.16
1.00	36.00	36.00	9.76	3.69
1.25	52.00	52.00	9.80	5.31
1.50	68.00	68.00	9.83	6.92
1.75	85.00	85.00	9.87	8.61
2.00	100.00	100.00	9.90	10.10
2.50	131.00	131.00	9.98	13.13
3.00	152.00	152.00	10.05	15.12
3.50			10.13	
4.00			10.20	
4.50			10.28	
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

$q_u = 15.12$



$C_u = q_u/2 = 7.56 \text{ Kg / cm}^2$

[Signature]
Ing. OSCAR A. ORELLANA
TECNOSUELO

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

DATOS DE LA MUESTRA

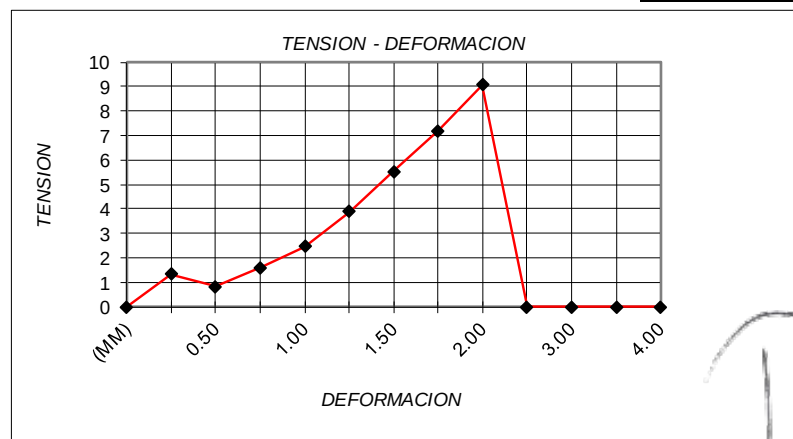
MUESTRA N°: 4

PROBETA RECONSTITUIDA DE SAN BERNARDO DE LAS ZORRAS

DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm2): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFORMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM2)	(KG/CM2)
0.25	13.00	13.00	9.66	1.35
0.50	8.00	8.00	9.69	0.83
0.75	15.50	15.50	9.73	1.59
1.00	24.00	24.00	9.76	2.46
1.25	38.00	38.00	9.80	3.88
1.50	54.50	54.50	9.83	5.54
1.75	71.00	71.00	9.87	7.20
2.00	90.00	90.00	9.90	9.09
2.50			9.98	
3.00			10.05	
3.50			10.13	
4.00			10.20	
4.50			10.28	
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

$q_u = 9.09$



$C_u = q_u/2 = 4.54 \text{ Kg / cm}^2$

[Handwritten signature]
Ing. OSCAR A. ORELLANA
TECNOSUELO

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

DATOS DE LA MUESTRA

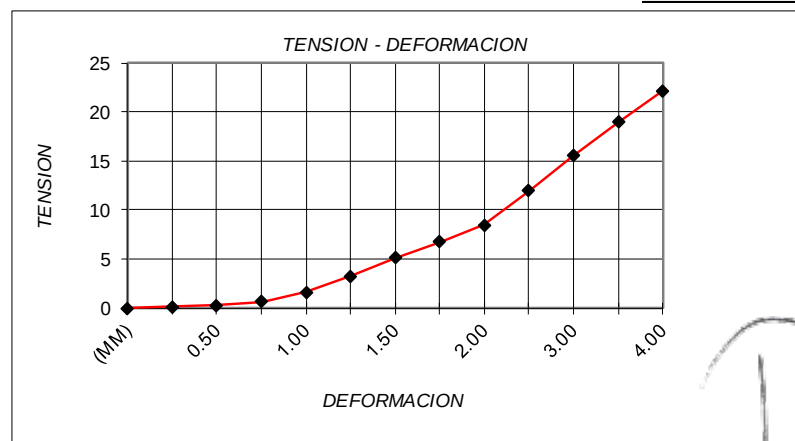
MUESTRA N°: 5

PROBETA RECONSTITUIDA DE SAN BERNARDO DE LAS ZORRAS

DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm2): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFOMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM2)	(KG/CM2)
0.25	1.00	1.00	9.66	0.10
0.50	3.00	3.00	9.69	0.31
0.75	6.00	6.00	9.73	0.62
1.00	16.00	16.00	9.76	1.64
1.25	32.00	32.00	9.80	3.27
1.50	50.00	50.00	9.83	5.09
1.75	67.00	67.00	9.87	6.79
2.00	84.00	84.00	9.90	8.48
2.50	119.00	119.00	9.98	11.93
3.00	156.00	156.00	10.05	15.52
3.50	192.00	192.00	10.13	18.96
4.00	226.00	226.00	10.20	22.15
4.50	250.00	250.00	10.28	24.31
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

$q_u = 24.31$



$C_u = q_u/2 = 12.16 \text{ Kg / cm}^2$

[Handwritten signature]
Ing. OSCAR A. ORELLANA
TECNOSUELO

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

DATOS DE LA MUESTRA

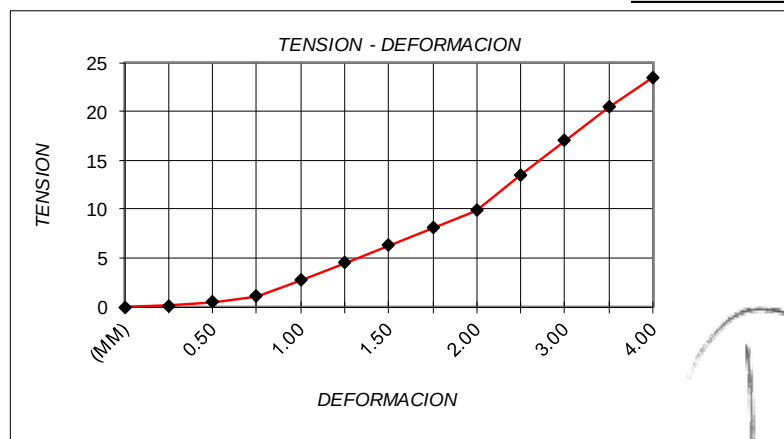
MUESTRA N°: 6

PROBETA RECONSTITUIDA DE SAN BERNARDO DE LAS ZORRAS

DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm²): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFOMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM ²)	(KG/CM ²)
0.25	1.00	1.00	9.66	0.10
0.50	5.00	5.00	9.69	0.52
0.75	11.00	11.00	9.73	1.13
1.00	27.00	27.00	9.76	2.77
1.25	44.00	44.00	9.80	4.49
1.50	62.00	62.00	9.83	6.31
1.75	80.00	80.00	9.87	8.11
2.00	98.00	98.00	9.90	9.89
2.50	135.00	135.00	9.98	13.53
3.00	171.00	171.00	10.05	17.01
3.50	207.00	207.00	10.13	20.44
4.00	240.00	240.00	10.20	23.52
4.50	262.00	262.00	10.28	25.48
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

$q_u = 25.48$



$C_u = q_u/2 = 12.74 \text{ Kg / cm}^2$

[Signature]
Ing. OSCAR A. ORELLANA
ING. TECNOSUELO

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

DATOS DE LA MUESTRA

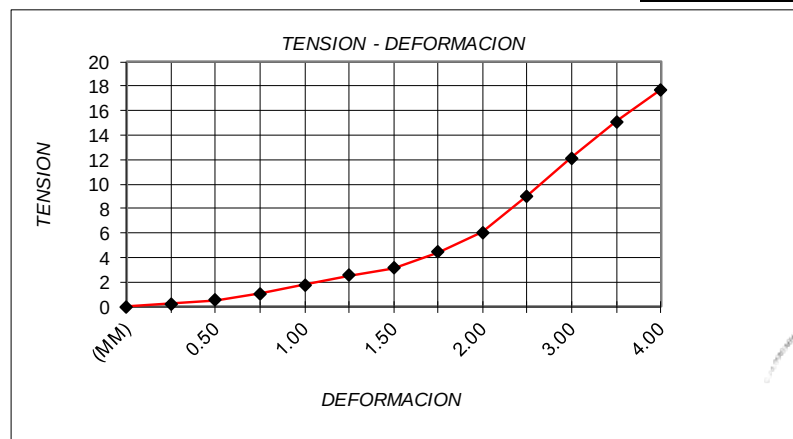
MUESTRA Nº: 7

PROBETA RECONSTITUIDA DE LA COMUNIDAD DEL ROSAL

DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm2): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFOMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM2)	(KG/CM2)
0.25	2.00	2.00	9.66	0.21
0.50	5.00	5.00	9.69	0.52
0.75	10.00	10.00	9.73	1.03
1.00	17.00	17.00	9.76	1.74
1.25	25.00	25.00	9.80	2.55
1.50	31.00	31.00	9.83	3.15
1.75	44.00	44.00	9.87	4.46
2.00	60.00	60.00	9.90	6.06
2.50	90.00	90.00	9.98	9.02
3.00	122.00	122.00	10.05	12.14
3.50	153.00	153.00	10.13	15.11
4.00	181.00	181.00	10.20	17.74
4.50			10.28	
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

$q_u = 17.74$



$C_u = q_u/2 = 8.87 \text{ Kg / cm}^2$

[Handwritten signature]
Ing. OSCAR A. ORELLANA
TECNOSUELO

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

DATOS DE LA MUESTRA

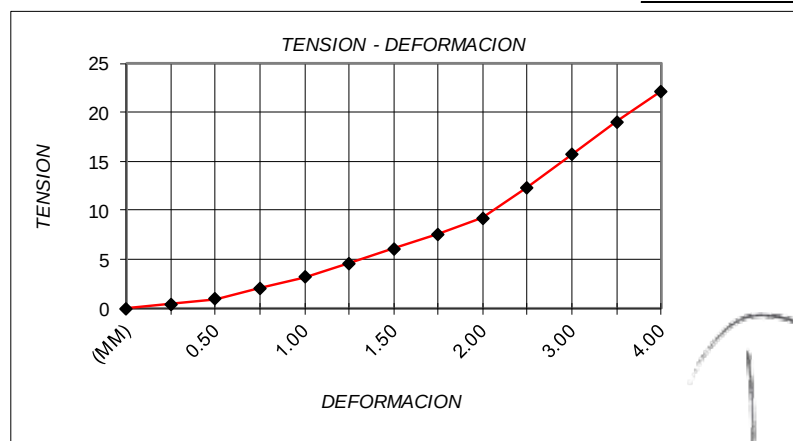
MUESTRA N°: 8

PROBETA RECONSTITUIDA DE LA COMUNIDAD DEL ROSAL

DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm2): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFOMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM2)	(KG/CM2)
0.25	4.00	4.00	9.66	0.41
0.50	9.00	9.00	9.69	0.93
0.75	20.00	20.00	9.73	2.06
1.00	31.00	31.00	9.76	3.18
1.25	45.00	45.00	9.80	4.59
1.50	60.00	60.00	9.83	6.10
1.75	75.00	75.00	9.87	7.60
2.00	91.00	91.00	9.90	9.19
2.50	123.00	123.00	9.98	12.33
3.00	158.00	158.00	10.05	15.72
3.50	193.00	193.00	10.13	19.06
4.00	226.00	226.00	10.20	22.15
4.50			10.28	
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

$q_u = 22.15$



$C_u = q_u/2 = 11.07 \text{ Kg / cm}^2$

[Handwritten signature]
ING. OSCAR A. ORELLANA
TECNOSUELO

ENSAYO COMPRESION SIMPLE

PROYECTO: ANÁLISIS DE GEOMATERIALES

COMITENTE: Ing. CANDELARIA CARMINATTI

FECHA: 26/9/2024

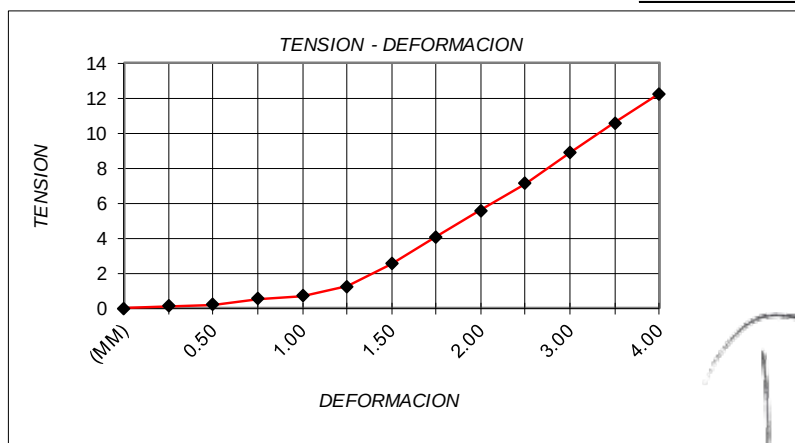
DATOS DE LA MUESTRA

MUESTRA Nº: 9

PROBETA RECONSTITUIDA DE LA COMUNIDAD DEL ROSAL

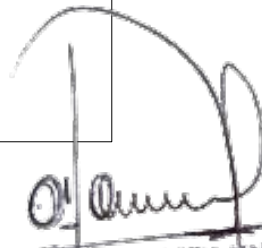
DIAMETRO (cm) 3.5 ALTURA (cm): 70 SECCION (cm2): 9.62
COEF. ARO: 1

DEFOMACION	LECTURA DIAL	CARGA	AREA CORREG	TENSION
(MM)	(DIV)	(KG)	(CM2)	(KG/CM2)
0.25	1.00	1.00	9.66	0.10
0.50	2.00	2.00	9.69	0.21
0.75	5.00	5.00	9.73	0.51
1.00	7.00	7.00	9.76	0.72
1.25	12.00	12.00	9.80	1.22
1.50	25.00	25.00	9.83	2.54
1.75	40.00	40.00	9.87	4.05
2.00	55.00	55.00	9.90	5.55
2.50	71.00	71.00	9.98	7.12
3.00	89.00	89.00	10.05	8.85
3.50	107.00	107.00	10.13	10.57
4.00	125.00	125.00	10.20	12.25
4.50	161.00	161.00	10.28	15.66
5.00			10.36	
5.50			10.44	
6.00			10.52	
6.50			10.61	

 $q_u = 15.66$

 $C_u = q_u/2 = 7.83 \text{ Kg / cm}^2$

Orellana
José Luis

Firmado digitalmente
por Orellana José Luis
Fecha: 2024.09.26
18:26:10 -03'00'


Ing. OSCAR A. ORELLANA
TECNOSUELO