

**EVALUACIÓN DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
SUELO POR MEDIO DE FRACTURE GROUTING**

**INTEGRANTES:
LAURA MARCELA QUINTANA CANO
NELSON FABIÁN SOTO GAMBOA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
2017**

**EVALUACIÓN DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
SUELO POR MEDIO DE FRACTURE GROUTING**

**LAURA MARCELA QUINTANA CANO
NELSON FABIÁN SOTO GAMBOA**

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR DEL PROYECTO
ING. MSc. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
2017**

DEDICATORIA

Dedicamos este logro a cada una de las personas que hicieron un aporte para que este proyecto se llevara a cabo; a nuestro Dios, por su infinita bondad, a nuestras familias, docentes y amigos que hicieron de este alcance una de las mejores experiencias de nuestras vidas.

Laura Marcela Quintana Cano y Nelson Fabián Soto Gamboa

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios por darnos la oportunidad, la persistencia y la sabiduría para llevar a cabo este proyecto; también a nuestras familias quienes nos han apoyado en cada uno de los propósitos que nos trazamos; también queremos agradecer a todos los docentes quienes compartieron sus conocimientos con nosotros y de manera especial al Ing. Julián André Galvis Flórez, nuestro director de proyecto, por la paciencia y el tiempo dedicado durante este proceso; finalmente agradecerle a Construsuelos de Colombia S.A.S, por la disponibilidad, colaboración y excelente servicio.

Laura Marcela Quintana Cano y Nelson Fabián Soto Gamboa

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. ANTECEDENTES	21
4. OBJETIVOS	23
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
5. MARCO TEÓRICO.....	24
5.1 GENERALIDADES DE LOS SUELOS	24
5.2 TIPOS DE SUELO	25
5.2.1 Suelos Cohesivos	25
5.2.2 Suelos No Cohesivos	25
5.3 EXPLORACIÓN Y MUESTREO	26
5.3.1 Ensayo de Campo SPT (Standard Penetration Test).....	26
5.3.2 Descripción del SPT	27
5.3.3 N Corregido	28
5.3.3.1 Factor de corrección por confinamiento	30
5.3.3.2 Factor de corrección por energía.....	30
5.3.4 Correlaciones	31
5.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS	33
5.4.1 Granulometría	33
5.4.1.1 Análisis granulométrico por tamizado:	33
5.4.1.2 Análisis granulométrico por Hidrómetro	33
5.4.2 Análisis Granulométrico Por Tamizado.....	33
5.4.3 Curva granulométrica.....	34
5.4.4 Coeficientes de Allen Hazen.....	35
5.4.4.1 Coeficiente de uniformidad (C_U)	35
5.4.4.2 Coeficiente de curvatura (C_C)	36
5.4.5 Plasticidad	36
5.4.6 Límites de Atterberg	37

5.4.6.1 Límite líquido.....	38
5.4.6.2 Límite plástico	38
5.4.6.3 Índice de Plasticidad	38
5.4.7 Humedad Natural de Suelos.....	39
5.4.8 Gravedad Específica	39
5.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	40
5.5.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)	41
5.5.1.1 Suelos gruesos.....	41
5.5.1.2 Suelos finos.....	42
5.5.2 Carta de plasticidad.....	42
5.5.3 Subdivisión de los suelos	44
5.5.3.1 Suelos con presencia de finos menores al 5% en peso.	44
5.5.3.2 Suelos con presencia de finos entre el 5% y 12% en peso.....	44
5.5.3.3 Suelos con presencia de finos mayores a 12% en peso.	46
5.5.3.4 Arcillas inorgánicas.	46
5.5.3.5 Limos Inorgánicos.	47
5.5.3.6 Caso de frontera	47
5.5.3.7 Arcillas y limos orgánicos	48
5.5.3.8 Turbas (Pt)	48
5.6 RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS SUELOS.....	49
5.6.1 Ensayo de Compresión Simple	49
5.6.2 Ensayo de Corte Directo	50
5.6.2.1 Ensayos no consolidados-no drenados o ensayos (UU):	51
5.6.2.2. Ensayo consolidado-no drenado (CU).....	51
5.6.2.3 Ensayo consolidado-drenado (CD).....	52
5.7 MEJORAMIENTO DE SUELOS.....	52
5.8 METODOS GROUTING	53
3.8.1 Técnicas Grouting.....	53
5.8.2 Fracture Grouting.....	54
5.8.2.1 Tipos de suelos en los cuales se puede aplicar	55
5.8.2.2 Equipos	56
5.8.2.3 Materiales.....	57
5.8.2.4 Procedimiento	57
5.8.2.5 Proporción de la mezcla de inyectado	60
6. METODOLOGÍA	61
6.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA	61
6.2 LOCALIZACIÓN DEL SITIO.....	61

6.3 EXPLORACIÓN DE CAMPO POR MEDIO DE ENSAYO SPT PRE - INYECCIÓN.....	62
6.4 ENSAYOS DE LABORATORIO PRE - INYECCIÓN	62
6.5 APLICACIÓN DEL MÉTODO FRACTURE GROUTING.....	63
6.5.1 Lechada de cemento.....	65
6.5.2 Fase de Pre - tratamiento.....	65
6.5.3 Inyección de fractura.....	66
6.6 EXPLORACIÓN Y MUESTREO POR MEDIO DE SPT POST - INYECCIÓN.....	67
6.7 ENSAYOS DE LABORATORIO POST - INYECCIÓN	68
6.8 APIQUE.....	69
7. DATOS Y RESULTADOS	71
7.1 ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO ANTES DE LA INYECCIÓN	71
7.1.1 Exploración y muestreo por medio de ensayo de SPT antes de la inyección	71
7.1.2 Descripción visual de las muestras antes de inyección.....	72
7.1.3 Ensayo de caracterización del suelo	74
7.1.3.1 Ensayos de granulometría	74
7.1.3.2 Límites de Atterberg y humedad natural	81
7.1.3.3 Clasificación de los suelos (Sistema SUCS).....	87
7.1.4 Ensayo de resistencia mecánica antes de la inyección.....	88
7.1.4.1 Ensayo de compresión inconfínada	89
7.1.3.4 Ensayo de corte directo antes de la inyección	97
7.2 ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO DESPUÉS DE LA INYECCIÓN	105
7.2.1 Exploración y muestreo por ensayo de campo SPT después de la inyección.....	105
7.2.2 Ensayos de resistencia mecánica	107
7.2.2.1 Ensayo de compresión inconfínada después de la inyección.....	107
7.3 CÁLCULO DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA CORTANTES MEDIANTE CORRELACIONES DE SPT	111
7.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA LECHADA DE INYECCIÓN	112
7.5 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD PORTANTE SIMULANDO UN MICROPILOTE	114
7.5.1 Capacidad portante antes de la inyección	114
7.5.2 Capacidad portante después de la inyección.....	116
7.5.3 Modelación del micropilote en Phace 2.....	116
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	120

8.1 COMPARATIVO DE DATOS.....	120
8.1.1 Ensayo de Campo SPT.....	120
8.1.2 Eficiencia del método	123
8.1.3 Análisis de cargas representado un micro-pilote	125
9. CONCLUSIONES	126
10. RECOMENDACIONES.....	128
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Valores de los Factores de Corrección</i>	29
Tabla 2 <i>Valores de Er</i>	31
Tabla 3 <i>Valores empíricos de ϕ, D_r y el peso unitario de suelos granulares basados en SPT aproximadamente 6 metros de profundidad y normalmente consolidados</i>	31
Tabla 4 <i>Consistencia de arcillas y correlación aproximada con el número N</i>	32
Tabla 5 <i>Tamaño estándar de los tamices</i>	34
Tabla 6 <i>Presiones obtenidas al aplicar la técnica</i>	66
Tabla 7 <i>Datos obtenidos en el ensayo SPT antes de la inyección.</i>	71
Tabla 8 <i>Descripción de las muestras</i>	73
Tabla 9 <i>Análisis granulométrico muestra no 1</i>	75
Tabla 10 <i>Análisis granulométrico muestra no 2</i>	76
Tabla 11 <i>Análisis granulométrico muestra no 3</i>	78
Tabla 12 <i>Análisis granulométrico muestra no 4</i>	79
Tabla 13 <i>Resultados obtenidos a partir del ensayo de límite líquido muestra no 1</i>	81
Tabla 14 <i>Resultados obtenidos del ensayo de límite plástico muestra no 1</i>	82
Tabla 15 <i>Humedad natural muestra no 1</i>	82
Tabla 16 <i>Resultados obtenidos del ensayo de límite líquido muestra no 2</i>	82
Tabla 17 <i>Resultado obtenido del ensayo de límite plástico muestra no 2</i>	83
Tabla 18 <i>Humedad natural muestra no 2</i>	84
Tabla 19 <i>Resultados obtenidos del ensayo de límite líquido muestra no 3</i>	84
Tabla 20 <i>Resultado obtenido del ensayo de límite plástico muestra no 3</i>	85

Tabla 21 <i>Humedad natural muestra no 3</i>	85
Tabla 22 <i>Resultados obtenidos del ensayo de límite líquido muestra no 4</i>	85
Tabla 23 <i>Resultado obtenido del ensayo de límite plástico muestra no 4</i>	86
Tabla 24 <i>Humedad natural muestra no 4</i>	87
Tabla 25 <i>Tipos de suelos obtenidos a partir de los ensayos de caracterización</i>	87
Tabla 26 <i>Datos de la probeta 1 - muestra no 3 antes de la inyección</i>	89
Tabla 27 <i>Resultados del ensayo de compresión simple de la probeta 1 - muestra no 3 antes de la inyección</i>	90
Tabla 28 <i>Datos de ensayo probeta 2 - muestra no 3 antes de la inyección</i>	91
Tabla 29 <i>Resultado del ensayo de compresión simple probeta 2 - muestra no 3 antes de la inyección</i>	92
Tabla 30 <i>Valor de esfuerzo máximo promedio muestra no 3 antes de la inyección</i>	93
Tabla 31 <i>Datos de ensayo probeta 1- muestra no 4 antes de la inyección</i>	94
Tabla 32 <i>Resultados del ensayo de compresión simple probeta 1 - muestra no 4 antes de la inyección</i>	94
Tabla 33 <i>Datos de ensayo probeta 2 – muestra no 4 antes de la inyección</i>	95
Tabla 34 <i>Resultados del ensayo de compresión simple probeta 2 – muestra no 4 antes de la inyección</i>	96
Tabla 35 <i>Valor del esfuerzo máximo promedio muestra no 4 antes de la inyección</i>	97
Tabla 36 <i>Datos de la muestra no 3 aplicando un esfuerzo de 0,5 kg/cm² antes de la inyección.</i>	98
Tabla 37 <i>Resultados de la muestra no 3 con un esfuerzo de 0,5 kg/cm² antes de la inyección...</i>	98
Tabla 38 <i>Datos de la muestra no 3 aplicando un esfuerzo de 1,0 kg/cm² antes de la inyección.</i>	98

Tabla 39 Resultados de la muestra 3 con un esfuerzo de 1,0 kg/cm ² antes de la inyección.....	99
Tabla 40 Datos de la muestra no 3 aplicando un esfuerzo de 2,0 kg/cm ² antes de la inyección.	99
Tabla 41 Resultados de la muestra no 3 con un esfuerzo de 2,0 kg/cm ² antes de la inyección...	99
Tabla 42 Resultado de corte directo muestra no 3 antes de la inyección.....	100
Tabla 43 Datos de la muestra no 4 aplicando un esfuerzo de 0,5 kg/cm ² antes de la inyección	101
Tabla 44 Resultados de la muestra no 4 con un esfuerzo de 0,5 kg/cm ² antes de la inyección.	101
Tabla 45 Datos de la muestra no 4 aplicando un esfuerzo de 1,0 kg/cm ² antes de la inyección	102
Tabla 46 Resultados de la muestra no 4 con un esfuerzo de 1,0 kg/cm ² antes de la inyección.	102
Tabla 47 Datos de la muestra no 4 aplicando un esfuerzo de 2,0 kg/cm ² antes de la inyección	102
Tabla 48 Resultados de la muestra no 4 con un esfuerzo de 2,0 kg/cm ² antes de la inyección.	103
Tabla 49 Resultado de corte directo muestra no 4 antes de la inyección.....	103
Tabla 50 Datos obtenidos por medio de ensayo SPT después de la inyección.....	105
Tabla 51 Muestras obtenidas del segundo SPT después de la inyección	106
Tabla 52 Datos de ensayo probeta 1 – muestra no 3 después de la inyección	107
Tabla 53 Resultado del ensayo de compresión simple probeta 1 - muestra no 3 después de la inyección	108
Tabla 54 Datos de ensayo probeta 2 – muestra no 3 después de la inyección	109
Tabla 55 Resultados obtenidos de la probeta 2 – muestra no 3 después de la inyección	109
Tabla 56 Valor del esfuerzo máximo promedio muestra no 3 después de la inyección	110
Tabla 57 Ensayo de resistencia a compresión de la lechada	112
Tabla 58 Comparación entre las profundidades y el número de golpes antes y después de la inyección	120

Tabla 59 <i>Comparación entre los ángulos de fricción y profundidad</i>	122
Tabla 60 <i>Eficiencia del método en el ensayo de compresión simple Muestra No 3</i>	123
Tabla 61 <i>Eficiencia del método de mejoramiento mediante correlaciones entre SPT y ángulo de fricción para los suelos arenos limosos.....</i>	124
Tabla 62 <i>Eficiencia del método de mejoramiento mediante correlaciones entre SPT y cohesión para un suelo arcilloso</i>	124
Tabla 63 <i>Comparativo de cargas admisibles antes y después de aplicar Fracture Grouting...</i>	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ensayo de penetración estándar (SPT)</i>	27
Figura 2 <i>Ejemplo de curva granulométrica</i>	35
Figura 3 <i>Límites de Atterberg</i>	37
Figura 4 <i>Dispositivo de ensayo de Casagrande</i>	38
Figura 5 <i>Carta de plasticidad</i>	43
Figura 6 <i>Resumen de la clasificación de los suelos por el sistema SUCS</i>	48
Figura 7 <i>Círculo de Mohr</i>	49
Figura 8 <i>Tipos de técnicas Grouting</i>	54
Figura 9 <i>Esquema del Fracture Grouting</i>	55
Figura 10 <i>Tamaño de las partículas para diferentes técnicas Grouting y estabilización de suelos</i>	56
Figura 11 <i>Preparación de la tubería de entrada e instalación de los tubos manguitos</i>	57
Figura 12 <i>(a) Instalación de la tubería de entrada, (b) Revestimiento de lechada</i>	58
Figura 13 <i>Obturador</i>	58
Figura 14 <i>Exposición del suelo después de la aplicación de Fracture Grouting</i>	59
Figura 15 <i>Localización del lugar donde se llevó a cabo el proyecto</i>	61
Figura 16 <i>Ensayo de campo SPT antes de la inyección de fractura</i>	62
Figura 17 <i>Instalación de la tubería de entrada</i>	63
Figura 18 <i>Revestimiento de lechada</i>	64
Figura 19 <i>Preparación de la lechada</i>	65
Figura 20 <i>Afloramiento de la lechada</i>	66

Figura 21 <i>Afloramiento de la lechada después de la fase de fractura</i>	67
Figura 22 <i>Ensayo de campo SPT post - inyección.....</i>	68
Figura 23 <i>Conjunto de fotografías del apique realizado en el sitio después de la inyección</i>	69
Figura 24 <i>Muestras obtenidas en el Ensayo SPT antes de la inyección.....</i>	72
Figura 25 <i>Curva granulométrica muestra no 1</i>	75
Figura 26 <i>Curva granulométrica muestra no 2</i>	77
Figura 27 <i>Curva granulométrica muestra no 3</i>	78
Figura 28 <i>Curva granulométrica muestra no 4</i>	80
Figura 29 <i>Curva de fluidez del ensayo de límite líquido muestra no 1</i>	81
Figura 30 <i>Curva de fluidez del ensayo de límite líquido muestra no 2</i>	83
Figura 31 <i>Curva de fluidez del ensayo de límite líquido muestra no 3</i>	84
Figura 32 <i>Curva de fluidez del ensayo de límite líquido muestra no 4</i>	86
Figura 33 <i>Ubicación de las muestras en la carta de plasticidad.....</i>	88
Figura 34 <i>Probeta 1 – muestra no 3 antes de la inyección.....</i>	89
Figura 35 <i>Curva esfuerzo vs deformación probeta 1 - muestra no 3 antes de la inyección.....</i>	90
Figura 36 <i>Probeta 2 – muestra no 3 antes de la inyección.....</i>	91
Figura 37 <i>Curva esfuerzo vs deformación probeta 2 - muestra no 3 antes de la inyección.....</i>	92
Figura 38 <i>Probeta 1 – muestra no 4 antes de la inyección.....</i>	93
Figura 39 <i>Curva esfuerzo vs deformación probeta 1 – muestra no 4 antes de la inyección</i>	95
Figura 40 <i>Curva esfuerzo deformación probeta 2 – muestra no 4 antes de la inyección</i>	96
Figura 41 <i>Muestras sometidas a corte directo antes de la inyección</i>	97
Figura 42 <i>Curva esfuerzo normal vs esfuerzo cortante muestra no 3 antes de la inyección.....</i>	100

Figura 43 <i>Curva esfuerzo normal vs esfuerzo cortante muestra no 4 antes de la inyección.....</i>	104
Figura 44 <i>Probeta 1 – muestra no 3 después de la inyección</i>	107
Figura 45 <i>Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 1 – muestra no 3 después de la inyección</i>	108
Figura 46 <i>Ensayo de compresión de la probeta 2 – muestra no 3 después de la inyección.....</i>	109
Figura 47 <i>Curva esfuerzo vs deformación probeta 2 - muestra no 3 después de la inyección.</i>	110
Figura 48 <i>Probetas de lechada</i>	113
Figura 49 <i>Diagrama del pilote con las propiedades antes y después de la inyección</i>	114
Figura 50 <i>Asignación de los materiales.....</i>	117
Figura 51 <i>Diagrama de esfuerzo vertical</i>	117
Figura 52 <i>Diagrama de esfuerzo vertical en la cabeza del micropilote</i>	118
Figura 53 <i>Diagrama de esfuerzo vertical en la punta del micropilote</i>	118
Figura 54 <i>Diagrama de deformaciones verticales.....</i>	119
Figura 55 <i>Curva número de golpes vs profundidad antes y después de la inyección</i>	121
Figura 56 <i>Curva de ángulo de fricción vs profundidad antes y después de la inyección.....</i>	122

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO POR MEDIO DE FRACTURE GROUTING

AUTOR(ES): LAURA MARCELA QUINTANA CANO
NELSON FABIÁN SOTO GAMBOA

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

RESUMEN

En este proyecto de grado, se plantea la técnica de Fracture Grouting, como un método de mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos arenos limosos y arcillas inorgánicas de baja compresibilidad, existentes en la Universidad Pontificia Bolivariana. Para ellos se realizaron dos sondeos en diferente fase, es decir, antes y después de la aplicación de la técnica mejoramiento. Finalizados los sondeos, se procedió a realizar ensayos de laboratorio y realizar los cálculos por medio de correlaciones a partir del SPT y así comparar los parámetros de resistencia (Ángulo de fricción y cohesión). En cuanto la mejoría del suelo, se pudo evidenciar gráficamente el aumento en el número de golpes y el ángulo de fricción teniendo como referencia los datos obtenidos en el sondeo inicial. Otro de los aspectos a destacar, es que se pudo observar las intrusiones de lechada en suelo, mediante un apique realizado a 2.00 metros de profundidad alrededor de donde se encontraba ubicada la tubería de entrada.

PALABRAS CLAVES:

Mejoramiento, Suelos, Lechada de Cemento, Inyecciones, Cohesión, Ángulo de Fricción.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF THE IMPROVEMENT OF MECHANICAL SOIL PROPERTIES BY FRACTURE GROUTING

AUTHOR(S): LAURA MARCELA QUINTANA CANO
NELSON FABIÁN SOTO GAMBOA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

ABSTRACT

In this research, the technique of Fracture Grouting is proposed as a method of improving the mechanical properties of sandy loam soils, and low-compressibility inorganic clays located at the Universidad Pontificia Bolivariana. For this, two probes were performed in different phase; before, and after the application of the technique improvement. At the end of the probes, laboratory tests were carried out followed by the respective calculations by means of correlations from the SPT, to compare the resistance parameters (friction angle and cohesion). As for the improvement of the soil, it was possible to identify graphically the increase in the number of impacts and the angle of friction taking as reference the data obtained in the initial probe. Another of the aspects to be highlighted is that it was possible to observe the intrusion of slurry in the ground, by means of an excavation performed at 2.00 meters of depth around where the inlet pipe was located.

KEYWORDS:

Improvement, Soils, Cement Grout, Injections, Cohesion, Friction Angle.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

El suelo presente en un sitio de construcción no siempre es el adecuado, ya sea para soportar edificaciones, puentes o alguna otra obra civil (Braja Das, 2001); por lo tanto, es común enfrentar problemas de baja capacidad portante. Debido a esto, se han desarrollado varias técnicas de mejoramiento de suelos para fines de construcción. Estas técnicas, ya sea por acción física o por inclusión de un aditivo, tienen como objeto modificar las propiedades mecánicas de los suelos.

Un ejemplo de estas técnicas es Fracture Grouting (Inyección de Fractura) o también conocida como Compensation Grouting (Inyección de Compensación). Este método ha sido utilizado como una medida de corrección para controlar los asentamientos, sin embargo, sus resultados han sido más que satisfactorios, debido a que ha llegado a aumentar la cohesión y el ángulo de fricción en los suelos, principales parámetros de la capacidad portante de estos.

Debido a que la implementación de este método se basa en la experiencia de otros proyectos, se hizo necesario recopilar información para saber, ¿En qué consiste?, ¿Cómo funciona?, ¿Qué beneficios tiene esta técnica? y ¿Cuáles son los resultados que se obtienen con el Fracture Grouting?. Para ello, se realizaron ensayos de laboratorio a los tipos de suelos encontrados en el sitio de estudio y ubicados en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y se analizó los resultados obtenidos antes y después de la aplicación de método.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La baja capacidad portante de los suelos es un problema que se ha presentado desde la antigüedad y que cada vez es más estudiado debido a la influencia que tiene en las estructuras.

Según fuentes bibliográficas la baja capacidad portante de un suelo, es la insuficiencia que tiene para soportar las cargas aplicadas, de tal manera que este podría presentar un fallo por esfuerzo cortante o un asentamiento diferencial excesivo. Esta poca capacidad se debe a que los suelos no poseen las características mecánicas suficientes, para garantizar un buen comportamiento del suelo. La solución para mejorar estas propiedades del suelo, es realizar inyecciones de lechada, conocidas como Fracture Grouting o Compensation Grouting; las cuales usan el principio de fractura hidráulica para reforzar el terreno.

2. JUSTIFICACIÓN

Debido a que los problemas de bajas capacidades portantes de los suelos se han convertido en un obstáculo en el camino de la ingeniería, se han buscado técnicas que solucionen esta dificultad, muchas de estas soluciones son antieconómicas y poco eficientes; es por eso que en los últimos años, ha tomado fuerza el tema de las inyecciones de fractura, que proporciona ventajas, entre las cuales podemos encontrar que: es usada en cualquier tipo de suelo, suele ser económica, además de esto, permite hacer un monitoreo después de realizada la inyección e incluso una nueva inyección si se llegara a necesitar.

El presente proyecto de grado se enfocará en estudiar las mejoras que se presentan en las propiedades mecánicas de los suelos después de aplicar la técnica Fracture Grouting o Compensation Grouting, ya que debido al aumento que se da como resultado de la inyección en el ángulo de fricción y la cohesión, se logra un mejor comportamiento cuando se cimenta una estructura en el terreno donde ha sido empleado el método.

El desarrollo de esta investigación permite ser la base de otros proyectos, debido a la recopilación de información sobre el tema que se hizo; también se pretende informar a toda la comunidad ingenieril sobre una técnica nueva y que ha dado buenos resultados en otros lugares como Londres, Alemania, Francia entre otros.

3. ANTECEDENTES

La inyección de lechada (Grout), es un proceso por el cual se introduce un fluido a presión en el suelo, reforzando de forma temporal o permanentemente el suelo (Ampuero, 2012).

El origen de la inyección de lechada en la ingeniería civil data del año 1802, cuando Charles Berigny, reparó la base del apoyo de un puente socavado por el agua en Dieppe (Francia), mediante inyecciones de lechada de cal (Vega, Vázquez, Martín & Pérez Fontan, 2014). Sin embargo, no fue hasta 1856 que este tipo de inyección se modificó empleando lechada de cemento y con el tiempo surge el proceso de fracturación hidráulica.

Originalmente este proceso nace en el campo de la ingeniería de petróleo, como una técnica para incrementar la permeabilidad en las rocas a partir de agua a presión, generando de esta manera fisuras que servirían como rutas para que el petróleo pudiera fluir hacia los pozos (Keller Cimentaciones, 2014).

El primer registro que se tiene del procedimiento de inyección de fractura en suelos, fue en 1948, en la ciudad de Essen (Alemania) y su uso era en actividades mineras. Y fue hasta 1951 cuando se implementa en el área de la geotecnia (Chambosse & Otterbein, 2001); posteriormente fue adaptada y mejorada por los ingenieros de Keller en los años 60 para resolver problemas geotécnicos.

Keller patentó la técnica de ejecución de inyección de compensación (Compensation Grouting o Fracture Grouting), como una mejora en el campo de la geotecnia. En los años 70 el método se mejora mediante la incorporación de tubos manguitos (TAMs) que funcionan como válvulas, en los cuales se introducen los obturadores y se inyecta un volumen definido a través de ellos (Keller Cimentaciones, 2014).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo aplicando el método de Fracture Grouting.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información del método de Fracture Grouting.
- Identificar y clasificar el tipo de suelo a mejorar.
- Aplicar el método de Fracture Grouting con el fin de mejorar las propiedades mecánicas.
- Comparar las propiedades mecánicas antes y después de la aplicación del método de mejoramiento.
- Emplear un programa de elementos finitos para modelar el cambio de las propiedades mecánicas.

5. MARCO TEÓRICO

El tipo de suelo presente en la ubicación donde se va a realizar el proyecto es de gran importancia para el ingeniero quien está a cargo de dicha obra; es por eso que se hace necesario caracterizar los suelos y sobretodo conocer sus propiedades mecánicas. En algunos casos, estas propiedades no siempre son adecuadas y por lo tanto se hace necesario aplicar métodos de mejoramientos. Estos métodos buscan en sí (Braja Das, 2001):

- Reducir el asentamiento de las estructuras
- Mejorar la resistencia cortante del suelo e incrementar así la capacidad de carga de las cimentaciones superficiales
- Incrementar el factor de seguridad contra posibles fallas de los taludes de riveras y presas de tierra
- Reducir la contracción y expansión de suelos.

5.1 GENERALIDADES DE LOS SUELOS

El suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con líquido y gas que ocupan los vacíos entre las partículas sólidas (Braja Das, 2001). Este es producto de la meteorización de rocas debido a procesos físicos y químicos; si después del intemperismo el material queda directamente sobre la roca que le dio origen, se denomina suelo residual, pero si por el contrario la temperización se dio antes de que el suelo llegara a su depósito final se le conoce como suelo transportado (Braja Das, 2001).

5.2 TIPOS DE SUELO

5.2.1 Suelos Cohesivos

Poseen atracción intermolecular, como las arcillas (Crespo Villalaz, 2004).

- **Arcillas:** Partículas submicroscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales. Se definen como partículas menores a 0.002 mm (Braja Das, 2001).

5.2.2 Suelos No Cohesivos

Formados por partículas de roca sin ninguna cementación, en este grupo están las gravas, arenas y limos (Crespo Villalaz, 2004).

- **Gravas:** Son fragmentos de rocas con algunas intrusiones de cuarzo, feldespatos y otros minerales (Braja Das, 2001).
- **Arenas:** Su principal característica es que posee una cohesión prácticamente nula (Braja Das, 2001).
- **Limos:** Fracciones microscópicas de suelo que consisten en granos muy finos de cuarzo y algunas partículas en forma de escamas (hojuelas) que son fragmentos de minerales micáceos (Braja Das, 2001).
- **Suelos orgánicos:** Poseen color oscuro debido al contenido de materia orgánica, la cual se encuentra en forma de humus, son esponjosos e insuficientes para soportar cualquier estructura ingenieril.
- **Turbas:** Constituido por material orgánico de color negro o pardo oscuro. Se forman en sitios pantanosos, en los que la humedad protege la materia orgánica de su total descomposición (Cesar Narváez, 2016).

5.3 EXPLORACIÓN Y MUESTREO

Tiene como finalidad observar las diferentes formaciones, características y niveles de agua que se pueden presentar donde se realiza la exploración. Los sondeos se pueden llevar a cabo mediante:

- Pozos a cielo a cielo con muestreo alterado o inalterado.
- Perforaciones con posteadora, barrenos helicoidales o métodos similares.
- Métodos de lavado.
- Métodos de penetración cónica
- Métodos de penetración estándar.

5.3.1 Ensayo de Campo SPT (Standard Penetration Test)

Es una prueba de penetración dinámica utilizada para realizar reconocimiento geotécnico del terreno, mostrando los diferentes estratos que se presentan. Las muestras que se obtienen son alteradas, pero permiten llevar a cabo laboratorios como:

- Análisis granulométrico.
- Límites de Atterberg.
- Gravedad específica de los sólidos.



(a)

(b)

Figura 1 *Ensayo de penetración estándar (SPT)*
Fuente propia

5.3.2 Descripción del SPT

El SPT consta de una pesa, la cual se deja caer libremente de una altura determinada; esta hinca una cuchara que es de media caña y es la encargada de extraer la muestra, también es conocida como muestreador. El procedimiento consiste en contar el número de golpes necesarios para penetrar el tomamuestras cada 15 cm durante tres intervalos.

El valor de penetración N es para 12" (30cm), y es la suma de los dos últimos valores registrados.

El procedimiento se da por terminado cuando el valor de N es igual o mayor que 50 golpes en 15cm (6") o no hay avance luego de 10 golpes (Gonzalez, 1999).

Las características del equipo SPT son las siguientes:

- Altura de caída: 76 cm.
- Diámetro Exterior del Tubo: 50,8 mm.
- Diámetro Interior del Muestreador en la Punta: 34,93 mm.
- Longitud del Muestreador: 45 cm (18”).
- Martillo: 63.5 kg (140 Lb).
- N_{Campo} : Sumatoria de los golpes de los últimos 30 cm (12”).

5.3.3 N Corregido

A pesar que el método se denomine “estándar”, no lo es del todo, pues existen factores que afectan el valor de N, como lo son (Gonzalez, 1999):

- Tipo de martillo (pesa con varilla de guía interna, martillo anular “donut”)
- Forma en que se deja caer el martillo.
- Longitud de la varilla desde el sitio de golpe y el tomamuestras.
- Revestimiento interno del toma muestras, etc.

Es por eso que se deben realizar las correcciones al N obtenido en campo (Bowles, 1988).

$$N_{Crr} = N_{Cam} * C_n * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4 \quad Ec. 1$$

N_{Crr} : Valor de N campo corregido.

N_{Cam} : Valor de N de campo.

η_1 : Factor de corrección por energía del martillo.

η_2 : Factor de corrección por longitud de varilla.

η_3 : Factor de corrección por resistencia interna del tomamuestras.

η_4 : Factor de corrección por diámetro de la perforación.

C_n : Factor de corrección dado por la sobrecarga efectiva del suelo.

A continuación se muestran algunos valores que pueden tomar cada uno de los factores:

Tabla 1 Valores de los Factores de Corrección

Hammer for η_1					Remarks
Average energy ratio E_r					
Country	Donut		Safety		R-P= Rope-pulley or carthead $\eta_1 = E_r/E_{rb} = E_r/70$
	R-P	Trip	R-P	Trip/Auto	
United States / North America	45	-	70 - 80	80 - 100	For U.S. trip/auto w/ $E_r = 80$
Japan	67	78	-	-	$\eta_1 = 80/70 = 1.14$
United Kingdom	-	-	50	60	
China	50	60	-	-	
Rod length correction η_2					
		Length	> 10 m	$\eta_2 = 1.00$	N is too high for L < 10m
			6-10	0.95	
			4-6	0.85	
			0-4	0.75	
Sampler correction η_3					
		Without liner		$\eta_3 = 1.00$	Base value
		Without liner: Dense sand, clay		0.80	N is too high with liner
		Loose sand		0.90	
Borehole diameter correction η_4					
	Hole diameter :	60 - 120 mm		$\eta_4 = 1.00$	Base value: N is too small
		150 mm		1.05	when there is an oversize hole
		200 mm		1.15	

* Data synthesized from Riggs (1986), Schmertmann (1978a) and Seed et al. (1985).

$\eta_4 = 1.00$ for all diameter hollow-stem augers where SPT is taken through the stem.

Tomada de Bowles (1988)

Generalmente se asumen $\eta_2 = \eta_3 = \eta_4 = 1$, debido a que se supone que las longitudes de las varillas son mayores o iguales a 10 m y los diámetros de perforación son entre (60-120mm); siendo así, sólo se deben calcular los valores de η_1 y C_n ; en caso contrario se deben tomar los valores correspondientes a los señalados en la tabla anterior (Bowles, 1988).

5.3.3.1 Factor de corrección por confinamiento

$$C_n = \left(\frac{95.76}{p'_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

p'_0 : Esfuerzo vertical efectivo a la profundidad donde se desea obtener el valor del N corregido.

$$p'_0 = \gamma * h \quad \text{Ec. 3}$$

5.3.3.2 Factor de corrección por energía

$$\eta_1 = \frac{E_r}{E_{60}} \quad \text{Ec. 4}$$

E_r : Es el valor de la energía de referencia de la barra.

E_{60} : Es el valor de la energía de referencia base que usualmente es 60%.

En la siguiente tabla se encuentran los valores de E_r que generalmente se usan; para el caso de Colombia $E_r = 45\%$.

Tabla 2 *Valores de Er*

País	Energía de la Barra (Er)	Factor de Corrección para 60% E _r
Japón	78%	78/60 = 1.30
EEUU	60%	60/60 = 1.00
Argentina	45%	45/60 = 0.75
China	60%	60/60 = 1.00

Cristian Soriano (2013)

5.3.4 Correlaciones

El SPT se puede correlacionar según el autor Joseph Bowles (1988) “con el peso unitario, la densidad relativa, el ángulo interno de fricción y el esfuerzo a la compresión no drenada, también se ha utilizado para estimar la capacidad de soporte de las fundaciones” (p.162). A continuación se muestra una tabla de correlación evaluada empíricamente:

Tabla 3 *Valores empíricos de ϕ , Dr y el peso unitario de suelos granulares basados en SPT aproximadamente 6 metros de profundidad y normalmente consolidados*

Description	Very Loose	Loose	Medium	Dense	Very Dense
Relativa Density Dr	0	0.15	0.35	0.65	0.85
SPT N ₇₀ : Fine	1-2	3-6	7-15	16-30	-
Medium	2-3	4-7	8-20	21-40	>40
Coarse	3-6	5-9	10-25	26-45	>45
ϕ : Fine	26-28	28-30	30-34	33-38	
Medium	27-28	30-32	32-36	36-42	<50
Coarse	28-30	30-34	33-40	40-50	
γ_{wet} (KN/m ²)	11-16*	14-18	17-20	17-22	20-23

Joseph Bowles (1988)

Existen correlaciones realizadas en campo y en laboratorio en diversos suelos, como las arenas, que permite relacionar la compacidad, el ángulo de fricción y en las arcillas relaciona la resistencia a la compresión inconficada con el número de golpes en ese suelo para que el penetrómetro estándar logre entrar 30 cm (12”).

Tabla 4 *Consistencia de arcillas y correlación aproximada con el número N*

Número de Penetración Estándar, N	Consistencia	Resistencia a la Compresión No Confinada q_u (KN/m²)
0-2	Muy Blanda	0-25
2-5	Blanda	25-50
5-10	Medio Firme	50-100
10-20	Firme	100-200
20-30	Muy Firme	200-400
>30	Dura	>400

Braja M. Das (2006)

5.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

5.4.1 Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado y se puede determinar mediante dos métodos:

5.4.1.1 Análisis granulométrico por tamizado:

Cuando la distribución de las partículas tienen un tamaño superior o igual que 75 mm.

5.4.1.2 Análisis granulométrico por Hidrómetro

Cuando la distribución de las partículas tiene un tamaño inferior a 75 mm.

5.4.2 Análisis Granulométrico Por Tamizado

Este análisis consiste en pasar una muestra de suelo a través de una serie de mayas o tamices, los cuales contienen aberturas que progresivamente van disminuyendo, de tal manera que se pueda lograr la distribución de las partículas presentes en una muestra de suelo.

Para obtener la distribución, se emplean tamices normalizados, enumerados y ordenados en orden decreciente, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5 *Tamaño estándar de los tamices*

Tamiz	Abertura (mm)
3"	75.000
2"	50.000
1 1/2 "	37.500
1"	25.000
1/4"	19.000
3/8"	9.500
No. 4	4.750
No. 8	2.360
No. 10	2.000
No. 16	1.100
No. 20	0.850
No. 30	0.600
No. 40	0.425
No. 50	0.300
No. 60	0.250
NO. 80	0.180
No. 100	0.150
No. 140	0.106
No. 200	0.075

Adaptado de INVE 123 (2013)

5.4.3 Curva granulométrica

Con los resultados obtenidos en laboratorio se puede realizar una gráfica o curva granulométrica, en donde la ordenada será el porcentaje que pasa por cada tamiz y la abscisa corresponderá al tamaño de la partícula en escala logarítmica.

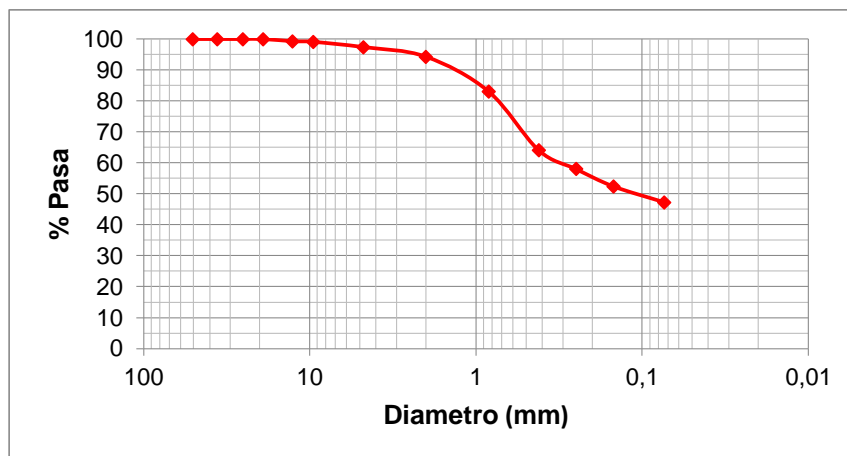


Figura 2 *Ejemplo de curva granulométrica*

Elaboración Propia

De la curva granulométrica se obtiene el porcentaje de gravas, arenas, finos presentes en la muestra y además se determina los coeficientes propuestos por Allen Hazen.

5.4.4 Coeficientes de Allen Hazen

5.4.4.1 Coeficiente de uniformidad (C_U)

Se utiliza para evaluar la uniformidad del tamaño de las partículas de un suelo y se expresa como la relación entre D_{60} y D_{10} (Patricio Puga, 2012).

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad Ec. 5$$

D_{60} : Tamaño de partículas donde pasa el 60% del material.

D_{10} : Tamaño de partículas donde pasa el 10% del materia.

5.4.4.2 Coeficiente de curvatura (C_c)

Dato complementario para definir la uniformidad de la curva y se expresa mediante la siguiente ecuación (Patricio Puga, 2012):

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} \quad Ec. 6$$

D_{30} : Tamaño de partículas donde pasa el 30% del material.

Estos coeficientes se utilizan como criterios de clasificación de suelos.

5.4.5 Plasticidad

Propiedad de los suelos de deformarse sin perder volumen ni agrietarse, cuando son sometidos a fuerzas de compresión. Esta propiedad depende del contenido de agua y varía de un suelo a otro. Por ende es importante conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico.

Atterberg determinó que si se tiene un suelo con contenido de agua bajo, éste se comporta como suelo sólido frágil, pero si se presenta el caso contrario éste fluye como un líquido. Se establece dependiendo del contenido de agua cuatro estados básicos: sólido, semi-sólido, plástico y líquido; como se muestra en la figura (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).

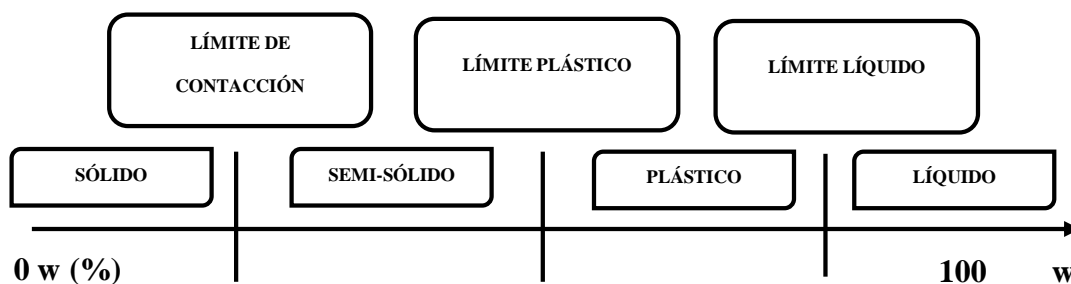


Figura 3 Límites de Atterberg

Adaptado de Braja Das (2001)

Las humedades correspondientes entre los puntos de transición entre cada uno de estos estados definen los límites líquidos, plástico y contracción o retracción (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000). Para hallar estos límites, existe un procedimiento de ensayo conocido como los límites de Atterberg.

5.4.6 Límites de Atterberg

Atterberg fue el primero que relacionó el grado de plasticidad de un suelo con su contenido de agua y también definió los cuatro estados de consistencia del suelo, determinando los límites entre ellos (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).

De los límites anteriormente mencionados, los de más interés son el límite líquido y el plástico, ya que estos presentan una alta deformabilidad y drástica reducción de su capacidad portante.

5.4.6.1 Límite líquido

Es el contenido de agua requerido para que la ranura de un suelo ubicado en el dispositivo de Casagrande se cierre a los 25 golpes desde una altura determinada. Este límite es expresado en porcentaje y delimita la transición entre el estado plástico y líquido.

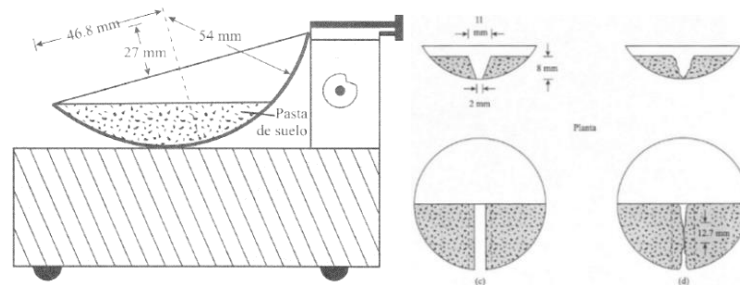


Figura 4 *Dispositivo de ensayo de Casagrande*

Braja Das (2001)

5.4.6.2 Límite plástico

Es el porcentaje de agua para el cual el suelo comienza a agrietarse y no se deja moldear para lograr cilindros de suelo con diámetro de 3 mm sin que se desmoronen.

5.4.6.3 Índice de Plasticidad

Es la diferencia entre el límite líquido y el plástico. Este valor permite tener una buena indicación de la compresibilidad, es decir, a mayor IP, mayor es la compresibilidad del suelo.

$$IP = LL - LP \quad \text{Ec. 7}$$

5.4.7 Humedad Natural de Suelos

La humedad natural es una de las propiedades más significativas para establecer una correlación entre el comportamiento del suelo, determinando su contenido de agua. Este contenido de agua se define como la relación expresada entre la masa de agua libre en una masa de material y la masa de las partículas sólidas (INVE 122 – 13).

$$w(\%) = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso de Suelo Seco}} * 100 \quad \text{Ec. 8}$$

ó

$$w(\%) = \frac{(\text{Peso Suelo Humedo} - \text{Peso Suelo Seco})}{\text{Peso Suelo Seco}} * 100 \quad \text{Ec. 9}$$

Por lo tanto, el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción, están regidos por la cantidad de agua que contienen. Debido a que esta propiedad es tan relevante se ajusta a la gran mayoría de relaciones de fases entre aire, agua, sólidos, en un volumen dado de material.

5.4.8 Gravedad Específica

La gravedad específica se define como la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura (Bowles, 1981).

$$G_s = \frac{W_s * K}{W_s + W_b - W_a} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

W_s : Masa del suelo seco (g).

W_b :Masa del picnómetro +agua + suelo (g), a la temperatura de ensayo.

W_a :Masa del picnómetro + agua a la temperatura del ensayo de gravedad específica (g).

W_s : Masa del suelo seco (g).

K : Factor de corrección basado en la densidad del agua a 20°C, para expresar la gravedad específica a 20°C.

5.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

La clasificación de los suelos permite una fácil agrupación, ya que asocia los suelos que presentan comportamientos similares en sus propiedades físicas y mecánicas y los ordena en base a su tamaño. Esta distribución se da en grupos y subgrupos.

Existen dos métodos para clasificar los suelos según su tamaño que son:

- El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S).
- El sistema de clasificación de suelos de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO).

5.5.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)

Es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología. Fue inventado por Arthur Casagrande en 1942 y adaptado por el U.S Bureau of Reclamation y el U.S Corps of Engineers (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000).

Este método describe la textura y el tamaño de las partículas de un suelo y reconoce sus propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos constituidos por partículas menores a la malla No. 200, los cuales pueden deducirse a partir de su plasticidad. El sistema divide el suelo en partículas gruesas y finas.

5.5.1.1 Suelos gruesos

Son suelos formados por partículas mayores al tamiz No. 200, pero menores al tamiz de 3” y se divide en:

- **Gravas:** Un suelo se considera grava cuando más del 50% de la fracción gruesa se retiene en el tamiz No. 4 y se simboliza con la letra G.
- **Arenas:** Se considera una arena cuando más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4 y se retiene en el tamiz No. 200 y se simboliza con la letra S.

Estos tipos de suelos según los criterios de gradación pueden ser:

- Bien graduados, se simboliza con la letra W.
- Pobrementemente graduados, se simboliza con la letra P.

5.5.1.2 Suelos finos

Son suelos formados por partículas que pasan por el tamiz No 200 y se dividen en:

- Limos inorgánicos, se simboliza con la letra M.
- Arcillas inorgánicas, se simboliza con la letra C.
- Limos y Arcillas orgánicas, se simboliza con la letra O.

Estos se subdividen según su límite líquido en:

- Suelos de Alta compresibilidad (H), si el límite líquido es mayor que el 50%.
- Suelos de Baja compresibilidad (L), si el límite líquido es menor que el 50%.

Para esto, se lleva acabo el uso de la carta de plasticidad.

5.5.2 Carta de plasticidad

Casagrande estudió la relación que existe entre el índice de plasticidad y el límite líquido con una amplia variedad de suelos. Tras estudios experimentales consigue ubicarlos en un diagrama, conocido como la carta de plasticidad (Bañon Blázquez & Beviá García, 2000)

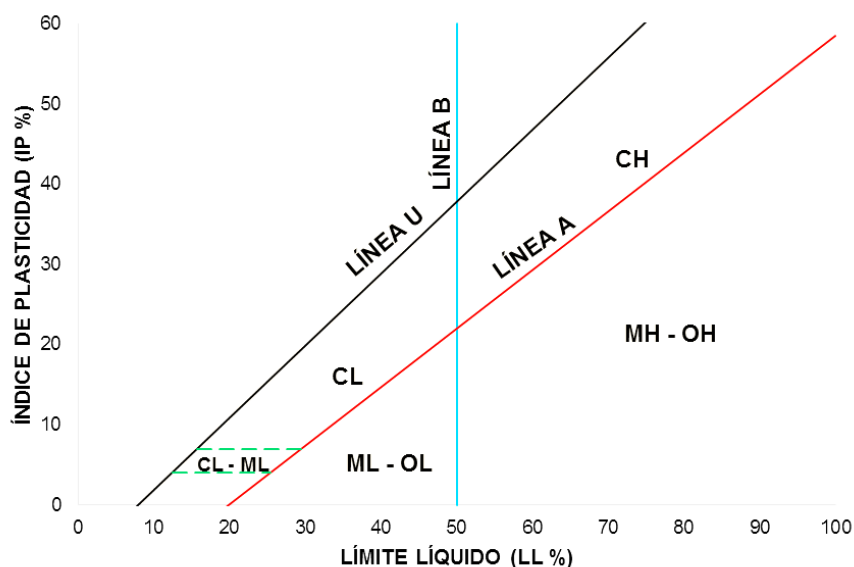


Figura 5 Carta de plasticidad

Adaptado de Bañon Blázquez & Beviá García (2000)

La carta de plasticidad se caracteriza por la línea A, que está representada por la ecuación:

$$IP = 0.73 (LL - 20) \quad Ec. 11$$

Esta línea separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos y está dada de manera empírica.

“La línea U que se encuentra sobre la línea A, es aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora y se representa por la ecuación” (Trejo Moguel):

$$IP = 0.90 (LL - 8) \quad Ec. 12$$

5.5.3 Subdivisión de los suelos

5.5.3.1 Suelos con presencia de finos menores al 5% en peso.

Los suelos limpios o con poca presencia de finos son:

- **Gravas bien graduadas:** Símbolo GW. La graduación se decreta por medio de los coeficientes de uniformidad (C_U) y curvatura (C_C). Para esto, una grava bien graduada debe tener un coeficiente de uniformidad mayor que 4 y un coeficiente de curvatura entre 1 y 3.
- **Arenas bien graduadas:** Símbolo SW. En caso de las arenas bien graduadas, el coeficiente de uniformidad debe ser mayor que 6 y el de curvatura debe cumplir el mismo criterio que el de las gravas bien graduadas.
- **Gravas pobremente graduadas:** Símbolo GP. Se considera pobremente gradado, debido a que al menos uno de los parámetros de gradación no cumple con el criterio.
- **Arenas pobremente graduadas:** Símbolo SP. Se considera pobremente gradado, debido a que al menos uno de los parámetros de gradación no cumple con el criterio.

5.5.3.2 Suelos con presencia de finos entre el 5% y 12% en peso.

Los suelos que presentan un contenido de finos igual o mayor al 5% en peso, pero que no supera el 12% en peso, son considerados casos de frontera, los cuales se les asigna una doble simbología y requiere de la carta de plasticidad.

- **Gravas arcillosas bien graduadas:** Símbolo GW-GC. Cumple con los parámetros de gradación (C_U mayor que 4 y C_C entre 1 y 3), índice de plasticidad mayor que 7 y debe estar encima de la línea A.
- **Gravas limosas bien graduadas:** Símbolo GW-GM. Cumple con los parámetros de gradación (C_U mayor que 4 y C_C entre 1 y 3), índice de plasticidad menor que 4 y debe estar abajo de la línea A.
- **Arenas arcillosas bien graduadas:** Símbolo SW-SC. Cumple con los parámetros de gradación (C_U mayor que 6 y C_C entre 1 y 3), índice de plasticidad mayor que 7 y debe estar encima de la línea A.
- **Arenas limosas bien graduadas:** Símbolo SW-SM. Cumple con los parámetros de gradación (C_U mayor que 6 y C_C entre 1 y 3), índice de plasticidad menor que 4 y debe estar abajo de la línea A.
- **Gravas arcillosas pobremente graduadas:** Símbolo GP-GC. Se considera pobremente gradado, debido a que al menos uno de los parámetros de gradación no cumple con el criterio. Índice de plasticidad mayor que 7 y debe estar encima de la línea A.
- **Gravas limosas pobremente graduadas:** Símbolo GP-GM. Se considera pobremente gradado, debido a que al menos uno de los parámetros de gradación no cumple con el criterio. Índice de plasticidad menor que 4 y debe estar abajo de la línea A.
- **Arenas arcillosas pobremente graduadas:** Símbolo SP-SC. Se considera pobremente gradado, debido a que al menos uno de los parámetros de gradación no cumple con el criterio. Índice de plasticidad mayor que 7 y debe estar encima de la línea A.

- **Arenas limosas pobremente graduadas:** Símbolo SP-SM. Se considera pobremente gradado, debido a que al menos uno de los parámetros de gradación no cumple con el criterio. Índice de plasticidad menor que 4 y debe estar abajo de la línea A.

5.5.3.3 Suelos con presencia de finos mayores a 12% en peso.

Los suelos que presentan un contenido de finos mayor que 12%, se hace necesario el uso de la carta de plasticidad.

- **Gravas arcillosas:** Símbolo GC. Fracción de suelo que se ubica por encima de la línea A y el índice de plasticidad es mayor a 7. Su plasticidad varía entre media y alta.
- **Gravas limosas:** Símbolo GM: Fracción de suelo que se ubica por debajo de la línea A y un índice de plasticidad menor a 4.
- **Arenas arcillosas:** Símbolo SC. Fracción de suelo que se ubica por encima de la línea A y el índice de plasticidad mayor a 7.
- **Arenas limosas:** Símbolo SM. Fracción de suelo que se ubica por debajo de la línea A y el índice de plasticidad menor a 4.
-

5.5.3.4 Arcillas inorgánicas.

- **Arcillas de bajo o media compresibilidad (CL):** Comprende a la zona sobre la línea A de la carta de plasticidad definida por un límite líquido menor que 50% y un índice de plasticidad mayor que 7%.

- **Arcillas de alta compresibilidad (CH):** Corresponde a la zona sobre la línea A de la carta de plasticidad definida por un límite líquido mayor que 50% e índice de plasticidad mayor que 7%.

5.5.3.5 Limos Inorgánicos.

- **Limos de baja o media compresibilidad (ML):** Corresponde a la zona bajo la línea A, definida por un límite líquido menor que 50% y un índice de plasticidad menor que 4%.
- **Limos de Alta compresibilidad (MH):** Corresponde a la zona bajo la línea A, definida por un límite líquido mayor que 50% y un índice de plasticidad menor que 4%.

5.5.3.6 Caso de frontera

Los suelos finos que caen sobre la línea A y con un índice de plasticidad entre 4% y 7% se consideran como casos de frontera y se le asigna el símbolo doble CL-ML (Civil Geeks, 2015).

5.5.3.7 Arcillas y limos orgánicos

Al igual que los anteriores estos suelos pueden ser de baja o media compresibilidad y de alta compresibilidad. Se simboliza OL y OH respectivamente y se ubican bajo la línea A (Civil Geeks, 2015).

5.5.3.8 Turbas (Pt)

“Las pruebas de límites pueden ejecutarse en la mayoría de suelos turbosos, después de un completo remoldeo. El límite líquido de estos suelos puede estar entre 300% y 500%, quedando su posición en la carta de plasticidad netamente abajo de la línea A; el índice plástico normalmente varía entre 100% y 200%” (Civil Geeks, 2015).

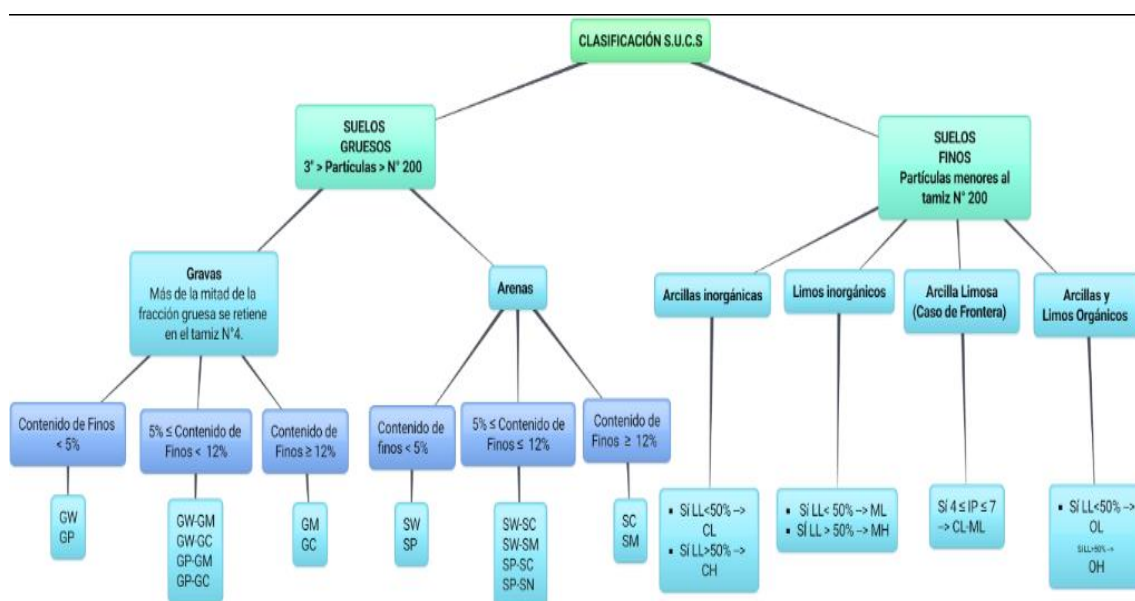


Figura 6 Resumen de la clasificación de los suelos por el sistema SUCS

Adaptado de Mecánica de suelos Luz Marina Torrado Gómez

5.6 RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS SUELOS

5.6.1 Ensayo de Compresión Simple

Es una prueba que se realiza a suelos cohesivos o semi – cohesivos, con el fin de determinar la resistencia a la compresión inconfiada (q_u), e indirectamente la resistencia al corte que se expresa como (Romero Preciado):

$$C_u = \frac{q_u}{2} \quad Ec. 13$$

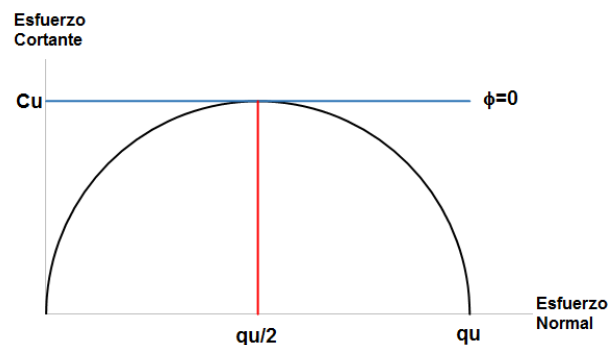


Figura 7 *Círculo de Mohr*
Adaptado de Braja Das (2001)

El suelo debe ser lo suficientemente cohesivo como para que se puedan realizar unas probetas que posean un buen confinamiento lateral. En esta prueba, el esfuerzo menor es cero, mientras que el mayor es igual a q_u , además, el ángulo de fricción interna del suelo se supone cero. Este ensayo es un caso especial del ensayo de triaxial, pero en este caso sólo se le aplica a la probeta una tensión longitudinal, mientras que en triaxial utiliza un dispositivo para aplicar una fuerza lateral, además

en este último se deben realizar incrementos de la carga que puede generar errores, pues se puede ocasionar una carga de impacto adicional (Romero Preciado).

5.6.2 Ensayo de Corte Directo

El ensayo de corte directo consiste en determinar la resistencia de una muestra de suelo que es sometida a fatiga y deformaciones que simulen las que existen o existirán en el terreno al aplicarse una carga.

El ensayo de corte directo induce la ocurrencia de una falla a través de un plano de localización predeterminado, sobre este plano actúan dos fuerzas o esfuerzos; un esfuerzo normal debido a una carga vertical P_r aplicada externamente y un esfuerzo cortante debido a la aplicación de una carga horizontal P_n . Estos esfuerzos se calculan así:

$$\sigma = \frac{Pr}{A} \quad Ec. 14 \quad ; \quad \tau = \frac{Pn}{A} \quad Ec. 15$$

Donde:

σ : Esfuerzo Normal

τ : Esfuerzo Cortante

El ensayo de corte directo fue originalmente muy popular pero por el avance del estado del arte se volvió menos popular y estas fueron las razones:

- El área de la muestra cambia a medida que el ensayo progresa
- La superficie de falla real no es un plano como se supuso con el tipo de caja de corte diseñado.
- El ensayo usa una muestra muy pequeña
- El tamaño de la muestra excluye la posibilidad de investigar con respecto a las condiciones de presión de poros durante la prueba
- No se puede determinar el módulo de elasticidad.

Los ensayos de corte directo pueden clasificarse como:

- Corte Directo No Consolidado No Drenado (UU).
- Corte Directo Consolidado No Drenado (CU).
- Corte Directo Consolidado Drenado (CD).

5.6.2.1 Ensayos no consolidados-no drenados o ensayos (UU):

El corte se inicia antes de consolidar la muestra bajo la carga normal P_u . Si el suelo es cohesivo y saturado se desarrollara exceso de presión de poros.

5.6.2.2. Ensayo consolidado-no drenado (CU)

Se aplica la fuerza normal y se observa el movimiento vertical del deformímetro hasta que pare el asentamiento antes de aplicar fuerza constante.

5.6.2.3 Ensayo consolidado-drenado (CD)

La fuerza normal se aplica y se demora la aplicación del corte hasta que se haya desarrollado todo el asentamiento, se somete a continuación la fuerza constante tan lento como sea posible para evitar el desarrollo de presiones de poros en la muestra.

Para suelos no cohesivos estos tres ensayos dan el mismo resultado, así esté la muestra saturada o no. Mientras que para materiales cohesivos, los parámetros de suelos están marcadamente influidos por el método de ensayo y por el grado de saturación y por el hecho de que el material esté normalmente consolidado o sobre consolidado.

5.7 MEJORAMIENTO DE SUELOS

Cuando se va a edificar una estructura se analiza el comportamiento del suelo, para establecer si se presenta algún asentamiento y mitigarlo. Entre las soluciones, se pueden encontrar tres: la primera, rigidizar la cimentación; la segunda, aumentar la resistencia del suelo y por otro lado, implementar la construcción de cimentaciones profundas. Todas estas soluciones buscan (Braja Das, 2001):

- Reducir el asentamiento ya sean diferenciales o absolutos de las estructuras.
- Mejorar la resistencia cortante del suelo e incrementar así la capacidad de carga de las cimentaciones superficiales.
- Reducir la contracción y expansión de suelos.

5.8 METODOS GROUTING

Grouting es la inyección de material semi-líquido en el suelo, llamado lechada (Grout), con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas. Gran parte de la información del Grouting se desarrolla de la experiencia in-situ y ha sido aplicado en las últimas dos décadas, para eliminar los problemas en la cimentación. Este proceso se hace mediante el bombeo de lechada por perforaciones hechas en el suelo y que con el tiempo se endurecen (Hsai - Fang Yang, 1990).

Este método ayuda a:

- Densificar el suelo, lo cual aumenta la resistencia al corte y la compresibilidad.
- Reforzar las estructuras existentes para evitar el movimiento de tierra durante una excavación o perforación.
- Estabilizar estructuras ya existentes.
- Reducir la permeabilidad y controla el flujo de agua.
- Aumentar la cohesión en suelo.

3.8.1 Técnicas Grouting

Actualmente existen cuatro tipos de métodos Grouting que varían dependiendo de la presión a la cual se llevan a cabo (Hsai - Fang Yang, 1990):

- Fracture Grouting o Compensation Grouting.
- Compaction Grouting.
- Permeation Grouting o Chemical Grouting.
- Jet Grouting.

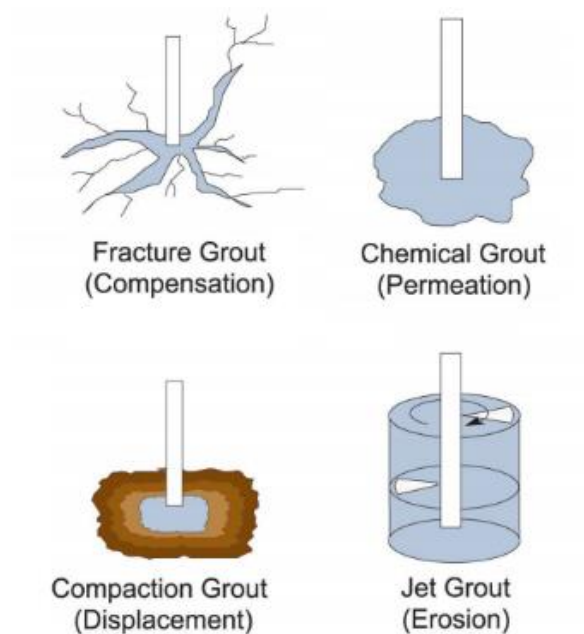


Figura 8 *Tipos de técnicas Grouting*

Donald P. Coduto (1999)

5.8.2 Fracture Grouting

La técnica Fracture Grouting también conocida como Compensation Grouting, consiste en la inyección de fractura o hidro-fractura (Haywardbaker, s.f.). Este proceso básicamente se realiza mediante una bomba de inyección que es conectada a una tubería la cual transporta una lechada que proporciona la presión suficiente para generar fractura o rupturas en el suelo, haciendo que este rellene las fisuras y provocando así una expansión.

Este método ha sido utilizado como una manera de rectificar los asentamientos que se puedan producir cerca de la superficie, por ejemplo, un túnel u otras estructuras que tienen que ser re-niveladas por su inestabilidad. Todavía éste se basa principalmente en estimaciones empíricas.

Este proceso transforma presión en energía cinética al paso de la lechada por las tuberías de salida, de esta manera el chorro creado corta el terreno y crea un nuevo elemento reforzado.

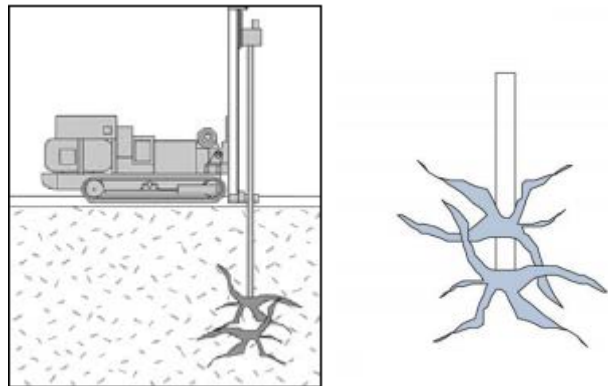


Figura 9 *Esquema del Fracture Grouting*
Manjriker Gunaratne (2006)

5.8.2.1 Tipos de suelos en los cuales se puede aplicar

Debido a que la función del método es fracturar el suelo, la técnica puede ser realizada en cualquier tipo de suelo, sin embargo cuando hablamos de partículas de diámetro mayor a 50 mm el método tiende a ser antieconómico y se debe optar por otra técnica de mejoramiento.

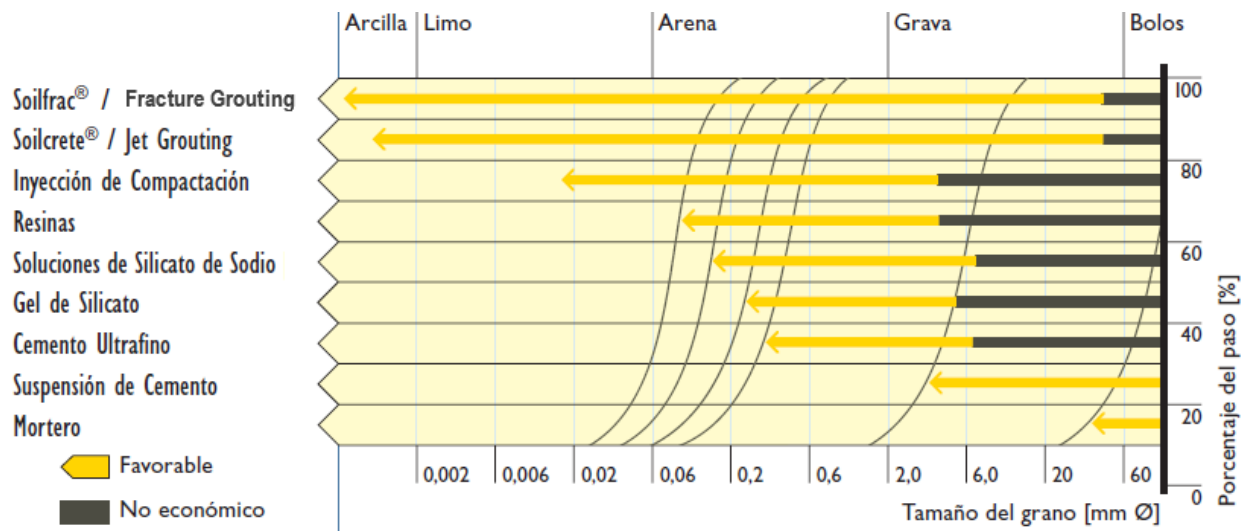


Figura 10 *Tamaño de las partículas para diferentes técnicas Grouting y estabilización de suelos Keller-cimentaciones (2014)*

5.8.2.2 Equipos

Los equipos principales para realizar el Fracture Grouting son:

- Equipo de perforación.
- Tubería de Entrada (puede ser de PVC o de Acero) con manguitos (TAMs).
- Bomba de Inyección de Alta Presión.
- Tubería de Inyección en Acero.
- Obturador doble.
- Un tanque de almacenamiento, cuyo fin es controlar el volumen de la lechada.
- Mezcladora.
- Accesorios de control para inspeccionar la velocidad y la presión de inyección.

5.8.2.3 Materiales

Para el Fracture Grouting, es necesario la aplicación de la lechada, básicamente la mezcla está compuesta de cemento Portland y agua, esta proporciona ventajas cuando se hace la aplicación, como la alta fluidez que permite el llenado de los poros y/o grietas que existan. También se han usado otras soluciones que se emplean para suelos expansivos (Manjriker Gunaratne, 2006), como:

- Cal y cenizas volátiles para reducir los cambios de humedad de las arcillas.
- Cloruro de Potasio y Lignosulfonato de Amonio para tratar químicamente las arcillas y reducir su afinidad con el agua.

5.8.2.4 Procedimiento

1. Se realiza la perforación, ya sea por sondeos manuales o rotoperusión.
2. Se determina la longitud de la tubería de entrada y alrededor se realizan 4 perforaciones. Estas perforaciones se hacen a lo largo de la longitud del tubo y posteriormente se instalan los tubos manguitos (TAMs).



Figura 11 Preparación de la tubería de entrada e instalación de los tubos manguitos

Fuente propia

- Una vez realizada la perforación y después de haber preparado la tubería de entrada, se prosigue a introducirla, fijándola con una mezcla de lechada alrededor del tubo (encamisado o recubrimiento de lechada).



(a)



(b)

Figura 12 (a) *Instalación de la tubería de entrada*, (b) *Revestimiento de lechada*

Fuente propia

- Se colocan obturadores dobles en la tubería de inyección, se independiza las perforaciones con cada uno de ellos con el fin de aplicar en cada tramo la presión necesaria para la fracturación.



Figura 13 *Obturador*

Fuente propia

5. Pre-tratamiento: Esta fase se realiza para cubrir las posibles fugas en el suelo, conocida como afloramiento y así poder alcanzar las presiones deseadas en la fase de fractura. (Esta fase se hace siempre y cuando la lechada haya aflorado o haya una caída de presión).

6. Inyección de Fractura: Se introduce la tubería de inyección que va conectada al equipo que proporciona la lechada, la cual va siendo inyectada pausadamente. La presión hace que los manguitos se hinchen de manera individual y estos expulsan la lechada por los orificios de la tubería. La tubería metálica se va retirando a medida que se inyecta a los diferentes intervalos donde se encuentran los manguitos. Estos pueden ser inyectados una o varias veces obteniendo así un suelo reforzado.



Figura 14 *Exposición del suelo después de la aplicación de Fracture Grouting*

Fuente propia

5.8.2.5 Proporción de la mezcla de inyectado

La mezcla de la lechada debe como mínimo garantizar la suficiente bombeabilidad para la inyección de la lechada y además proporcionar elevada resistencia. Generalmente se usan relaciones a/c que varían entre 0.4 y 0.6; sí se desea obtener resultados adicionales, como aumentar la manejabilidad y reducción del tiempo de fraguado de la lechada se les puede agregar algún aditivo que satisfaga esta necesidad.

6. METODOLOGÍA

6.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta fase se consultó acerca del método en libros, artículos científicos, base de datos de la UPB e información en páginas web de empresas como Keller (<http://www.keller-cimentaciones.com/>) y la Hayward Baker (<http://www.haywardbaker.com/>).

6.2 LOCALIZACIÓN DEL SITIO

La ubicación del sitio se hizo en compañía del director de proyecto y con aprobación de la autoridad encargada por parte de la Universidad. Para situar el lugar, se tuvo en cuenta que fuera de fácil acceso para el ingreso de la maquinaria y que se pudieran realizar trabajos sin interferir con las labores de la universidad.



Figura 15 Localización del lugar donde se llevó a cabo el proyecto
Google Maps

6.3 EXPLORACIÓN DE CAMPO POR MEDIO DE ENSAYO SPT PRE - INYECCIÓN

Una vez se determinó el sitio, se procedió a realizar el SPT para obtener las muestras de suelo, estas permitieron conocer la estratificación y clasificación del suelo.



Figura 16 *Ensayo de campo SPT antes de la inyección de fractura*

Fuente propia

6.4 ENSAYOS DE LABORATORIO PRE - INYECCIÓN

Después de que se obtuvieron las muestras de SPT, se hizo una descripción visual de cada una de ellas y luego se llevaron a cabo la identificación del suelo por medio de los siguientes ensayos:

- Granulometría (INVE 123 – 13)
- Límites de Atterberg
 - Límite líquido (INVE 125 – 13)
 - Límite plástico (INVE 126 – 13)
- Humedad natural del suelo (INVE 122 – 13)

Para resistencia mecánica se realizaron con muestras remoldeadas, debido a que el material que obtuvo era insuficiente moldear la muestra:

- Compresión Simple (INVE 152 – 13)
- Corte Directo (INVE 154 – 13)

6.5 APLICACIÓN DEL MÉTODO FRACTURE GROUTING

Para ejecutar el método de mejoramiento, hubo que instalar la tubería de entrada en la perforación hecha por el SPT. Esta tubería tubo una longitud de 4.70 metros de los cuales 3.70 metros quedaron dentro de la perforación; a este tubo se le hicieron perforaciones (en cruz) cada 0.50 metros e instalando el debido maguito en cada uno de ellos.



Figura 17 *Instalación de la tubería de entrada*

Fuente propia

Los manguitos fueron ajustados con cinta PVC, para evitar el desplazamiento en el momento de introducir el tubo en la perforación. Al finalizar la instalación del tubo de entrada, se aplicó un revestimiento de lechada de cemento para fijarlo.

Se dejó secar el encamisado de lechada y posteriormente se llevó a cabo la técnica.



Figura 18 *Revestimiento de lechada*

Fuente propia

6.5.1 Lechada de cemento

Para llevar a cabo la inyección, se optó por usar una dosificación 0.5 (A/C), el cual presenta una resistencia teórica de 3000 Psi, pero será corroboradas con los ensayos de compresión. Se hizo necesario inyectar 0.03 m³ de lechada por cada metro de profundidad.



Figura 19 *Preparación de la lechada*

Fuente propia

6.5.2 Fase de Pre - tratamiento

Esta fase se realizó debido a que hubo un afloramiento, como se puede mostrar en las *figuras 18* (*El círculo verde, marca el punto de afloramiento de la lechada en el momento que se aplica el método*) y como resultado se presenta una caída de presión. Esta etapa ayuda a que conductos dentro del suelo sean sellados por la lechada.



Figura 20 Afloramiento de la lechada

Fuente propia

6.5.3 Inyección de fractura

Después de la fase de pre - tratamiento y de haber pasado dos días de secado, se realiza la inyección de fractura y se logran obtener las siguientes presiones:

Tabla 6 Presiones obtenidas al aplicar la técnica

Profundidad de los Manguitos (m)	Presión (Psi)
0,2	75
0,7	125
1,2	25
1,7	50
2,2	50
2,7	200
3,2	300

Fuente propia

Después de haber inyectado a 2.70 m de profundidad, se evidencia una caída de presión, debido a un afloramiento de la lechada. Este afloramiento se da a 45 cm del punto de donde se encuentra la tubería de entrada como se encuentra en la *figura 19*. A pesar de eso a 0.70 m de profundidad se logra incrementar la presión debido a que posiblemente no se encontró fuga.



Figura 21 Afloramiento de la lechada después de la fase de fractura

Fuente propia

6.6 EXPLORACIÓN Y MUESTREO POR MEDIO DE SPT POST - INYECCIÓN

En este paso, el ensayo SPT sirve primero para chequear el número de golpes, ya que este debe aumentar después de haberse aplicado el método de Fracture Grouting y segundo obtener muestras con posible contenido de lechada. Este segundo SPT, se hizo a una distancia de 70 cm del SPT inicial.



Figura 22 *Ensayo de campo SPT post - inyección*

Fuente propia

Nota: Los análisis se realizaran en datos y resultados

6.7 ENSAYOS DE LABORATORIO POST - INYECCIÓN

Se realizó el ensayo de compresión inconfiada a la muestra que se encuentra ubicada aproximadamente entre 1.85 m y 2.30 m de profundidad. No se pudo realizar más ensayos debido a que la muestra extraída con el SPT no fue suficiente y realizar un apique a esta profundidad constituye un riesgo para quien lo hace. Para obtener los parámetros que dan los ensayos de resistencia mecánica en el laboratorio, se hizo el cálculo a partir de correlaciones del ensayo SPT.

6.8 APIQUE

A continuación se evidencia en la *figura 30*, la exposición del suelo después de haber aplicado el método de mejoramiento Fracture Grouting. Esto muestra que la lechada se introjo en el suelo mediante la fracturación a presión.

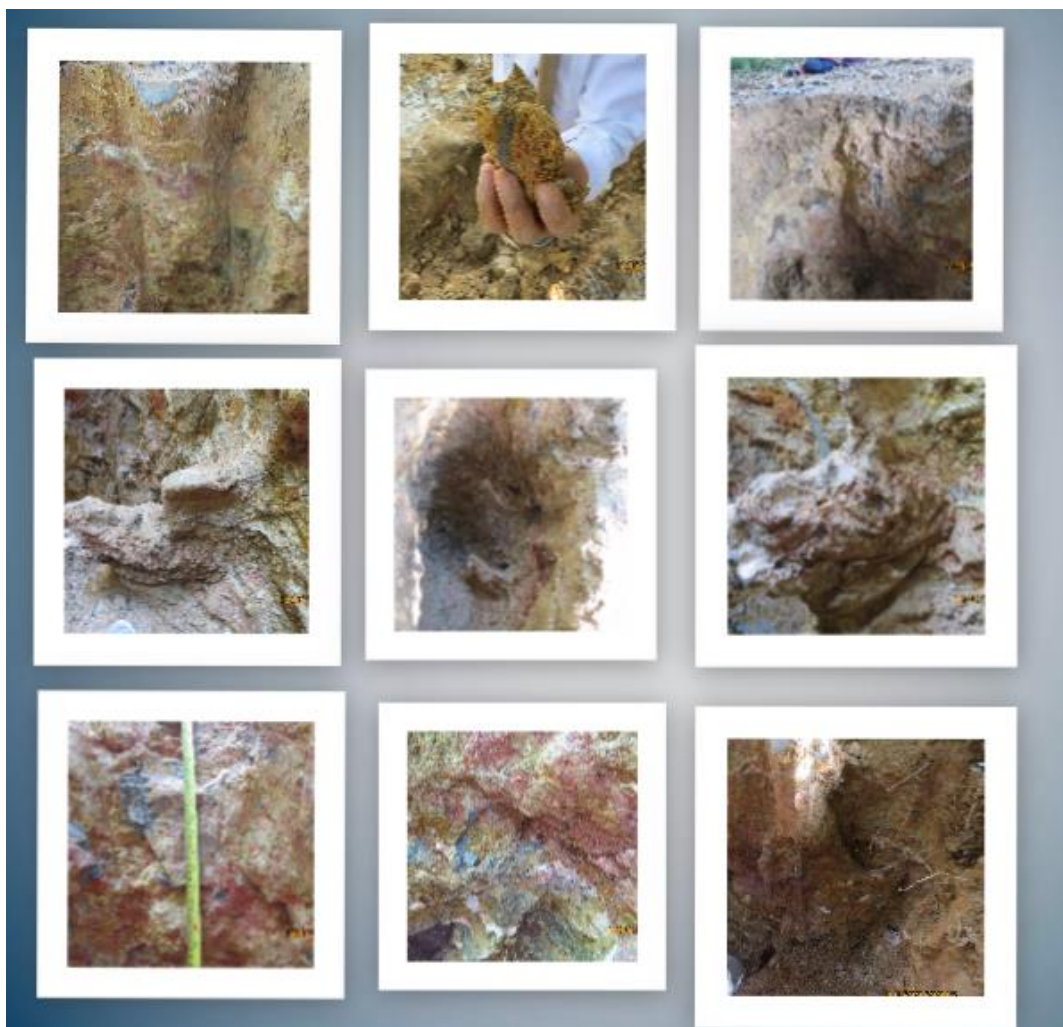


Figura 23 Conjunto de fotografías del apique realizado en el sitio después de la inyección

Fuente propia

El apique se realizó hasta una profundidad de 1.80 m. A 1.60 m, donde se encontró un bloque de lechada de aproximadamente 45 cm de largo.

Tambien se evidenció que la lechada alcanzó a abarcar un diámetro promedio de 80 cm a partir de la primera perforación.

7. DATOS Y RESULTADOS

7.1 ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO ANTES DE LA INYECCIÓN

7.1.1 Exploración y muestreo por medio de ensayo de SPT antes de la inyección

Se realizó un sondeo mediante SPT de tal manera que se obtuviera material para realizar los ensayos descritos anteriormente. En la siguiente tabla se encuentran consignados los datos obtenidos.

Tabla 7 Datos obtenidos en el ensayo SPT antes de la inyección.

MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		NÚMERO DE GOLPES			N ₄₅
		DE	A	6"	12"	18"	
M1	BOLSA	0,00	0,50				0
M2	SPT	0,50	0,95	0	1	1	2
M3	SPT	0,95	1,40	1	3	2	5
		1,40	1,85	2	4	6	10
M4	SPT	1,85	2,30	9	14	15	29
		2,30	2,75	23	20	20	40
M5	SPT	2,75	3,20	20	26	24	50
		3,20	3,65	22	27	23	50

Fuente propia

Con este SPT se alcanzó una profundidad de 3,65 m, pero se encontró rechazo en el intervalo anterior, aun así, se decidió realizar un avance para comprobar este resultado, logrando finalmente que la pesa rebotara y dando por terminado el SPT.

7.1.2 Descripción visual de las muestras antes de inyección







Figura 24 *Muestras obtenidas en el Ensayo SPT antes de la inyección*

Fuente propia

En la siguiente imagen se evidencian las muestras obtenidas por el SPT, con su debida descripción visual. Esta descripción se confirmó con los ensayos de clasificación.

Tabla 8 Descripción de las muestras

MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD		DESCRIPCIÓN	PERFIL
		DE	A		
M1	BL	0	0,5	Arena limosa, con presencia de finos color blanco hábano e intrusiones de material rojizo.	
M2	SPT	0,5	0,95	Arena limosa, con similar apariencia que la muestra 1. Nota: La muestra 1 y muestra 2, se unieron.	
M3	SPT	0,95	1,4	Arena limosa, color grisáceo, de alta consistencia.	
	AVANCE	1,4	1,85		
M4	SPT	1,85	2,3	Arcilla de baja compresibilidad, consistencia alta, de color gris con intercalaciones rojas.	
	AVANCE	2,3	2,75		
M5	SPT	2,75	3,2	Arena limosa, con presencia de un lente de 1 cm de arena color blanco, con aproximadamente 5 cm de roca y arena de grano grueso.	
	AVANCE	3,2	3,65		

Fuente propia

7.1.3 Ensayo de caracterización del suelo

A continuación se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de clasificación de suelos y la debida identificación mediante el sistema SUCS para las respectivas muestras obtenidas en el ensayo de campo SPT.

7.1.3.1 Ensayos de granulometría

Enseguida se evidencia los resultados del análisis granulométrico para las 4 muestras descritas anteriormente.

- Muestra No 1

Tabla 9 Análisis granulométrico muestra no 1

GRANULOMETRÍA					
Peso Muestra Seco (g)			587,37		
Peso Muestra Lavado Tamiz No 200 (g)			327		
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Suelo Retenido (g)	Peso Retenido Parcial (%)	Peso Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50,8	0	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,1	0	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,52	0	0,00	0,00	100,00
No 4	4,75	1,48	0,25	0,25	99,75
10	2	7,42	1,26	1,51	98,49
20	0,84	0	0,00	1,51	98,49
40	0,42	161,43	27,48	28,99	71,01
60	0,25	0	0,00	28,99	71,01
100	0,149	83,26	14,18	43,17	56,83
200	0,074	57,43	9,78	52,95	47,05
Pasa 200	-	276,35	47,05	100,00	0,00
		587,37	100,00		

Fuente propia

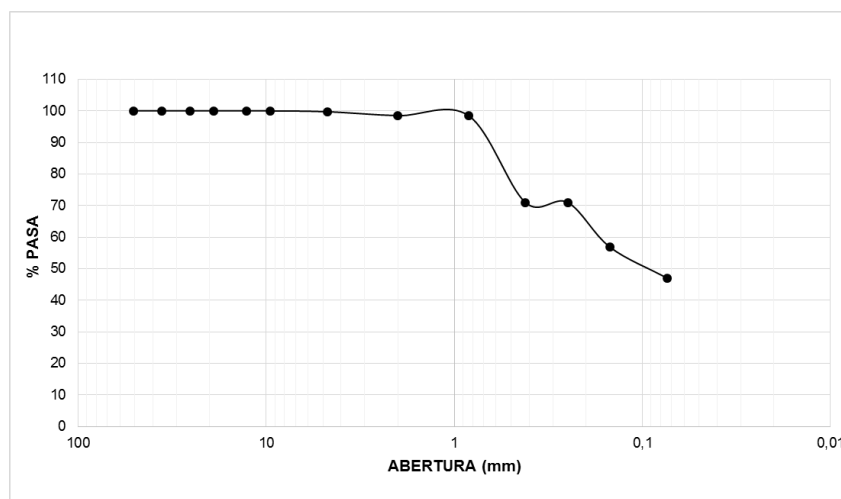


Figura 25 Curva granulométrica muestra no 1

Fuente propia

G-GRAVAS (%)	0,25	S-ARENAS (%)	52,70	F-FINOS (%)	47,05
---------------------	------	---------------------	-------	--------------------	-------

D₆₀ (mm)	0,17
D₃₀ (mm)	N.A
D₁₀ (mm)	N.A

Coficiente de Uniformidad (Cu)	N.A
Coficiente de Curvatura (Cc)	N.A

- Muestra No 2

Tabla 10 Análisis granulométrico muestra no 2

GRANULOMETRÍA					
Peso Muestra Seco (g)			328,88		
Peso Muestra Lavado Tamiz No 200 (g)			205,65		
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Suelo Retenido (g)	Peso Retenido Parcial (%)	Peso Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50,8	0	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,1	0	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,52	0	0,00	0,00	100,00
No 4	4,75	5,59	1,70	1,70	98,30
10	2	7,49	2,28	3,98	96,02
20	0,84	0	0,00	3,98	96,02
40	0,42	84,31	25,64	29,62	70,38
60	0,25	0	0,00	29,62	70,38
100	0,149	63,37	19,27	48,89	51,11
200	0,074	38,6	11,74	60,63	39,37
Pasa 200	-	129,52	39,38	100,0	0,0
		328,88	100,0		

Fuente propia

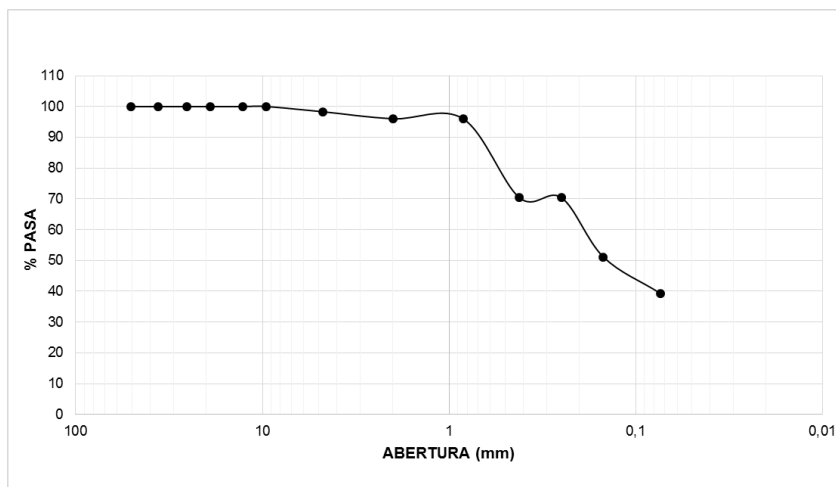


Figura 26 Curva granulométrica muestra no 2

Fuente propia

G-GRAVAS (%)	1,70	S-ARENAS (%)	58,93	F-FINOS (%)	39,37
---------------------	------	---------------------	-------	--------------------	-------

D₆₀ (mm)	0,2
D₃₀ (mm)	N.A
D₁₀ (mm)	N.A

Coefficiente de Uniformidad (Cu)	N.A
Coefficiente de Curvatura (Cc)	N.A

- Muestra No 3

Tabla 11 Análisis granulométrico muestra no 3

GRANULOMETRÍA					
Peso Muestra Seco (g)			349,17		
Peso Muestra Lavado Tamiz No 200 (g)			167,90		
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Suelo Retenido (g)	Peso Retenido Parcial (%)	Peso Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50,8	0	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,1	0	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,52	0	0,00	0,00	100,00
No 4	4,75	0,8	0,23	0,23	99,77
10	2	5,86	1,68	1,91	98,09
20	0,84	0	0,00	1,91	98,09
40	0,42	48,98	14,03	15,94	84,06
60	0,25	0	0,00	15,94	84,06
100	0,149	58,13	16,65	32,59	67,41
200	0,074	47,41	13,58	46,17	53,83
Pasa 200	-	187,99	53,84	100,0	0,0
		349,17	100,0		

Fuente propia

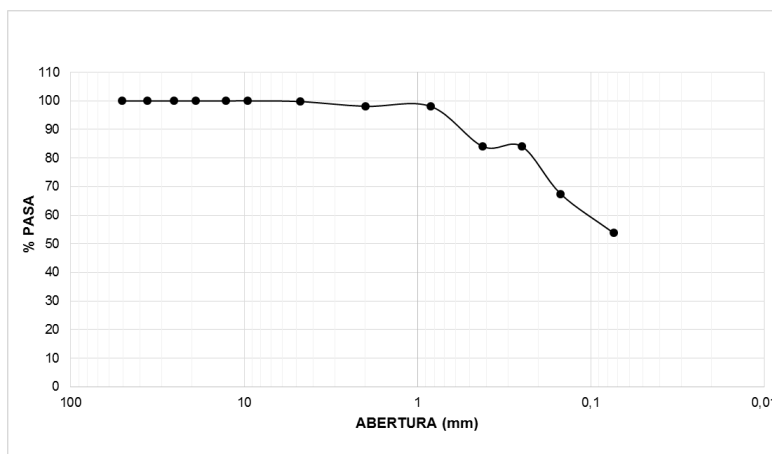


Figura 27 Curva granulométrica muestra no 3

Fuente propia

G-GRAVAS (%)	0,23	S-ARENAS (%)	45,94	F-FINOS (%)	53,83
---------------------	------	---------------------	-------	--------------------	-------

D₆₀ (mm)	0,11
D₃₀ (mm)	N.A
D₁₀ (mm)	N.A

Coefficiente de Uniformidad (Cu)	N.A
Coefficiente de Curvatura (Cc)	N.A

- **Muestra No 4**

Tabla 12 Análisis granulométrico muestra no 4

GRANULOMETRÍA					
Peso Muestra Seco (g)			646,16		
Peso Muestra Lavado Tamiz No 200 (g)			350,25		
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Suelo Retenido (g)	Peso Retenido Parcial (%)	Peso Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50,8	0	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,1	0	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,52	0	0,00	0,00	100,00
No 4	4,75	2,83	0,44	0,44	99,56
10	2	6,64	1,03	1,47	98,53
20	0,84	0	0,00	1,47	98,53
40	0,42	148,83	23,03	24,50	75,50
60	0,25	0	0,00	24,50	75,50
100	0,149	107,15	16,58	41,08	58,92
200	0,074	71,4	11,05	52,13	47,87
Pasa 200	-	309,31	47,87	100,00	0,00
		646,16	100,00		

Fuente propia

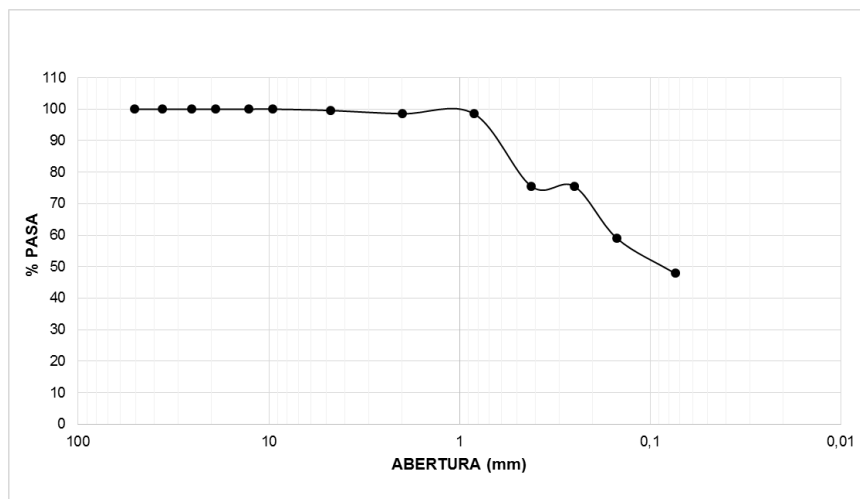


Figura 28 Curva granulométrica muestra no 4

Fuente propia

G-GRAVAS (%)	0,44	S-ARENAS (%)	51,69	F-FINOS (%)	47,87
---------------------	------	---------------------	-------	--------------------	-------

D₆₀ (mm)	0,16
D₃₀ (mm)	N.A
D₁₀ (mm)	N.A

Coefficiente de Uniformidad (Cu)	N.A
Coefficiente de Curvatura (Cc)	N.A

7.1.3.2 Límites de Atterberg y humedad natural

A continuación se exponen los resultados de los límites de plasticidad y humedad natural para las 4 muestras obtenidas en el ensayo SPT.

- **Muestra No 1**

Tabla 13 Resultados obtenidos a partir del ensayo de límite líquido muestra no 1

LÍMITE LÍQUIDO (LL)						
No Prueba	Cápsula No	No Golpes	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	134	19	20,89	28,13	26,09	39,23
2	53	21	27,09	38,17	35,24	35,95
3	20	32	21,18	32,59	29,64	34,87

Fuente propia

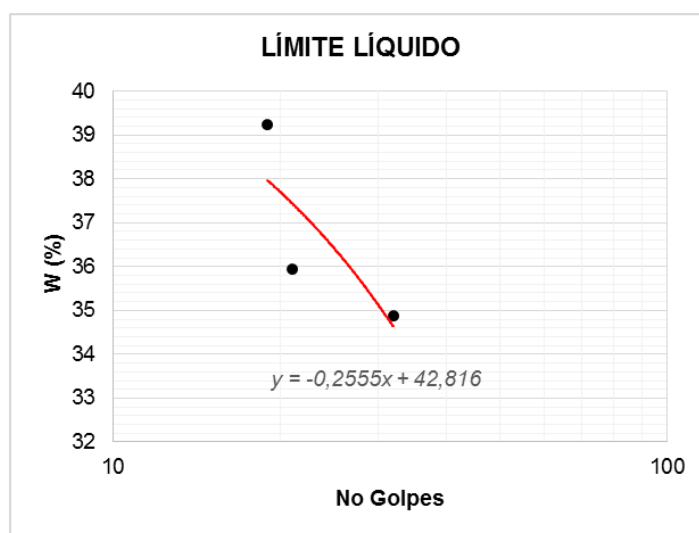


Figura 29 Curva de fluidez del ensayo de límite líquido muestra no 1

Fuente propia

$$LL (\%) = 36,43$$

Tabla 14 Resultados obtenidos del ensayo de límite plástico muestra no 1

LÍMITE PLÁSTICO (LP)					
Prueba No	Cápsula No	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	4	21,04	26,38	25,29	25,65
2	19	20,64	26,69	25,39	27,37

Fuente propia

$$LP (\%) = 26,51$$

Tabla 15 Humedad natural muestra no 1

HUMEDAD NATURAL (W)					
Prueba No	Cápsula No	Peso Bandeja (g)	Peso Bandeja + Suelo Húmedo (g)	Peso Bandeja + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	-	301,76	1305,32	1087,96	27,65

Fuente propia

- Muestra No 2

Tabla 16 Resultados obtenidos del ensayo de límite líquido muestra no 2

LÍMITE LÍQUIDO (LL)						
No Prueba	Cápsula No	No Golpes	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	126	18	21,05	36,06	31,32	46,15
2	14	26	21,14	35,46	31,24	41,78
3	9	36	20,88	34,57	30,6	40,84

Fuente propia

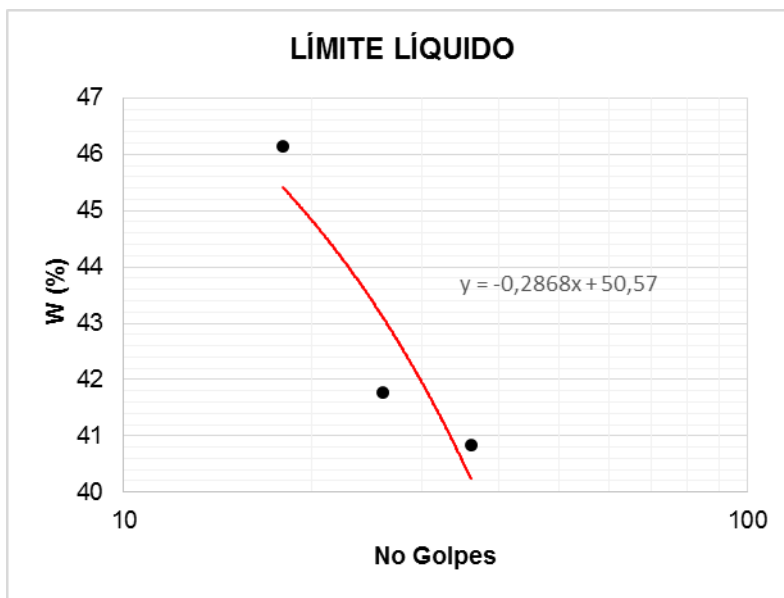


Figura 30 Curva de fluidez del ensayo de límite líquido muestra no 2

Fuente propia

$$LL(\%) = 43,40$$

Tabla 17 Resultado obtenido del ensayo de límite plástico muestra no 2

LÍMITE PLÁSTICO (LP)					
Prueba No	Cápsula No	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	18	21,33	26,85	25,55	30,81
2	89	21,17	26,38	25,15	30,9

Fuente propia

$$LP(\%) = 30,86$$

Tabla 18 *Humedad natural muestra no 2*

HUMEDAD NATURAL (W)					
Prueba No	Cápsula No	Peso Bandeja (g)	Peso Bandeja + Suelo Húmedo (g)	Peso Bandeja + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	-	337,3	1197,11	993,45	31,04

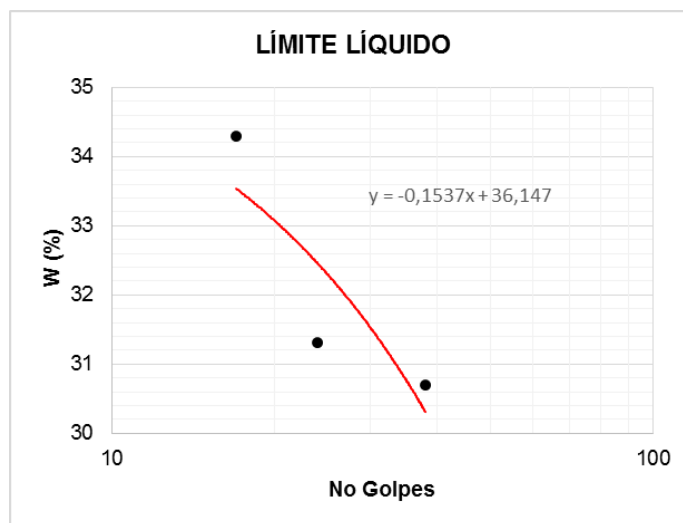
Fuente propia

- **Muestra No 3**

Tabla 19 *Resultados obtenidos del ensayo de límite líquido muestra no 3*

LÍMITE LÍQUIDO (LL)						
No Prueba	Cápsula No	No Golpes	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	2	17	27,37	35,71	33,58	34,3
2	123	24	20,98	32,85	30,02	31,31
3	325	38	20,78	32,83	30	30,69

Fuente propia

**Figura 31** *Curva de fluidez del ensayo de límite líquido muestra no 3*

Fuente: Propia

$$LL(\%) = 32,30$$

Tabla 20 Resultado obtenido del ensayo de límite plástico muestra no 3

LÍMITE PLÁSTICO (LP)					
Prueba No	Cápsula No	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	12	27,06	33,49	32,32	22,24
2	9	27,33	31,3	30,53	24,06

Fuente propia

$$LP(\%) = 23,15$$

Tabla 21 Humedad natural muestra no 3

HUMEDAD NATURAL (W)					
Prueba No	Cápsula No	Peso Bandeja (g)	Peso Bandeja + Suelo Húmedo (g)	Peso Bandeja + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	-	301,96	672,15	615,59	18,03

Fuente propia

- Muestra No 4

Tabla 22 Resultados obtenidos del ensayo de límite líquido muestra no 4

LÍMITE LÍQUIDO (LL)						
No Prueba	Cápsula No	No Golpes	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	17	18	21,23	30,21	27,56	41,86
2	9	22	20,88	31,19	28,3	38,95
3	89	38	21,17	29,27	27,08	37,06

Fuente propia

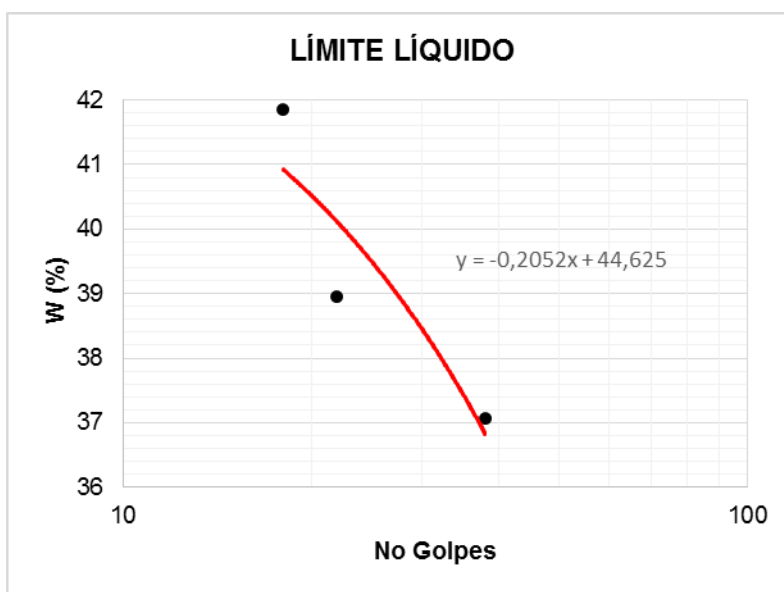


Figura 32 Curva de fluidez del ensayo de límite líquido muestra no 4

Fuente propia

$$LL(\%) = 39,50$$

Tabla 23 Resultado obtenido del ensayo de límite plástico muestra no 4

LÍMITE PLÁSTICO (LP)					
Prueba No	Cápsula No	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	59	27,17	30,97	30,13	28,38
2	15	26,96	32,97	31,78	24,69

Fuente propia

$$LP(\%) = 26,54$$

Tabla 24 *Humedad natural muestra no 4*

HUMEDAD NATURAL (W)					
Prueba No	Cápsula No	Peso Bandeja (g)	Peso Bandeja + Suelo Húmedo (g)	Peso Bandeja + Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (%)
1	-	300,67	1332,25	1175	17,99

Fuente propia

7.1.3.3 Clasificación de los suelos (Sistema SUCS)

Teniendo los resultados de la granulometría y los límites de Atterberg de cada muestra, se prosigue a hacer su debida clasificación mediante el sistema SUCS. Como todas las muestras presentan un porcentaje de finos superior al 12% en peso se hace necesario el uso de la carta de plasticidad.

Tabla 25 *Tipos de suelos obtenidos a partir de los ensayos de caracterización*

Muestra	G-Gravas (%)	S-Arenas (%)	F-Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Tipo de Suelo	
1	0,25	52,70	47,05	36,43	26,51	9,92	SM	Arena Limosa
2	1,70	58,93	39,37	43,40	30,86	12,55	SM	Arena Limosa
3	0,23	45,94	53,83	32,30	23,15	9,15	CL	Arcilla de Baja Compresibilida
4	0,44	51,59	47,87	39,50	26,54	12,97	SM	Arena Limosa

Fuente propia

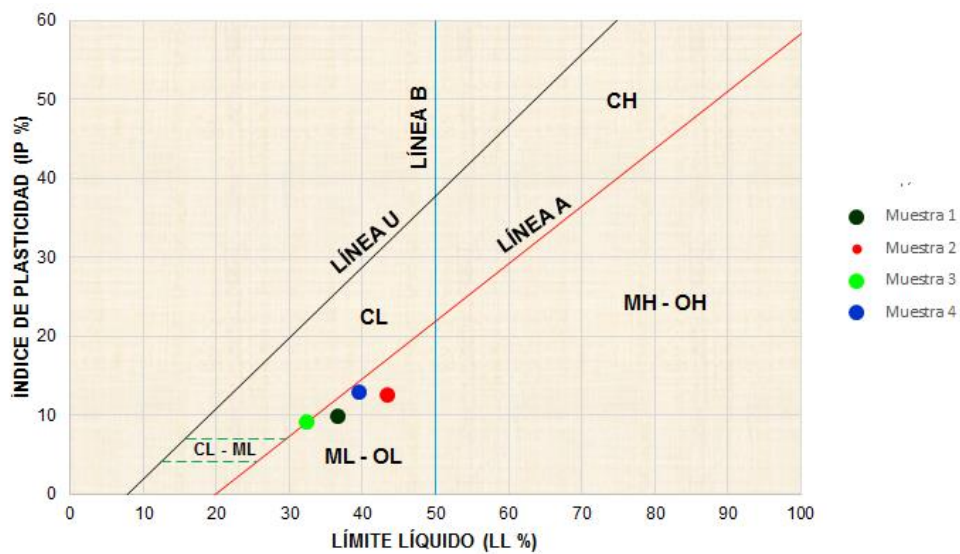


Figura 33 Ubicación de las muestras en la carta de plasticidad

Adaptado de Bañón Blázquez & Beviá García (2000)

7.1.4 Ensayo de resistencia mecánica antes de la inyección

Una vez identificados los tipos de suelo mediante ensayos de caracterización, se prosiguen a realizar los ensayos de resistencia mecánica (Compresión Inconfinada y Corte Directo). Estos ensayos solo se realizaron a la muestra 3 y 4.

7.1.4.1 Ensayo de compresión inconfiada

- MUESTRA No 3



Figura 34 Probeta 1 – muestra no 3 antes de la inyección

Fuente propia

Tabla 26 Datos de la probeta 1 - muestra no 3 antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,5	Altura de la Muestra (cm)	6,93
Peso Muestra (gr)	130,37	Diámetro de la Muestra (cm)	3,5
Área Muestra (cm ²)	9,62		
Cápsula No	2	Humedad (%)	23,82
Peso Cápsula (g)	27,59	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,51
Peso Suelo Húmedo + Cápsula (gr)	157,46	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,41
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	132,48		

Tabla 27 Resultados del ensayo de compresión simple de la probeta 1 - muestra no 3 antes de la inyección

Lectura No	Carga (Kg)	Deformación (cm)	Deformación Axial (%)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Normal (Kg/cm ²)
1	0,45	0,01	0,14	9,63	0,05
2	0,91	0,03	0,43	9,66	0,09
3	0,91	0,05	0,72	9,69	0,09
4	1,82	0,08	1,15	9,73	0,19
5	2,27	0,10	1,44	9,76	0,23
6	2,27	0,12	1,73	9,79	0,23
7	3,18	0,15	2,16	9,83	0,32
8	3,63	0,18	2,6	9,88	0,37
9	3,63	0,20	2,89	9,91	0,37
10	4,09	0,23	3,32	9,95	0,41
11	4,54	0,25	3,61	9,98	0,45
12	4,99	0,27	3,9	10,01	0,5
13	4,99	0,30	4,33	10,06	0,5
14	5,90	0,35	5,05	10,13	0,58
15	6,36	0,40	5,77	10,21	0,62
16	5,90	0,45	6,49	10,29	0,57
17	5,90	0,50	7,22	10,37	0,57
18	5,45	0,60	8,66	10,53	0,52

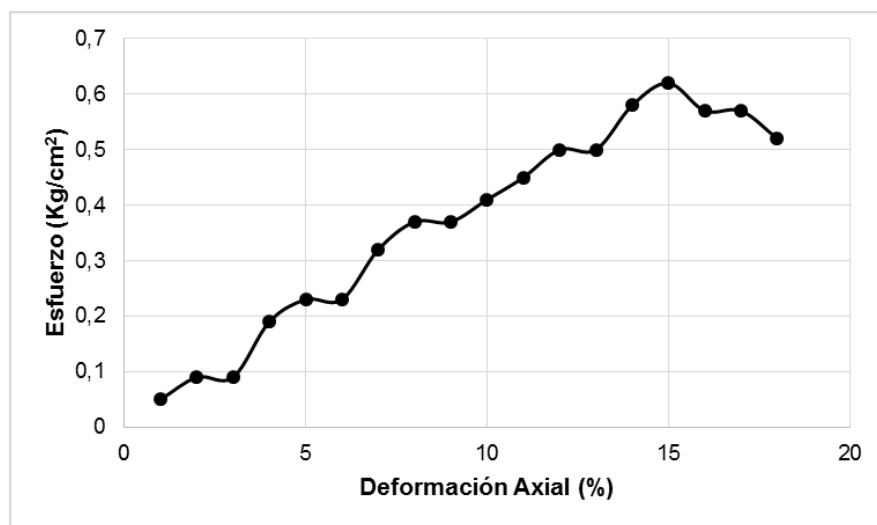


Figura 35 Curva esfuerzo vs deformación probeta 1 - muestra no 3 antes de la inyección

Fuente propia

$$\text{Esfuerzo Máximo} = \sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,62$$

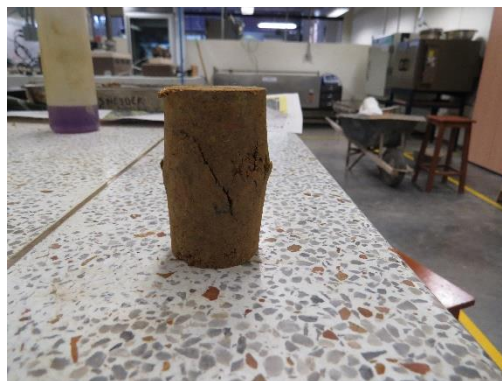


Figura 36 *Probeta 2 – muestra no 3 antes de la inyección*

Fuente propia

Tabla 28 *Datos de ensayo probeta 2 - muestra no 3 antes de la inyección*

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,5	Altura de la Muestra (cm)	6,93
Peso Muestra (gr)	129,45	Diámetro de la Muestra (cm)	3,52
Área Muestra (cm ²)	9,73		
Cápsula No	325	Humedad (%)	23,97
Peso Cápsula (g)	21,08	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,52
Peso Suelo Húmedo + Cápsula (gr)	149,98	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,42
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	125,06		

Fuente propia

Tabla 29 Resultado del ensayo de compresión simple probeta 2 - muestra no 3 antes de la inyección

Lectura No	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Deformación Axial (%)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Normal (Kg/cm ²)
1	0,45	0,01	0,14	9,63	0,05
2	0,45	0,03	0,43	9,66	0,05
3	0,91	0,05	0,72	9,69	0,09
4	1,36	0,08	1,15	9,73	0,14
5	3,18	0,10	1,44	9,76	0,33
6	3,18	0,12	1,73	9,79	0,32
7	3,18	0,15	2,16	9,83	0,32
8	3,18	0,18	2,6	9,88	0,32
9	3,18	0,20	2,89	9,91	0,32
10	3,18	0,23	3,32	9,95	0,32
11	3,63	0,25	3,61	9,98	0,36
12	4,54	0,27	3,9	10,01	0,45
13	4,99	0,30	4,33	10,06	0,5
14	5,90	0,35	5,05	10,13	0,58
15	6,36	0,40	5,77	10,21	0,62
16	6,81	0,45	6,49	10,29	0,66
17	6,36	0,50	7,22	10,37	0,61
18	4,99	0,60	8,66	10,53	0,47

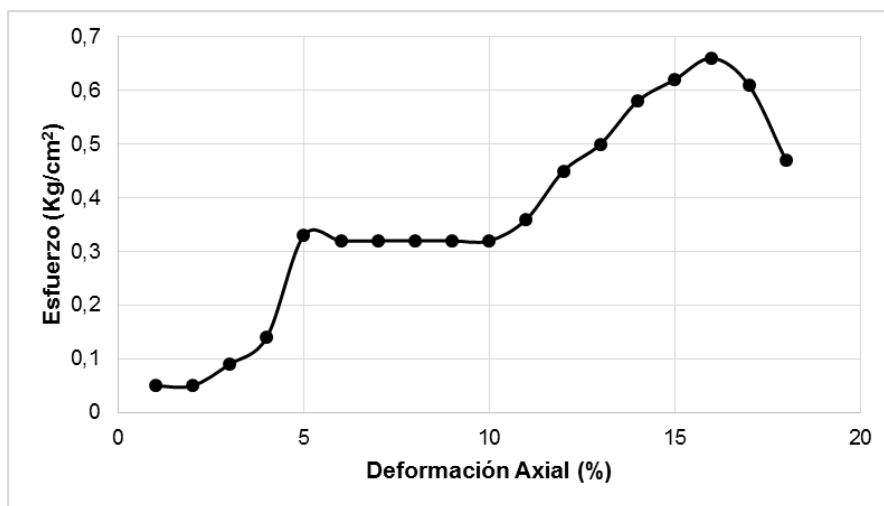


Figura 37 Curva esfuerzo vs deformación probeta 2 - muestra no 3 antes de la inyección

Fuente propia

$$\text{Esfuerzo Máximo} = \sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,66$$

Tabla 30 Valor de esfuerzo máximo promedio muestra no 3 antes de la inyección

Probeta No	σ Máximo (Kg/cm ²)
1	0,62
2	0,66
Promedio	0,64

Fuente propia

$$C = \frac{0,64}{2} = 0,32 \frac{kg}{cm^2}$$

- Muestra No 4



Figura 38 Probeta 1 – muestra no 4 antes de la inyección

Fuente propia

Tabla 31 Datos de ensayo probeta 1- muestra no 4 antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,5	Altura de la Muestra (cm)	10,08
Peso Muestra (gr)	365,6	Diámetro de la Muestra (cm)	5,54
Área Muestra (cm ²)	24,11		
Cápsula No	17	Humedad (%)	16,91
Peso Cápsula (g)	21,45	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,66
Peso Suelo Húmedo + Cápsula (gr)	112,09	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,56
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	98,98		

Fuente propia

Tabla 32 Resultados del ensayo de compresión simple probeta 1 - muestra no 4 antes de la inyección

Lectura No	Carga (Kg)	Deformación (cm)	Deformación Axial (%)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Normal (Kg/cm ²)
1	3,18	0,01	0,1	24,13	0,13
2	4,54	0,03	0,3	24,18	0,19
3	4,99	0,05	0,5	24,23	0,21
4	6,81	0,08	0,79	24,3	0,28
5	10,90	0,10	0,99	24,35	0,45
6	11,35	0,12	1,19	24,4	0,47
7	14,98	0,15	1,49	24,47	0,61
8	15,44	0,18	1,79	24,55	0,63
9	17,71	0,20	1,98	24,6	0,72
10	17,71	0,23	2,28	24,67	0,72
11	18,16	0,25	2,48	24,72	0,73
12	17,71	0,27	2,68	24,77	0,71
13	15,89	0,30	2,98	24,85	0,64
14	13,17	0,35	3,47	24,98	0,53

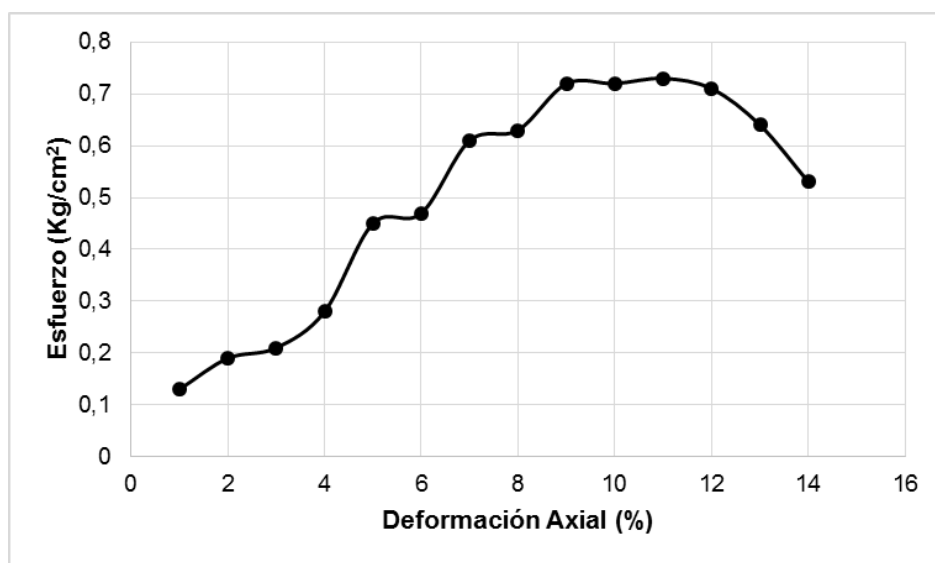


Figura 39 Curva esfuerzo vs deformación probeta 1 – muestra no 4 antes de la inyección

Fuente propia

$$\text{Esfuerzo Máximo} = \sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,73$$

Tabla 33 Datos de ensayo probeta 2 – muestra no 4 antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,5	Altura de la Muestra (cm)	10,06
Peso Muestra (gr)	365,6	Diámetro de la Muestra (cm)	5,52
rea Muestra (cm ²)	23,93		
Cápsula No	306	Humedad (%)	18,79
Peso Cápsula (g)	27,32	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,66
Peso Suelo Húmedo + Cápsula (gr)	152,94	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,56
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	133,07		

Tabla 34 Resultados del ensayo de compresión simple probeta 2 – muestra no 4 antes de la inyección

Lectura No	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Deformación Axial (%)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Normal (Kg/cm ²)
1	0,91	0,01	0,1	24,13	0,04
2	2,72	0,03	0,3	24,18	0,11
3	4,99	0,05	0,5	24,23	0,21
4	8,63	0,08	0,79	24,30	0,36
5	11,35	0,10	0,99	24,35	0,47
6	13,17	0,12	1,19	24,40	0,54
7	13,62	0,15	1,49	24,47	0,56
8	15,44	0,18	1,79	24,55	0,63
9	16,80	0,20	1,98	24,60	0,68
10	19,52	0,23	2,28	24,67	0,79
11	19,52	0,25	2,48	24,72	0,79
12	19,52	0,27	2,68	24,77	0,79
13	20,88	0,30	2,98	24,85	0,84
14	18,61	0,35	3,47	24,98	0,74

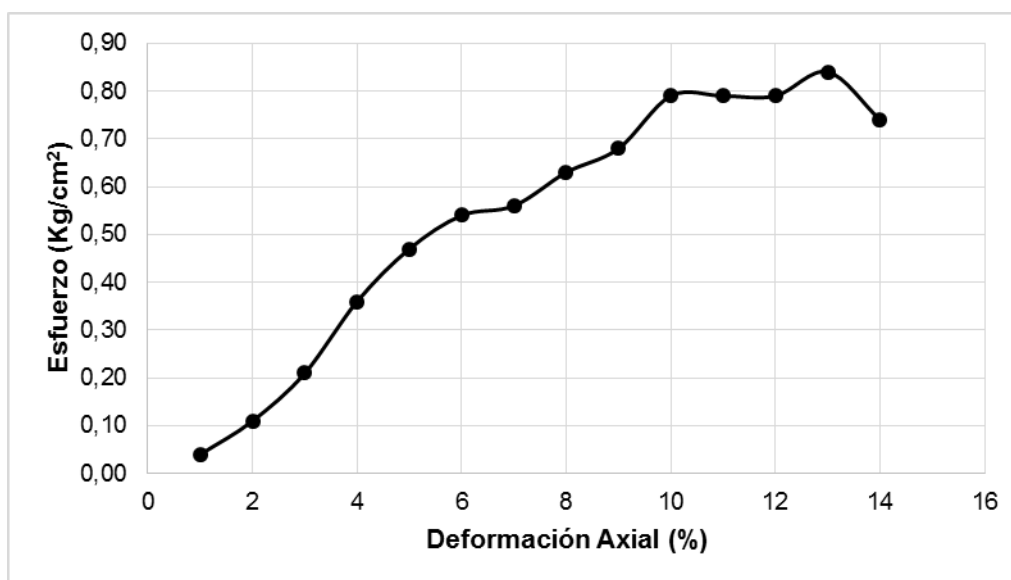


Figura 40 Curva esfuerzo deformación probeta 2 – muestra no 4 antes de la inyección

Fuente propia

$$\text{Esfuerzo Máximo} = \sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,84$$

Tabla 35 Valor del esfuerzo máximo promedio muestra no 4 antes de la inyección

Probeta No	σ Máximo (Kg/cm ²)
1	0,73
2	0,84
Promedio	0,79

$$C = \frac{0,79}{2} = 0,39 \frac{kg}{cm^2}$$

7.1.3.4 Ensayo de corte directo antes de la inyección

- Muestra No 3



Figura 41 Muestras sometidas a corte directo antes de la inyección

Fuente propia

Tabla 36 Datos de la muestra no 3 aplicando un esfuerzo de $0,5 \text{ kg/cm}^2$ antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	1	Altura de la Muestra (cm)	1,83
Peso del Molde (gr)	140,4	Peso Muestra + Molde (gr)	272,14
Área Muestra (cm^2)	36	σ (Kg/cm^2)	0,5
Cápsula No	123	Humedad (%)	20,94
Peso Cápsula (g)	20,98	Peso Especifico Húmedo (gr/cm^3)	0,50
Peso Suelo Humedo + Cápsula (gr)	64,94	Peso Especifico Seco (gr/cm^3)	0,41
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	57,33		

Tabla 37 Resultados de la muestra no 3 con un esfuerzo de $0,5 \text{ kg/cm}^2$ antes de la inyección

Tiempo (Min)	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Área Corregida (Cm^2)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm^2)
0,5	6,14	0,04	35,79	0,17
1	8,83	0,08	35,51	0,25
1,5	11,31	0,13	35,21	0,32
2	13,53	0,18	34,90	0,39
2,5	14,96	0,21	34,74	0,43
3	15,58	0,29	34,27	0,45
3,5	15,61	0,34	33,93	0,46
4	15,14	0,39	33,64	0,45
4,5	14,49	0,44	33,34	0,43
5	14,18	0,50	33,01	0,43

$$\tau_{\text{Máximo}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,46$$

Tabla 38 Datos de la muestra no 3 aplicando un esfuerzo de $1,0 \text{ kg/cm}^2$ antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	1	Altura de la Muestra (cm)	1,86
Peso del Molde (gr)	140,63	Peso Muestra + Molde (gr)	271,71
Área Muestra (cm^2)	36	σ (Kg/cm^2)	1
Cápsula No	306	Humedad (%)	20,57
Peso Cápsula (g)	27,09	Peso Especifico Húmedo (gr/cm^3)	0,51
Peso Suelo Humedo + Cápsula (gr)	89,46	Peso Especifico Seco (gr/cm^3)	0,42
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	78,82		

Tabla 39 Resultados de la muestra 3 con un esfuerzo de 1,0 kg/cm² antes de la inyección

Tiempo (Min)	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)
0,5	8,62	0,08	35,52	0,24
1	12,78	0,12	35,27	0,36
1,5	17,66	0,16	35,02	0,5
2	21,99	0,21	34,73	0,63
2,5	25,70	0,25	34,49	0,75
3	28,43	0,32	34,10	0,83
3,5	30,10	0,37	33,80	0,89
4	30,64	0,41	33,52	0,91
4,5	30,95	0,47	33,18	0,93
5	30,06	0,52	32,87	0,91
5,5	27,85	0,57	32,59	0,85

$$\tau_{M\acute{a}ximo} \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 0,93$$

Tabla 40 Datos de la muestra no 3 aplicando un esfuerzo de 2,0 kg/cm² antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	1	Altura de la Muestra (cm)	1,84
Peso del Molde (gr)	145,22	Peso Muestra + Molde (gr)	274,16
Área Muestra (cm ²)	36	σ (Kg/cm ²)	2
Cápsula No	12	Humedad (%)	18,82
Peso Cápsula (g)	27,07	Peso Especifico Húmedo (gr/cm ³)	0,51
Peso Suelo Húmedo + Cápsula (gr)	95,5	Peso Especifico Seco (gr/cm ³)	0,43
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	84,66		

Tabla 41 Resultados de la muestra no 3 con un esfuerzo de 2,0 kg/cm² antes de la inyección

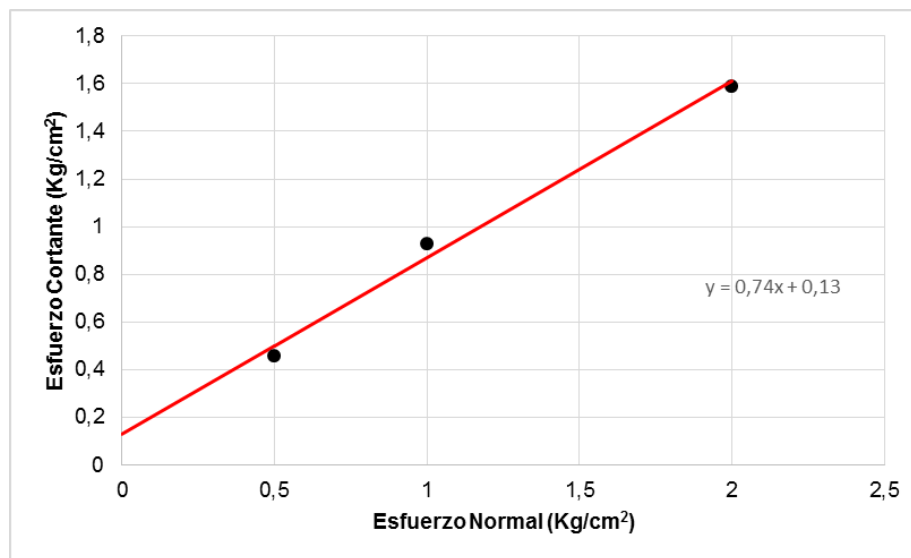
Tiempo (Min)	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)
0,5	18,03	0,00	35,98	0,5
1	26,72	0,08	35,53	0,75
1,5	33,23	0,12	35,25	0,94
2	37,52	0,17	34,97	1,07
2,5	42,13	0,21	34,72	1,21
3	45,78	0,27	34,38	1,33
3,5	49,18	0,32	34,06	1,44
4	51,47	0,37	33,77	1,52
4,5	52,90	0,42	33,48	1,58
5	52,73	0,47	33,16	1,59
5,5	50,86	0,52	32,85	1,55
6	50,28	0,58	32,54	1,55

$$\tau_{M\acute{a}ximo} \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 1,59$$

Tabla 42 Resultado de corte directo muestra no 3 antes de la inyección

σ (Kg/cm ²)	τ (Kg/cm ²)
0,5	0,46
1	0,93
2	1,59

Fuente propia

**Figura 42** Curva esfuerzo normal vs esfuerzo cortante muestra no 3 antes de la inyección

Fuente propia

$$\text{Ángulo de Fricción} = \phi = \tan^{-1}(0,74)$$

$$\phi = 36,50^\circ$$

$$C = 0,13 \frac{kg}{cm^2}$$

- **Muestra No 4**

Tabla 43 Datos de la muestra no 4 aplicando un esfuerzo de 0,5 kg/cm² antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,3	Altura de la Muestra (cm)	1,89
Peso del Molde (gr)	141,1	Peso Muestra + Molde (gr)	266,77
Área Muestra (cm ²)	36	σ (Kg/cm ²)	0,5
Cápsula No	53	Humedad (%)	24,53
Peso Cápsula (g)	26,98	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,54
Peso Suelo Humedo + Cápsula (gr)	158,45	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,43
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	132,55		

Tabla 44 Resultados de la muestra no 4 con un esfuerzo de 0,5 kg/cm² antes de la inyección

Tiempo (Min)	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)
0,5	5,66	0,02	35,88	0,16
1	7,02	0,03	35,81	0,2
1,5	7,43	0,04	35,76	0,21
2	8,55	0,07	35,59	0,24
2,5	8,90	0,07	35,59	0,25
3	11,01	0,07	35,56	0,31
3,5	12,30	0,11	35,35	0,35
4	12,85	0,12	35,27	0,36
4,5	13,39	0,14	35,19	0,38
5	13,50	0,14	35,18	0,38
5,5	15,94	0,16	35,02	0,46
6	14,45	0,18	34,90	0,41
6,5	14,13	0,19	34,85	0,41
7	13,80	0,20	34,79	0,4

$$\tau_{M\acute{a}ximo} \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 0,46$$

Tabla 45 Datos de la muestra no 4 aplicando un esfuerzo de 1,0 kg/cm² antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,3	Altura de la Muestra (cm)	1,83
Peso del Molde (gr)	141,1	Peso Muestra + Molde (gr)	264,26
Área Muestra (cm ²)	36	σ (Kg/cm ²)	1
Cápsula No	7	Humedad (%)	24,1
Peso Cápsula (g)	27,23	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,53
Peso Suelo Húmedo + Cápsula (gr)	152,5	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,43
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	128,17		

Tabla 46 Resultados de la muestra no 4 con un esfuerzo de 1,0 kg/cm² antes de la inyección

Tiempo (Min)	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)
0,5	6,40	0,04	35,73	0,18
1	8,29	0,05	35,71	0,23
1,5	12,75	0,06	35,65	0,36
2	13,57	0,07	35,60	0,38
2,5	15,95	0,09	35,44	0,45
3	17,50	0,10	35,38	0,49
3,5	19,05	0,11	35,32	0,54
4	20,24	0,14	35,19	0,58
4,5	21,17	0,15	35,10	0,6
5	22,09	0,17	35,01	0,63
5,5	23,59	0,18	34,92	0,68
6	24,27	0,20	34,83	0,7
6,5	25,32	0,20	34,77	0,73
7	23,38	0,22	34,66	0,67
7,5	23,31	0,23	34,63	0,67
8	23,18	0,25	34,49	0,67

$$\tau_{M\acute{a}ximo} \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 0,73$$

Tabla 47 Datos de la muestra no 4 aplicando un esfuerzo de 2,0 kg/cm² antes de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,3	Altura de la Muestra (cm)	1,85
Peso del Molde (gr)	141,03	Peso Muestra + Molde (gr)	265,8
Área Muestra (cm ²)	36	σ (Kg/cm ²)	2
Cápsula No	36	Humedad (%)	24,81
Peso Cápsula (g)	21,06	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,53
Peso Suelo Húmedo + Cápsula (gr)	148,4	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,42
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	123,09		

Tabla 48 Resultados de la muestra no 4 con un esfuerzo de 2,0 kg/cm² antes de la inyección

Tiempo (Min)	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)
0,5	10,63	0,01	35,91	0,3
1	14,66	0,04	35,73	0,41
1,5	17,55	0,06	35,61	0,49
2	19,91	0,08	35,52	0,56
2,5	22,02	0,09	35,49	0,62
3	24,07	0,10	35,42	0,68
3,5	26,93	0,12	35,29	0,76
4	29,01	0,13	35,23	0,82
4,5	31,25	0,14	35,14	0,89
5	33,51	0,15	35,12	0,95
5,5	35,62	0,17	34,99	1,02
6	34,80	0,18	34,94	1
6,5	33,94	0,18	34,94	0,97
7	33,88	0,17	34,96	0,97

$$\tau_{M\acute{a}ximo} \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 1,0$$

Tabla 49 Resultado de corte directo muestra no 4 antes de la inyección

σ (Kg/cm ²)	τ (Kg/cm ²)
0,5	0,46
1	0,73
2	1,02

Fuente propia

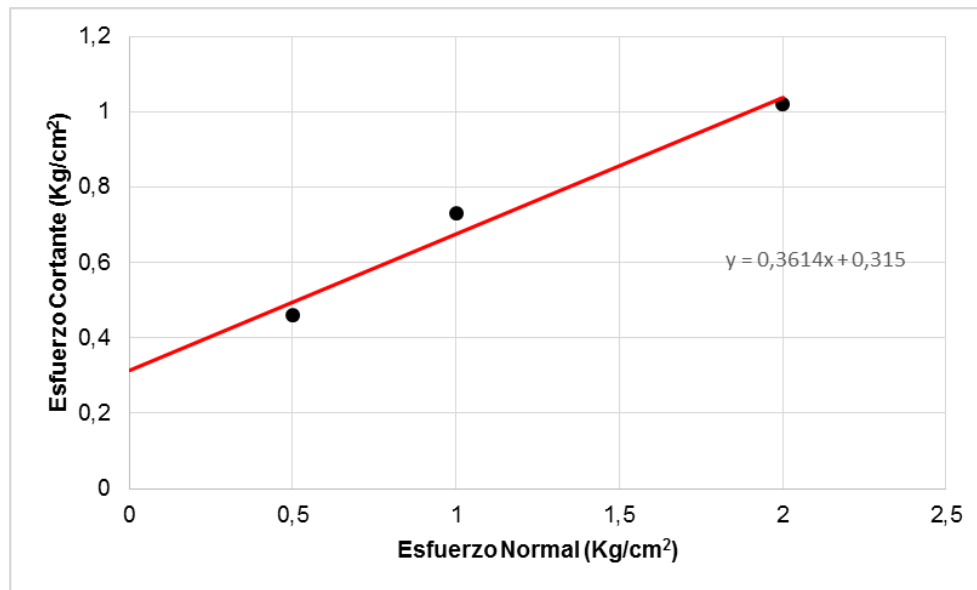


Figura 43 Curva esfuerzo normal vs esfuerzo cortante muestra no 4 antes de la inyección

Fuente propia

$$\text{Ángulo de Fricción} = \phi = \tan^{-1}(0,3614)$$

$$\phi = 19,87^\circ$$

$$C = 0,32 \frac{kg}{cm^2}$$

7.2 ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO DESPUÉS DE LA INYECCIÓN

7.2.1 Exploración y muestreo por ensayo de campo SPT después de la inyección






Se realizó un segundo sondeo mediante ensayo SPT, para comparar los datos antes y después de la aplicación del método de Fracture Grouting. En la siguiente tabla se encuentran consignados los datos obtenidos del segundo ensayo SPT.

Tabla 50 Datos obtenidos por medio de ensayo SPT después de la inyección

MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		NO. GOLPES			N ₄₅
		DE	A	6"	12"	18"	
M1	SPT	0,00	0,45	1	1	1	2
		0,45	0,90	1	3	2	5
M2	SPT	0,90	1,35	2	4	2	6
		1,35	1,80	3	7	5	12
M3	SPT	1,80	2,25	13	17	15	32
M4	SPT	2,25	2,70	27	22	26	48
M5	SPT	2,70	2,90	26	50		50

Fuente propia

Tabla 51 Muestras obtenidas del segundo SPT después de la inyección

MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD		PERFIL
		DE	A	
M1	SPT	0	0,45	
	AVANCE	0,45	0,9	
M2	SPT	0,9	1,35	
	AVANCE	1,35	1,8	
M3	SPT	1,8	2,25	
M4	AVANCE	2,25	2,7	
M5	SPT	2,7	3,15	

Nota: No se adjunta descripción de las muestras debido a que presentan las mismas características del sondeo 1 y tampoco se realizar ensayos de caracterización, porque el suelo sigue siendo el mismo. Se tomaron las muestras 3 y 4 como una sola muestra por la analogía de las propiedades.

7.2.2 Ensayos de resistencia mecánica

No se realizaron ensayos de corte directo en ambas muestras.

7.2.2.1 Ensayo de compresión incofinada después de la inyección

- **Muestra No 3**



Figura 44 Probeta 1 – muestra no 3 después de la inyección

Fuente propia

Tabla 52 Datos de ensayo probeta 1 – muestra no 3 después de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,5	Altura de la Muestra (cm)	6,85
Peso Muestra (gr)	128,85	Diámetro de la Muestra (cm)	3,53
Área Muestra (cm ²)	9,79		
Cápsula No	10	Humedad (%)	26,41
Peso Cápsula (g)	21,17	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,52
Peso Suelo Humedo + Cápsula (gr)	148,87	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,41
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	122,19		

Tabla 53 Resultado del ensayo de compresión simple probeta 1 - muestra no 3 después de la inyección

Lectura No	Carga (Kg)	Deformación (cm)	Deformación Axial (%)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Normal (Kg/cm ²)
1	0,45	0,01	0,15	9,8	0,05
2	2,27	0,03	0,44	9,83	0,23
3	2,72	0,05	0,73	9,86	0,28
4	3,18	0,08	1,17	9,91	0,32
5	3,18	0,10	1,46	9,94	0,32
6	3,18	0,12	1,75	9,96	0,32
7	3,63	0,15	2,19	10,01	0,36
8	4,09	0,18	2,63	10,05	0,41
9	4,54	0,20	2,92	10,08	0,45
10	4,99	0,23	3,36	10,13	0,49
11	4,99	0,25	3,65	10,16	0,49
12	4,99	0,27	3,94	10,19	0,49
13	5,45	0,30	4,38	10,24	0,53
14	5,90	0,35	5,11	10,32	0,57
15	6,36	0,40	5,84	10,4	0,61
16	6,81	0,45	6,57	10,48	0,65
17	7,26	0,50	7,3	10,56	0,69
18	7,26	0,60	8,76	10,73	0,68
19	7,26	0,70	10,22	10,9	0,67
20	7,26	0,80	11,68	11,08	0,66
21	7,26	0,90	13,14	11,27	0,64

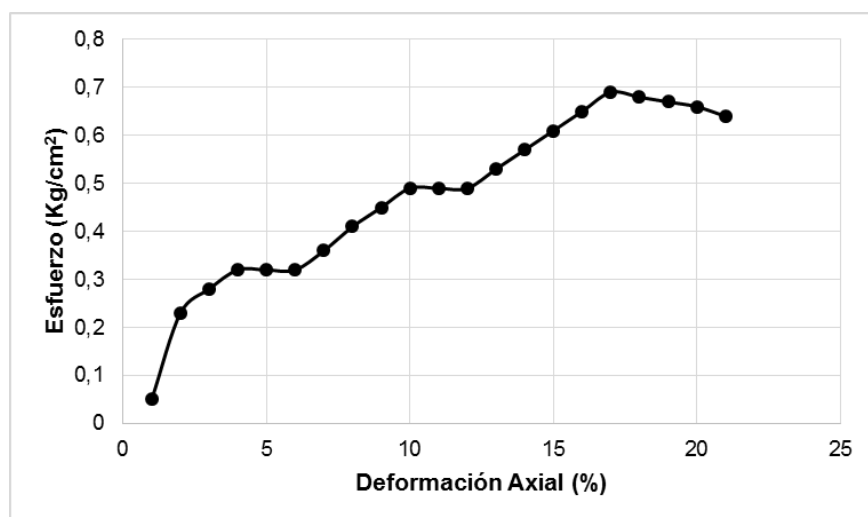


Figura 45 Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 1 – muestra no 3 después de la inyección

Fuente propia

$$\text{Esfuerzo Máximo} = \sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,69$$



Figura 46 Ensayo de compresión de la probeta 2 – muestra no 3 después de la inyección

Fuente propia

Tabla 54 Datos de ensayo probeta 2 – muestra no 3 después de la inyección

Velocidad de ensayo (mm/min)	0,5	Altura de la Muestra (cm)	6,85
Peso Muestra (gr)	130,03	Diámetro de la Muestra (cm)	3,55
Área Muestra (cm ²)	9,9		
Cápsula No	24	Humedad (%)	22,6
Peso Cápsula (g)	21,14	Peso Específico Húmedo (gr/cm ³)	0,52
Peso Suelo Humedo + Cápsula (gr)	150,56	Peso Específico Seco (gr/cm ³)	0,42
Peso Suelo Seco + Cápsula (gr)	126,7		

Tabla 55 Resultados obtenidos de la probeta 2 – muestra no 3 después de la inyección

Lectura No	Carga (Kg)	Deformación (Cm)	Deformación Axial (%)	Área Corregida (Cm ²)	Esfuerzo Normal (Kg/cm ²)
1	0,45	0,01	0,15	9,8	0,05
2	0,91	0,03	0,44	9,83	0,09
3	0,91	0,05	0,73	9,86	0,09
4	1,36	0,08	1,17	9,91	0,14
5	2,27	0,10	1,46	9,94	0,23
6	2,27	0,12	1,75	9,96	0,23
7	2,72	0,15	2,19	10,01	0,27
8	3,18	0,18	2,63	10,05	0,32
9	3,63	0,20	2,92	10,08	0,36
10	3,63	0,23	3,36	10,13	0,36
11	3,63	0,25	3,65	10,16	0,36
12	4,09	0,27	3,94	10,19	0,4
13	4,54	0,30	4,38	10,24	0,44
14	4,54	0,35	5,11	10,32	0,44
15	4,99	0,40	5,84	10,4	0,48
16	5,45	0,45	6,57	10,48	0,52
17	6,36	0,50	7,3	10,56	0,6
18	6,81	0,60	8,76	10,73	0,63
19	8,17	0,70	10,22	10,9	0,75
20	7,72	0,80	11,68	11,08	0,7
21	7,26	0,90	13,14	11,27	0,64

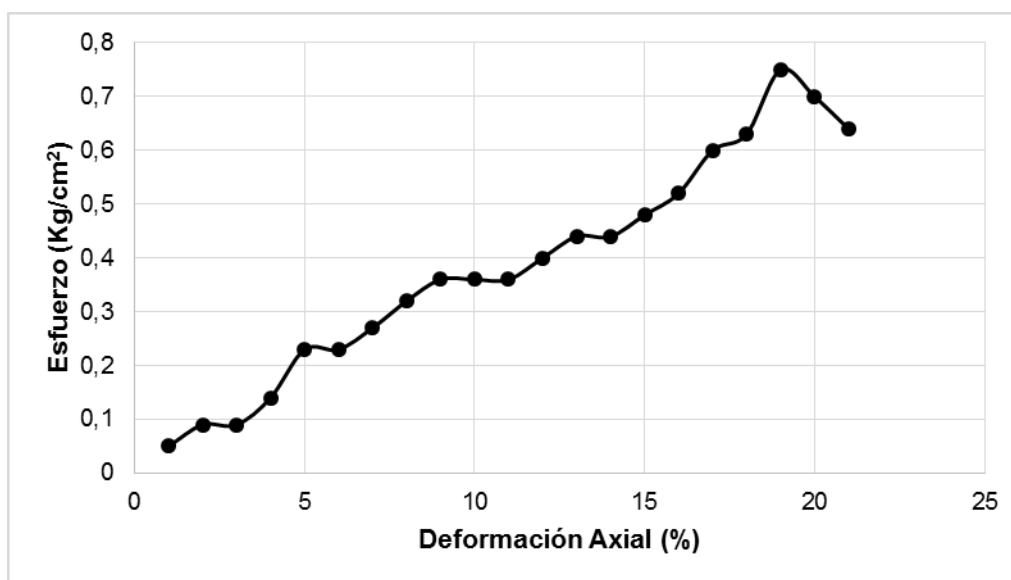


Figura 47 Curva esfuerzo vs deformación probeta 2 - muestra no 3 después de la inyección

Fuente propia

$$\text{Esfuerzo Máximo} = \sigma \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0,75$$

Tabla 56 Valor del esfuerzo máximo promedio muestra no 3 después de la inyección

Probeta No	σ Máximo (Kg/cm ²)
1	0,69
2	0,75
Promedio	0,72

Fuente propia

$$C = \frac{0,72}{2} = 0,36 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

7.3 CÁLCULO DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA CORTANTES MEDIANTE CORRELACIONES DE SPT

Antes de la Inyección

CLASIFICACIÓN	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)			NO. GOLPES			γ (Ton/m ²)	α_v' (Ton/m ²)	Cn	η_1		η_2	η_3	η_4	N_{corr}		ϕ equiv	C (Ton/m ²)
		DE	A	MEDIA	6"	12"	18"				USA	Japón				USA	Japón		
Arena Limosa	M1	0,00	0,50	0,25				2,00	4,42	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00		
		0,50	0,95	0,73	0	1	1	2	2,00	2,59	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	2,92	2,43	22,64	
Arena Limosa	M2	0,95	1,40	1,18	1	3	2	2,00	2,35	2,04	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	5,73	4,78	25,71	
		1,40	1,85	1,63	2	4	6	2,00	3,25	1,73	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	9,75	8,12	28,96	
Arcilla de Baja Compresibilidad	M3	1,85	2,30	2,08	9	14	15	1,80	3,74	1,62	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	26,37	21,98		12,76
		2,30	2,75	2,53	23	20	20	1,80	4,55	1,47	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	32,97	27,48		17,60
Arena Limosa	M4	2,75	3,20	2,98	20	26	24	2,00	5,95	1,28	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	36,02	30,02	41,84	
		3,20	3,65	3,43	22	27	23	2,00	6,85	1,19	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	33,57	27,98	40,91	

Después de la Inyección

CLASIFICACIÓN	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)			NO. GOLPES			γ (Ton/m ²)	α_v' (Ton/m ²)	Cn	η_1		η_2	η_3	η_4	N_{corr}		ϕ equiv	C (Ton/m ²)
		DE	A	MEDIA	6"	12"	18"				USA	Japón				USA	Japón		
Arena Limosa	M1	0,00	0,45	0,23	1	1	1	2,00	4,45	4,66	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	5,24	4,37	25,24	
		0,45	0,90	0,68	1	3	2	2,00	1,35	2,69	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	7,56	6,30	27,30	
Arena Limosa	M2	0,90	1,35	1,13	2	4	2	2,00	2,25	2,08	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	7,03	5,86	26,86	
		1,35	1,80	1,58	3	7	5	2,00	3,15	1,76	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	11,88	9,90	30,42	
Arcilla de Baja Compresibilidad	M3	1,80	2,25	2,03	13	17	15	1,80	3,65	1,64	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	29,46	24,55		14,08
		2,25	2,70	2,48	27	22	26	1,80	4,46	1,48	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	39,97	33,31		21,12
Arena Limosa	M4	2,70	2,90	2,80	26	50		2,00	5,60	1,32	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	37,13	30,94	42,25	

Debido a que no se tiene valores de ángulo de fricción y cohesión para las muestras después de la inyección de fractura, porque la cantidad de éstas no era suficientes para realizar los laboratorios, por lo tanto se hace necesario el uso de correlaciones por SPT para tener datos comparativos.

7.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA LECHADA DE INYECCIÓN

A continuación se exponen los resultados obtenidos de las probetas de lechada, para comprobar su resistencia a los 28 días.

Nota: Debido a la insuficiencia de tiempo, las probetas se tuvieron que ensayar antes de cumplir 28 días, como se evidencia en la *tabla 57*.

Tabla 57 Ensayo de resistencia a compresión de la lechada

Probeta	Tiempo de Curado	Base (cm)	Ancho (cm)	Área (m ²)	Carga (KN)	Esfuerzo (Kn/m ²)	Esfuerzo (Psi)
1	24 días	5	5	0,0025	57,20	22880	3318,46
2		5	5	0,0025	42,37	16948	2458,10
3		5	5	0,0025	60,53	24212	3511,65
4	22 días	5	5	0,0025	34,16	13664	1981,80
5		5	5	0,0025	35,20	14080	2042,13
6		5	5	0,0025	39,85	15940	2311,90
7		5	5	0,0025	34,62	13848	2008,48
8		5	5	0,0025	41,30	16520	2396,02

Fuente propia



Figura 48 *Probetas de lechada*

Fuente: Propia

$$\text{Probeta 1 - 3} = \frac{3318,46 + 2458,10 + 3511,65}{3}$$

$$\text{Probeta 1 - 3} = 3096,07 \text{ Psi}$$

$$\text{Probeta 4 - 8} = \frac{1981,80 + 2042,13 + 2311,90 + 2008,48 + 2396,02}{5}$$

$$\text{Probeta 4 - 8} = 2148,07 \text{ Psi}$$

7.5 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD PORTANTE SIMULANDO UN MICROPILOTE

A continuación, se calcula la carga admisible para un micropilote de 0.30 metros de diámetro y una profundidad de 4 de metros. Este cálculo se realiza para demostrar la efectividad de la técnica de mejoramiento de suelos con lechadas de fracturamiento.

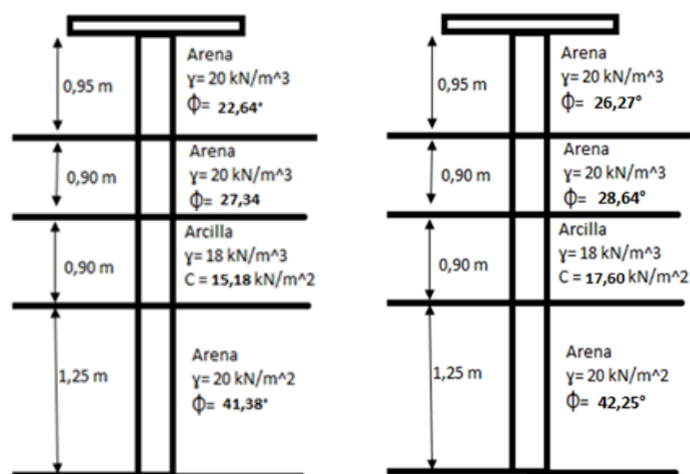


Figura 49 Diagrama del pilote con las propiedades antes y después de la inyección

Fuente propia

7.5.1 Capacidad portante antes de la inyección

Para obtener los resultados de la carga por fricción se calcula como:

$$Q_s = \sum p * \Delta l * f$$

Se debe tener en cuenta que la fricción difiere la ecuación, dependiendo del tipo de suelo. Además se tuvo en cuenta que el pilote es pre-excavado, debido a que se hizo por medio de SPT la perforación.

La fricción para la arcilla se obtuvo como:

$$f = \alpha * Cu$$

Y para las arenas:

$$f_{prom} = k_0 * \sigma'_v * \tan(0,8 * \phi)$$

Donde $k_0 = 1 - \text{sen}(\phi)$ (Para un pilote pre - excavado)

CAPACIDAD PORTANTE POR FRICCIÓN													
γ (kN/m ³)	NF	ϕ (°)	C (kN/m ²)	L_i (m)	σ'_v (kN/m ²)	Área (m ²)	σ'_v efect (kN/m ²)	α	C (kN/m ²)	λ	k_0	f_{prom}	Q_s (kN)
20	N.E	22,64	0,00	0,95	19,00	9,03	9,50	0,60	3,42	0,38	0,62	1,17	30,74
20	N.E	27,34	0,00	0,90	37,00	25,20	28,00				0,54	3,68	
18	N.E		15,18	0,90	53,20	40,59	45,10					19,74	
20	N.E	41,38	0,00	1,25	78,20	82,13	65,70				0,34	8,41	

Para el obtener la carga por punta, se tuvo en cuenta que el pilote estaba en un estrato de arena; se hace el uso de la ecuación de Meyerhof para obtener dicho valor.

$$Q_p = q' * Nq' * A_p \leq ql * A_p$$

$$ql = 50 * Nq * \tan\phi$$

Después de obtener los valores de la carga por punta y la carga por fricción se suman y se dividen en el Factor de Seguridad para conocer el valor de la carga admisible.

CAPACIDAD PORTANTE POR PUNTA							
q' (kN/m ²)	Nq'	q_i	$q_i \cdot A_p$	Q_p (kN)	Q_U (kN)	FS	Q_{Adm} (kN)
80	475	20923,7	1464,66	1464,7	1495,40	3	498,5

7.5.2 Capacidad portante después de la inyección

Al igual que como se hacen los cálculos antes de la inyección, se obtienen los valores para después de la inyección.

CAPACIDAD PORTANTE POR FRICCIÓN													
γ (kN/m ³)	NF	ϕ (°)	C (kN/m ²)	L_i (m)	σ'_v (kN/m ²)	Área (m ²)	σ'_v efect (kN/m ²)	α	C (kN/m ²)	λ	k_o	f_{prom}	Q_s (kN)
20	N.E	26,27	0,00	0,95	19,00	9,03	9,50	0,60	3,96	0,38	0,56	1,23	31,08
20	N.E	28,64	0,00	0,90	37,00	25,20	28,00				0,52	3,72	
18	N.E		17,60	0,90	53,20	40,59	45,10					20,15	
20	N.E	42,25	0,00	1,25	78,20	82,13	65,70				0,33	8,33	

CAPACIDAD PORTANTE POR PUNTA							
q' (kN/m ²)	Nq^*	q_i	$q_i \cdot A_p$	Q_p (kN)	Q_u (kN)	FS	Q_{Adm} (kN)
80	475	21573	1510,1	1510,1	1541,19	3	513,7

7.5.3 Modelación del micropilote en Phace 2

Se realizó una modelación del micropilote mediante el programa Phace 2 de elementos finitos, RocScience) para observar el comportamiento del elemento y el suelo circundante frente a una carga vertical equivalente a 51 toneladas.

En la presente figura, se muestra la asignación de los materiales con sus respectivas propiedades mecánicas para los diferentes estratos encontrados.

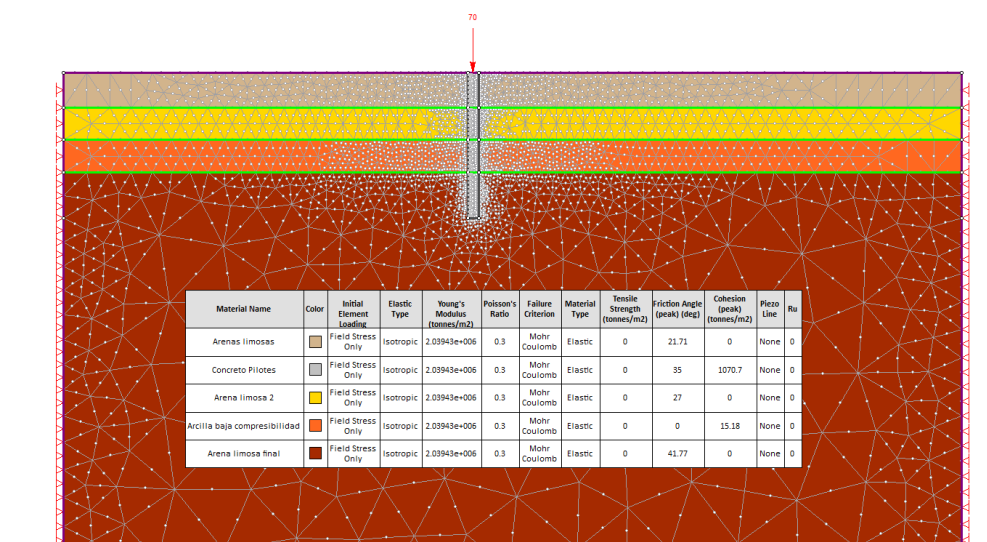


Figura 50 Asignación de los materiales

Fuente propia

La *figura 51*, evidencia la distribución de los esfuerzos en el terreno, generado por un micropilote al cual se le aplica una carga de 51 toneladas.

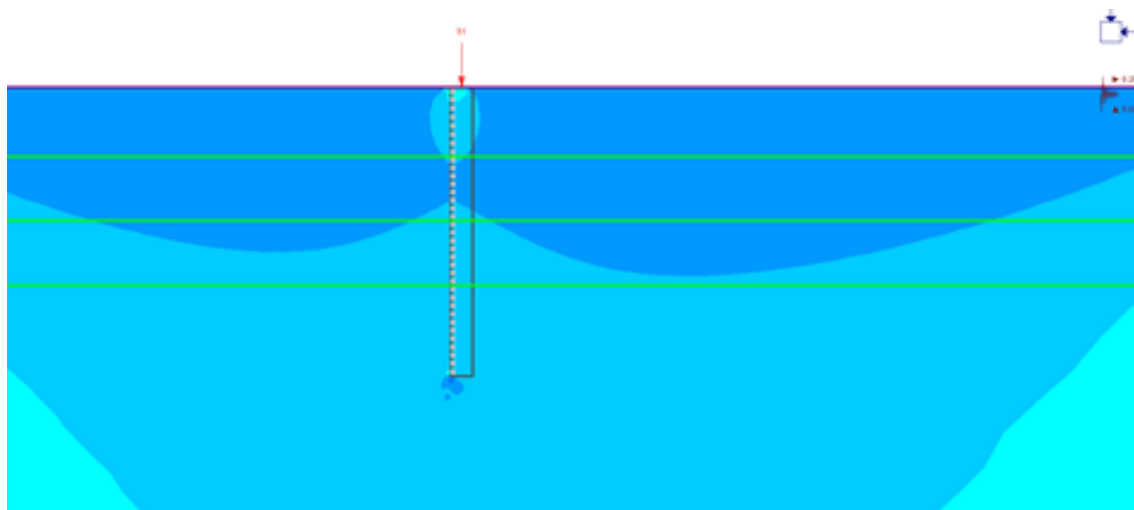


Figura 51 Diagrama de esfuerzo vertical

Fuente propia

A continuación se puede observar la distribución de los esfuerzos en la cabeza del micropilote. El color verde indica que el esfuerzo es mayor en la superficie.

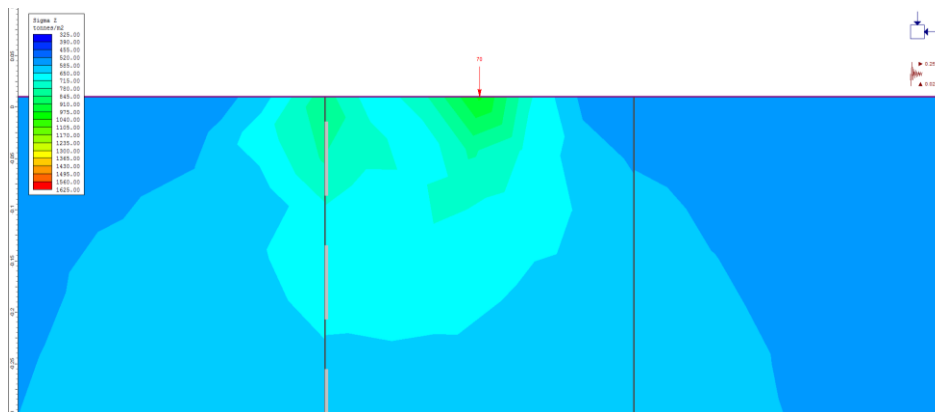


Figura 52 Diagrama de esfuerzo vertical en la cabeza del micropilote

Fuente propia

Al igual que en la cabeza del micropilote, también se puede observar la distribución de los esfuerzos en la punta.

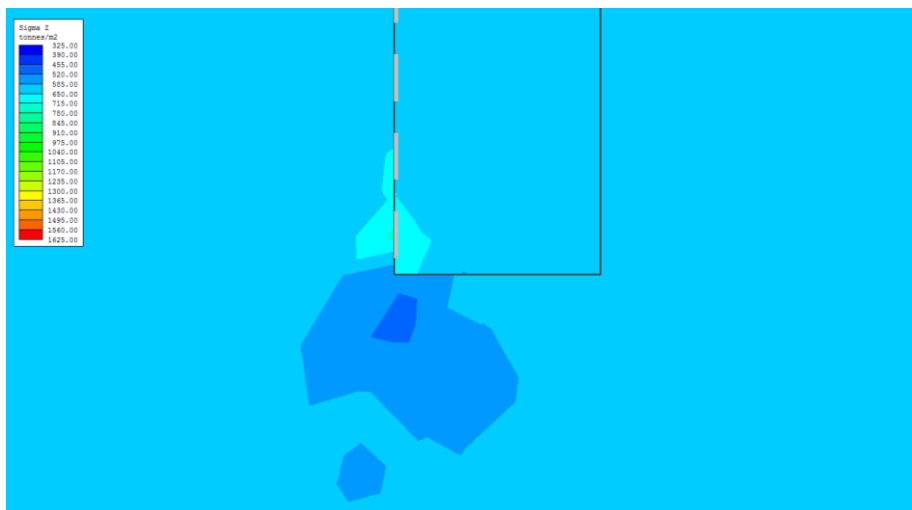


Figura 53 Diagrama de esfuerzo vertical en la punta del micropilote

Fuente propia

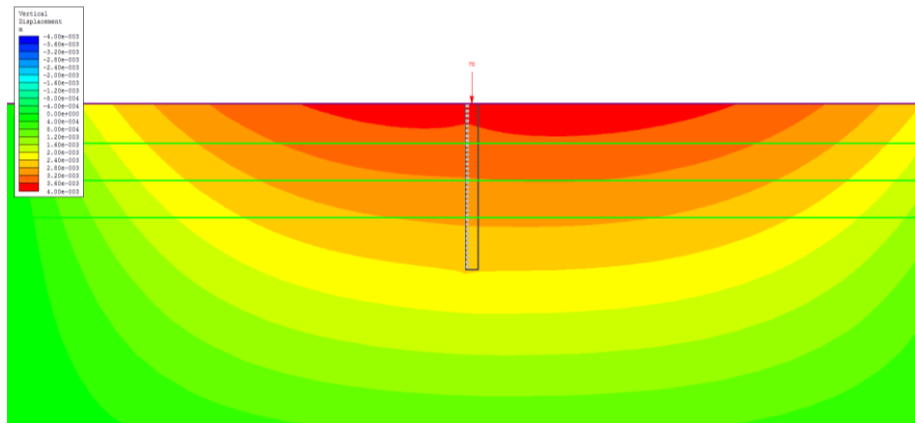


Figura 54 *Diagrama de deformaciones verticales*

Fuente propia

Se observan valores máximos de 4×10^{-3} m, esto está relacionado con la carga que está recibiendo el elemento la cual no está siendo soportada en su totalidad por el terreno. Esto infiere que el elemento analizado cumple con su función como cimentación profunda resistencia a la carga impuesta.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 COMPARATIVO DE DATOS

8.1.1 Ensayo de Campo SPT

Se identificaron los tipos de suelo encontrados en el lugar del sondeo. Los cuatro estratos presentan suelos Arena-Limoso en los dos primeros, luego una Arcilla de baja Compresibilidad, y finalmente un estrato Arena-Limoso. La tabla evidencia de que hubo un aumento en el número de golpes y que la profundidad del segundo sondeo no alcanzó a la del primer sondeo. En el segundo sondeo no se realizaron más golpes pues el terreno estaba tan compactado que hacer rebotar el martillo y se podía producirle un daño al tubo toma-muestras.

Tabla 58 Comparación entre las profundidades y el número de golpes antes y después de la inyección

CLASIFICACIÓN	MUESTRA	ANTES DE LA INYECCIÓN		DESPUES DE LA INYECCIÓN	
		PROF. MEDIA	N ₄₅	PROF. MEDIA	N ₄₅
Arena Limosa	M 1	0,25		0,23	2
		0,73	2	0,68	5
Arena Limosa	M 2	1,18	5	1,13	6
		1,63	10	1,58	12
Arcilla de Baja Compresibilidad	M 3	2,08	29	2,03	32
		2,53	40	2,48	48
Arena Limosa	M 4	2,98	50	2,80	50
		3,43	50		

Fuente propia

Al igual que en la tabla, en la gráfica se muestra el aumento en el número de golpes con respecto a la profundidad. La línea roja representa los valores obtenidos en el SPT después de la inyección, mientras que la línea negra el SPT antes de la inyección.

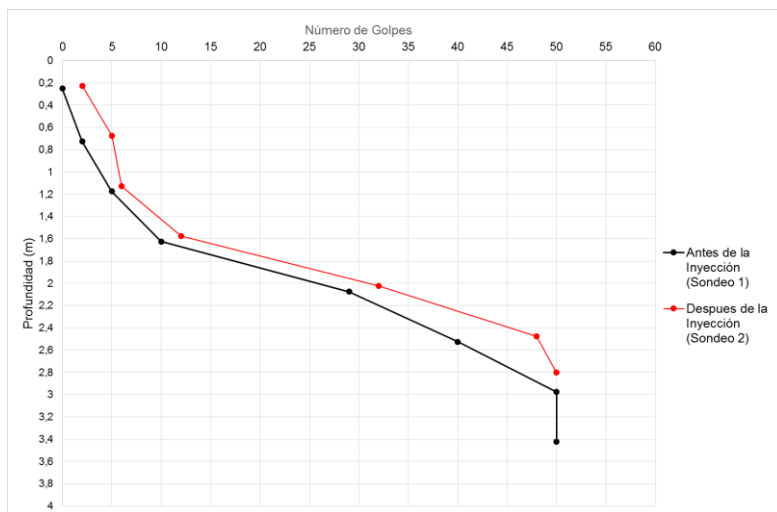


Figura 55 Curva número de golpes vs profundidad antes y después de la inyección

Fuente propia

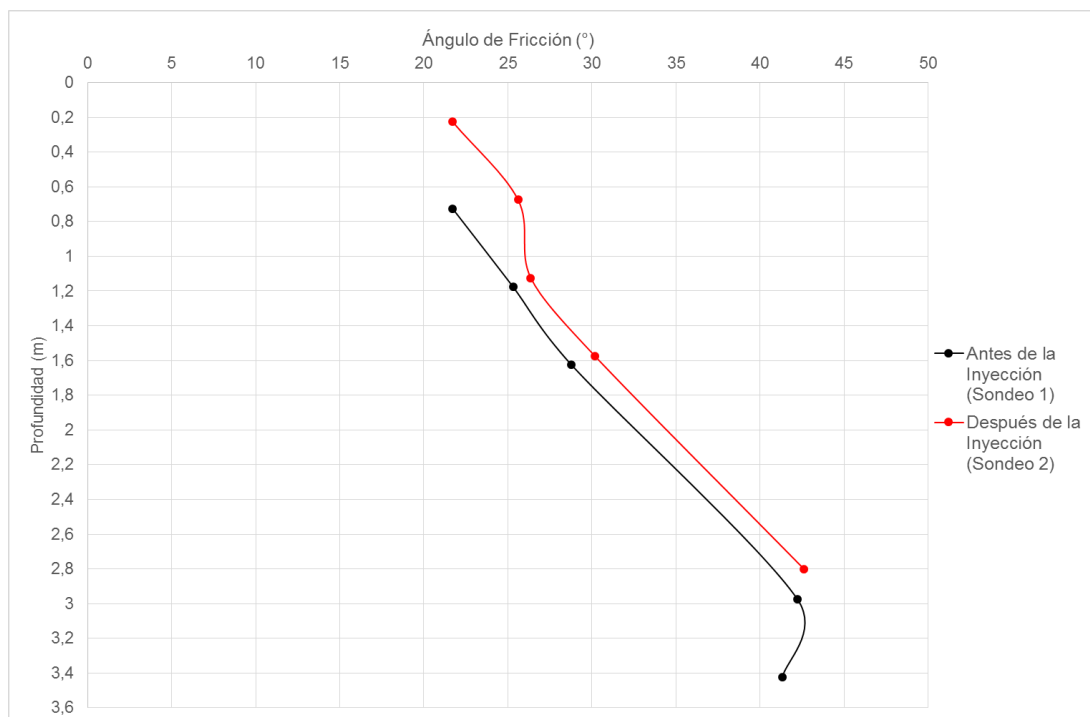
En la *tabla 59* se comparan los ángulos de fricción antes y después de la inyección. Esta comparación se hizo con respecto a los datos obtenidos por SPT, es decir por correlaciones, debido a que primero, la muestra ubicada a una profundidad de 1,85-2,75 m no fue suficiente y la muestra de 2,75-3,70 m no hubo la posibilidad de hacer ningún ensayo pues no se alcanzó dicha profundidad.

Tabla 59 Comparación entre los ángulos de fricción y profundidad

CLASIFICACIÓN	MUESTRA	ANTES DE LA INYECCIÓN		DESPUES DE LA INYECCIÓN	
		PROF. MEDIA	ϕ' equiv	PROF. MEDIA	ϕ' equiv
Arena Limosa	M1	0,25		0,23	25,24
		0,73	22,64	0,68	27,30
Arena Limosa	M2	1,18	25,71	1,13	26,86
		1,63	28,96	1,58	30,42
Arcilla de Baja Compresibilidad	M3	2,08		2,03	
		2,53		2,48	
Arena Limosa	M4	2,98	41,84	2,80	42,25
		3,43	40,91		

Fuente propia

La siguiente figura muestra los resultados de la tabla anterior de manera gráfica; de tal forma que los resultados puedan ser más evidentes.

**Figura 56** Curva de ángulo de fricción vs profundidad antes y después de la inyección

Fuente propia

La mejoría que se presenta tanto en el ángulo de fricción, cohesión y el número de golpes se debe a que la superficie fue reforzada por la inyección; que al fracturar y rellenar las grietas, modificó el suelo en dichos parámetros.

8.1.2 Eficiencia del método

A continuación se exponen los valores de cohesión y esfuerzos promedios para las probetas antes y después de la inyección; se puede evidenciar un aumento del 12,5% de mejora en estas propiedades.

En las tablas 59 y 60 se muestra la eficiencia del método en cuanto al ángulo de fricción y la cohesión de la cada una de las muestras.

Tabla 60 Eficiencia del método en el ensayo de compresión simple Muestra No 3

Muestra 3	Antes de la Inyección	Después de la Inyección	Eficiencia (%)
$\sigma_{\text{Prom. Máx}} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	0,64	0,72	12,5
C (kg/cm²)	0,32	0,36	

Fuente propia

Tabla 61 Eficiencia del método de mejoramiento mediante correlaciones entre SPT y ángulo de fricción para los suelos arenos limosos

CLASIFICACIÓN	MUESTRA	SPT1	SPT2	Eficiencia (%)
		ϕ' equiv	ϕ' equiv	
Arena Limosa	M1		25,24	
		22,64	27,30	17,06
Arena Limosa	M2	25,71	26,86	4,28
		28,96	30,42	4,78
Arena Limosa	M4	41,84	42,25	0,97
		40,91		

Fuente propia

Con respecto a la eficiencia tomando como referencia los ángulos de fricción, se puede notar que disminuye a medida que aumenta la profundidad. Se deduce que tiene que ver con que a mayor profundidad la atracción entre partículas es mayor.

Tabla 62 Eficiencia del método de mejoramiento mediante correlaciones entre SPT y cohesión para un suelo arcilloso

CLASIFICACIÓN	MUESTRA	C (Ton/m ²)		Eficiencia (%)
		ANTES	DESPUÉS	
Arcilla de Baja Compresibilidad	M3	12,76	14,08	9,38
		17,60	21,12	16,67

Fuente propia

Es importante resaltar que la eficiencia del método con respecto a la cohesión obtenida por medio de SPT y la de laboratorio promedio no difiere mucho, pues mientras en el laboratorio se obtuvo una eficiencia del 12,5%, al promediar las cohesiones de la *tabla 62* se obtiene una eficiencia de 13,03%.

8.1.3 Análisis de cargas representado un micro-pilote

En la siguiente tabla se comparan los valores de carga admisible de un micro-pilote de diámetro de 0.30m. El valor de carga admisible antes de la inyección fue de 498,467 KN mientras que después de llevar a cabo el método se obtuvo una carga admisible de 513,73 KN; es decir, después del método, el suelo es capaz de soportar 15.26kN (1,55 Ton.) más después del mejoramiento.

Tabla 63 *Comparativo de cargas admisibles antes y después de aplicar Fracture Grouting*

ESTRATO	DATOS INICIALES			ANTES DE LA INYECCIÓN					Después de la Inyección						
	γ (kN/m ³)	L _i (m)	FS	ϕ (°)	C (kN/m ²)	Q _S (kN)	Q _P (kN)	Q _U (kN)	Q _{Adm} (kN)	ϕ (°)	C (kN/m ²)	Q _S (kN)	Q _P (kN)	Q _U (kN)	Q _{Adm} (kN)
1	20	0,95	3,00	22,64	0,00	30,74	1464,66	1495,40	498,47	26,27	0,00	31,08	1510,11	1541,19	513,73
2	20	0,90		27,34	0,00					28,64	0,00				
3	18	0,90			15,18					17,60					
4	20	1,25		41,38	0,00					42,25	0,00				

Fuente propia

9. CONCLUSIONES

- Cuando se mejoran las propiedades de los suelos, se evidencia la mejora también en la capacidad portante del mismo suelo, en la comparación que se hizo con el micropilote se evidenció que la capacidad portante última del suelo aumentó de 1495,4 a 1541,19 kN. Los resultados anteriores demuestran la efectividad en la aplicación del método y los valores posibles alcanzados de mejoría para una cimentación profunda, esto lleva a concluir que es posible obtener suelos mejorados tras aplicaciones sencillas del método.
- Los parámetros de resistencia del suelo determinados con base en ensayos de laboratorio y de campo (in situ), permitieron modelar la interacción suelo estructura entre el micropilote analizado y el suelo existente en el sitio de estudio empleando un software de elementos finitos, en el cual se han empleado dichos parámetros reales tomados del suelo existente y una aplicación de carga en la cabeza del micropilote de 51 toneladas.
- Para este trabajo de grado en particular, se analizó la efectividad en función de la capacidad de carga de una cimentación profunda, lo cual también aplicaría para la mitigación de movimientos de material (excavaciones y transportes) e instalación de rellenos si se hablara de una cimentación superficial, empleando el mismo criterio anterior, se podrían reducir los asentamientos que se producen en algunos terraplenes debido a las consolidaciones de los suelos de fundación, siendo el método de mejoramiento del suelo “Fracture Grouting” un método rápido, sencillo y que demuestra eficacia.
- Se evidenció un incremento del 12.5% de la cohesión con respecto a la muestra 3 realizado en laboratorio, esto quiere decir que hubo un aumento en las fuerzas internas del terreno y aumentando la atracción entre las partículas de suelo.

- Al realizar la inyección, se aumentó la cohesión entre las partículas, lo cual se refleja en un aumento en el número de golpes.
- Se compararon los ángulos de fricción y se obtiene que para una profundidad media de 0,49m se presentó un incremento del 17,06%, para una de 1,41m uno 4,53% y para 3,21m, 0,97%.

10. RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar un SPT cuya punta sea de pared delgada, para que sea más efectiva la penetración del tubo.
- Realizar un pre-tratamiento para lograr mejores resultados, pues con este se logran obtener presiones más altas, debido a que las grietas existentes son llenadas de lechada.
- Usar un obturador doble, para limitar la zona de inyección, y así hacer más eficiente la presión donde se encuentra el manguito.
- Realizar un segundo SPT o en defecto un apique para obtener una muestra inalterada y suficiente para realizar los ensayos.
- Verificar que el ensayo de campo SPT cumpla con la normativa, para que este sea realizado adecuadamente.
- Confirmar con la empresa que va a realizar la inyección, el tipo de tubería que se debe usar para que el obturador se acople de tal manera que no se devuelva la lechada por el tubo de inyección, ya que existen en el mercado tubos con paredes más gruesas que imposibilitan el ingreso de la herramienta de inyección dentro del sondeo.
- Realizar el segundo SPT a menor distancia para que la mejora en las propiedades sea más evidentes.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ampuero C, Salomón E. (2012). Mejoramiento de Cimentaciones en Suelos y Rocas Aplicando las Técnicas de Grouting (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Pág (127 – 135).
- Bañón B, Luis y Beviá G, Jose F. (2000). Manual de Carreteras. Tomo II. Pág (3-11, 21-23)
- Bowles, Joseph E. (1988). Foundation Analysis and Design. Tercera Edición. Pág (154-165)
- Bowles, Joseph. (1980). Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. McGraw-Hill. Pág. (175-178).
- Chambosse, Gerhard - Otterbien, Reiner. (2001). Estado del Arte de las Inyecciones de Compensación en Alemania. XV Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Recuperado de http://www.keller-cimentaciones.com/wp-content/uploads/2014/06/Estado-del-arte-de-las-inyecciones-de-compesacion-en-Alemania_Chambosse-Otterbein-2001.pdf
- Das, B. M. (2001). Principios de Ingeniería de Cimentaciones. En B. M. Das. CENGAGE Learnig. Pág (25-27, 764).
- Das, B. M. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. En B. M. Das. Pág (1-3, 7-12, 27-35). Thomson Learnig.
- Gonzalez. Alvaro. (1999). Estimativos de Parámetros Efectivos de Resistencia con el SPT. X Jordana Geotécnicas de la Ingeniería en Colombia. Recuperado: <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/ESTIMATIVOS-DE-PARAMETROS-DE-RESISTENCIA-CON-SPT.pdf>
- Henríquez P., Carlos I. (2007). Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Hsai-Yang Fang. (1990). Foundation Engineering Handbook. Segunda Edición. Pág (353-358)
- Keller-Cimentaciones. (2014). Compensation Soilfrac. Recuperado de <http://www.keller-cimentaciones.com/inyecciones-de-compensacion-soilfrac/>
- Manjriker Gunaratne. (2006). The Foundation Engineering Handbook. Pág (539-551)
- Narváez, Cesar. (2016). Análisis del mejoramiento y estabilización de suelos con cal. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Pág (21, 23)

Ovando P., Héctor A. (2011). Inyección de suelo por medio de la técnica del Jet Grouting. (Proyecto de Grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Perdigón Caro, Pedro. (2016) Técnica de Jet-Grouting. Aspectos Analíticos para casos de Tapones de Fondo. *Estructurando*.

Peter L. Berry & David Reid. Mecánica de Suelos. Pág (394-558). Editorial. McGraw-Hill.

Soriano. C, Cristian. Y. (2013). Aplicación del ensayo de penetración estándar en la determinación de parámetros geotécnicos de suelos granulares. Pág 33. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Cristian_Soriano/publication/284030446_Aplicacion_ensayo_penetracion_estandar_en_la_determinacion_de_parametros_geotecnicos_de_suelos_granulares/links/564b3ea008ae3374e5dd850d.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&origin=publication_detail

Vázquez A., Darío (2006). Aspectos constructivos de la técnica de compactación dinámica para mejoramiento de suelos. Universidad Nacional Autónoma De México, México. Pág (1-2)

Vega, R., Vazquez, M., Martin, D., Perez, A., (2014). Modelación numérica del fracturamiento hidráulico bajo cimentaciones profundas en suelos blandos del Valle de México.

Villalaz, Crespo. (2004). Mecánica de suelos y cimentaciones. Quinta Edición. Limusa. Pág (26).