

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MUESTRAS DE SUELO INALTERADO
CON UN NÚCLEO DE EPOXI COMO POSIBLE ALTERNATIVA DE ANCLAJE EN
ESTABILIDAD DE TALUDES**

DANIELA TORO ROJAS

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C I-2015**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MUESTRAS DE SUELO INALTERADO
CON UN NÚCLEO DE EPOXI COMO POSIBLE ALTERNATIVA DE ANCLAJE EN
ESTABILIDAD DE TALUDES**

DANIELA TORO ROJAS

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniera Civil

**Asesor: JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS
Ingeniero Civil, MSc. PhD**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C I-2015**

DEDICATORIO Y AGRADECIMIENTOS

"Nos iluminó tu risa, ella es nuestra escuela más valiosa. Cuántas amarguras infantiles, cuántas lágrimas fueron disueltas ante la magia de tu risa, mamá, sin ella tu no serías tú, y todos estaríamos tristes. Ante tu risa nunca podremos marchitarnos, por ello, es día de fiesta ver tu foto y ver tu risa. Gracias mamá por tu vitalidad y tu fuerza"*, gracias mamá por tu lucha y tu valentía, gracias mamá por hacerme quien soy. Tú madre hermosa eres todo lo que algún día fui, lo que en este momento soy y seguramente la parte más valiosa de lo que seré. Tú, mami divina, eres el ser más importante en mí, eres una guerrera de luz, una luchadora inalcanzable, un modelo insuperable. Como mujer y madre hiciste que la tierra temblara y el mundo (esa diminuta parte que era toda tu existencia) cambiara para siempre. Te abrazo en la distancia, te llevo en el alma y en esa parte mía que siempre será tuya pero que me hace atesorarte con más fuerza a cada minuto. Por ti y para ti.
Siempre.
*CP

Debo empezar dando las gracias a mi mamá Martha por todo lo que significa que sea mi madre. A mi hermana Ana María por su implícita compañía y porque sé que es mi hogar en donde quiera que esté. A Cristian por su eterna paciencia, apoyo incondicional y total credibilidad en mí.

Ustedes tres son lo más importante.

A Juan Carlos Ruge y Catalina Gómez por guiarme en este proyecto, por despertar mi interés genuino y apasionado por la geotecnia y por convertirse en mucho más que profesores de universidad, ahora sé que son maestros en mi vida, amigos y colegas.

A Claudia Murcia, una madre y un ángel en la tierra. Sin ella, esto no existiría.

A todos los profesores de la Universidad Piloto y en especial a Daniella Rodríguez.

A Sindy Ramírez, mi amiga e incondicional compañera en todos estos años.

A Simona, ella siempre estará presente

Al personal del laboratorio de la Universidad Piloto y la Universidad Católica por su disposición.

Y a todos los que directa o indirectamente hicieron posible este trabajo, un maravilloso punto final para mi pregrado.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	13
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
4. OBJETIVOS.....	15
4.1. OBJETIVO GENERAL	15
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
5. MARCO REFERENCIAL	16
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	16
5.1.1 Suelo.....	16
5.1.2 Caolín.	16
5.1.3 Resina epoxi.	17
5.1.4 <i>Pull-Out</i>	18
5.1.5 Estabilidad de Taludes.	18
5.2 MARCO TEÓRICO	23
5.2.1 Taludes Reforzados con Materiales Poliméricos.	23
5.2.2 <i>Soil Nailing</i>	24
5.2.3 Anclajes con Polímeros.....	32
6. METODOLOGIA	35
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	37
7.1 CAOLÍN.....	37
7.1.1 Caracterización.....	37
7.2 RESINA	41
7.2.1 Propiedades de los Materiales.....	41
7.2.2 Elaboración de Especímenes.....	43
7.2.3 Ensayos Mecánicos.	50
7.3 SUELO/POLÍMERO	62
7.3.1 Elaboración de Especímenes.....	62
7.3.2 Adaptación Ensayo de <i>Pull-Out</i>	64
7.3.3 Modelación Numérica.....	73

7.3.4 Análisis (Adherencia).....	80
8. DISCUSIONES.....	81
9. CONCLUSIONES.....	83
10. RECOMENDACIONES.....	84
11. REFERENCIAS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Soil Nailing</i> . Fuente: <i>Soil Nailing-Aremedial construction technique to improve natural soil slopes, retaining walls, and embankments quality</i> . (2013)	22
Figura 2 Paso a paso sistema constructivo. Fuente: Byrne, Cotton, Poterfield, Wolschlag, & Ueblcker (1998).....	31
Figura 3 Composición de especímenes (Investigación de anclajes con tendones CFRP). Fuente: <i>Park et al.</i> (2013)	33
Figura 4 Metodología de la investigación.	35
Figura 5 Prueba 1 de resina y fibra.	44
Figura 6 Prueba 2 de resina y fibra.	44
Figura 7 Prueba 3 de resina y fibra.	45
Figura 8 Espécimen de prueba.	46
Figura 9 Catalizador, Carbonato de Calcio, Fibra de vidrio picada y Resina.	47
Figura 10 Molde con mezcla.	48
Figura 11 Especímenes con barras para ensayo de tensión.	48
Figura 12 Ensayo de tensión en especímenes con barras.	49
Figura 13 Especímenes definitivos para ensayos de tensión.	49
Figura 14 Espécimen para ensayo de tensión ajustado en máquina.	51
Figura 15 Espécimen 2 después del ensayo mecánico de tensión.	51
Figura 16 Espécimen 3 después del ensayo mecánico de tensión.	52
Figura 17 Espécimen 4 después del ensayo mecánico de tensión.	53
Figura 18 Espécimen 5 después del ensayo mecánico de tensión.	54
Figura 19 Espécimen 6 después del ensayo mecánico de tensión.	55
Figura 20 Espécimen 1 después del ensayo mecánico de compresión.	57

Figura 21 Espécimen 2 después del ensayo mecánico de compresión.	58
Figura 22 Espécimen 3 después del ensayo mecánico de compresión.	59
Figura 23 Espécimen 4 después del ensayo mecánico de compresión.	60
Figura 24 Espécimen 5 después del ensayo mecánico de compresión.	61
Figura 25 Molde para inyección de resina en el suelo.	63
Figura 26 Conjuntos suelo/resina. Fuente Autora.....	63
Figura 27 Adaptación ensayo de <i>pull-out</i>	65
Figura 28 Conjunto 1 Suelo/Resina después del ensayo.	65
Figura 29 Conjunto 2 Suelo/Resina después del ensayo.	67
Figura 30 Conjunto 3 Suelo/Resina después del ensayo.	68
Figura 31 Conjunto 4 Suelo/Resina después del ensayo.	70
Figura 32 Conjunto 5 Suelo/Resina después del ensayo.	71
Figura 33 Modelo geométrico sección transversal conjunto suelo/resina.	73
Figura 34 Condiciones generales y parámetros para el caolín.	74
Figura 35 Condiciones generales y parámetros para la resina epoxy.	75
Figura 36 Carga para modelación numérica.	76
Figura 37 Malla deformada.	76
Figura 38 Desplazamiento vertical.	77
Figura 39 Tensiones efectivas.	77
Figura 40 Tensiones medias.	78
Figura 41 Puntos plásticos.	78
Figura 42 Deformaciones de corte.	79
Figura 43 Tensiones cortantes en los componentes σ_{xy}	79

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Esfuerzo desviados vs Deformación unitaria probeta 1.	39
Gráfica 2 Esfuerzo desviados vs Deformación unitaria probeta 2.	40
Gráfica 3 Esfuerzo desviados vs Deformación unitaria probeta 3.	40
Gráfica 4 Esfuerzo desviados vs Deformación unitaria probeta 4.	41

Gráfica 5 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 2.	52
Gráfica 6 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 3.	53
Gráfica 7 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 4.	54
Gráfica 8 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 5.	55
Gráfica 9 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 6.	56
Gráfica 10 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 1.	58
Gráfica 11 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 2.	59
Gráfica 12 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 3.	60
Gráfica 13 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 4.	61
Gráfica 14 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 5.	62
Gráfica 15 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 1.	66
Gráfica 16 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 2.	68
Gráfica 17 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 3.	69
Gráfica 18 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 4.	71
Gráfica 19 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 5.	72
Gráfica 20 Adherencia.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad.	37
Tabla 2 Propiedades líquidas resina. Fuente: Ficha técnica fabricante.....	42
Tabla 3 Propiedades físicas resina. Fuente: Ficha técnica fabricante	42
Tabla 4 Propiedades y especificaciones catalizador. Fuente: Ficha técnica fabricante	42
Tabla 5 Especificaciones químicas y físicas carbonato de calcio. Fuente: Ficha técnica proveedor	43
Tabla 6 Composición espécimen de prueba. Fuente. Autora.....	46
Tabla 7 Dimensiones espécimen de prueba. Fuente. Autora	46
Tabla 8 Composición calculada para especímenes de 88,14 cm ³	46
Tabla 9 Composición de especímenes para ensayos de tensión.	50
Tabla 10 Dimensiones de especímenes para ensayos de tensión.	50

Tabla 11 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 2.	51
Tabla 12 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 3.	52
Tabla 13 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 4.	53
Tabla 14 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 5.	54
Tabla 15 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 6.	55
Tabla 16 Composición de especímenes para ensayos de compresión.	56
Tabla 17 Dimensiones de especímenes para ensayos de compresión.	57
Tabla 18 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 1.	57
Tabla 19 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 2.	58
Tabla 20 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 3.	59
Tabla 21 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 4.	60
Tabla 22 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 5.	61
Tabla 23 Dimensiones del conjunto (resina).	64
Tabla 24 Dimensiones del conjunto (caolín).	64
Tabla 25 Carga, Esfuerzo y Deformación Conjunto 1.	66
Tabla 26 Carga, Esfuerzo y Deformación Conjunto 2.	67
Tabla 27 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 3.	69
Tabla 28 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 4.	70
Tabla 29 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 5.	72
Tabla 30 Módulo de elasticidad del caolín.	74
Tabla 31 Cohesión caolín.	74
Tabla 32 Módulo de elasticidad de la resina epoxi.	75

RESUMEN

Estabilizar correctamente los suelos ha sido uno de los principales objetivos de la ingeniería civil a través de los años, pues este material tiene un comportamiento variable y una resistencia muy baja a la tracción y a la flexión. En cualquier problema geotécnico abordado, el fin último es otorgarle al suelo las propiedades que no posee o en las cuales presenta deficiencias mecánicas. La técnica denominada como *soil nailing*, está constituida por anclajes que se encargan de estabilizar taludes y suelos de excavación por medio de barras de acero fijadas con lechadas de cemento, cuya interacción con el suelo circundante se da en toda la longitud de la barra. Sin embargo, otros materiales podrían cumplir la función de este conjunto, como las resinas epóxicas, un material polimérico que se caracteriza, entre otras cosas, por tener un buen comportamiento al ser sometidas a diversas cargas, por lo que en conjunto con el suelo, forman una alternativa diferente a los anclajes tipo *soil nailing* ordinarios. Este trabajo se enfoca entonces, en el análisis del comportamiento de un suelo inalterado (caolín) y su interacción con un núcleo de resina epoxi, con el fin de determinar cuantitativamente a pequeña escala la adherencia en la interfase de estos materiales y así comprobar su capacidad como sistema de estabilización.

Palabras Clave: *Soil nailing*, anclaje, epoxi, interfase suelo-polímero, adherencia

ABSTRACT

Stabilize correctly the soil has been one of the principals objectives in civil engineering through the years, as this material has a variable behavior and a low tensile strength and bending. In any geotechnical problem addressed, the ultimate goal is giving the ground the properties that don't have or in which it have mechanical deficiencies. The technique known as "soil nailing", it's constitute by anchors that are responsible of stabilize slopes and excavation grounds by steel bars fixing with grouting, whose interaction with the surrounding ground occurs throughout the length of the bar. However other materials could fulfill the function of the set, as epoxy resins, a polymeric material characterized among others by good behavior when is subjected to various loads. So that together with the ground constitutes a different alternative for the ordinary soil nailing anchors. This paper focusing then, in the analysis of behavior in an unchanged soil (kaolin) and his interaction with a core of epoxy resin, in order to quantify at small scale the adherence at the interface of these materials and thus verify his capacity as stabilization system.

Key words: Soil nailing, Anchorage, epoxy, interface soil-polymer, adherence

GLOSARIO

Catalizador: Sustancia que acelera diferentes reacciones químicas provocando el proceso de catálisis

CFRP: Carbon fiber reinforced polymer (Polímero reforzado con fibra de carbono)

Interfase: Superficie de separación entre dos fases sucesivas

Modelo Constitutivo: Expresiones matemáticas que describen la relación esfuerzo-deformación de un material

Presión Intersticial: Presión ejercida en los poros o espacios vacíos de una sustancia

Reacción exotérmica: Reacción química que desprende energía en forma de calor o luz

Reticulación: Reacción química por medio de la cual los polímeros se unen en cadenas para formar redes y así alterar las propiedades químicas iniciales del material

Termoestabilidad: Se define como la difícil alteración por acción del calor en ciertos materiales

Tixotropía: Es la propiedad de ciertos fluidos en la que su viscosidad de equilibrio tarda un tiempo en alcanzarse, cuando se presenta un cambio instantáneo en el esfuerzo cortante al cual es sometido

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enfoca en el análisis del comportamiento de un suelo inalterado y su interacción con un núcleo de resina epoxi, con el fin de determinar cuantitativamente la adherencia en la interfase de estos materiales, que en conjunto pueden ser una alternativa a los anclajes *soil nailing* utilizados normalmente en la estabilidad de taludes y suelos de excavación, debido a que la resina posee propiedades que el suelo carece: alta resistencia a la tracción y a la flexión.

Los estudios referentes a la medición de la adherencia de la interfase de este tipo de anclajes son exiguos, ya que la visión principal de las investigaciones tiene por objeto estimar las cargas máximas que puede soportar un anclaje en condiciones ideales, es decir, no se ha examinado la influencia que puede tener el comportamiento de la interfase en el desarrollo de la vida útil de la obra de estabilización. Por este motivo, los antecedentes a esta investigación son escasos y en ocasiones poco concluyentes.

Para poder realizar la medición, se elaborarán especímenes cilíndricos de caolín con núcleos de resina epoxi, los cuales simularán a escala un nuevo tipo de anclajes, en los que además de estimar las cargas máximas soportadas se analizará la respuesta en la zona de la unión, esto a través de la adaptación en el laboratorio del ensayo mecánico de *pull-out*.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

La ingeniería geotécnica, como rama de la ingeniería civil, es la encargada de estudiar las propiedades de los materiales que serán utilizados como elementos en autopistas, vías férreas, puentes, presas, oleoductos, acueductos, edificios y obras civiles en general. Un análisis adecuado generará resultados y medios para encontrar los métodos necesarios que prevean la manera en la que el terreno se desempeña, para ello se deben realizar estudios claves en los suelos y en sus componentes principales, que den respuesta a los problemas generados por el comportamiento e interacción de sus materiales fundamentales.

Uno de estos problemas radica en la efectiva estabilización del suelo, el cual, por ser dependiente del ambiente en el que se encuentra, tiene comportamientos diferentes si está en condición húmeda o seca e inevitablemente va a afectar su ya baja resistencia a la flexión y a la tensión. Es decir, es necesario mejorar las propiedades del suelo con un material que tenga un mejor comportamiento al ser sometido a dichas fuerzas, y de esta manera pueda conformar una interfase que dé soluciones y permita estabilizar cualquier tipo de suelo bajo cualquier condición ambiental.

Algunos polímeros poseen alta resistencia a la tensión y a la flexión y por ello pueden ser un material adecuado para complementar al suelo, así como Gómez *et al.* (2013) lo explican, al realizar los primeros acercamientos a la interacción de la interfase suelo/polímero con una modelación numérica de los ensayos elementales que permitían caracterizar ese conjunto. En esta investigación se obtuvieron los resultados de la simulación, en los que a pesar de no utilizar los modelos constitutivos apropiados, se lograron observar las deformaciones producidas en la interfase después de aplicar un esfuerzo sobre la misma.

Hasta el momento, no se ha realizado una prueba real en la que verdaderamente se observe el comportamiento del conjunto suelo/polímero, por ello, y con el fin de obtener resultados verídicos, se realizarán ensayos mecánicos sobre probetas de suelo inalterado con un núcleo de epoxi y de esta manera, definir la interacción entre los dos materiales.

3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El suelo es un material natural de construcción fundamental en cualquier tipo de obra. Es pertinente mejorar sus características y propiedades para un desarrollo óptimo de cualquier proceso constructivo. Uno de los problemas con este material es su baja resistencia al corte y a la flexión, por lo que se recomienda reforzarlo con otro elemento que tenga un buen comportamiento al someterlo a diversas cargas.

Actualmente se utilizan barras de acero en anclajes tipo *soil nailing* para reforzar taludes o excavaciones. En estos, se asegura la barra al suelo inyectando lechadas de mortero y más recientemente colocando plástico como adherente principal (Invias, 2006).

Las investigaciones se han enfocado en medir la resistencia del anclaje en condiciones ideales con adherencias perfectas a las lechadas, pero se registran muy pocas en las que se detalle el comportamiento de la interfase suelo/lechada o barra/lechada que permitan considerar y analizar unas condiciones desfavorables o diferentes.

De igual manera, los investigadores han realizado pruebas en conjuntos lechada/barra de acero/suelo, pero sin realizar pruebas en interfases de únicamente dos elementos: suelo y polímero. Siendo así:

¿El conjunto suelo/polímero puede ser una alternativa a los anclajes tipo *soil nailing* estándar? Y
¿Es posible medir la adherencia en la interfase suelo polímero mediante un ensayo especializado de laboratorio?

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar, desde abordajes experimentales y numéricos, el comportamiento en la interfase suelo inalterado-polímero mediante la adaptación del ensayo de *pull-out*, para determinar la adherencia entre los dos materiales y definir si esta es una alternativa apropiada para reemplazar los anclajes tipo *soil nailing* en la estabilización de taludes y suelos de excavación.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar el caolín y la resina epóxica a través de ensayos físicos y mecánicos de laboratorio
- Elaborar especímenes cilíndricos de caolín con núcleos de resina epoxi para simular los anclajes tipo *soil nailing*
- Realizar un ensayo de *pull-out* en cada uno de los especímenes, para establecer la carga máxima soportada y el desplazamiento alcanzado a través de curvas de esfuerzo-deformación, lo cual permitirá determinar la adherencia en la interfase suelo/polímero
- Simular numéricamente el comportamiento de los materiales analizados, mediante la modelación del ensayo diseñado en un programa de elementos finitos, con el fin de cuantificar de manera artificial la respuesta aproximada de la interfase suelo/polímero
- Analizar los resultados obtenidos y realizar una aproximación del comportamiento de la interfase para su aplicación en la ingeniería de excavaciones.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO CONCEPTUAL

5.1.1 Suelo.

El suelo lo define Braja M. Das (2001), como el conjunto de agregados de granos minerales, materia orgánica descompuesta, partículas sólidas y los vacíos entre éstas, los cuales son ocupados por líquidos y gases. Es un material que depende de las condiciones ambientales en las que se encuentra debido a que estas determinan la conducta de sus componentes y por ende alteraran su comportamiento. Se considera también, que el suelo es un sistema de fases múltiples, consistente en sólidos, agua y aire dispuestos sin ningún orden y que posee propiedades fundamentales, como lo son la distribución granulométrica de las partículas sólidas, la resistencia al corte, la capacidad de carga, la compresibilidad, la capacidad para drenar el agua y el origen.

5.1.2 Caolín.

El término caolín se utiliza en materiales compuestos principalmente por caolinita, uno de los minerales más abundantes en la corteza terrestre, el cual se produce a partir de yacimientos con una cantidad significativa de este mineral. El caolín también se puede definir como una roca con un porcentaje variable de minerales de la arcilla, de composición igual o próxima a la caolinita y que a su vez es fácil de concentrar por separación de los minerales restantes. Sus principales propiedades físicas son el color, el cual puede ser blanco, gris o amarillo, el aspecto (untuoso al tacto) y otros como el brillo (terroso mate), la densidad (2,40-2,64 g/cm³) y la dureza (2-2,5) (Bartolomé, 1997). Otras propiedades como la flexibilidad y la elevada capacidad de absorción hacen del caolín la materia prima ideal para la elaboración de cerámicas, materiales de construcción y otros productos elaborados. Gracias a su estabilidad y alta resistencia al ataque químico, se emplea también, como material inerte en la elaboración de pinturas, medicinas, pesticidas, abonos y alimentos para animales (Cortés, 2010). A su vez, se utiliza como material

arcilloso en diversas investigaciones, pues su alta permeabilidad y amplia caracterización en la bibliografía hace frecuente su uso en laboratorios (Cimentada, 2009).

5.1.3 Resina epoxi.

Los epoxi son un tipo de resinas poliméricas termoestables, utilizados en materiales compuestos reforzados con fibras y adhesivos. Empero, estas resinas no presentan propiedades técnicas útiles por sí mismas, lo que conlleva a una necesidad de reacción química con otros compuestos que permiten obtener diversas características físicas de la mezcla, como es el caso de los agentes de entrecruzamiento o catalizadores (Coderch, s.f.).

Tiene varias características especiales, entre ellas la alta reticulación que mejora su estabilidad a la temperatura pero reduce su resistencia al impacto (Abraira, 2010); una contracción de curado insignificante; propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas adecuadas (Paz & Rojas, 2007), alta resistencia a la humedad, muy buenas propiedades a la rotura y una resistencia a la temperatura de uso de hasta 180°C (Jara, 2008). Sin embargo, una de las cualidades más importantes de este polímero es su gran capacidad de adherirse a casi cualquier elemento, lo que ocasiona un aumento en el porcentaje de refuerzo y una mejora de las características del material a complementar.

Normalmente, se realizan mezclas de resina con diferentes elementos para alcanzar este desempeño. Los materiales más comunes son los catalizadores que se encargan de endurecer la mezcla, el carbonato de calcio que aumenta el volumen de la misma, acelera la cristalización y disminuye el grado de exotermia que desprende la resina (Sagristà Products, s.f.), y la fibra de vidrio que aprovecha al máximo las características de la resina para mejorar el rendimiento a partir de la asociación.

5.1.4 Pull-Out.

El ensayo de *pull-out* o de arrancamiento mide una carga del mismo nombre, en una probeta consistente en láminas de materiales compuestos unidos mecánicamente (Cabrera, 2011). Fue concebido por B.J. Daniels con el objetivo de medir la resistencia a rasante longitudinal o adherencia entre un concreto y una chapa perfilada de acero constituyente de losas mixtas. En este ensayo, se pretende separar la unión mediante la aplicación de cargas perpendiculares a su plano. Esto se logra con la aplicación de una carga vertical en sentido de la chapa y en el contrario del bloque de concreto, hasta provocar un deslizamiento considerable entre ambos materiales. Los datos registrados son la curva carga vs desplazamiento en donde se aprecia el momento de la falla estructural y de la carga última, lo que a su vez permite determinar la adherencia entre los materiales, comportamiento que en muchas ocasiones es el motivo de fallo de un sistema (Guerrero, 2009).

5.1.5 Estabilidad de Taludes.

Los taludes son un elemento fundamental en el desarrollo de las obras lineales, debido a que determinan la selección del alineamiento y las estructuras más adecuadas para mantener la estabilidad de todo un conjunto. Para ello, es necesario tener en cuenta las características propias de la ladera, como lo son los materiales (suelo, roca o su combinación), las discontinuidades (planos de debilidad y estratificación), la pendiente (inclinación del talud), el recubrimiento de la superficie, la corona y el pie del talud. (Invias, 2006).

La inestabilidad de un talud es provocada entonces por la alteración de esas características y por factores internos y externos. Los internos son las características geológicas, geomorfológicas, geotécnicas y de vegetación que determinan la susceptibilidad de la ladera, mientras que los externos son los elementos considerados como detonantes o contribuyentes, tales como los factores sísmicos, antropogénicos y climáticos (Invias, 2006).

Además de los efectos generados por dichos factores, se considera necesario analizar la dinámica de la zona que condiciona la estabilidad del terreno, que se define como las señales del

movimiento o primeros signos de inestabilidad. Por verbigracia, algunas son: los cambios de forma, el drenaje deficiente de agua superficial, grietas de tracción en carreteras o en los taludes, deformación de estructuras adyacentes, erosión y hundimiento de la subrasante (Invias, 2006).

5.1.5.1 Tipos de Movimiento.

Varnes (citado por Invias, 2006) clasificó los tipos de movimiento en cinco tipos

- **Caídas.** Son movimientos de rocas que se desprenden del talud y van descendiendo.
- **Volcamientos.** Movimiento rotacional en la punta del talud de varias unidades por causa de la gravedad, fuerzas ejercidas o fluidos en las grietas.
- **Deslizamiento.** Es la deformación por corte y desplazamiento a lo largo de la superficie. Pueden ser:
 - Rotacionales o hundimientos
 - Traslacionales
- **Flujos.** Movimiento continuo, cuya velocidad es comparable con la de un líquido viscoso. Existen varios tipos de flujo, entre ellos:
 - Reptación
 - Flujo de detritos y de tierra
 - Flujo de lodo
- **Movimientos Complejos.** Es la combinación de dos tipos de movimientos básicos.

5.1.5.2 Obras de Estabilización.

Para controlar e impedir que el talud falle y ocasione movimientos de roca o tierra, existen obras que se desarrollan de manera tal que al elaborarlas estabilizan el suelo según sus

características y las señales que presenta. Según el tipo se clasifican en cinco grandes grupos (Invias, 2006)

- **Reconformación.** Se enfoca en el cambio de la geometría de la ladera, para soportar fuerzas que impiden que el terreno resista las cargas inducidas removiendo el material que cause la inestabilidad. Las obras más utilizadas son el tendido del talud, las bermas de suelo y roca en el pie del talud, trincheras estabilizantes y el terraceo.
- **Estructuras de Contención.** Se utilizan en obras lineales, pues corrigen las fallas en los taludes aumentando la capacidad de resistencia, para esto y dada su utilidad es necesario que tengan buenos dispositivos de drenaje y cimentaciones que no posibiliten la remoción del suelo de fundación. Los ejemplos más conocidos de este tipo de obra son los diques en tierra o roca, los muros de gaviones, los muros de gravedad en concreto, los muros de encofrado o de cribas, muros de tierra reforzada, muros de concreto reforzado y los muros anclados.
- **Revestimientos de Taludes.** Son utilizadas en taludes con materiales que no garantizan su debida estabilidad. Se realizan revistiendo la zona de riesgo con vegetación o con elementos estructurales, asegurando que no se presenten presiones hidrostáticas detrás de la protección. Existen cuatro grandes tipos de revestimiento:
 - Vegetación
 - Flexibles
 - Rígidos Livianos
 - Rígidos Pesados
- **Estructuras de Retención de Rocas.** Reducen la amenaza de la caída de rocas controlando su dirección y trayectoria. Unas de estas obras son los escudos contra caídas, cunetas, bermas, redes y muros de contención.
- **Anclajes.** Es el conjunto de anclajes o tensores pre-esforzados o no, considerados también como estructura de contención (Invias, 2006). Los anclajes son elementos importantes

que garantizan la estabilidad de diferentes estructuras porque permiten ser utilizados de forma tal, que en una masa de suelo soporten esfuerzos que el material de cimentación principal no soporta por sí mismo. De esta manera, los sistemas creados por anclajes representan una alternativa funcional y económica de estabilización (Ucar, 2002) Según su función, se clasifican en:

- **Anclajes en Roca.** Controlan los desplazamientos en roca
- **Pantallas Ancladas.** Son muros de concretos colocados en la cara del talud. Su capacidad de contención se la otorgan cables o barras pre o postensadas que se colocan en perforaciones realizadas con anterioridad y que se anclan al terreno en la superficie por medio de inyecciones de mortero (Invias, 2006)
- **Pilotes y Caissons.** Solucionan los deslizamientos superficiales cuando se utilizan pilotes hincados en suelos firmes y adecuados que evitan el arrancamiento y la inclinación. En problemas de deslizamientos profundos se utilizan pilotes excavados y caissons trabajando en voladizo (Invias, 2006).
- **Suelo Empernado o Sistema de Clavetaje (*soil nailing*).** Refuerzan el suelo in situ con la intrusión de barras o perfiles de acero hincados o barrenados, inyectados con lechadas de cemento o mortero en toda la longitud. Uno de sus extremos se adhiere a un recubrimiento del talud generalmente hecho con mallas de refuerzo y concreto lanzado. Están formados por *nailings* o pernos, consistentes en barras de acero estructural, normalmente de 1” con separaciones entre 1,0 m y 1,5 m; una pantalla protectora hecha de concreto proyectado reforzada con malla electrosoldada y un cabezal sujeto a la losa (Invias, 2006). El fundamento del *soil nailing* se basa en que el suelo es un material con muy baja resistencia a la tensión, por lo que debe ser reforzado con un elemento que responda efectivamente cuando esté actuando este tipo de carga, por ello se instalan los *nailings*, los cuales son los responsables de soportar los esfuerzos de tensión generados en la masa de suelo (Figuroa, Rodríguez & Zelada, 2011). En la figura

1 se muestra como los *soil nailing* actúan como barrera para soportar el suelo detrás de ésta.

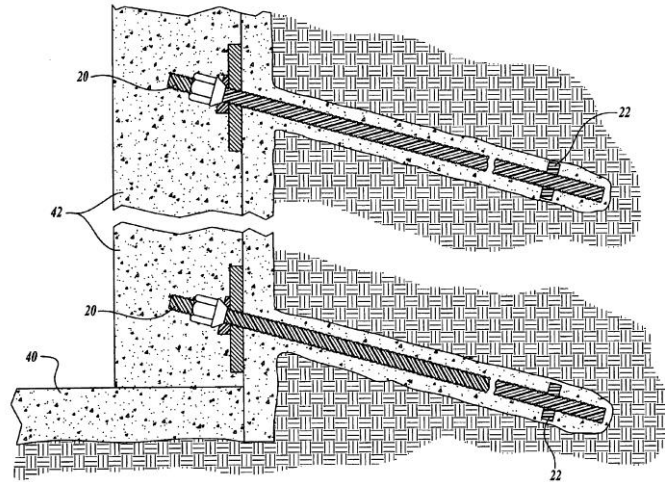


Figura 1 *Soil Nailing*. Fuente: *Soil Nailing-A remedial construction technique to improve natural soil slopes, retaining walls, and embankments quality.* (2013)

5.2 MARCO TEÓRICO

5.2.1 Taludes Reforzados con Materiales Poliméricos.

Los polímeros han sido uno de los materiales más utilizados para reforzar suelos en elementos estructurales como las capas de pavimento y los taludes, bajo presentaciones de geotextiles tejidos, cuadrículas dibujadas, correas hechas a partir de fibras protegidas por un revestimiento exterior, etc., las cuales brindan un apoyo sustancial a las fuerzas por tracción directa. El uso de estos materiales permite formar estructuras impermeables al agua. Ciertas resinas sintéticas aumentan la resistencia del suelo incrementando su cohesión y en algunos casos la resistencia al esfuerzo cortante se reduce de tal manera que la compactación mejora de forma significativa, convirtiendo el polímero en un agente que favorece este proceso, en conjunto con su ya conocida capacidad para estabilizar (López, Hernández, Horta, Coronado & Castaño, 2010). Actualmente se proponen nuevas técnicas de construcción que utilizan principalmente productos geosintéticos fabricados a partir de polímeros. Estas técnicas permiten adaptar cualquier tipo de suelo a través de una mejora o modificación de sus propiedades actuales, con el fin de habilitarlo a la infraestructura que se desee (Morales, 2008).

Todo esto fue analizado por Jewell & Greenwood (1988) cuando seleccionaron las propiedades de los materiales y los factores de seguridad para el diseño de laderas empinadas reforzadas con polímeros. En este estudio se utilizó un método en el que se separaban las fuerzas mecánicas requeridas para el equilibrio que dependían del suelo, y las fuerzas puestas a disposición por la inclusión de capas de refuerzo. Para ello se tuvieron en cuenta conceptos de estado límite aceptados en ingeniería geotécnica que se adoptan para el cálculo de las fuerzas requeridas en los diseños.

Jewell & Greenwood (1988) se enfocaron, en primer lugar, en la importancia del tiempo y de la temperatura de diseño para el refuerzo de polímero. En segundo lugar, en distinguir las propiedades de referencia del material suministrado y las propiedades esperadas de la armadura en el suelo al final de la vida de diseño, cuando ha sido objeto de daño mecánico y ha estado en

contacto con el medio ambiente. Y en tercer lugar en determinar las propiedades a largo plazo. A su vez, hubo una atención central en el cálculo de la fuerza permisible en el refuerzo a disposición de mantener el equilibrio, el número y la posición de la seguridad requerida, los márgenes para el método propuesto y las magnitudes para ellos. No obstante sugirieron siempre que fue posible, valores sobre la base de los conocimientos existentes.

Sin embargo, existe una incertidumbre en el final de la vida diseño de estructuras de suelo a largo plazo reforzadas con polímeros, en cuanto a las propiedades mecánicas del conjunto bajo carga, debido a la falta de datos para períodos prolongados a su exposición. Esta escasez de datos de prueba se está remediando con el aumento de la atención a las propiedades a largo plazo, pero el problema tiende a permanecer en la medida que se desarrollan materiales poliméricos nuevos y mejorados, sobre los cuales no se han analizado dichas propiedades en los tiempos requeridos (Jewell & Greenwood, 1988)

5.2.2 Soil Nailing.

Este tipo de obras de estabilidad han sido usadas en una gran variedad de proyectos de ingeniería civil en las últimas décadas. La técnica se origina como una extensión de los *Rock Bolting* o Pernos de Anclaje y de la *New Austrian Tunneling Method* desarrollada por Rabcewicz, en donde se combinaba los refuerzos con concreto lanzado y los pernos de anclaje con el fin de crear un sistema de soporte flexible para la construcción de excavaciones subterráneas. Gracias a esto, países del norte ecuatorial han usado esta técnica con gran éxito. En Norte América la primera aplicación se dio en la década del 70, en España en 1972, en Francia en 1972-73 y Alemania probó en 1976 los *soil nailing* con una conexión vial a través de una excavación temporal. Pero una de las excavaciones para fundación más conocidas, fue la del Hospital *Good Samaritan* en Portland, pues fue la primera aplicación del *soil nailing* publicada en Estados Unidos. Desde entonces, los *soil nailing* se han desarrollado por programas experimentales y diversas aplicaciones, ya que se consideran como un método muy atractivo por su costo, su flexibilidad de construcción, la habilidad de usar equipo menor en cualquier construcción, particularmente en ambientes urbanos y en general, por su alta adaptabilidad para las aplicaciones

especiales. En los países anteriormente mencionados, se han incluido estabilizaciones temporales y permanentes con *soil nailing* en pendientes naturales, en renovaciones de viejas paredes de retención, en renovaciones de muros de tierra estabilizados mecánicamente con deterioro por corrosión prematura de los aceros de refuerzo instalados originalmente, en pernos temporales para bases de excavaciones, en fundaciones para edificios y en cortes que dan paso a carreteras, ferrocarriles y túneles. (Byrne *et al*, 1998)

De acuerdo a lo anterior, es necesario tener medidas instauradas que garanticen la correcta instalación de los *soil nailing*, debido a que uno de los problemas principales en este proceso, es la pérdida de adherencia entre el tendón y la lechada cuyos componentes principales pueden ser el cemento o una base de poliéster. Así lo explican Akisanya e Ivanovic (2014) cuando afirman que una incorrecta instalación de los anclajes en la zona a estabilizar, con la pérdida descrita, afectan la capacidad de carga.

Ahora partiendo de los mismos autores, durante la instalación del anclaje en taludes, existe la posibilidad de que aparezcan grietas que ocasionen dichas pérdidas. Las primeras pueden aparecer en la lechada, en la interfase tendón/lechada, y otras en la de roca/lechada. A esto se suma el hecho que si los materiales de acero entran en contacto con el agua, los efectos de la corrosión posibilitarán en mayor medida las grietas entre el tendón y la lechada.

La ubicación de las fallas entonces, dependerá de las propiedades mecánicas de los materiales, las características de la interfase y la compatibilidad de la lechada con el perno y la roca circundante, pero es vital entender que el tendón de acero tiene una fuerza y tenacidad mucho mayor que la lechada, la roca o la interfase, lo que lo hace determinante en el rendimiento global del sistema de anclaje. Pese a esto, la cuantificación de su tenacidad y el estudio de la relación de dureza a modo de falla, no ha sido ampliamente estudiada (Akisanya & Ivanovic, 2014).

Uno de los pocos estudios de referencia, se denomina “Pérdida de adherencia a lo largo de la longitud de un anclaje fijo al suelo” (*Debonding along the fixed anchor length of a ground anchorage*), el cual analiza los efectos de la resistencia a la fractura de la interfase roca/lechada y de la interfase tendón/lechada, localizando la falla y determinando el mecanismo de la misma. Se

utilizó una barra de acero con una superficie lisa y una barra de refuerzo, un epoxi como lechada y hormigón para moldear la roca o el suelo. De esta manera, se armó un anclaje tipo *soil nailing* y se trató a partir de un ensayo de *pull-out*. Los primeros resultados, fueron la pérdida de adherencia inicial en la interfase, seguida de una relación casi lineal entre el desplazamiento y la carga hasta el momento de la falla, lo que indica un crecimiento inestable en la grieta. Además, de los ensayos realizados con barras lisas, se tuvo una carga máxima menor que los realizados en conjuntos con barras corrugadas (Akisanya & Ivanovic, 2014).

Como resultado, se evidencia cómo la adherencia en la interfase tendón/lechada o roca/lechada afecta la capacidad de carga de un anclaje, a pesar que después de la desunión en el máximo de carga, el fenómeno se presenta en la totalidad del anclaje. Por esto, es importante entender las características de las interfases si se quiere adquirir un entendimiento del sistema de anclajes con una visión global, puesto que la primera influye al nivel macro.

En otra investigación llevada a cabo por Ivanovic, Neilson & Rodger (2002) se analizó el desempeño estático y dinámico de los sistemas de anclaje, que implicaban mediciones tanto en laboratorio como en lugares de construcciones activas. El trabajo se enfocó, en las condiciones de funcionamiento de resinas en *soil nailing*, con el fin de desarrollar un nuevo método para el ensayo no destructivo de estos tipos de anclaje, y en una investigación que estableció la manera en la que las cargas de pretensado influyen en la respuesta dinámica de estos sistemas, otorgando así al método propuesto la capacidad para determinar la variación en la respuesta de frecuencia con los cambios de pretensado. El programa resultante incluyó el desarrollo de un modelo de parámetros concentrado, que simula la respuesta de los anclajes a los cambios de tensión previa y carga de impacto, resultado altamente influenciado por el comportamiento de la cabeza del anclaje.

Por otra parte, algunos autores han enfocado sus estudios en materiales alternativos para este tipo de anclajes, que permitan a su vez modificar el sistema convencional de los suelos empernados. Salvá & Mesa (2013), hablaron del *soil nailing* verde, una alternativa que utiliza vigas y mallas de geotextil en vez del revestimiento usual en concreto. Esta propuesta disminuye el impacto visual de los cortes y por ende mejora la estética en áreas urbanas. No obstante, dicha

modificación implica cambios en la interacción entre los pernos, el suelo y el revestimiento, pues las fuerzas y empujes considerados en los diseños iniciales indudablemente varían.

El *soil nailing* verde, se pensó para la estabilización de cortes de gran altura que permitan el engramado, una situación muy común en linderos de urbanizaciones en zonas de laderas o entre viviendas donde se originan taludes que requieren sistemas de contención. Estos taludes en particular, requieren pendientes menores en su cara, hecho que se justifica por su sistema constructivo (Salvá & Mesa, 2013).

5.2.2.1 Proceso Constructivo Soil Nailing.

Según Byrne *et al.* (1998), el proceso constructivo más común en la elaboración de los *soil nailing* es el siguiente:

- *Corte Inicial de Excavación*
 - Antes de comenzar la excavación es necesario asegurarse que el nivel freático estará controlado durante el proceso de construcción. Esto se hace generalmente con zanjas colectoras que interceptan y desvían el agua superficial antes de que pueda afectar la operación. A continuación, se excava el corte inicial a una profundidad ligeramente por debajo de la primera fila de *nailings*, a una distancia aproximada de 1 a 2 m dependiendo de la capacidad del suelo para mantenerse sin ningún soporte durante 24 a 48 horas. Sin embargo, existe la posibilidad que la cara del corte presente problemas en estos períodos de tiempo. Para esto se colocan bermas estabilizantes las cuales se dejan hasta que la primera fila de *nailings* se instale y se aplique el revestimiento. Otra manera de combatir los problemas en la cara del corte es una rápida aplicación de concreto lanzado. Esto ocurre generalmente en las primeras etapas de excavación por la inminente presencia del nivel freático.

- La excavación masiva se realiza con equipos de movimiento de tierra convencional. De hecho, las últimas etapas de la excavación pueden finalizarse con una retroexcavadora o una excavadora hidráulica.
 - Por lo general, la longitud expuesta de los cortes está determinada por el área de la cara que va a ser estabilizada y por el concreto lanzado que se puede colocar en el curso de un cambio de trabajo. Se debe reducir al mínimo la alteración del suelo durante la excavación además de lograr un acabado suave y regular en la cara del corte con el fin de minimizar las cantidades de concreto lanzado posteriormente.
- *Agujeros para los nailings*
 - Los agujeros para colocar los *nailings* son taladrados en zonas predeterminadas con una longitud e inclinación específica, utilizando métodos de perforación apropiados para el suelo, los cuales incluyen métodos no entubados para materiales más competentes y métodos entubados para suelos con menor estabilidad.
 - La separación típica de los *nailings* es de 1 a 2 metros tanto vertical como horizontalmente. La longitud por otra parte corresponde del 70% al 100% de la altura de la pared y la inclinación de los *nailings* es generalmente 15 grados debajo de la horizontal para facilitar la colocación de la lechada.
- *Instalación y Lechada*
 - Para centrar el *nailing* en el orificio perforado se utilizan comúnmente centralizadores de plástico. Sin embargo, cuando los *nailings* se instalan en una abertura demasiado larga, los centralizadores son ineficaces por lo que son remplazados por una mezcla de concreto más rígida que ayuda a mantener la posición del *nailing* y evitan que se localicen en el fondo del agujero

- Los *nailings* utilizados en estos anclajes tienen una resistencia que está entre 420 y 500 N/mm²
 - Los *nailings* son instalados en la abertura mientras que el resto de la perforación es rellenada con una lechada de cemento que une la barra al suelo circundante. Se debe tener en cuenta que los *nailings* con un diámetro menor a 25 mm pueden causar problemas de instalación por su baja rigidez. La lechada por su parte tiene lugar bajo la presión de la parte inferior del agujero y se extiende hasta encima del mismo, ya sea a través de un tubo para métodos de instalación de agujero abierto o a través de la sarta de perforación para métodos entubados.
 - Para instalaciones permanentes, las barras de acero son típicamente protegidas contra daños por corrosión con un recubrimiento pesado de epóxico o por encapsulación de la lechada en un revestimiento de plástico.
- *Sistema de Drenaje*
 - Una amplia malla de drenaje sintética prefabricada se ubica en tiras verticales entre las cabezas de las barras en una separación horizontal igual a la de los *nailings*. Se instala normalmente contra la cara de la excavación antes de colocar el concreto lanzado para así proporcionar un drenaje detrás de este hormigón. Las tiras de drenaje se extienden hasta la base de la pared con cada ascensión de la excavación y se conectan directamente con un desagüe o un hueco que penetra la cara final del muro. Estas tiras de drenaje están destinadas a controlar la filtración del agua estancada o la infiltración superficial después de la construcción. Si se encuentra agua durante la construcción, los desagües cortos horizontales se requieren generalmente para interceptar el agua antes de que alcance la cara del muro.

- *Construcción de la Cara e Instalación de las Placas de Carga*
 - La construcción de la cara consiste en una malla reforzada húmeda mezclada en una capa de concreto lanzado en el orden de 100 mm de espesor, aunque esto depende de cada diseño específico.
 - Después de la colocación del concreto lanzado, una placa de apoyo de acero y una tuerca de fijación se colocan en cada una de las cabezas de los *nailings*. Las tuercas se aprietan lo suficiente como para incrustar la placa a una distancia pequeña dentro del concreto lanzado, el cual debe estar en un estado plástico.

- *Repetición del Proceso*
 - La secuencia de excavar, instalar las barras, colocar el sistema de drenaje y construir las caras, se repite hasta llegar al último escalón de la pared. La cara del concreto lanzado puede colocarse antes de clavar la barra a la perforación, particularmente en situaciones donde la estabilidad del suelo es un problema.

- *Colocación del Revestimiento Final*
 - Por razones de larga durabilidad estructural, se utiliza un tipo de revestimiento común en concreto en aplicaciones de *soil nailing* permanentes. Bajo circunstancias apropiadas, la cara final puede consistir en una segunda capa de concreto lanzado estructural, aplicado después de la excavación final.

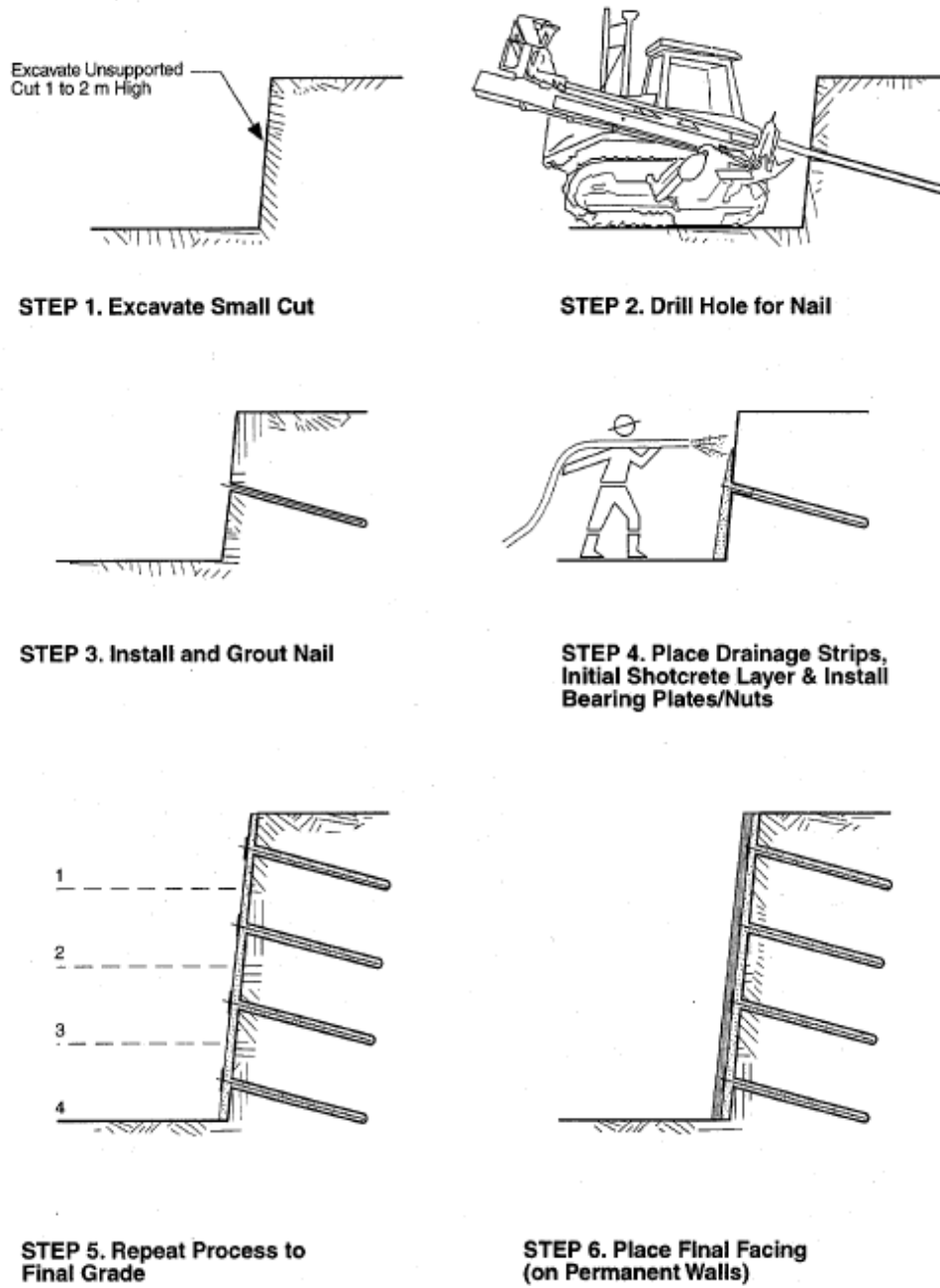


Figura 2 Paso a paso sistema constructivo. Fuente: Byrne, Cotton, Poterfield, Wolschlag, & Ueblcker (1998).

5.2.3 Anclajes con Polímeros.

Tradicionalmente, los sistemas de anclajes se instalan con materiales de acero y se fijan con lechadas de cemento. Una alternativa es cambiar esas lechadas por polímeros que fijen de igual manera los tendones. Puigvert, *et al*(2014) estudiaron más a fondo dicha alternativa, realizando predicciones de ensayos de fluencia y de fatiga sobre las juntas traslapadas y la interfase de adherencia, a través del análisis de elementos finitos, los cuales estuvieron en concordancia con los datos registrados experimentalmente. En esta investigación, se determinó la carga máxima de la fatiga y la relación de carga a partir de los niveles de esfuerzo habituales en los anclajes de tendones de acero; el efecto de la carga máxima de la fatiga y la relación de carga general, arrojaron los resultados de la fatiga en las uniones adhesivas.

Para modelar el daño por fatiga en las uniones adhesivas, Puigvert, *et al.* (2014) utilizaron varios métodos basados en el esfuerzo y en la mecánica de la fractura, los cuales predecían la vida útil del conjunto teniendo en cuenta el inicio de los daños o la propagación de los mismos. Un ejemplo de ello, es el modelo de zona cohesiva (CZM) en el que el recorrido de la fisura se conoce con anterioridad. Así pues, los elementos de cohesión combinan el inicio del daño con la propagación de las fallas, después de que se haya llegado a la tracción máxima. Los materiales utilizados en esta investigación fueron varillas de anclaje y fibra de carbono con epoxi.

Los resultados fueron curvas experimentales de fuerza desplazamiento, lineales hasta el punto de falla que ocurrió de repente. La resistencia elástica promedio fue de 1563kN, valor utilizado para sacar las fluencias al 80, 60, 40 y 20%. A medida que el grosor del adhesivo era mayor, el momento de flexión aumentó con las tensiones adhesivas, es decir, los especímenes más gruesos tuvieron tendencia a una vida útil más corta, que las muestras más delgadas, comparándolas a través de las cargas aplicadas, que siempre fueron las mismas. Debido a esto, se redujo la tensión media para que aumentara la vida útil en función del grosor del epoxi (Puigvert, *et al.* 2014).

De esta investigación se concluye de manera general, que para que un anclaje inyectado con polímero tenga mayor duración es necesario reducir las cargas soportadas para aumentar su vida útil, sin que el grosor del adhesivo sea el factor principal (Puigvert, *et al.* 2014).

Una segunda investigación, simuló numéricamente el comportamiento de una muestra de suelo cohesivo con un núcleo de epoxi a través de ensayos elementales, con el objetivo de observar la evolución de la resistencia al corte del conjunto y de la interfase. Por tal motivo, se utilizaron teorías constitutivas tradicionales y modernas del comportamiento del conjunto suelo/resina que incluyeran parámetros que reprodujeran el deterioro del polímero dentro del material cohesivo. Los resultados indicaron que efectivamente las mayores tensiones ocurren en la interfase (Gómez, *et al.*, 2013).

Park, Jung, Kang & Kum (2013) probaron otra alternativa en la que examinaron el esfuerzo cortante y el desplazamiento de tendones CFRP, para que mediante el análisis de elementos finitos de los parámetros que influyen en el rendimiento de un anclaje, pudieran evaluar las características del mismo utilizando este tipo de tendón. Para ello elaboraron especímenes cilíndricos conformados por un barril que recubría a un llenante, cuyo objetivo era mantener en el centro un tendón CFRP como se muestra en la figura 3. Los parámetros que se manejaron en esta investigación fueron el ángulo interior del barril de anclaje, la fricción entre el material y el llenante y el módulo de elasticidad del material de relleno.

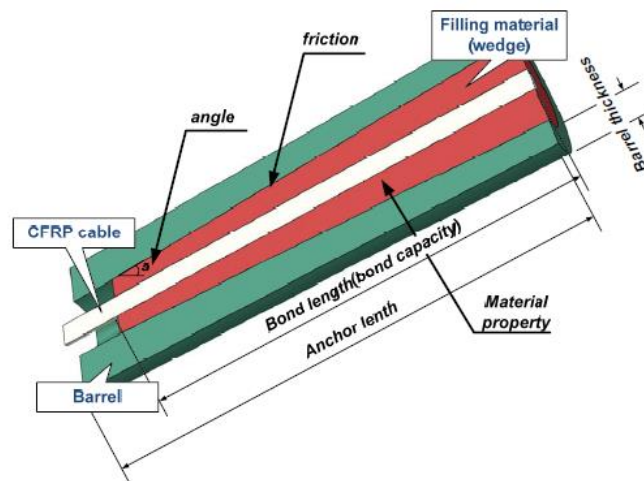


Figura 3 Composición de especímenes (Investigación de anclajes con tendones CFRP). Fuente: Park *et al.* (2013)

Los resultados analíticos muestran que el esfuerzo cortante desarrollado en el tendón CFRP se reduce cuando el ángulo interno del barril es mayor y cuando el módulo de elasticidad del

material de relleno es menor. Sin embargo, tal combinación provoca el aumento del desplazamiento relativo del tendón de CFRP. Especialmente, la insuficiencia de deslizamiento puede ocurrir debido a la falta de la fuerza necesaria para confinar el anclaje por causa de la pérdida repentina de la fuerza vertical generada por la cuña. Los resultados de los barriles con ángulos interiores de 2° y 4° indican que con el primero se conserva el rendimiento del anclaje hasta su falla por tracción y que el segundo fracasa en el desarrollo de su máximo rendimiento debido a la falta de deslizamiento (*Park et al.*, 2013)

6. METODOLOGIA

En concordancia con lo planteado hasta acá, la problemática de la investigación está basada en la ausencia de estudios referentes al comportamiento de la interfase de un anclaje y en especial de la inexistencia de anclajes tipo *soil nailing* que utilicen únicamente una resina epoxi como material de refuerzo y de estabilidad de taludes. En la figura 4, la metodología es presentada gráficamente para el mejor entendimiento del lector.

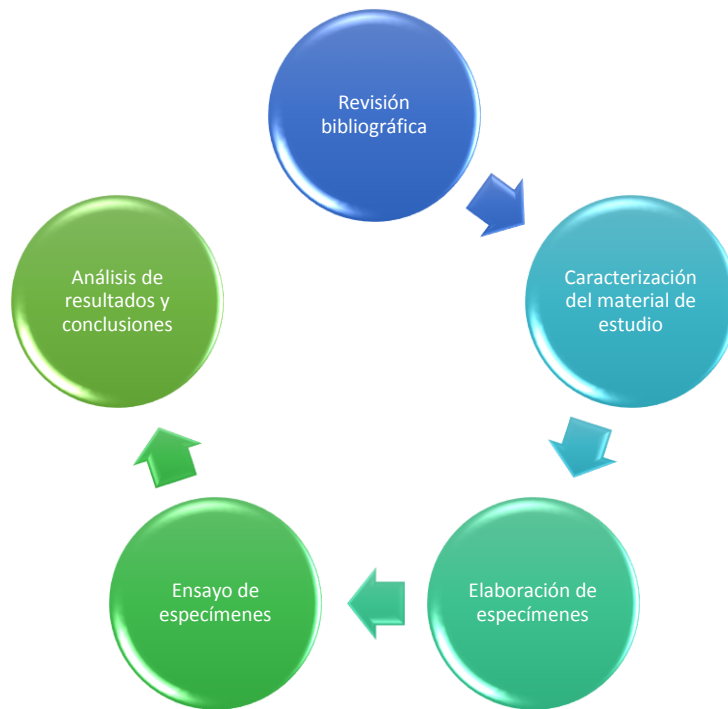


Figura 4 Metodología de la investigación. Fuente: Autora

El inicio de la investigación está relacionado con una amplia revisión bibliográfica que cubre lo relacionado con las resina epoxi, el ensayo de *pull-out*, la estabilidad de taludes desde las causas para realizarlo hasta las obras existentes en este proceso constructivo, una base teórica sobre suelos y su baja resistencia al corte y la flexión, y una serie de estudios acerca de los pocos ensayos realizados para medir la interfase suelo/lechada y tendón/lechada.

Así mismo, el diseño metodológico involucra la caracterización del material utilizado para realizar las probetas. Por un lado la resina epoxi, probando el comportamiento con sus aditivos, y por otro lado, realizando el estudio previo al material cohesivo (caolín) a través de ensayos de límites (Determinación del Límite Líquido de los Suelos I.N.V. E-125-07 y Límite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos I.N.V. E-126-07), de pesos unitarios (Densidad Bulk -Peso Unitario- y Porcentaje de Vacíos de los Agregados Compactados o Suelos I.N.V. E-217-07) y de compresión inconfinaada (Compresión Inconfinaada en muestras de Suelos I.N.V. E-152-07)

Paralelo a esto, se llevará a cabo un análisis del comportamiento mecánico de diez probetas de resina epoxi, de las cuales cinco serán probadas en ensayos de tensión y cinco en ensayos de compresión. Los equipos que se utilizarán para realizar estas pruebas serán respectivamente, una Máquina Universal de ensayos tipo Versa Tester producida por Soiltest Inc., y una Prensa Multiusos fabricada por Pinzuar, que permitirán obtener los datos necesarios para graficar curvas esfuerzo vs deformación, sobre las que se observarán las cargas máximas alcanzadas. Una vez detallado este comportamiento, se elaborarán cinco conjuntos caolín/resina epoxi para ser ensayados en la prensa por medio de la adaptación del ensayo de *pull-out*, que permitirá evaluar la interfase del conjunto.

Posteriormente y con el fin de realizar un análisis de los esfuerzos y las deformaciones del tándem suelo/polímero, se ejecutará una simulación numérica del ensayo de *pull-out* en el software de elementos finitos bidimensionales PLAXIS cuyo énfasis es el estudio de problemas geotécnicos.

El análisis final de los resultados de los ensayos y de la simulación numérica determinará si el conjunto es óptimo como alternativa de anclaje *soil nailing*.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 CAOLÍN

7.1.1 Caracterización.

7.1.1.1 Límites.

Se ejecutaron los ensayos de límite líquido y límite plástico de acuerdo a las especificaciones de las normas “Determinación del Límite Líquido de los Suelos I.N.V. E-125-07” y “Límite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos I.N.V. E-126-07”. En la tabla 1 se organizan los resultados obtenidos.

	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	IND DE PLASTICIDAD
Ensayo 1	36,85	24,01	12,84
Ensayo 2	36,80	23,64	13,16
Ensayo 3	36,83	24,16	12,67
Promedio	36,83	23,94	12,89

Tabla 1 Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad. Fuente: Autora

Estos resultados indican que el caolín es un tipo de suelo ML de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos o USCS por sus siglas en inglés (*Unified Soil Classification System*), tal y como lo expone Juárez & Rico (2005) cuando afirma que el caolín es un tipo de suelo fino y suave con un alto porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla, que lo hace comparable con otras arcillas típicas localizadas arriba de la línea A de la Carta de Plasticidad.

7.1.1.2 Pesos Específicos.

Con el fin de determinar el peso unitario seco del caolín, se llevó a cabo el ensayo de “Densidad Bulk (Peso Unitario) y Porcentaje de Vacíos de los Agregados Compactados o Suelos I.N.V. E-217-07”, mediante el cual se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\rho_d = \frac{G - T}{V}$$

Donde,

ρ_d = Densidad seca del caolín

G = Masa del suelo más la del recipiente de medida (4,41kg)

T = Masa del recipiente de medida (1,92kg)

V = Volumen del recipiente de medida (0,0028m³)

Entonces,

$$\rho_d = \frac{4,41kg - 1,92kg}{0,0028m^3} = 885,30 \text{ kg}/m^3 = 0,885 \text{ g}/m^3$$

Se sabe que el producto de la densidad y la aceleración de la gravedad g (9,81 m/s²) es el peso específico del material

$$\gamma = \rho(g)$$

$$\gamma_d = 885,30 \text{ kg}/m^3 (9,81 \text{ m}/s^2) = 8684,81 \text{ N}/m^3$$

Como la humedad promedio w del caolín utilizada en las pruebas equivalía a 32%, el peso específico húmedo γ es igual a:

$$\gamma = \gamma_d(1 + w) = 8684,81 \text{ N}/m^3 (1,32) = 11463,94 \text{ N}/m^3 = 11,46 \text{ kN}/m^3$$

Se tiene que,

Por lo tanto la relación de vacíos e es igual a

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e}$$

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

Donde

G_s = Gravedad específica del material (2,6 para el caolín)

γ_w = Peso específico del agua (9,81 kN/m³)

γ_d = Peso específico seco (8,68 kN/m³)

$$e = \frac{2,6 (9,81 \text{ kN/m}^3)}{(8,68 \text{ kN/m}^3)} - 1 = 1,93$$

El peso específico saturado se define como

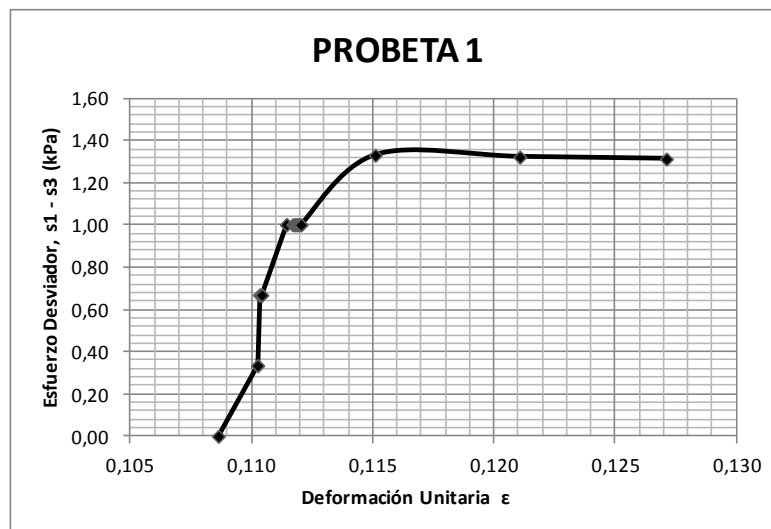
$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e}$$

Reemplazando valores γ_{sat} es igual a

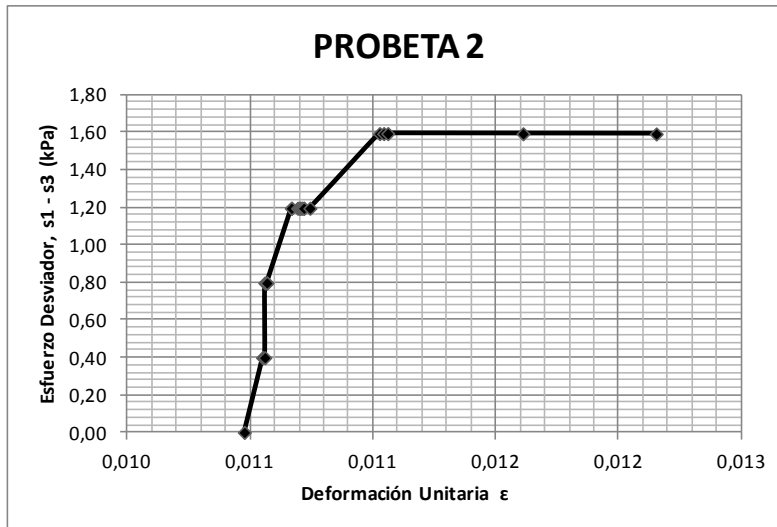
$$\gamma_{sat} = \frac{(2,6 + 1,93) (9,81 \text{ kN/m}^3)}{1 + 1,93} = 15,17 \text{ kN/m}^3$$

7.1.1.3 Compresión Inconfinada.

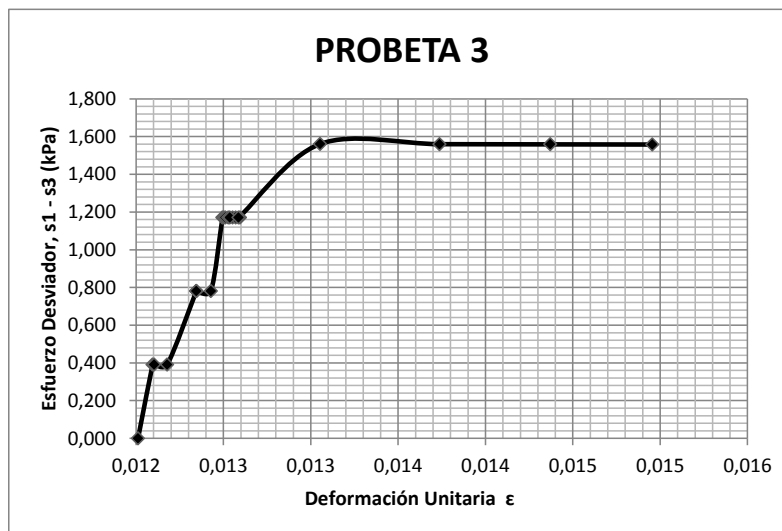
Una vez determinados los pesos específicos del caolín, se realizaron probetas de aproximadamente 60mm de diámetro por 120mm de alto, destinadas a fallarse según los parámetros del ensayo “Compresión Inconfinada en muestras de Suelos I.N.V. E-152-07”. Se encontró que el esfuerzo máximo promedio del suelo fue 1,52 kN/m².



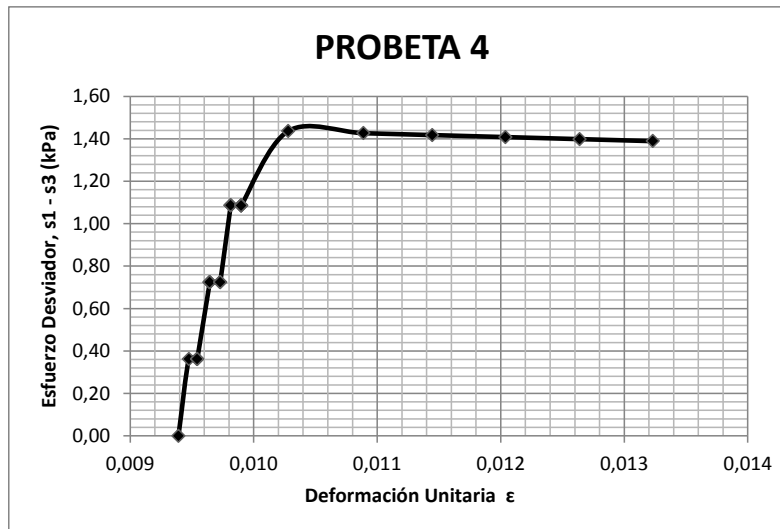
Gráfica 1 Esfuerzo desviados vs Deformación unitaria probeta 1. Fuente: Autora



Gráfica 2 Esfuerzo desviados vs Deformación unitaria probeta 2. Fuente: Autora



Gráfica 3 Esfuerzo desviados vs Deformación unitaria probeta 3. Fuente: Autora



Gráfica 4 Esfuerzo desviados vs Deformación unitaria probeta 4. Fuente: Autora

7.2 RESINA

7.2.1 Propiedades de los Materiales.

Para elaborar los especímenes, se tuvo en cuenta que la resina sola no posee propiedades técnicas útiles, por lo que fue necesario añadirle tres aditivos que le otorgaran diversas características físicas. De acuerdo a esto, se utilizó una resina poliéster de viscosidad media, preacelerada y tixotrópica con buenas características de humectación a fibra de vidrio, exotermia moderada y buenos tiempos de curado y desbaste. En las tablas 2 y 3 se muestran las propiedades líquidas y físicas de este material.

VARIABLE	VALOR MIN	VALOR MAX	TÉCNICA DE ANÁLISIS
Número Ácido	-	30 (solución)	TARQ-100
No Volátiles (%)	57	64	TARQ-200
Tpo. Gelado (min.) ¹	15	19	TARQ-400
Tpo. Curado (min.) ¹	25	37	TARQ-400
Temp. Exotermia (°C) ¹	-	160	TARQ-400
Tixotropia ³	1,5	-	TARQ-300
Visc. Brookfield (Cps) ²	380	480	TARQ-300
Estabilidad a 120°C (Horas)	1,5	-	TARQ-660
Apariencia	Opalescente	Opalescente	Visual

¹ 1,25% de Butanox M-50 @ 25°C

² RVT, aguja # 3, 50 rpm @ 25°C

³ RVT, aguja # 3, 5 rpm / 50 rpm @ 25°C

Tabla 2 Propiedades líquidas resina. Fuente: Ficha técnica fabricante

VARIABLE	VALOR
Resistencia a la flexión (psi)	25270
Módulo de flexión (psi x 10 ⁶)	0,72
Resistencia a la tensión (psi)	14130
Módulo de tensión (psi x 10 ⁶)	1,105
%Elongacion	1,88
Dureza barcol	58-62
Impacto Izod (sin muesca, ft-lb/in)	20,15

Tabla 3 Propiedades físicas resina. Fuente: Ficha técnica fabricante

Por el lado de los aditivos, se manejó un catalizador para resina de poliéster recomendado por el proveedor de los materiales. Sus propiedades se detallan en la tabla 4.

PROPIEDADES	ESPECIFICACIONES
Aspecto físico	Líquido semiviscoso transparente blanco a levemente amarillo
%Oxígeno Activo	10,0-11,0
%Metil Etil Cetona Peróxido	55,0-60,0
Gravedad Especifica (20 / 20°C)	1,050-1,100
Compatible con Resina Poliéster	Compatible
Solubilidad en agua	Insoluble

Tabla 4 Propiedades y especificaciones catalizador. Fuente: Ficha técnica fabricante

De origen natural, el segundo aditivo seleccionado fue el carbonato de calcio. Posee un tamaño de partícula controlado; se caracteriza por su alta pureza mineralógica y estabilidad química y se produce a partir de procesos de molienda y clasificación. En la tabla 5 se especifican sus propiedades químicas y físicas.

ESPECIFICACIONES QUÍMICAS	VALOR STD
Carbonato de Calcio - CaCO ₃	98,0 % Mínimo
Silicio - SiO ₂	1,0 % Máximo
Magnesio - MgO	1,0 % Máximo
Aluminio - Al ₂ O ₃	Trazas
Hierro - Fe ₂ O ₃	Trazas
P.P.C a 1000°C	(41,0 - 45,0) %
ESPECIFICACIONES FÍSICAS	VALOR STD
Humedad a 105°C	0,50 % Máximo
Densidad Aparente Compacta	(0,95 - 1,05) g/cm ³
Absorción de Aceite	(20,0 - 24,0) g/100g
pH (solución al 10%)	8,00 - 10,00
Color (whiteness)	80,76 Mínimo
Color (Brightness)	85,00 Mínimo
Retenido en malla 400 (38µm)	0,50 % Máximo
Calidad del Residuo	Sin granitos
Diámetro Medio (D ₅₀)	(8,50 - 11,50) µm
Diámetro Superior (D ₉₀)	(23,00 - 29,00) µm
Área Superficial Específica	(0,98 - 1,30) m ² /g

Tabla 5 Especificaciones químicas y físicas carbonato de calcio. Fuente: Ficha técnica proveedor

El último material utilizado fue la fibra de vidrio. Este componente le otorga resistencia y cohesión a la mezcla. Se utilizó en pequeños filamentos de no más de 1” de largo.

7.2.2 Elaboración de Especímenes.

Para elaborar los especímenes, se tuvieron en cuenta las recomendaciones de los fabricantes y la asesoría de los proveedores, los cuales indicaron que tanto el carbonato de calcio como el catalizador, debían utilizarse en proporciones máximas de 3% respecto al peso de la resina.

7.2.2.1 Fibra de Vidrio.

Con la fibra de vidrio no se manejaba una especificación, puesto que dependiendo del uso de la resina epoxi se determinaba su cantidad, lo que originó las primeras pruebas para identificar la cantidad ideal de fibra en la mezcla.

Un exceso de fibra de vidrio hacía que la mezcla fuera difícil de manejar, y que después de unos minutos se formara una pasta muy poco fluida. En la primera prueba, se adicionó 3,5% de fibra respecto al peso de la resina, esto equivalía a 1,1g y 30,6g respectivamente. Como se observa en la figura 5, el resultado fue una masa llena de filamentos, poco manejable y difícil de mezclar



Figura 5 Prueba 1 de resina y fibra. Fuente. Autora

Para la segunda prueba, se utilizó 3% de fibra, es decir, 0,92 g de fibra respecto a 30,6g de resina. Esta mezcla presentó el mismo comportamiento de la anterior: alta presencia de filamentos que generaban dificultad al momento de combinar los aditivos (figura 6).



Figura 6 Prueba 2 de resina y fibra. Fuente. Autora

En la tercera prueba, y teniendo en cuenta los resultados anteriores, se redujo el porcentaje de fibra hasta un 1,5%, representados en 0,6g para 40g de resina. El resultado fue una mezcla homogénea, fácil de combinar y manejar. Los filamentos de fibra se adhirieron correctamente sin presentarse un exceso de ellos después del endurecimiento (figura 7).

En todas estas pruebas, se manejó un porcentaje de 3% para el catalizador y el carbonato de calcio en relación al peso de la resina.



Figura 7 Prueba 3 de resina y fibra. Fuente. Autora

De acuerdo a lo anterior, se eligió el 1,5% como porcentaje en peso de fibra de vidrio respecto al peso de la resina para realizar las siguientes muestras.

7.2.2.2 Mezclas.

Para realizar los especímenes, se realizó una pequeña probeta utilizando un recipiente metálico como molde, con el fin de determinar la masa necesaria para diferentes volúmenes. En las tablas 6 y 7 se muestran las proporciones utilizadas para una altura y diámetro determinados y en la figura 8 se observa la forma final de la mezcla.

ESPÉCIMEN PRUEBA	
MATERIAL	Cantidad (g)
Resina Epoxy	40,5
Catalizador	1,2
Carbonato de Calcio	1,2
Fibra de Vidrio 1"	0,6

Tabla 6 Composición espécimen de prueba. Fuente. Autora

ESPÉCIMEN PRUEBA		
	D (mm)	H (mm)
Dato 1	48,88	20,00
Dato 2	48,89	20,02
Dato 3	48,88	20,00
Promedio	48,88	20,01

Tabla 7 Dimensiones espécimen de prueba. Fuente. Autora



Figura 8 Espécimen de prueba. Fuente: Autora

Dichas cantidades de material producen una mezcla de $37,5\text{cm}^3$. Esta relación se usaría para determinar que en un volumen de $88,14\text{ cm}^3$ (correspondiente a los moldes para los demás especímenes), se deberían utilizar las siguientes cantidades:

ESPECÍMENES	
MATERIAL	Cantidad (g)
Resina Epoxy	95,1
Catalizador	2,85
Carbonato de Calcio	2,85
Fibra de Vidrio 1"	1,5

Tabla 8 Composición calculada para especímenes de $88,14\text{ cm}^3$. Fuente: Autora

7.2.2.3 Muestras.

Con las proporciones ya establecidas, el siguiente paso fue la elaboración de las muestras como se indica a continuación.

1. **Peso.** Aplicable a todos los especímenes, en este paso se separaban cada uno de los materiales en diferentes recipientes con la masa antes determinada (figura 9)

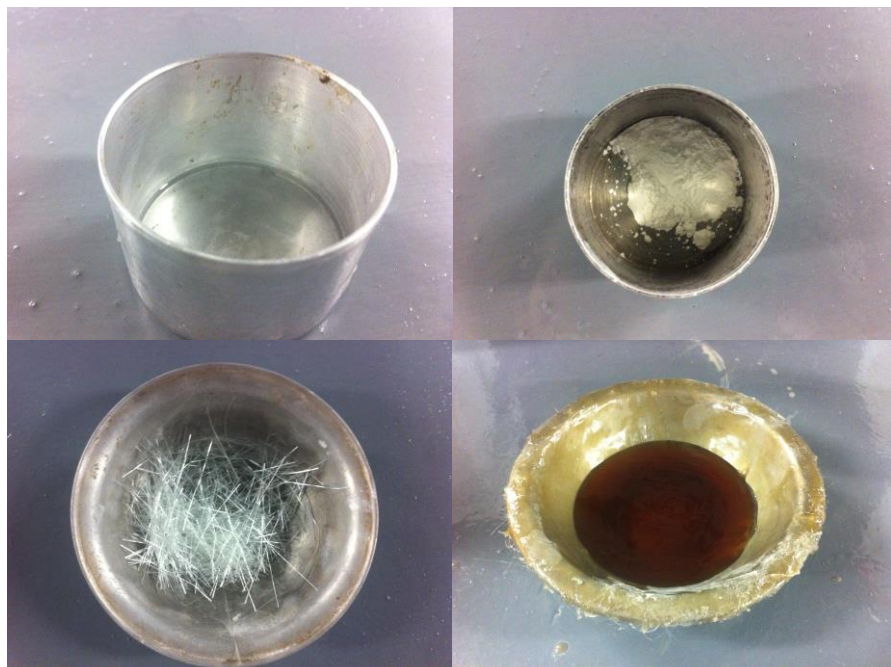


Figura 9 Catalizador, Carbonato de Calcio, Fibra de vidrio picada y Resina. Fuente: Autora

2. **Mezcla.** En el recipiente que contenía la resina, se adicionaban el resto de materiales para iniciar el proceso de mezclado.
3. **Moldes.** Una vez que la mezcla tomaba una apariencia homogénea se pasaba a los moldes y se dejaba endurecer en un tiempo aproximado de 30 a 35 minutos. La exotermia en este tiempo era bastante alta, por lo que también se dejaban las muestras quietas hasta que alcanzaran una temperatura que permitiera su manipulación (figura 10).



Figura 10 Molde con mezcla. Fuente: Autora

- 4. Desmolde.** En este último paso, los moldes eran retirados y los especímenes tomaban su forma final

7.2.2.4 Especímenes.

Las primeras mezclas que pasaron a los moldes, fueron endurecidas con dos barras de acero en sus extremos, de manera que en el momento de fallarlas a tensión, las mordazas de una máquina universal no tuvieran problema en el agarre de la muestra (figura 11). Estos especímenes se pensaron para medir la carga máxima soportada por la resina, sin embargo, en el momento del ensayo, la unión entre la barra y la resina no fue la adecuada, por lo que la falla esperada del espécimen no ocurrió. En algunos casos, las barras se soltaban y se salían de la resina y en otros, el plano de falla se generaba en el punto donde la barra finalizaba dentro de la probeta, lo que no aseguraba un resultado confiable de la carga máxima soportada por la resina epoxi.



Figura 11 Especímenes con barras para ensayo de tensión. Fuente: Autora



Figura 12 Ensayo de tensión en especímenes con barras. Fuente: Autora

En consecuencia, se modificaron los moldes de los especímenes destinados para los ensayos de tensión, adaptando una forma que permitiera a la máquina universal agarrar perfectamente la muestra, dejando una distancia aproximada entre mordazas de 15 cm. De este modo se eliminaron las barras para dejar sola la resina y sus aditivos (figura 13)



Figura 13 Especímenes definitivos para ensayos de tensión. Fuente: Autora

Para los especímenes que se utilizarían en los ensayos de compresión, se manejaron moldes de 33,5mm de diámetro por 100mm de alto. Las muestras resultantes se cortaron y modificaron para adaptarlas a las especificaciones del ensayo correspondiente.

7.2.3 Ensayos Mecánicos.

7.2.3.1 Tensión.

En este ensayo se elaboraron 6 especímenes, de los cuales uno debió ser descartado después del proceso de desmolde, debido a la gran cantidad de vacíos en su superficie. Las otras cinco muestras fueron medidas y marcadas para su uso. En la tabla 9 se detalla la cantidad de material utilizado en cada espécimen y en la tabla 10 se promedian sus medidas de altura y diámetro.

COMPOSICIÓN ESPÉCIMENES TENSIÓN						
	ESPÉCIMEN 1	ESPÉCIMEN 2	ESPÉCIMEN 3	ESPÉCIMEN 4	ESPÉCIMEN 5	ESPÉCIMEN 6
MATERIAL	Cantidad (g)	Cantidad (g)	Cantidad (g)	Cantidad (g)	Cantidad (g)	Cantidad (g)
Resina Epoxy	95,1	95,1	95,0	94,9	95,0	95,1
Catalizador	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Carbonato de Calcio	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Fibra de Vidrio 1"	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6

Tabla 9 Composición de especímenes para ensayos de tensión. Fuente: Autora

DIMENSIONES ESPÉCIMENES TENSIÓN										
	ESPÉCIMEN 2		ESPÉCIMEN 3		ESPÉCIMEN 4		ESPÉCIMEN 5		ESPÉCIMEN 6	
	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)
Dato 1	246,34	17,72	184,25	17,64	257,05	17,75	231,77	16,33	234,62	16,07
Dato 2	247,28	17,63	184,04	17,58	257,57	17,76	231,88	16,17	234,76	16,09
Dato 3	247,14	17,71	182,93	17,77	256,99	17,55	231,94	16,20	232,41	15,97
Promedio	246,92	17,69	183,74	17,66	257,20	17,69	231,86	16,23	233,93	16,04

Tabla 10 Dimensiones de especímenes para ensayos de tensión. Fuente: Autora

Como el espécimen 1 fue descartado, el primer ensayo se ejecutó sobre el espécimen 2. Gracias al diámetro de las muestras, la mordaza de la máquina las agarró perfectamente (figura 14)



Figura 14 Espécimen para ensayo de tensión ajustado en máquina. Fuente: Autora

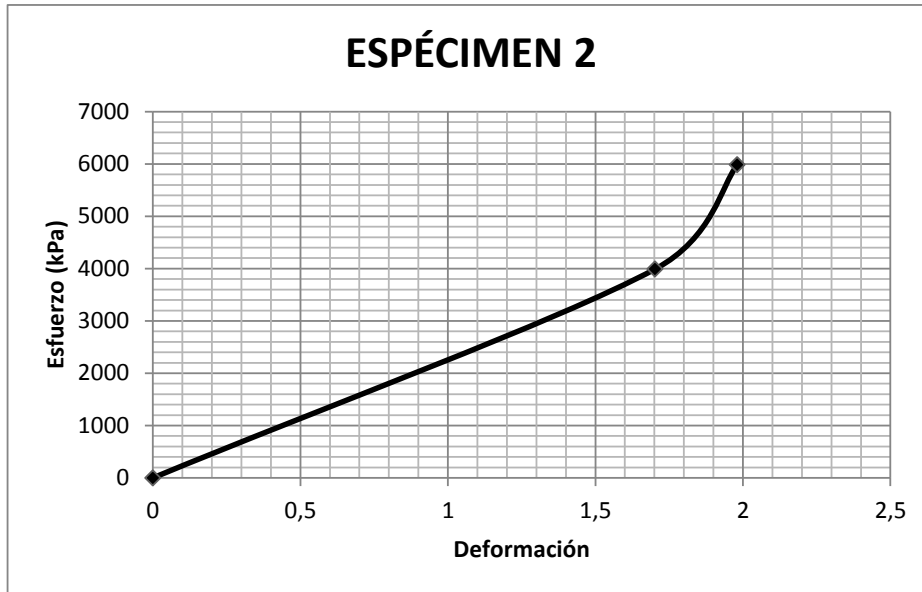
El espécimen 2 presentó una falla en la parte superior de su longitud (figura 15). La tabla 11 y la gráfica 5 detallan su conducta durante el ensayo, en el cual alcanzó un esfuerzo máximo en 5983,23 kPa con una deformación de 1,98. En la gráfica se observa cómo después de superar 4000 kPa el material pasa de un estado elástico a un estado plástico.



Figura 15 Espécimen 2 después del ensayo mecánico de tensión. Fuente: Autora

ESPÉCIMEN 2		
CARGA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0	0	0
0,98	3988,82	1,70
1,47	5983,23	1,98

Tabla 11 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 2. Fuente: Autora



Gráfica 5 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 2. Fuente: Autora

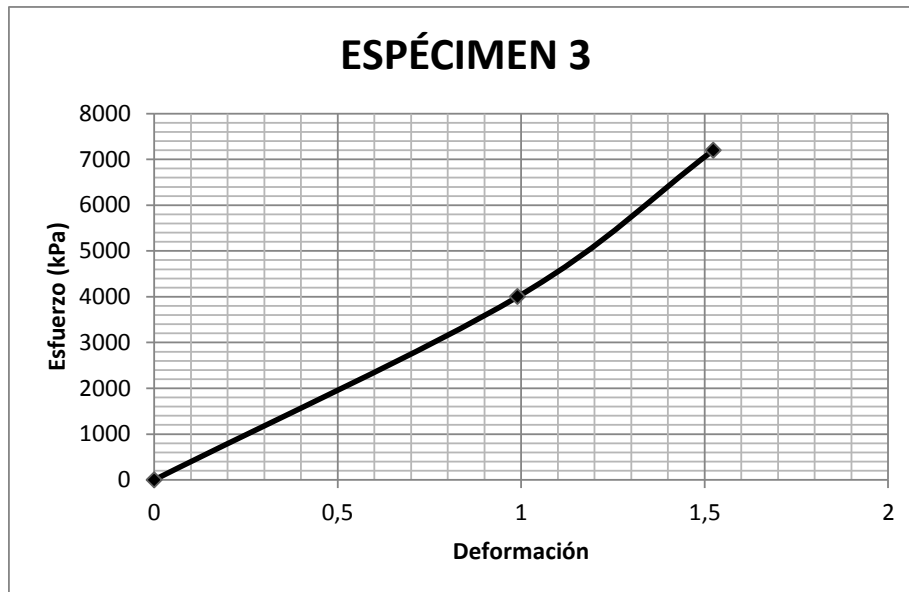
De longitud más pequeña, el espécimen 3 falló en el extremo superior de su longitud (figura 16). La tabla 12 y la gráfica 6 señalan su comportamiento durante el ensayo, el cual, como sucedió con la muestra 2, cambió su desarrollo registrando una pequeña curva hasta llegar a 7198,85 kPa, punto máximo de esfuerzo frente a una deformación total de 1,524.



ESPÉCIMEN 3		
CARGA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0	0	0
0,98	3999,36	0,9906
1,764	7198,85	1,524

Tabla 12 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 3. Fuente: Autora

Figura 16 Espécimen 3 después del ensayo mecánico de tensión. Fuente: Autora



Gráfica 6 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 3. Fuente: Autora

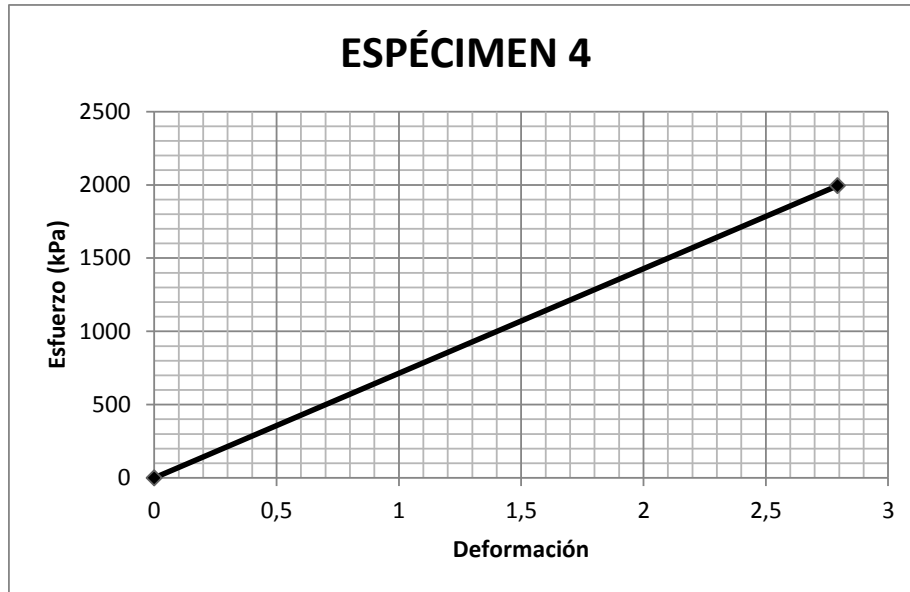
El espécimen 4 por su parte, tuvo un comportamiento irregular respecto a las otras muestras. Registró una deformación mucho mayor frente a una carga máxima muy baja. Así mismo, presentó dos planos de falla en sus extremos, dejando a la probeta dividida en tres partes. La figura 17 permite observar como la falla del extremo inferior está prácticamente en el límite de la muestra. La tabla 13 y la gráfica 7 reflejan la conducta del espécimen durante el ensayo, con el que se registró un esfuerzo máximo de 1994,41 kPa, un valor muy bajo si se compara con las probetas anteriores.



ESPÉCIMEN 4		
CARGA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0	0	0
0,49	1994,41	2,794

Tabla 13 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 4. Fuente: Autora

Figura 17 Espécimen 4 después del ensayo mecánico de tensión. Fuente: Autora



Gráfica 7 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 4. Fuente: Autora

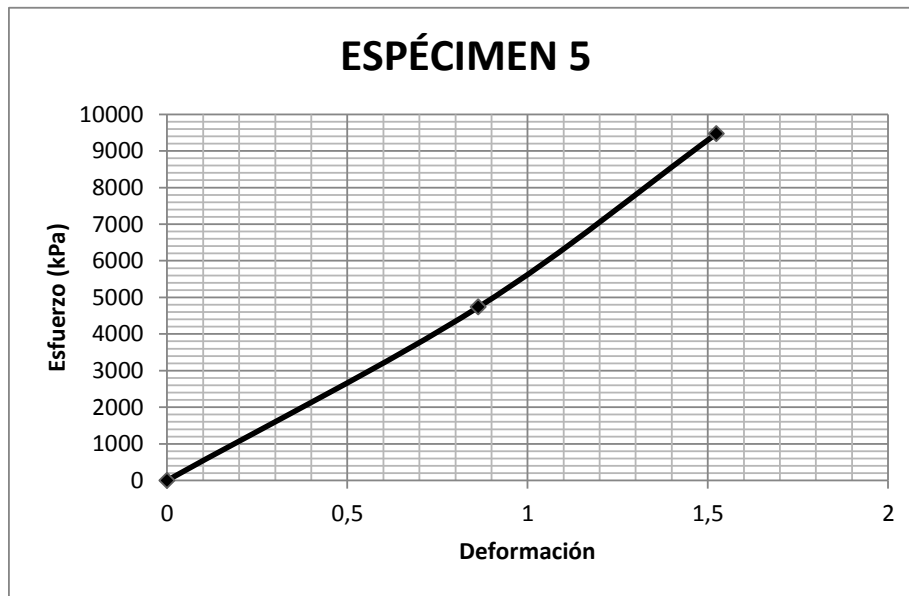
El espécimen 5 soportó 1,96kN de carga máxima equivalentes a 9470,02 kPa, el valor más alto que se registró en los 5 ensayos realizados. Se quebró en el extremo superior de su longitud (figura 18) tras deformarse 1,524. Presentó un comportamiento lineal durante toda la prueba, cambiando únicamente las pendientes entre los puntos registrados.



ESPÉCIMEN 5		
CARGA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0	0	0
0,98	4735,01	0,8636
1,96	9470,02	1,524

Tabla 14 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 5. Fuente: Autora

Figura 18 Espécimen 5 después del ensayo mecánico de tensión. Fuente: Autora



Gráfica 8 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 5. Fuente: Autora

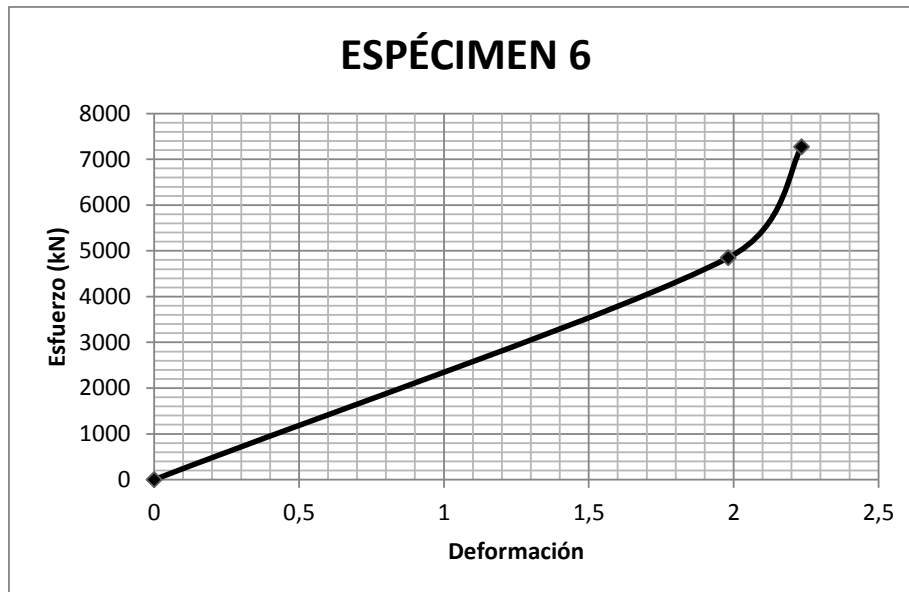
La rotura del espécimen 6 se generó en el extremo superior de la muestra a unos pocos milímetros de su borde, dejando así al resto de la probeta en un estado prácticamente inalterado (figura 19). Al final del ensayo alcanzó el punto máximo de esfuerzo, equivalente a 7271,71 kPa. En el punto $x_2=1,9812$ se inicia la condición plástica del material.



ESPÉCIMEN 6		
CARGA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0	0	0
0,98	4847,83	1,9812
1,47	7271,74	2,2352

Tabla 15 Carga, Esfuerzo y Deformación Espécimen 6. Fuente: Autora

Figura 19 Espécimen 6 después del ensayo mecánico de tensión. Fuente: Autora



Gráfica 9 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 6. Fuente: Autora

Los especímenes ensayados a tensión resistieron en promedio 1,43 kN de carga máxima y 6383,64 kPa de esfuerzo frente a una deformación media igual a 2,01.

7.2.3.2 Compresión.

Las muestras que se manejaron para los ensayos de compresión se diseñaron con la misma dosificación de los especímenes utilizados en los ensayos de tensión (tabla 16). Sin embargo, las dimensiones de cada probeta se plantearon bajo una relación de altura y diámetro 2:1, con el fin de obtener varios resultados de carga y deformación (tabla 17).

MATERIAL	COMPOSICIÓN ESPECÍMENES COMPRESIÓN				
	ESPÉCIMEN 1	ESPÉCIMEN 2	ESPÉCIMEN 3	ESPÉCIMEN 4	ESPÉCIMEN 5
	Cantidad (g)	Cantidad (g)	Cantidad (g)	Cantidad (g)	Cantidad (g)
Resina Epoxy	95,0	95,0	95,1	95,2	95,1
Catalizador	2,8	2,9	2,8	2,8	2,8
Carbonato de Calcio	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Fibra de Vidrio 1"	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Tabla 16 Composición de especímenes para ensayos de compresión. Fuente: Autora

	DIMENSIONES ESPÉCIMENES COMPRESIÓN									
	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2		ESPÉCIMEN 3		ESPÉCIMEN 4		ESPÉCIMEN 5	
	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)
Dato 1	59,50	27,00	60,06	29,40	58,25	29,05	60,72	29,26	59,63	29,03
Dato 2	60,16	29,17	59,91	28,64	58,41	29,37	60,39	29,19	59,48	29,44
Dato 3	59,58	29,06	60,06	29,00	58,77	29,03	60,16	29,23	59,16	28,69
Promedio	59,75	28,41	60,01	29,01	58,48	29,15	60,42	29,23	59,42	29,05

Tabla 17 Dimensiones de especímenes para ensayos de compresión. Fuente: Autora

El espécimen 1 soportó 3,68 kN como fuerza máxima, siendo este un valor mucho mayor que todos los resultados registrados en los ensayos mecánicos de tensión. En la figura 20 aparece el espécimen 1 después del ensayo, con una apariencia astillada pero con su forma aún completa. La gráfica (10) de esfuerzo vs deformación tiene un ligero comportamiento polinómico.

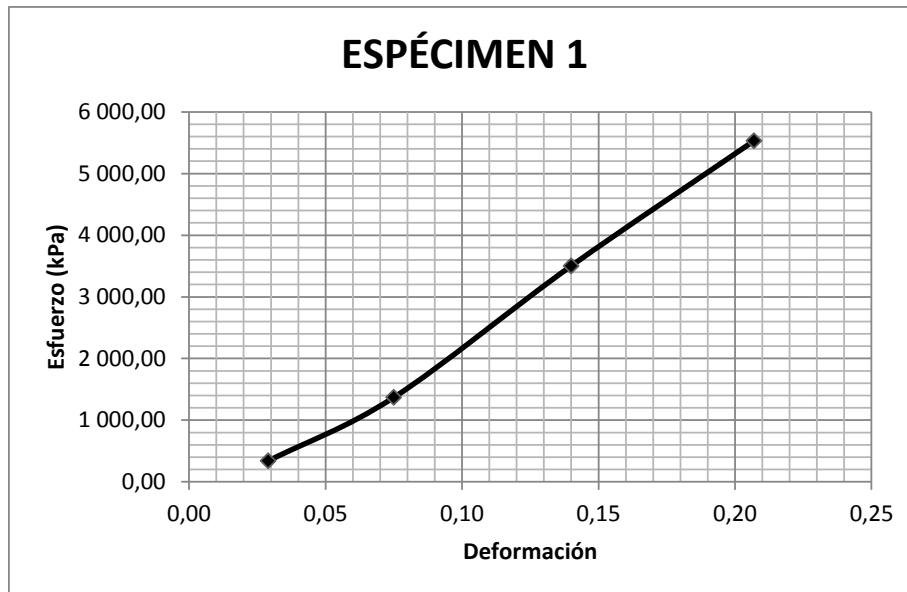


Figura 20 Especimen 1 después del ensayo mecánico de compresión. Fuente: Autora

ESPÉCIMEN 1		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,219	339,24	0,029
0,891	1369,52	0,075
2,304	3502,37	0,14
3,681	5531,34	0,207

Tabla 18 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Especimen 1.

Fuente: Autora



Gráfica 10 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 1. Fuente: Autora

El espécimen 2 presentó un comportamiento similar, con una fuerza máxima registrada de 3,26kN. Su forma se mantuvo a pesar de un pequeño desprendimiento lateral del material. En cuanto al esfuerzo vs la deformación, el desarrollo de la muestra fue un comportamiento gráfico lineal.

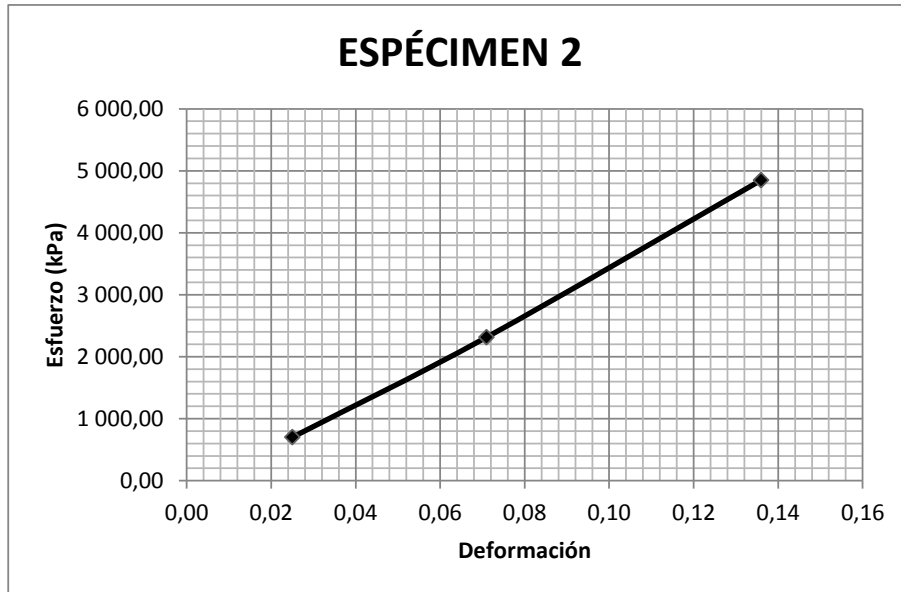


Figura 21 Espécimen 2 después del ensayo mecánico de compresión. Fuente: Autora

ESPÉCIMEN 2		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,462	700,39	0,025
1,539	2315,17	0,071
3,26	4850,37	0,136

Tabla 19 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 2.

Fuente: Autora



Gráfica 11 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 2. Fuente: Autora

A pesar de resistir una fuerza máxima cercana a la de los otros especímenes (3,74 kN), la muestra 3 se deformó completamente al finalizar el ensayo (figura 22). La gráfica (12) esfuerzo vs deformación presenta un crecimiento exponencial desde el inicio del ensayo hasta su conclusión, siendo ésta otra variación respecto a los otros especímenes.

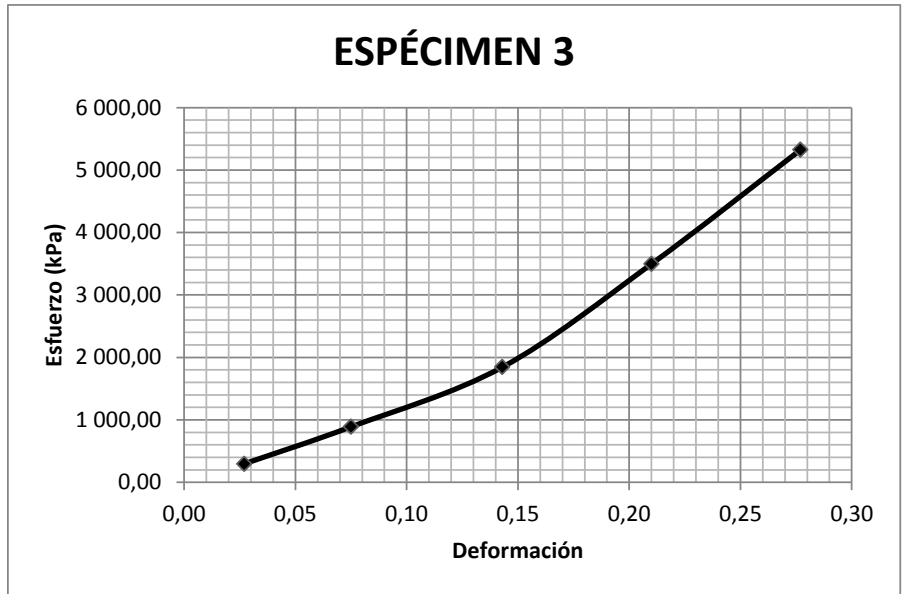


Figura 22 Espécimen 3 después del ensayo mecánico de compresión. Fuente: Autora

ESPÉCIMEN 3		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,199	295,69	0,027
0,603	888,60	0,075
1,266	1843,66	0,143
2,429	3495,79	0,21
3,744	5324,31	0,277

Tabla 20 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 3.

Fuente: Autora



Gráfica 12 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 3. Fuente: Autora

La muestra 4 presentó desprendimiento de material en una gran proporción, sin embargo, no perdió la estructura cilíndrica original (figura 23). Su carga máxima registrada fue de 3,86 kN frente a 0,205 de deformación, en una gráfica que inicia sus registros sobre una curva y finaliza sus coordenadas sobre una línea recta.

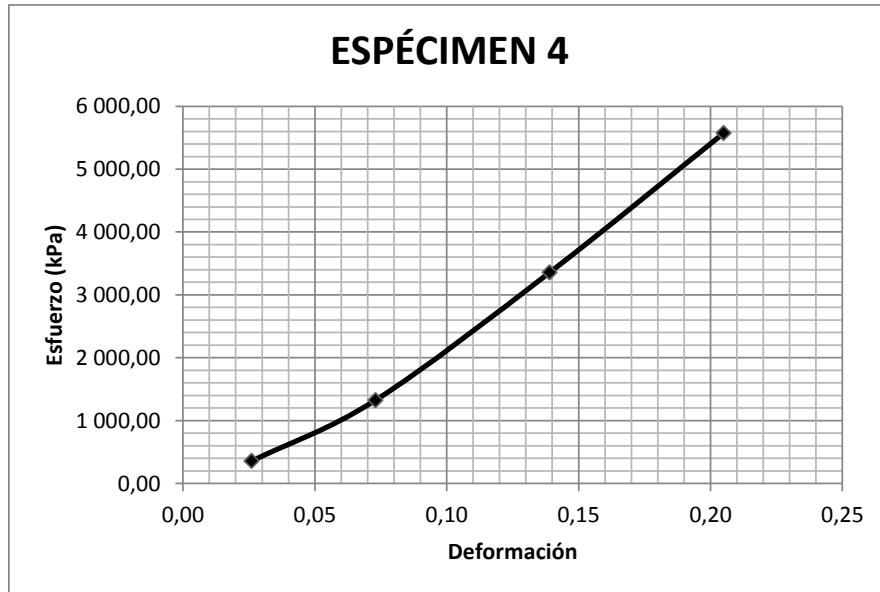


ESPÉCIMEN 4		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,239	354,93	0,026
0,899	1324,66	0,073
2,303	3355,90	0,139
3,868	5573,38	0,205

Tabla 21 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 4.

Fuente: Autora

Figura 23 Espécimen 4 después del ensayo mecánico de compresión. Fuente: Autora



Gráfica 13 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 4. Fuente: Autora

El menor valor de carga máxima lo registró el espécimen 5 con 2,66 kN (tabla 22). Esta muestra no perdió su forma, por el contrario quedó casi intacta si se desprecia una pequeña deformación lateral (figura 24). Al igual que el espécimen 4, la gráfica esfuerzo vs deformación marca sus primeros registros sobre una curva y finaliza marcándolos sobre una línea recta.

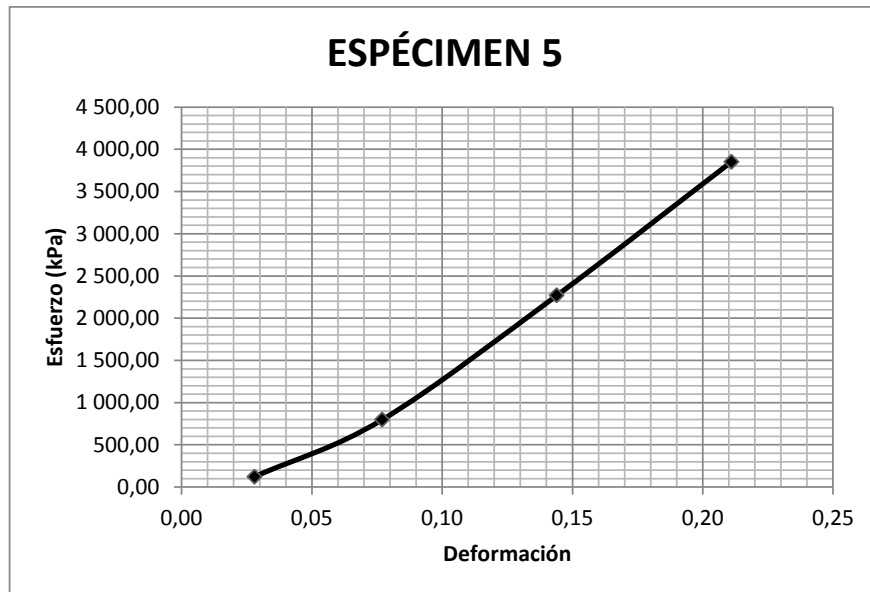


Figura 24 Espécimen 5 después del ensayo mecánico de compresión. Fuente: Autora

ESPÉCIMEN 5		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,082	122,29	0,028
0,539	797,18	0,077
1,552	2269,18	0,144
2,665	3851,47	0,211

Tabla 22 Fuerza, Esfuerzo y Deformación Espécimen 5.

Fuente: Autora



Gráfica 14 Esfuerzo vs Deformación Espécimen 5. Fuente: Autora

Los especímenes ensayados a compresión resistieron en promedio 3,4 kN de carga máxima y 5026,17 kPa de esfuerzo frente a una deformación media igual a 0,207.

7.3 SUELO/POLÍMERO

7.3.1 Elaboración de Especímenes.

Una vez caracterizados y ensayados mecánicamente el caolín y el epóxico por separado, se prosiguió con la elaboración de 5 conjuntos suelo/resina. El primer paso fue moldear las probetas de caolín saturado dentro de moldes plásticos para otorgarle una forma cilíndrica y regular. Para no perder la humedad alcanzada, se envolvieron las muestras en vinipel y se almacenaron en una nevera de icopor. El segundo paso comprendió la inyección de la resina en una perforación de aproximadamente 1,27mm de diámetro, ubicado en el centro de la probeta de caolín (figura 25). Al interior de la abertura se hicieron desniveles sobre las paredes. Como resultado se obtuvo el

conjunto suelo/resina con el que posteriormente se determinaría la adherencia entre los dos materiales (figura 26).



Figura 25 Molde para inyección de resina en el suelo. Fuente: Autora

En las tablas 23 y 24 se promedian las dimensiones para cada uno de los materiales en los 5 conjuntos elaborados. La altura total de la resina no se registró, debido a que la longitud del núcleo dentro del suelo era imposible de determinar.



Figura 26 Conjuntos suelo/resina. Fuente Autora

	DIMENSIONES CONJUNTO SUELO/RESINA (RESINA)				
	CONJUNTO 1	CONJUNTO 2	CONJUNTO 3	CONJUNTO 4	CONJUNTO 5
	D (mm)	D (mm)	D (mm)	D (mm)	D (mm)
Dato 1	17,71	17,65	17,73	17,50	17,77
Dato 2	17,73	17,60	17,75	17,53	17,79
Dato 3	17,74	17,71	17,62	17,51	17,79
Promedio	17,73	17,65	17,70	17,51	17,78
Área	246,80	244,76	246,06	240,89	248,38

Tabla 23 Dimensiones del conjunto (resina). Fuente: Autora

	DIMENSIONES CONJUNTO SUELO/RESINA (CAOLIN)									
	CONJUNTO 1		CONJUNTO 2		CONJUNTO 3		CONJUNTO 4		CONJUNTO 5	
	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)	H (mm)	D (mm)
Dato 1	100,12	56,37	99,98	57,53	101,52	56,18	100,94	56,84	98,38	56,64
Dato 2	101,20	57,12	100,34	57,01	100,21	56,76	100,53	57,69	101,02	56,93
Dato 3	99,55	56,48	99,78	56,31	100,09	56,78	100,67	56,08	100,75	56,22
Promedio	100,29	56,66	100,03	56,95	100,61	56,57	100,71	56,87	100,05	56,60

Tabla 24 Dimensiones del conjunto (caolín). Fuente: Autora

7.3.2 Adaptación Ensayo de *Pull-Out*.

En el ensayo de *Pull-Out* se separan uniones de concreto y barras de acero a través de la acción de cargas perpendiculares a su plano con la aplicación de esfuerzos de tracción vertical que provocan un deslizamiento entre ambos materiales. Para el caolín y la resina epoxy, se mantuvo el principio de este ensayo al aplicar un esfuerzo vertical (en este caso fue de compresión debido a la complejidad a la cual se podía llegar, en el laboratorio donde se realizaron las pruebas) sobre la unión de estos materiales como se observa en la figura 27. En este montaje, la celda de carga se colocó sobre la parte de la resina; dos aditamentos se colocaron en la base de la máquina para que en primer lugar, el polímero pudiera atravesar el suelo sin impedimentos y en segundo lugar el suelo no presentara un movimiento significativo durante el ensayo. Esta misma razón sustenta el uso del tubo de PVC en la parte inferior del conjunto, ya que la humedad del caolín afecta su estabilidad.

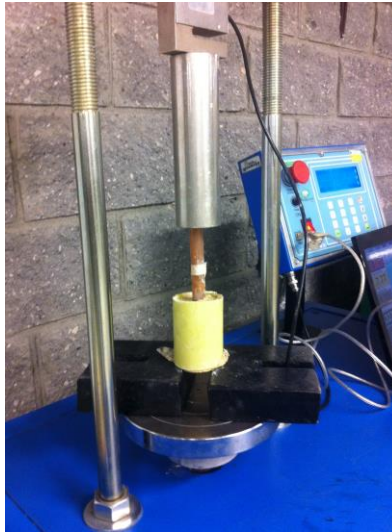


Figura 27 Adaptación ensayo de *pull-out*. Fuente: Autora

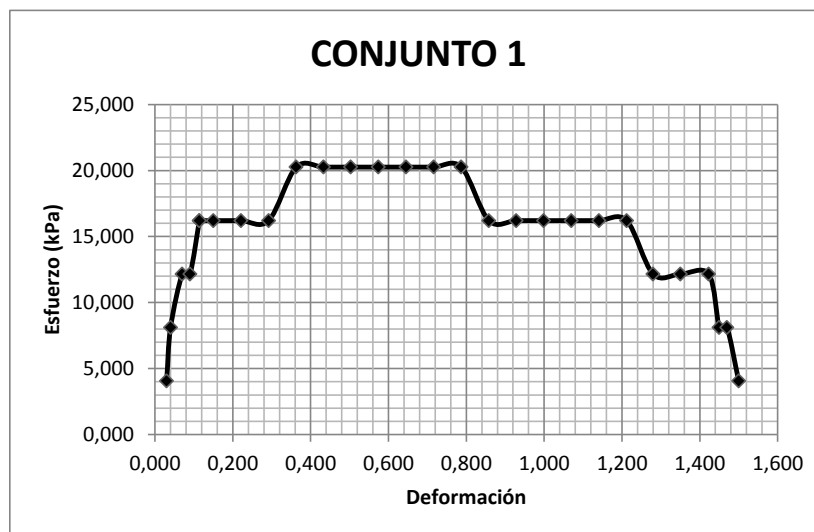
El primer ensayo se ejecutó sobre el conjunto 1 (figura 28). En la gráfica (15) esfuerzo vs deformación se agrupan los datos obtenidos en una curva cóncava cuyo punto máximo se registra en un esfuerzo normal de 20,259 kPa, valor constante en un rango de deformación ($x= 0,363$ a $x=0,787$). Tanto en la gráfica 15 como en la tabla 25, se observa cómo la muestra se mantiene cuando alcanza un punto de carga máxima y cómo posteriormente vuelven a descender los valores de la fuerza hasta llegar a 0,001 kN nuevamente.



Figura 28 Conjunto 1 Suelo/Resina después del ensayo. Fuente: Autora

CONJUNTO 1		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,001	4,052	0,030
0,002	8,104	0,040
0,003	12,156	0,070
0,003	12,156	0,090
0,004	16,207	0,114
0,004	16,207	0,114
0,004	16,207	0,150
0,004	16,207	0,221
0,004	16,207	0,292
0,005	20,259	0,363
0,005	20,259	0,433
0,005	20,259	0,503
0,005	20,259	0,574
0,005	20,259	0,645
0,005	20,259	0,716
0,005	20,259	0,787
0,004	16,207	0,858
0,004	16,207	0,928
0,004	16,207	0,999
0,004	16,207	1,070
0,004	16,207	1,141
0,004	16,207	1,212
0,003	12,156	1,280
0,003	12,156	1,350
0,003	12,156	1,423
0,002	8,104	1,450
0,002	8,104	1,470
0,001	4,052	1,500

Tabla 25 Carga, Esfuerzo y Deformación Conjunto 1. Fuente: Autora



Gráfica 15 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 1. Fuente: Autora

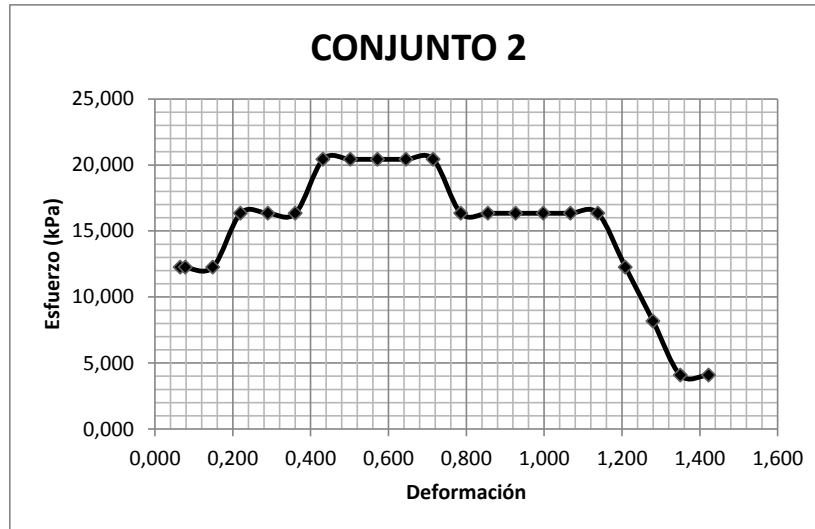
El conjunto 2 resistió un esfuerzo máximo igual a 20,428 kPa y registró una deformación al final del ensayo igual a 1,42. Este espécimen en particular, registró una carga inicial de 0,003 kN pero cuando la carga alcanzó su punto máximo y descendió, registró un valor final de 0,001 kN. Como el conjunto 1, en varios intervalos de deformación, los valores de la fuerza se mantuvieron constantes, haciendo que la secuencia de datos graficara una forma cóncava para todo el ensayo.



Figura 29 Conjunto 2 Suelo/Resina después del ensayo. Fuente: Autora

CONJUNTO 2		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,003	12,257	0,065
0,003	12,257	0,078
0,003	12,257	0,149
0,004	16,342	0,220
0,004	16,342	0,290
0,004	16,342	0,361
0,005	20,428	0,432
0,005	20,428	0,502
0,005	20,428	0,572
0,005	20,428	0,645
0,005	20,428	0,715
0,004	16,342	0,786
0,004	16,342	0,856
0,004	16,342	0,927
0,004	16,342	0,998
0,004	16,342	1,068
0,004	16,342	1,138
0,003	12,257	1,209
0,002	8,171	1,280
0,001	4,086	1,350
0,001	4,086	1,423

Tabla 26 Carga, Esfuerzo y Deformación Conjunto 2. Fuente: Autora

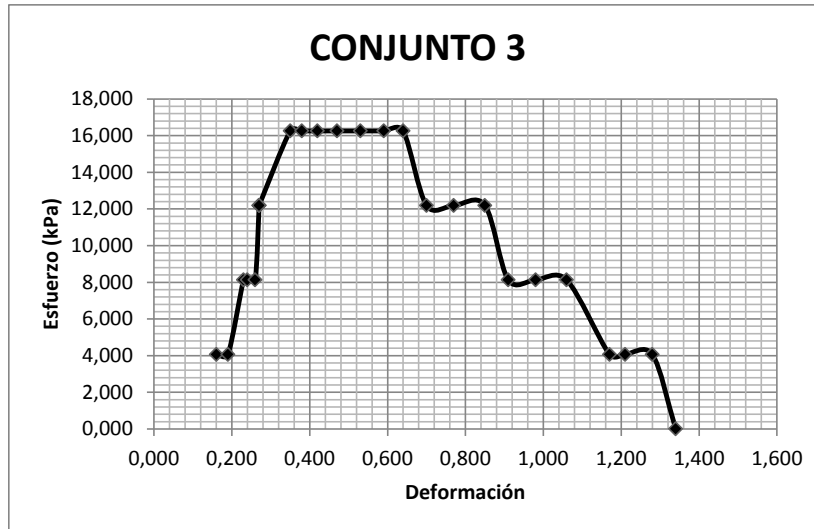


Gráfica 16 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 2. Fuente: Autora

Con una conducta similar, la muestra 3 alcanzó una carga máxima de 0,004 kN y una deformación al final del ensayo igual a 1,34. En la tabla 27 se observa la carga, el esfuerzo y la deformación y la gráfica 17 ilustra el comportamiento del conjunto, cuya variación principal respecto a los anteriores especímenes, fue la mínima deformación alcanzada durante el inicio del ensayo antes de llegar al esfuerzo máximo de 16,256 kPa, valor mínimo registrado en todas las pruebas ejecutadas.



Figura 30 Conjunto 3 Suelo/Resina después del ensayo. Fuente: Autora



Gráfica 17 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 3. Fuente: Autora

CONJUNTO 3		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,001	4,064	0,160
0,001	4,064	0,190
0,002	8,128	0,230
0,002	8,128	0,240
0,002	8,128	0,260
0,003	12,192	0,270
0,003	12,192	0,270
0,003	12,192	0,270
0,004	16,256	0,350
0,004	16,256	0,380
0,004	16,256	0,420
0,004	16,256	0,470
0,004	16,256	0,530
0,004	16,256	0,590
0,004	16,256	0,640
0,003	12,192	0,700
0,003	12,192	0,770
0,003	12,192	0,850
0,002	8,128	0,910
0,002	8,128	0,980
0,002	8,128	1,060
0,001	4,064	1,170
0,001	4,064	1,210
0,001	4,064	1,280
0,000	0,000	1,340

Tabla 27 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 3. Fuente: Autora

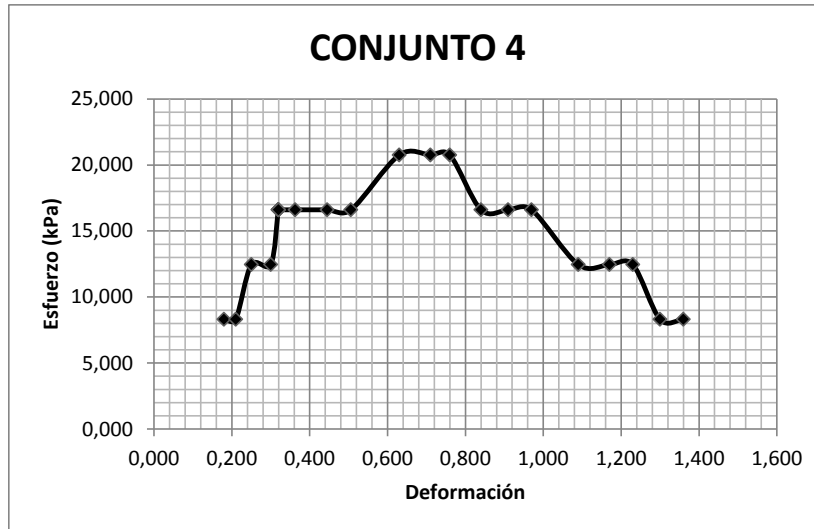
El conjunto 4 marcó una deformación al final del ensayo igual a 1,36, alcanzando una carga máxima de 0,005 kN. En esta prueba se volvió a registrar un esfuerzo máximo por encima de los 20 kPa en un intervalo mucho más pequeño respecto a las muestras anteriores ($x=0,630$ a $x=0,760$). La secuencia de todos los datos forma una gráfica cóncava.



Figura 31 Conjunto 4 Suelo/Resina después del ensayo. Fuente: Autora

CONJUNTO 4		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,002	8,302	0,180
0,002	8,302	0,210
0,003	12,454	0,250
0,003	12,454	0,300
0,004	16,605	0,319
0,004	16,605	0,319
0,004	16,605	0,319
0,004	16,605	0,320
0,004	16,605	0,320
0,004	16,605	0,363
0,004	16,605	0,445
0,004	16,605	0,506
0,005	20,756	0,630
0,005	20,756	0,710
0,005	20,756	0,760
0,004	16,605	0,840
0,004	16,605	0,910
0,004	16,605	0,970
0,003	12,454	1,090
0,003	12,454	1,170
0,003	12,454	1,230
0,002	8,302	1,300
0,002	8,302	1,360

Tabla 28 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 4. Fuente: Autora



Gráfica 18 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 4. Fuente: Autora

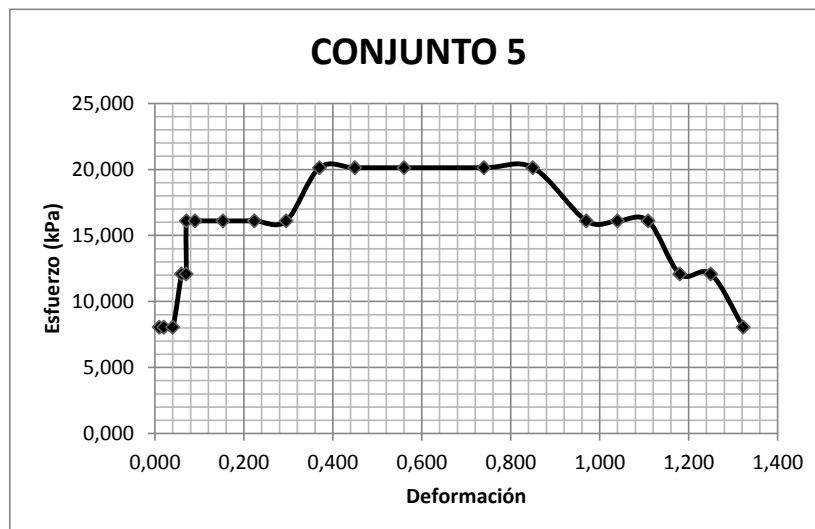
El conjunto 5 registró una deformación de 1,32 al finalizar el ensayo. Marcó una carga máxima de 0,005 kN. Las deformaciones de este espécimen son mayores en las tres etapas del ensayo: la primera, corresponde al inicio de la aplicación de carga hasta el momento en que la muestra alcanza su punto máximo. La segunda etapa comprende la actividad constante de la carga máxima en un rango de deformación $x=0,370$ a $x=0,850$; y la tercera fase involucra la caída de la fuerza hasta un punto mínimo que en este caso fue 0,002 kN.



Figura 32 Conjunto 5 Suelo/Resina después del ensayo. Fuente: Autora

CONJUNTO 5		
FUERZA (kN)	ESFUERZO (kPa)	DEFORMACIÓN
0,002	8,052	0,010
0,002	8,052	0,020
0,002	8,052	0,040
0,003	12,078	0,060
0,003	12,078	0,070
0,004	16,104	0,071
0,004	16,104	0,090
0,004	16,104	0,153
0,004	16,104	0,224
0,004	16,104	0,295
0,005	20,130	0,370
0,005	20,130	0,450
0,005	20,130	0,560
0,005	20,130	0,740
0,005	20,130	0,850
0,004	16,104	0,970
0,004	16,104	1,040
0,004	16,104	1,109
0,003	12,078	1,180
0,003	12,078	1,250
0,002	8,052	1,323

Tabla 29 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 5. Fuente: Autora



Gráfica 19 Esfuerzo vs Deformación Conjunto 5. Fuente: Autora

7.3.3 Modelación Numérica.

Con el fin de realizar un análisis de los esfuerzos y las deformaciones, así como de la estabilidad del conjunto suelo/resina, se simuló numéricamente el ensayo adaptado de *pull-out* en PLAXIS, un software de elementos finitos bidimensionales enfocado en el estudio de problemas geotécnicos. En este programa, se generó un modelo geométrico en dos dimensiones de la sección transversal vertical del espécimen caolín/resina, en el que se contemplaron las condiciones del ensayo ejecutado (figura 33).

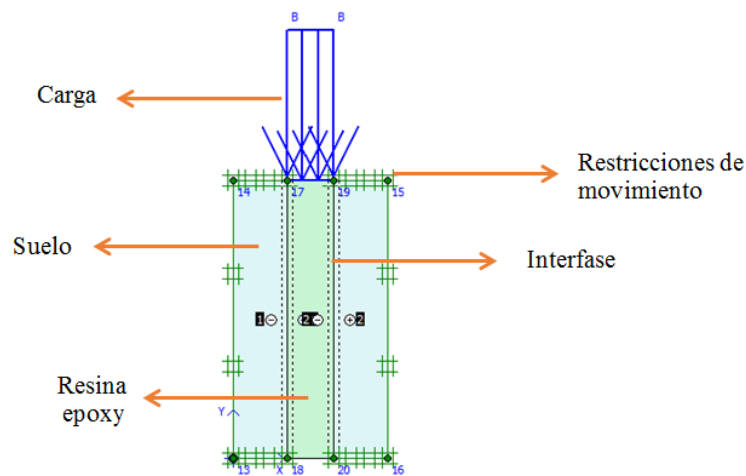


Figura 33 Modelo geométrico sección transversal conjunto suelo/resina. Fuente. Autora

Para cada material se manejó un modelo constitutivo diferente. En el caso del caolín se utilizó el modelo de Mohr-Coulomb en el que se considera que la falla del suelo se produce cuando el esfuerzo cortante es igual a la suma de la cohesión más el producto del esfuerzo normal en el plano de falla por la tangente del ángulo de fricción interno ($\tau = c + \sigma_n \tan f$) (González-Cueto, 2013). Para ello se tuvieron en cuenta tres parámetros: el módulo de Young o módulo de elasticidad E , el coeficiente de Poisson ν y la cohesión no drenada c_u ya que se considera que el problema geotécnico relacionado con un anclaje se encuentra dentro de una condición no drenada del suelo, este parámetro fue obtenido de los ensayos de compresión no confinada mostrados anteriormente (figura 34). Con la resina epóxica se operó el modelo elástico lineal que representa la ley de Hooke de elasticidad lineal isótropa, la cual relaciona las deformaciones del material

con las fuerzas aplicadas contemplando dos parámetros de rigidez elástica: el módulo de Young E y el coeficiente de Poisson ν (figura 35).

El módulo de elasticidad del caolín, se calculó a partir de las pendientes de la zona lineal de las gráficas esfuerzo vs deformación obtenidas con los ensayos de compresión inconfiada (tabla 30).

MÓDULO DE ELASTICIDAD E	
kN/m ²	
Probeta 1	4363,75
Probeta 2	5298,94
Probeta 3	4682,70
Probeta 4	4279,31
Promedio	4656,17

Tabla 30 Módulo de elasticidad del caolín. Fuente: Autora

La cohesión no drenada se calculó como la mitad del esfuerzo promedio máximo alcanzado por todas las probetas en el mismo ensayo de compresión no confinado (tabla 31).

COHESIÓN c	
kN/m ²	
Probeta 1	1,49
Probeta 2	1,59
Probeta 3	1,56
Probeta 4	1,44
Promedio	1,52
Prom/2	0,76

Tabla 31 Cohesión caolín. Fuente: Autora

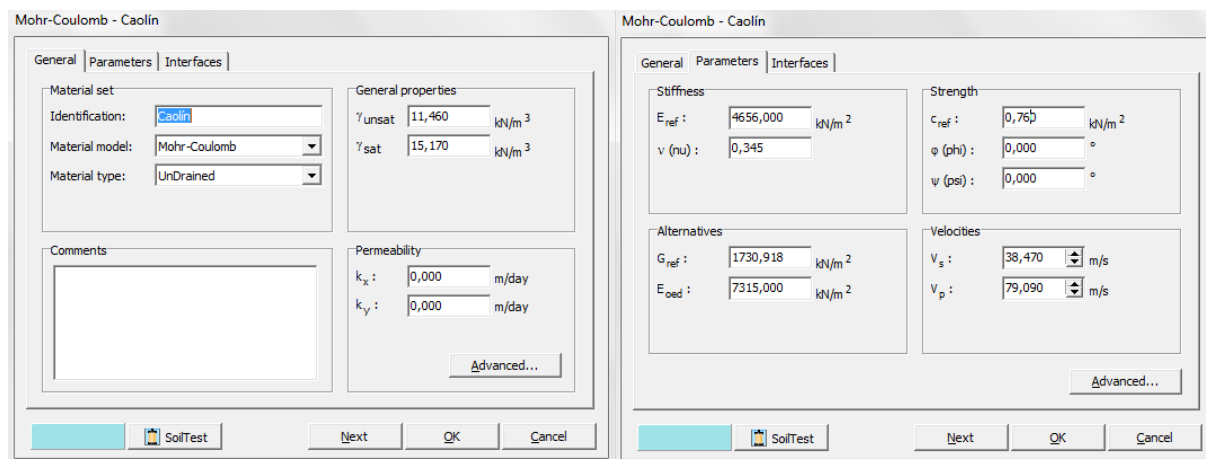


Figura 34 Condiciones generales y parámetros para el caolín. Fuente: Autora

A su vez, el módulo de elasticidad de la resina epoxy se calculó con el promedio de las pendientes de las gráficas de esfuerzo vs deformación registradas en los ensayos de compresión (tabla 32).

MÓDULO DE ELASTICIDAD E	
kN/m ²	
Espécimen 1	22397,40
Espécimen 2	35103,78
Espécimen 3	12352,34
Espécimen 4	20632,40
Espécimen 5	13773,23
Promedio	20851,83

Tabla 32 Módulo de elasticidad de la resina epoxy. Fuente: Autora

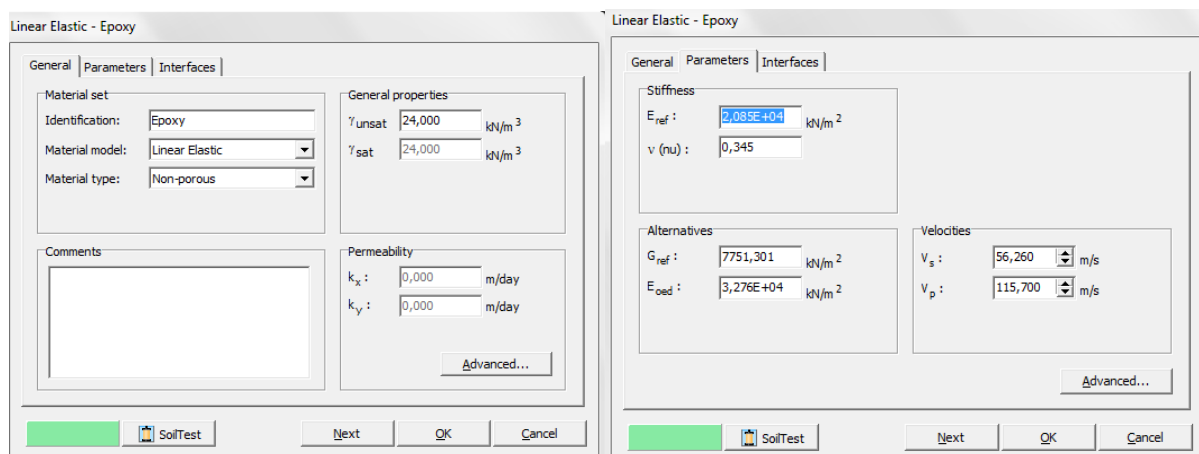


Figura 35 Condiciones generales y parámetros para la resina epoxy. Fuente: Autora

Se utilizó 0,345 como coeficiente de Poisson ν , valor teórico medio de los suelos clasificados como arcillas cuyos valores de este parámetro oscilan entre 0,2 a 0,5 dependiendo de la condición de drenaje del problema geotécnico (Braja M. Das, 2001).

Una vez ingresados todos los parámetros se configuró la carga a compresión con un valor de $-19,560 \text{ kN/m}^2$, promedio de los máximos esfuerzos alcanzados por los conjuntos caolín/resina.

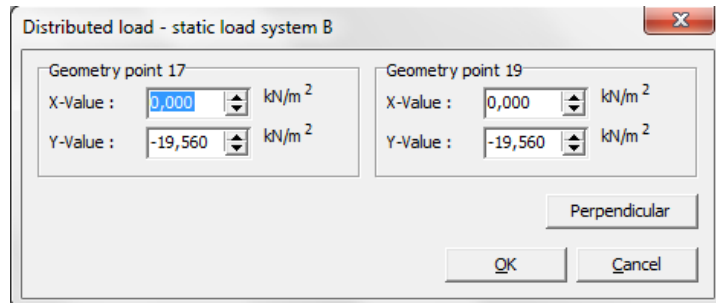


Figura 36 Carga para modelación numérica. Fuente: Autora

Con todas las configuraciones, parámetros y valores ingresados, se corrió el modelo con el que se consiguieron los resultados a continuación descritos.

En la figura 37 se observa la malla deformada, es decir, la gráfica de las deformaciones ocurridas en el modelo exageradas 2000 veces, en la malla de elementos finitos

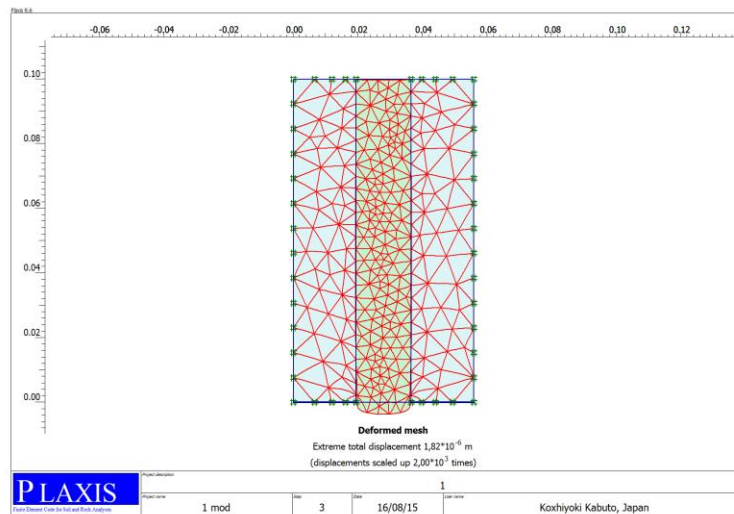


Figura 37 Malla deformada. Fuente: Autora

En la figura 38 se muestran los componentes acumulados del desplazamiento vertical, que para esta modelación son iguales a los desplazamiento totales, debido a que el desplazamiento horizontal fue nulo como consecuencia de las restricciones de movimiento laterales y superiores que simulaban las condiciones reales del ensayo en laboratorio. Los desplazamientos se ubicaron en los lados adyacentes de la interfase y en el centro de la resina epoxy, siendo mucho mayores en el extremo inferior de la misma.

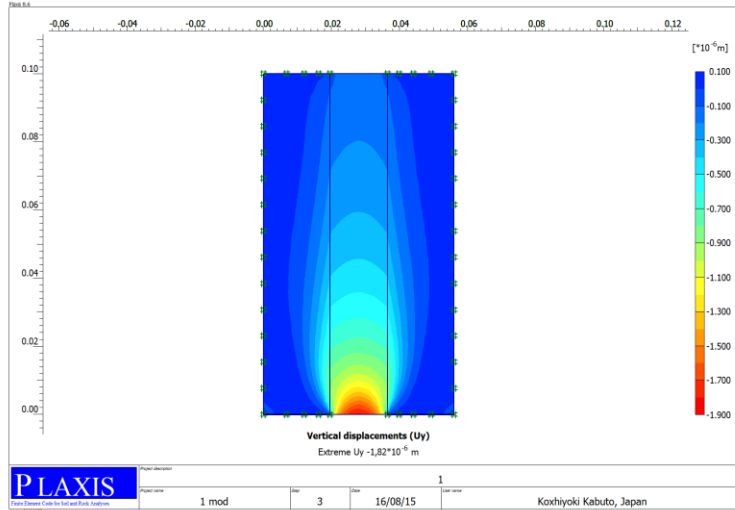


Figura 38 Desplazamiento vertical. Fuente: Autora

En la figura 39 se observan las tensiones efectivas, es decir, las debidas al peso propio del suelo. Los mayores valores se concentran en el extremo inferior del conjunto con un esfuerzo efectivo de $-1,47 \text{ kN/m}^2$. Como se asumió una carga a compresión se consideran los esfuerzos negativos.

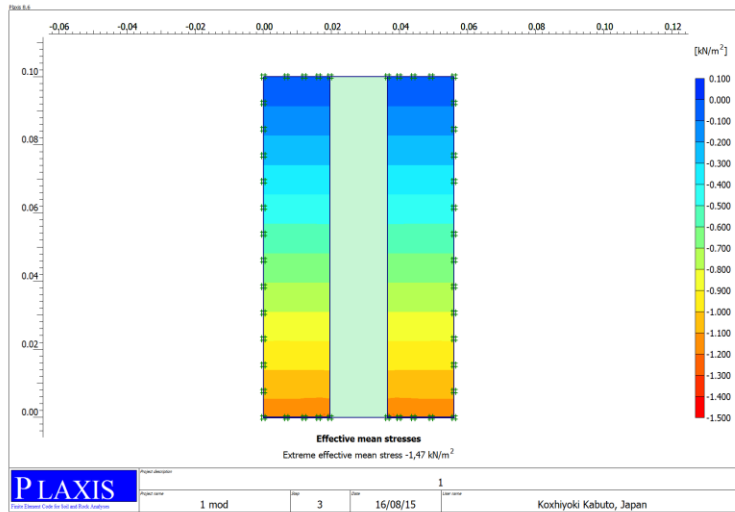


Figura 39 Tensiones efectivas. Fuente: Autora

En la figura 40 se observan las tensiones totales (tensiones efectivas más las presiones intersticiales activas) representadas en tensiones medias, las cuales son mucho mayores en la

parte de la interfase de los extremos inferiores del conjunto; allí, el esfuerzo total alcanza a marcar $-4,71 \text{ kN/m}^2$.

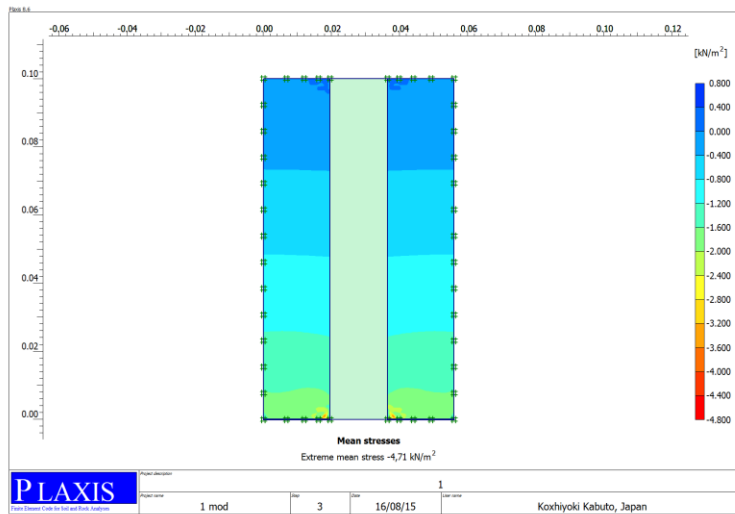


Figura 40 Tensiones medias. Fuente: Autora

En la figura 41 se observan los puntos plásticos, es decir, puntos de tensión en los que se desarrollan deformaciones plásticas; estos se pueden ver sobre el gráfico de la geometría no deformada. Los cuadros con borde de color rojo, ubicados en la parte inferior de la interfase, indican que las tensiones se encuentran sobre la envolvente de rotura de Coulomb; los cuadros negros son indicadores de tensiones de corte en el extremo superior del conjunto, presentándose con más notoriedad en el suelo y en la interfase de esa zona.

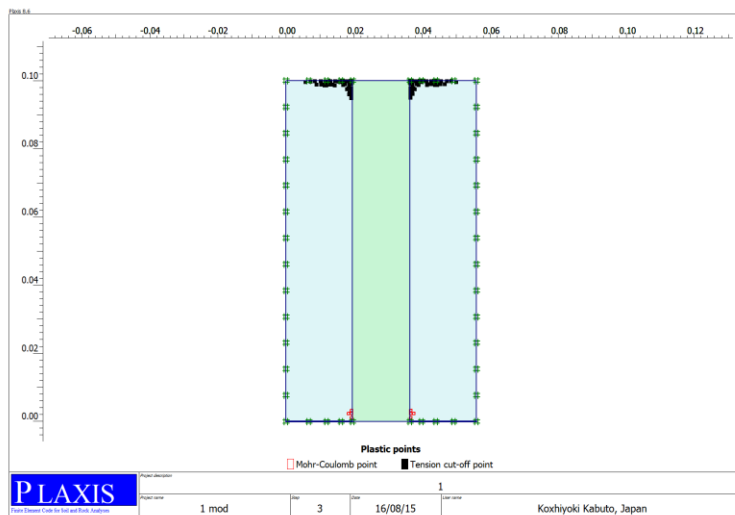


Figura 41 Puntos plásticos. Fuente. Autora

En la figura 42 se muestran las deformaciones incrementales, es decir, los incrementos de deformación del conjunto en los puntos de tensión calculados, representados en deformaciones de corte que en la mayoría del conjunto son homogéneos hasta llegar a la interfase del extremo inferior de la geometría. Aquí se alcanzan deformaciones en dos direcciones (positivas y negativas) de $79,45 \times 10^{-3} \%$

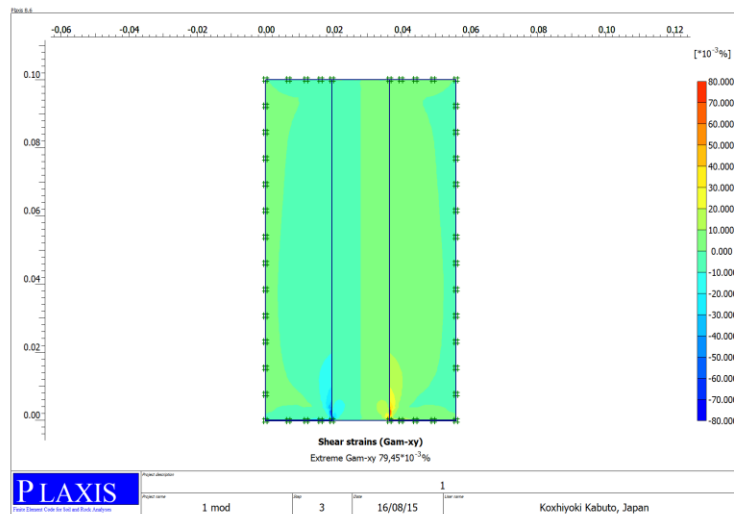


Figura 42 Deformaciones de corte. Fuente: Autora

La figura 43 muestra las tensiones totales cartesianas en los componentes x-y, que como la figura anterior, localiza los mayores esfuerzos en la zona adyacente a la interfase del extremo inferior del conjunto, con valores máximos (positivos y negativos) de $824,85 \times 10^{-3} \text{ kN/m}^2$.

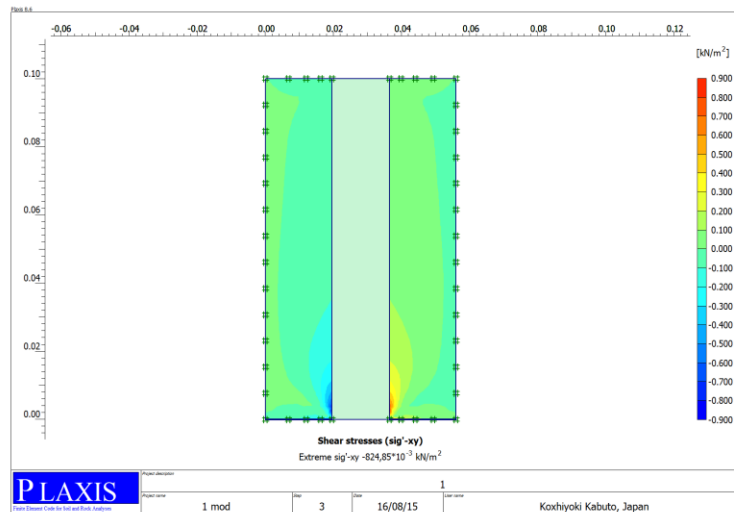
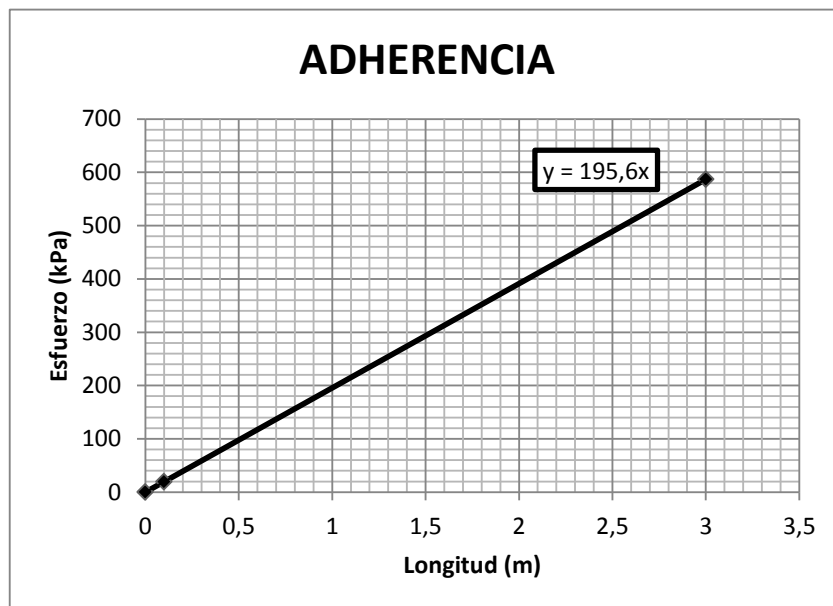


Figura 43 Tensiones cortantes en los componentes σ_{xy} . Fuente: Autora

7.3.4 Análisis (Adherencia)

La adherencia en la interfase suelo/resina se expresa como el máximo esfuerzo registrado en los ensayos adaptados de *pull-out*, que puede ser interpretado como el valor necesario para vencer la adherencia entre el tándem polímero-suelo. Este esfuerzo arrojó un valor promedio de $19,560 \text{ kN/m}^2$ en un conjunto de $0,10 \text{ m}$ de longitud. Vinculando estas dos medidas en una relación directamente proporcional, se tiene que para una longitud real de una barra en un anclaje tipo *soil nailing* la adherencia va a ser mucho mayor (gráfica 20). Así, para un *nailing* con una longitud de 3 m , el valor estimado de la adherencia sería $586,8 \text{ kN/m}^2$, que de acuerdo a la modelación numérica se ubicaría en la unión de las dos materiales, una de las zonas más importante de un anclaje *soil nailing*.

Este valor estimativo de la adherencia ($y = 195,6x$) se encuentra limitado por la cantidad de ensayos de *pull-out* realizados y por la modelación en dos dimensiones que no contempla todas los parámetros del conjunto caolín/resina. Sin embargo, funciona como una aproximación de una medida que influye en el comportamiento a largo plazo de los *soil nailing*.



Gráfica 20 Adherencia. Fuente: Autora

8. DISCUSIONES

La resina epoxy es un polímero que tiene muy buen comportamiento al someterlo a esfuerzos de tensión y compresión, cuenta con buenas propiedades a la rotura, alta resistencia a la temperatura y sobre todo alta resistencia a la humedad. Con los ensayos de *pull-out* realizados a los conjuntos suelo/resina epoxy y la posterior modelación numérica de los mismos, se comprobó que la adherencia de este polímero con otros materiales es alta, aun cuando dicho material tenga niveles de saturación significativos. En esta investigación se manipularon probetas de caolín con porcentajes de humedad del 32%, que al ser ensayadas con los núcleos de resina, lograron alcanzar valores de adherencia mayores a $20,0 \text{ kN/m}^2$, demostrando así que un suelo y esta clase de polímero se pueden combinar sin inconvenientes.

En cuanto a la resistencia que puede soportar la resina epoxy, se obtuvo un promedio de 6,383 MPa a tensión en barras con diámetro de $\frac{1}{2}$ ", esfuerzo que se consideraría muy bajo si se compara con 500 MPa que un anclaje tipo *soil nailing* estándar de 1" llega a tolerar, teniendo en cuenta que los diámetros de barras diferentes en la comparación favorecen a los *nailings* convencionales de acero. No obstante, la investigación realizada por *Park et al* en el año 2013, recrea una posibilidad para el uso de estos polímeros reforzados con fibra de carbono en obras de estabilidad: en vez de las barras de acero fijadas con lechadas de cemento, se colocaría una red densa de micro anclajes de resina epoxy en los taludes o suelos de excavación a tratar, con separaciones mucho menores a las contempladas en los procesos constructivos actuales, siguiendo parámetros de diseño que permitan soportar las cargas propias del suelo.

Además de convertirse en una alternativa, los *soil nailing* con resina epoxy son comparables económicamente con los anclajes ordinarios, ya que el cambio en el sistema de construcción radica en unir el proceso de instalación de la barra y el llenado e inyección de la lechada, para modificarlo por solo la inyección del polímero en los huecos pre excavados. El precio de las barras de acero es menor frente al valor monetario de la resina epoxy, empero, el mantenimiento que se debe ejecutar sobre las primeras es mayor, teniendo en cuenta que los daños por corrosión y oxidación al contacto con el agua generan en muchos casos reemplazos totales de los *nailings*,

hecho que no ocurriría con los polímeros por su resistencia a los cambios ambientales y a la humedad. Adicionalmente las inyecciones de lechada en los anclajes estándar, producen problemas a la hora de controlar la eficiencia del fluido con el que logran rellenar el espacio entre la barra y el suelo, generando incertidumbre en el proceso constructivo. Con el uso del polímero y a través de un cálculo volumétrico óptimo dicha incertidumbre sería despreciable. A largo plazo, los costos podrían compensarse y las secuencias de excavación y refuerzo disminuirían sus tiempos de ejecución e incrementarían su eficiencia.

9. CONCLUSIONES

El comportamiento mecánico de la resina epoxy en los ensayos de tensión y compresión fue muy superior si se compara con la respuesta del caolín, suelo arcilloso con el que se trabajó durante toda la investigación, pues las resistencias máximas alcanzadas en promedio fueron $6383,64 \text{ kN/m}^2$ y $1,52 \text{ kN/m}^2$ respectivamente. El polímero utilizado alcanzó estos esfuerzos gracias al uso de catalizadores y aditamentos, elementos que además de otorgarle buenas propiedades mecánicas le proporcionaban altos niveles de estabilidad. Cabe resaltar que el comportamiento más apropiado del epóxico se obtuvo en los ensayos de tensión tal y como se esperaba de acuerdo a la investigación realizada.

Al unir los dos materiales, se armaron conjuntos caolín/resina ensayados bajo el principio de la prueba de *pull-out*, en donde en vez de halar se empujó el núcleo del sistema en una máquina que registró los esfuerzos y las deformaciones de cada tándem. Con estos datos, se elaboraron curvas esfuerzo vs deformación que al compararlas entre sí presentaban un comportamiento gráfico homogéneo con valores máximos y últimos muy similares

Con la modelación numérica llevada a cabo en el software PLAXIS, se calculó una estimación de los esfuerzos y las deformaciones del conjunto suelo/resina, sin embargo, estos resultados se vieron limitados por la simulación en dos dimensiones, que no permite contemplar todas las condiciones reales ni todos los parámetros del ensayo adaptado de *pull-out*. A pesar de ello, se cuantificó de manera artificial el valor necesario para vencer la adherencia en la interface suelo/polímero, con un resultado igual a $19,560 \text{ kN/m}^2$. Al vincular este resultado con la altura de los especímenes de caolín/resina epoxy, se planteó una relación directamente proporcional que permite evaluar la adherencia del suelo con barras de diferentes longitudes y sustenta la posibilidad de medir este parámetro bajo otras condiciones.

De esta manera se obtuvo una aproximación del comportamiento de la interfase y de cada uno de sus componentes, que en conjunto sí pueden ser una alternativa a los anclajes *soil nailing* tradicionales si se instalan como una red de micro anclajes con mínimas separaciones en taludes y suelos de excavación.

10. RECOMENDACIONES

En esta investigación se plantea el uso de micro anclajes de resina epoxy distribuidos en una red densa a los largo de las zonas a estabilizar, sin embargo, se recomienda continuar con la propuesta para establecer un proceso constructivo que abarque tanto el proceso de inyección del polímero en los agujeros pre excavados, como la colocación de las tuercas de fijación en las cabezas de los *nailings*, pasando por el revestimiento de la cara del talud.

Así mismo, se exhorta a continuar estudiando la interfase suelo/polímero con suelos de distintas clasificaciones en condiciones variables, para estimar con más precisión el comportamiento en la unión de estos materiales y parametrizar cuantitativamente las magnitudes de la adherencia.

11. REFERENCIAS

- Abraira, D. (2010). *Nuevas redes termoestables a partir de una resina epoxi modificada con polímeros hiperramificados basados en poliglicidol*. Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España.
- Akisanya, A.R. & Ivanovic, A. (2014). Debonding along the fixed anchor length of a ground anchorage. *Engineering Structures*. 74, 23-31.
- Bartolomé, J. (1997). El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 36, 7-19.
- Byrne, R.J. Cotton, D. Potterfield, J. Wolschlag, C. & Uebler, G. (1998). *Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Wall*. Reporte No. FHWA-SA-96-069R. Recuperado del sitio de internet de la Federal Highway Administration: <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/010571.pdf>
- Cabrera, R. (2011). *Ensayos de pull-out/bending sobre uniones aeronáuticas* Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, Sevilla, España.
- Carbonato Cálcico. (s.f). Recuperado de http://www.sagristaproducts.com/es/cargas-minerales/97-carbonato-calcico.html#more_info_inner
- Cimentada, A. (2009). *Análisis Experimental en Modelo Reducido de la Consolidación Radial y Deformación de un Suelo Blando Mejorado con Columnas de Grava*. (Tesis Doctoral). Universidad de Cantabria. España.
- Coderch, J. (s.f.). *Riesgos en el empleo de Resinas Epoxi*. Publicación Institucional de Ibermutuamur. Recuperado de http://www.ibermutuamur.es/revista_bip_antigua/20/pdf/seguridadlaboral_bip20.pdf

- Cortés, D. (2010). *Diseño de un Sistema de Secado de Caolín Compuesto por Secado Solar en Invernaderos y Secado Directo en Secador Rotatorio*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Das, B.M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Thomson Editores.
- Gómez, C., da Cunha, R., Vásquez, A. & Ruge, J. (2013) Modelación numérica de ensayos elementales de muestras de suelo cohesivo con inclusión de un núcleo de epoxi. *Simposio Argentino de Polímeros*. Buenos Aires, Argentina.
- González-Cueto, Omar; Herrera Suarez, Miguel; Iglesias Coronel, Ciro E. & López Bravo, Elvis. (2013). Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. *Rev Cie Téc Agr*, 22(3), 75-80.
- Guerrero, A. (2009). *Diseño de un Perfil de Acero para Losa Mixta y Realización de Ensayos de Pull-Out para el Estudio de un Nuevo Sistema de Conexión Mecánica entre Acero y Hormigón*. Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España.
- Ivanovic, A., Neilson, R. & Roger, A. (2002). Influence of Prestress on the Dynamic Response of Ground Anchorages. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 128(3), 237-249.
- Jara Mori, G. (2008). *Estudio de la Aplicabilidad de Materiales Compuestos al Diseño de Estructuras de Contención de Tierras y su Interacción con el Terreno, Para su Empleo en Obras de Infraestructura Viaria*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. España
- Jewell, R & Greenwood, J. (1988). Long Term Strength and Safety in Steep Soil Slopes Reinforced by Polymer Materials. *Geotextiles and Geomembranes*, 7, 81-118.

Juárez, E. (2005). *Mecánica de suelos. Fundamentos de la mecánica de suelos*. Recuperado de https://books.google.com.co/books?id=3OPOaDHQC8wC&pg=PA156&lpg=PA156&dq=caol%C3%ADn+tipo+suelo+clasificaci%C3%B3n+arcilla&source=bl&ots=e6_8plEq7k&sig=I_IQw9S3Q_cmGIneCBzym42DRjo&hl=es&sa=X&ved=0CDUQ6AEwBGoVChMIrpuKINCwxwIVBpIeCh3KWwHQ#v=onepage&q=caol%C3%ADn%20tipo%20suelo%20clasificaci%C3%B3n%20arcilla&f=false

López, T., Hernández, J., Horta, J., Coronado, A. & Castaño, V. (2010). Polímeros para la Estabilización Volumétrica de Arcillas Expansivas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(3), 159-168.

Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías & Universidad Nacional de Colombia. (2006). *Manual para la inspección visual de obras de estabilización*. Recuperado de https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.invias.gov.co%2Findex.php%2Fechos-de-transparencia%2Finformacion-financiera-y-contable%2Fdoc_download%2F977-manual-para-la-inspeccion-visual-de-obras-de-estabilizacion&ei=ZBTIU57JM8rfsATK7oKwAw&usq=AFQjCNGEalf3UufiE4kxefs721QA7wCaA&sig2=vWxVwW7k2rLUhhNQj2KGCg&bvm=bv.72676100,d.cWc

Morales, R. (2008). *Muros, Taludes y Terraplenes de Suelo Reforzado: Control de Erosión*. Recuperado de <https://snavarro.files.wordpress.com/2008/09/control-erosion-en-suelos.pdf>

Park, J., Jung, W., Kang, J. & Kum, M. (2013). Behavior Characteristics of Bonded Type Anchorage for CFRP Tendon. *Engineering*. Doi: <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2013.511111>

Paz Enríquez, L. & Rojas Molina, R. (2007). *Formulación de Recubrimientos a Partir de Partículas Incorporadas a un Polímero Termoestable*. Escuela de Ingeniería, Quito, Ecuador.

Puigvert, F., Crocombe, A.D & Gil, L. (2014) Fatigue and creep analyses of adhesively bonded anchorages for CFRP tendons, *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.013>

Salvá, P & Mesa, J. (2013). Soil Nailing Verde. *VI Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras*. Encuentro llevado a cabo en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.

Soil Nailing-Aremedial construction technique to improve natural soil slopes, retaining walls, and embankments quality. (2013, 11 de julio). [web log post] Recuperado de <https://civilviews.wordpress.com/2013/07/11/soil-nailing-aremedial-construction-technique-to-improve-natural-soil-slopes-retaining-walls-and-embankments-quality/>

Ucar, R. (2002). *Manual de anclajes en obras de tierras*. Recuperado de http://www.serbi.ula.ve/serbiula/libroselectronicos/Libros/manual_anclaje/pdf/librocompleto.pdf