

**SOPORTE TÉCNICO EN LA ESTANDARIZACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE
PREPARACION DE LA LECHADA DE INYECCION PARA ANCLAJES Y
ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE
PERMEABILIDAD EN CAMPO.**

ESTEFANY ROSANA SERRANO URIBE.

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PRÁCTICA EMPRESARIAL

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

BUCARAMANGA

2013

**SOPORTE TÉCNICO EN LA ESTANDARIZACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE
PREPARACION DE LA LECHADA DE INYECCION PARA ANCLAJES Y
ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE
PERMEABILIDAD EN CAMPO.**

ESTEFANY ROSANA SERRANO URIBE.

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PRÁCTICA EMPRESARIAL

SUPERVISOR UNIVERSIDAD:

MSC. GERARDO BAUTISTA GARCÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

BUCARAMANGA

2013

Nota de aceptación

INGENIERO MANUEL ORTIZ PRADA
TUTOR EMPRESARIAL.

M.S.C. GERARDO BAUTISTA GARCÍA
TUTOR ACADÉMICO.

Evaluador empresa.

Evaluador Universidad.

Bucaramanga, Enero del 2013.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por regalarme la vida y estar a mi lado en cada paso que doy, por llenarme de fuerza, sabiduría y discernimiento para afrontar cada situación difícil que se me presentó y por dejarme compartir con todas las personas que formaron parte fundamental durante esta etapa.

A mi familia porque su apoyo ha sido primordial para la culminación de este proceso, por creerme en mi y enseñarme que con sacrificios y dedicación los resultados son más satisfactorios.

Mi más profundo agradecimiento a mis supervisores de práctica, los ingenieros Gerardo Bautista García y Manuel Ortiz Prada, por su dedicación, paciencia y tiempo; ya que de ningún otro modo hubiese sido posible la realización de este trabajo exitosamente. De igual manera a mis compañeros de trabajo de P&P Ltda y ETA S.A. por recibirme con los brazos abiertos y permitirme aprender de cada uno de ellos.

Finalmente a la Universidad Pontificia Bolivariana y a todos los docentes por transmitirme sus conocimiento y las bases necesarias para iniciar la vida profesional.

TABLA DE CONTENIDO.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO-----	9
GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE -----	10
INTRODUCCIÓN -----	11
2. OBJETIVOS-----	12
2.1. Objetivo General-----	12
2.2. Objetivos Específicos.-----	12
3. RESEÑA HISTORICA -----	13
3.1. Síntesis Histórica -----	13
3.2. Política HSEQ-----	13
3.3. Servicios -----	14
3.4. Proyectos Desarrollados.-----	14
4. ACTIVIDADES DESARROLLADAS -----	16
4.1. Elaboración de Informes -----	16
4.1.1. Ensayo de penetración estándar.-----	16
4.1.2. Ensayo de permeabilidad en roca: Método de Lugeon. -----	17
4.1.3. Método de ensayo normal para el uso del Penetrómetro dinámico de cono- 18	
4.2. Investigación.-----	21
4.3. Manual de procedimiento para ensayos de permeabilidad en campo: Lugeon- 22	
4.3.1. Supervisión de ensayos-----	22
4.4. Control de Costos. -----	24
4.5. Propiedades de la lechada de cemento para inyección de anclajes -----	25
4.5.1. Muestras obtenidas en obra -----	25
4.5.2. Muestras desarrolladas en laboratorio -----	25
5. OTRAS ACTIVIDADES RELEVANTES -----	28
5.1. Digitalización de datos obtenidos en campo. -----	28
5.2. Distribución de los Informes de Laboratorio.-----	28
6. RECOMENDACIONES -----	29

7. CONCLUSIONES -----	31
BIBLIOGRAFIA -----	32
ANEXOS -----	34

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Registro de sondeos con ensayos de penetración estándar	35
ANEXO 2: Formato para el cálculo del N_{60}	36
ANEXO 3: Registro de datos del Ensayo Lugeon	37
ANEXO 4: Cálculo permeabilidad Lugeon	38
ANEXO 5: Cálculo de pérdidas por fricción	39
ANEXO 6: Cálculo de pérdidas analíticamente	41
ANEXO 7: Cálculo del índice PDC y el CBR	42
ANEXO 8: Propuesta de especificación técnica para anclajes en suelo y roca	44
ANEXO 9: Manual de procedimiento para ensayos de Lugeon	77
ANEXO 10: Registro fotográfico de supervisión de ensayos de Lugeon	89
ANEXO 11: Ejemplos del cálculo de la presión de inflado del packer	90
ANEXO 12: Formato de campo del ensayo de Lugeon	92
ANEXO 13: Registro fotográfico de muestras obtenidas en obra	93
ANEXO 14: Registro fotográfico de ensayos realizados en laboratorio	94
ANEXO 15: Formato de campo de descripción de calicatas	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del equipo para realización del ensayo PDC	19
Figura 2: Prueba de Inflado del obturador	90
Figura 3: Válvula de regulación de presión	90
Figura 4: Montaje del Prensaestopas	90
Figura 5: Sistema de medición del caudal	90
Figura 6: Cilindros de lechada con aditivo obtenidos en obra	94
Figura 7: Cubos de lechada con aditivo obtenidos en obra	94
Figura 8: Cubos y cilindros antes del ensayo de compresión	94
Figura 9: Maquina de prueba la compresión Controls 940615	94
Figura 10: Balón volumétrico graduado-Ensayo de densidad del cemento	95
Figura 11: Cono de Marsh	95
Figura 12: Muestras de Laboratorio con 0.87% de aditivo	95
Figura 13: Muestras de Laboratorio con 3.2% de aditivo	95

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: SOPORTE TÉCNICO EN LA ESTANDARIZACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE PREPARACION DE LA LECHADA DE INYECCION PARA ANCLAJES Y ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN CAMPO

AUTOR (ES): ESTEFANY R. SERRANO URIBE

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil.

DIRECTOR (A): GERARDO BAUTISTA GARCÍA

RESUMEN

La practica empresarial se desarrolló en la empresa P&P Ltda, durante un periodo de seis (6) meses en los cuales se llevaron a cabo actividades de tipo investigativo y técnico; tales como la investigación de las diferentes especificaciones internacionales sobre anclajes en suelo y roca, el estudio de las diferentes normativas sobre control de calidad de la lechada de inyección utilizada en anclajes y la elaboración de ensayos de laboratorio que especificaban las mismas.

También se realizó control de costos a la obra ejecutada por la empresa para SP Explanaciones, elaboración de informes y supervisión de ensayos de Lugeon realizados en el municipio de California en Santander; así como la construcción de un manual de procedimiento interno para la realización de estas pruebas.

El desarrollo de estas actividades permitió el cumplimiento satisfactorio de todos los objetivos planteados y adquirir un mayor conocimiento de los temas tratando durante la práctica.

PALABRAS

CLAVES: P&P Ltda, Anclaje, Inyección, Lechada, Lugeon, Manual de procedimiento interno.

V°B. Director de Trabajo de Grado.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: SUPPORT IN THE STANDARDIZED PROCEDURES PREPARATION FOR ANCHOR GROUT INJECTION AND MAKING THE PROCEDURE MANUAL FOR FIELD PERMEABILITY TESTS.

AUTHOR (S): ESTEFANY R. SERRANO URIBE

FACULTY: Civil Engineering

DIRECTOR: GERARDO BAUTISTA GARCÍA

ABSTRACT

Business practice developed in the company P & P Ltd, for a period of six (6) months in which we carry out research and technical activities. such as the investigation of the various international specifications for anchorages in soil and rock, the study of the different regulations on quality control of injection grout used in anchorages and the development of laboratory tests specifying them.

Also performed cost control to the work performed by the company to SP Explanaciones, reporting and monitoring trials of Lugeon made in the municipality of California Santander, as well as building a internal procedures manual for conducting these testing.

The development of these activities allowed the successful completion of all objectives and gain a better understanding of the topics covered during practice.

KEY WORDS:

P & P Ltd, Anchor, Injection, Grout, Lugeon, Internal procedures manual

V°B. Director of Graduate Work

INTRODUCCIÓN

P&P Ltda es una empresa enfocada hacia trabajos de perforación especializados como la perforación de pozos profundos para agua, pozos para recuperación de núcleos en investigaciones geotécnicas, entre otros. También prestan servicios de estabilización de taludes, construcción de anclajes y ensayos de laboratorio para suelos, concreto y asfaltos.

La práctica empresarial fue desarrollada por un periodo de 6 meses en los cuales se sirvió de apoyo tanto al ingeniero supervisor como al ingeniero residente en la realización de actividades tales como: la elaboración de ensayos de laboratorio con el fin de identificar las propiedades de la lechada de inyección utilizada por la empresa en anclajes, la supervisión de ensayos de permeabilidad en roca, la conformación de una especificación interna de anclajes en suelo y roca y otras actividades que se describen a lo largo de este trabajo.

Teniendo como soporte especificaciones internacionales que hacen referencia a anclajes se generó un documento en el cual se indican algunas recomendaciones técnicas para la ejecución de este tipo de obras. De la mano de este proceso y con la realización de determinados ensayos se realizaron algunas recomendaciones para la producción de la lechada de cemento empleada en la inyección de anclajes.

Otro aspecto fundamental desarrollado durante este tiempo hace referencia a la elaboración de un manual de procedimiento para la elaboración de ensayos de Lugeon en campo y su posterior evaluación con la supervisión de los mismos.

Con la realización de las actividades mencionadas anteriormente y muchas otras descritas a lo largo de este trabajo se pudo llevar a cabo de manera satisfactoria cada una de las metas propuestas al inicio de este proceso.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Estandarizar los procedimientos de preparación de la lechada de inyección en la construcción de anclajes y cortinas de impermeabilización y elaborar un manual de procedimiento interno para los ensayos de permeabilidad en campo para la empresa P&P Ltda.

2.2. Objetivos Específicos.

- Servir de apoyo al ingeniero encargado del laboratorio, en la elaboración, montaje y supervisión de ensayos.
- Participar en la investigación y elaboración de ensayos pertinentes con el propósito de lograr que la lechada de inyección empleada por la empresa en la construcción de anclajes cumpla con la normativa de referencia (Artículo 631-07, INVIAS E-2007).
- Evaluar y elaborar el manual de procedimiento interno de la empresa, para la realización de las pruebas de permeabilidad por el método de Lugeon.
- Control de costos de los proyectos en ejecución y las propuestas de la empresa y recomendaciones pertinentes a cada caso.
- Realizar la programación y presupuesto de las obras que llevara a cabo la empresa.
- Apoyar en sus actividades al ingeniero residente de las obras en ejecución de la empresa.
- Colaborar en las demás actividades que el ingeniero supervisor de la práctica lleve a cabo en la empresa.

3. RESEÑA HISTORICA

3.1. Síntesis Histórica¹

P&P Ltda fue fundada el 22 de Octubre de 1981 por los ingenieros Alfredo Carrizosa Gómez y Jaime Niño Infante ambos con título de Master of Science en ingeniería civil, vinculando también a su empresa ETA Ltda con amplia experiencia desde 1969 en el campo de estudios, proyectos, Interventoría y construcciones en el área de las obras civiles, vías, geología, geotecnia, minería, aguas superficiales y subterráneas, estructuras hidráulicas entre otros.

El 24 de septiembre del 2004 modifica su objeto social para incluir servicios de diseño, construcción e Interventoría de obras civiles.

El 21 de abril del 2006, se registra ante la cámara de comercio, el cambio de Representante Legal y del Gerente de la empresa; nombrando a la Doctora Maria Elsa Prada Bueno en dichas funciones.

Posteriormente la firma certifica su Sistema de Gestión Integral HSEQ bajo los lineamientos de las Normas NTC- OHSAS 18001: 2007 Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional, NTC- ISO 14001: 2004 Sistema de Gestión Ambiental, NTC- ISO 9001: 2008 y Sistema de Gestión Calidad, a través del ente certificador SGS Colombia.

3.2. Política HSEQ²

La Empresa tiene como propósito garantizar la satisfacción del cliente y de manera responsable garantizar la salud y seguridad de los trabajadores y el cuidado del ambiente, mediante los siguientes compromisos:

- Prevenir la ocurrencia de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales originados por los riesgos no aceptables tales como: Amputaciones por manipulación de máquinas y herramientas, fatalidades por exposición a trabajo en alturas, alteraciones respiratorias por exposición a polvos y sustancias químicas, alteraciones osteomusculares por adopción de posturas inadecuadas y repetitivas, alteraciones auditivas por exposición prolongada a fuentes generadoras de ruido.

¹ P&P LTDA INGENIEROS. Síntesis histórica. En: P&P Ltda Ingenieros. [En Línea]. [consultado 9 Sep. 2012]. Disponible en: <<http://www.pypltda.com/home.htm>>

² P&P LTDA INGENIEROS. POLITICA HSEQ. En: P&P Ltda Ingenieros. [En Línea]. [consultado 9 Sep. 2012]. Disponible en: < http://www.pypltda.com/politica_hseq.html>

- Prevenir la contaminación ambiental, y mitigar los posibles impactos ambientales generados en el desarrollo de nuestras actividades administrativas y operativas, a través de la racionalización del uso de recursos naturales, cuando sea técnicamente posible y la disposición adecuada de los residuos generados.
- Cumplir con los requisitos legales y de otras índoles vigentes aplicables a la actividad económica de la organización, en seguridad industrial, salud ocupacional, y ambiente.
- Destinar los recursos financieros, humanos y técnicos necesarios para mejorar continuamente el desempeño y la eficacia del Sistema de Gestión Integral en HSEQ y así obtener rentabilidad y desarrollo sostenible de la empresa.

3.3. Servicios³

La Firma P&P Ltda., se dedica a la ejecución de trabajos especializados relacionados con la perforación, tales como la perforación de pozos profundos para agua y su prospección, perforación para la recuperación de núcleos útiles en la evaluación de potenciales mineros, estabilización de taludes con perforación para drenajes horizontales, construcción de anclajes pasivos y activos, concreto lanzado, construcción de cimentaciones profundas y superficiales, la construcción y prueba de líneas de presión.

P&P Ltda., también presta servicios de laboratorios de suelos, concretos, asfaltos, lodos y aguas para investigaciones geotécnicas y de aguas.

Para garantizar la idoneidad de las mediciones que se realicen con los equipos de P&P Ltda., se desarrolla la calibración y verificación de los equipos empleados para las pruebas con entidades especializadas en el ramo y acreditadas para estas labores por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC).

3.4. Proyectos Desarrollados.⁴

A continuación se citan algunos de los proyectos adelantados por la empresa

- Construcción de las obras de estabilización del talud ubicado en los conjuntos residenciales Alcalá I y Alcalá II afectados por la ampliación de la doble calzada del tramo I Vía Girón-Lebrija entre las abscisas PR 69+500 a PR 69+70 del proyecto de Concesión Vial "ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA"

³ P&P LTDA INGENIEROS. NUESTROS SERVICIOS. En: P&P Ltda Ingenieros. [En Línea]. [consultado 9 Sep. 2012]. Disponible en: <<http://www.pypltda.com/servicios.html>>

⁴ P&P LTDA INGENIEROS. NUESTROS PRINCIPALES PROYECTOS. En: P&P Ltda Ingenieros. [En Línea]. [consultado 4 Ene. 2013]. Disponible en: <<http://www.pypltda.com/proyectos.html>>

Las obras ejecutadas comprendieron: Excavación de 13,305 m³ y conformación de terrazas, construcción de 4106 m de anclajes de 27 toneladas, instalación de 410 m³ de concreto para muros, construcción de 120 m de drenes de penetración y obras complementarias para el manejo de aguas superficiales

- Estudio de Suelos en la Vía al Corregimiento de Bocas en Rio Negro, ejecutado para la empresa PI LTDA.
- Inyecciones de lechada de cemento portland para sellado de grietas para la construcción de una presa en tierra para embalse, en Ruitoque Golf Country Club para URBANAS S.A. Floridablanca (Santander).
- Pantalla de Concreto lanzado e=0,10 m sobre malla electro-soldada y con anclajes de dos (2) torones de diámetro de ½” para el control de erosión y estabilización de taludes en el Barrio La Ceiba, para CDMB. Bucaramanga (Santander).
- Construcción de 1314 m de anclaje activo de cuatro torones de Ø = ½” para estabilización del talud oriental sector 2, de el proyecto denominado Centro Comercial Megamall. Obra ejecutada para el Consorcio Centro Comercial Grama Construcciones S.A y Alejandro Char y Cía Ltda en la ciudad de Bucaramanga (Santander).
- Ensayos varios de control de calidad de concretos, subrasante y rasante de vías realizados dentro del convenio de prestación de servicios que P & P Ltda. mantiene con ETA S.A.

4. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

4.1. Elaboración de Informes

Para la elaboración de informes la empresa P y P Ltda cuenta con formatos establecidos para cada ensayo que realiza y de este modo agilizar la producción de los mismos.

4.1.1. Ensayo de penetración estándar.

En forma general en ensayo de penetración estándar según INV E-111-07 consiste en perforar por incrementos, de tal manera que permita una toma de muestras. Después que la perforación ha avanzado hasta la profundidad deseada se conecta el tubo partido a la tubería y se baja dentro del agujero, dejándolo caer suavemente, se coloca el martillo en posición y se instala el cabezote en la parte superior de la tubería.

Se hinca el muestreador golpeando el martillo, con caída de 0.76m (30"), y se cuenta el número de golpes aplicados para efectuar la penetración en cada incremento de 0.15m (15, 30 y 45 cm). La suma del número de golpes requeridos para el segundo y tercer avance de 0.15 m (6") de penetración, se llama la "resistencia a la penetración normal" o "valor N".

Se saca el muestreador a la superficie y se abre. Se registra el porcentaje de recuperación o la longitud de la muestra recobrada. Se describe la muestra de suelo, en cuanto a su composición, color, estratificación y condición; se coloca luego una o más partes representativas de la muestra en recipientes sellados para el ensayo de humedad, sin que se compacte o distorsione cualquier estratificación aparente.

En uno de sus trabajos, P&P Ltda llevó a cabo ensayos de penetración estándar en los suelos de cimentación de la torre N°2 del proyecto la Gironela, desarrollado por la empresa Prourbe S.A, con el fin de obtener información adicional sobre dicho suelo.

El ensayo se llevó a cabo a través en un sondeo de 25 metros de profundidad, presentando en un informe los resultados de los trabajos de campo y de laboratorio que se aplicaron a las muestras recuperadas en el sondeo y adicionalmente las recomendaciones necesarias por parte del ingeniero especialista.

El sondeo se realizó por el método de percusión y lavado haciendo ensayos corridos de penetración estándar, (SPT) y muestreo con cuchara partida según norma I.N.V E-111 y/o rotación con recuperación de núcleo en donde se encontraron cantos; el diámetro de perforación fue BW y varillaje de perforación AW⁵.

Una vez obtenidos los datos de campo se registra la información respectiva en el Anexo 1, registro de sondeos con ensayos de penetración estándar, y se realizan los cálculos necesarios para obtener el N_{60} en el Anexo 2. En este mismo formato se registran los resultados de laboratorio de las pruebas de humedad y de clasificación realizados sobre las muestras recuperadas.

Para el cálculo del N corregido, cuando el número de golpes supera los 50 por sección de 15 cm, se clasifica como rechazo, identificando en la planilla (Anexo 2) con un "R". En donde se perfora con barrena, se asocia la presencia densa de cantos y/o bloques que no permiten el ensayo y donde se pudieron hacer los dos primeros tercios del ensayo, pero en el tercero se presentó rechazo, se toman los dos primeros para el cálculo del N corregido.

En la conformación del informe se anexaron los datos mencionados anteriormente y se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en este sondeo y en el sondeo realizado a los suelos subyacentes a la cimentación de la torre 1, ITC 001, para facilitar su interpretación al ingeniero geotecnista responsable del estudio de suelos.

4.1.2. Ensayo de permeabilidad en roca: Método de Lugeon.

El método de Lugeon es utilizado fundamentalmente para la determinación de la permeabilidad en roca, en pozos perforados con niveles estáticos debajo de la superficie, aislando una sección del pozo e inyectando, a presión, agua a la roca.

De forma general el ensayo consiste en medir el caudal inyectado a presión constante durante un periodo de tiempo entre 5 y 10 minutos. Se repite la operación aumentando la presión en intervalos entre 2.5 y 5 Kg/cm². No se debe superar este último valor para evitar hidrofracturación de la roca⁶. También se deben realizar ensayos con presiones decrecientes con el fin efectuar un estudio cualitativo del ensayo mediante gráficos.

⁵ P&P LTDA. Exploración de campo mediante un sondeo para el estudio de los mantos de suelos en donde se proyecta la construcción de la torre N°2 del proyecto la Gironela. ITC 002. 2012. p 6.

⁶ HERNANDEZ, Francisco. Pruebas de permeabilidad (resumen). México: Escuela superior de ingeniería y arquitectura, unidad Zacatenco, 2010, p11.

Para la realización de estos ensayos se emplea un obturador, que dependiendo de la longitud del sondeo y de la zona que se desee aislar, puede ser de una o dos glándulas.

Los obturadores son accionados neumáticamente o hidráulicamente e incorporan un cabezal que se desliza y otro fijo unido a un eje central. Este cabezal deslizante permite que la glándula se retraiga sobre el eje a medida que se infla.⁷

Los datos obtenidos en campo se registran en el Anexo 3 y se procede a realizar el informe como se indica en el Anexo 4: Cálculo de permeabilidad de Lugeon; es importante resaltar que el esquema del ensayo plasmado en estos documentos varía según el tipo de ensayo que se realiza (Lugeon simple o Lugeon doble). Tal como se muestra en este anexo se deben tener en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería que se calcula teniendo en cuenta una medición previa de pérdidas realizadas en campo, para varios caudales y diferentes tramos de tubería.

Identificadas estas pérdidas base, se procede a realizar su cálculo pero teniendo en cuenta los caudales específicos del ensayo. Este último proceso se realiza de forma grafica mediante el Anexo 5: Cálculo de pérdidas por fricción.

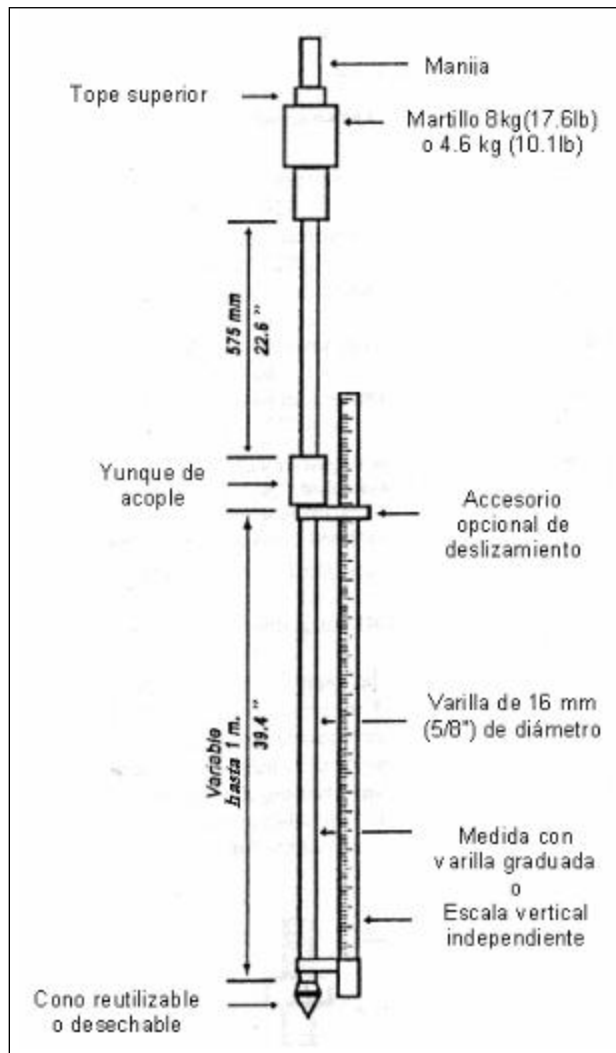
Cuando las pérdidas por fricción no se pueden calcular mediante el método descrito anteriormente, debido a que la longitud de la tubería supera la de las perdidas realizadas en campo, se procede a realizarlas por el método analítico, por ejemplo la ecuación de Darcy Weisbach (Anexo 6)

4.1.3. Método de ensayo normal para el uso del Penetrómetro dinámico de cono

El Penetrómetro dinámico de cono evalúa la resistencia de los suelos inalterados o materiales compactados, midiendo la rata de penetración del mismo con un martillo de 8 Kg y un dispositivo opcional que facilita esta lectura, Figura 1. Así mismo permite relacionar la rata de penetración con valores de resistencia in-situ, como el CBR (California Bearing Ratio).

Según el Instituto Nacional de Vías en la Norma E-172 del 2007 este método consiste básicamente en ubicar la punta del PDC dentro del suelo, levantar el martillo deslizante hasta la manija y soltarlo para que caiga libremente hasta golpear el yunque. La penetración para cierta cantidad de golpes debe ser registrada en milímetros.

⁷ RST INSTRUMENTS. Borehole Packer. [En línea] < www.rstinstruments.com >



. 8 Figura 1. Esquema del equipo PDC

Los datos obtenidos en campo, es decir la penetración acumulada por golpe, se registran en un formato interno de la empresa, Anexo 7, y se calcula la penetración por golpe, índice PDC y el CBR. En muchas ocasiones la presencia de material rocoso no permite que el equipo continúe perforando y por lo tanto se debe cambiar el punto de ensayo.

El índice PDC es la misma penetración por golpe; es decir la diferencia entre la penetración acumulada del golpe final menos el inicial. El CBR se calcula utilizando el índice PDC mediante la siguiente correlación especificada en la INV

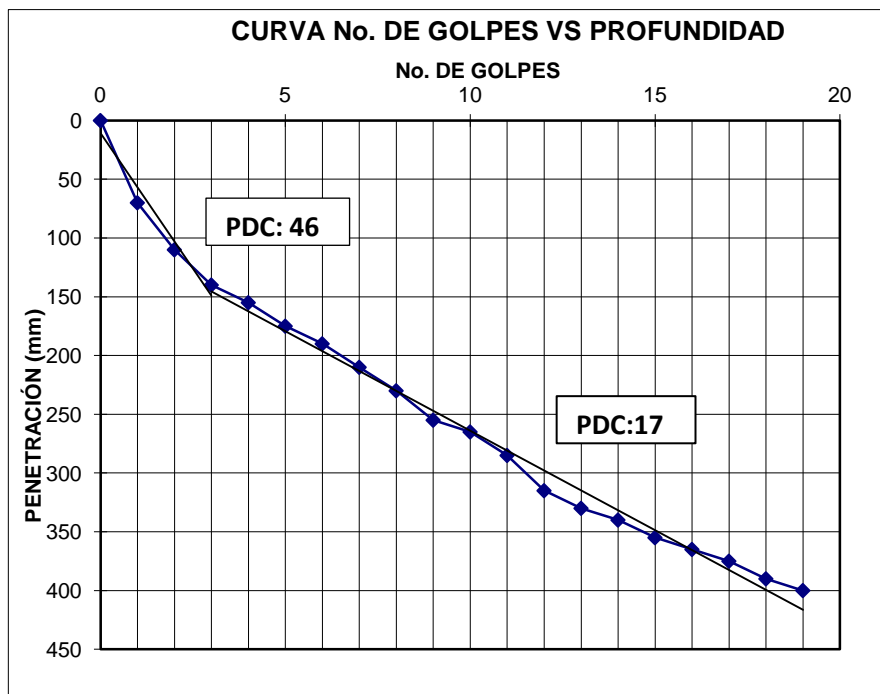
⁸ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Método de ensayo normal para el uso del Penetrómetro dinámico de cono en la aplicación de pavimentos a poca profundidad Bogotá: INVIAS, 2007. p 2. (INV E-172)

E -172; sin embargo usar una correlación adecuada depende del buen juicio del profesional. El Instituto Nacional de vías plantea otras ecuaciones dependiendo de la clasificación del suelo.

Ecuación 1
$$. CBR = \frac{292}{(PDC)^{1.12}}$$

Los datos de penetración acumulada y número de golpes se relacionan gráficamente y si se presenta un cambio de pendiente indica la presencia de diferentes capas en el material que se ensayó. Cuando esto ocurra el valor de CBR será calculado para cada cambio de pendiente; es decir para el Índice de penetración o número PDC promedio que presenta cada capa de material.

Con el fin de clarificar las ideas expuestas anteriormente a continuación se presenta una gráfica de No de golpes vs profundidad.



Gráfica 1. Ensayo de PDC-No de golpes Vs Profundidad

Se puede observar que la grafica 1 indica cambio de pendientes y por lo tanto la presencia de diferentes capas en el material. Para obtener el CBR de estas capas se calcula la pendiente promedio de cada una de ellas; es decir el indice PDC y con este el CBR. Aplicando la Ecuación 1 se obtiene que para un PDC de 46 y 17 se obtiene un CBR de 4% y 12% respectivamente.

También se puede relacionar la profundidad con el índice PDC gráficamente, obteniendo con ello un diagrama estructural que muestra la capacidad de penetración del suelo a determinada profundidad así como la uniformidad en el material.

4.2. Investigación.

Como parte fundamental para cumplir con los objetivos propuestos se investigaron diferentes especificaciones internacionales sobre anclajes en tierra y roca; con el fin de adquirir un conocimiento básico sobre estos temas.

Con este proceso se conformó una base de datos para la empresa y así mismo se generó una especificación interna sobre anclajes; la cual puede consultarse detalladamente en el Anexo 8.

A continuación se listan los documentos consultados para la realización de la especificación técnica para anclajes en suelo y roca, los cuales pueden ampliarse consultando las referencias de este trabajo:

- De Petros Xanthakos algunos apartes de la primera edición de su libro: Anclajes en suelo y estructuras ancladas.
- La Norma Europea sobre ejecución de trabajos geotécnicos especiales: Anclajes-UNE- EN 1537
- Del Instituto de Post-tesado de los Estados Unidos, las recomendaciones para el pre-tesado de anclajes en roca y suelo –PTI DC-35
- Del Departamento de Transporte de los Estados Unidos la especificación estándar para la construcción de carreteras y puentes en proyectos federales de carreteras-División 250.
- De la guía de especificaciones de la NAVFAC la sección 31 68 13: Anclajes en suelo y roca.
- De Cawangan Kejuruteraan Cerun la sección 6 sobre especificaciones para anclajes en suelo.

Una vez estudiados estos documentos e identificados los aspectos importantes que tenían en común se compiló tal información y se construyó la especificación interna que en forma general establece algunos parámetros de diseño, recomendaciones para la construcción de los anclajes, características generales del equipo de perforación,

inyección, tensado y de prueba; tipos de materiales que se utilizan comúnmente y define los componentes del sistema y su importancia. Así mismo establece algunas características puntuales para la fabricación, construcción e instalación del anclaje, algunos ejemplos de protección contra la corrosión que puede utilizarse y el control de calidad que debe aplicarse a obras de este tipo.

4.3. Manual de procedimiento para ensayos de permeabilidad en campo: Lugeon

Con este manual se pretende identificar los procedimientos básicos que permiten la realización del ensayo de permeabilidad por el método de Lugeon de forma correcta y evitando al máximo los posibles inconvenientes que puedan presentarse en campo.

Es importante resaltar que la empresa ya contaba con un Manual de Lugeon y para la realización de este documento se tomo como base el ya existente.

Para el desarrollo de este documento y por lo tanto su posterior evaluación se realizó inicialmente una investigación y estudio del material con el que la empresa contaba respecto al tema, así como del manual ya existente, y se complementó con la realización de informes, actividad descrita en el numeral 4.1.2. Seguido de esto se generó una primera versión del documento que se llevo a la práctica y permitió su evaluación mediante la supervisión de ensayos en campo, teniendo como resultado una versión final de manual de procedimientos. Ver Anexo 9.

4.3.1. Supervisión de ensayos

En forma breve la supervisión de los ensayos se basa fundamentalmente en los siguientes pasos:

1. *Verificación de la zona en la que quedará ubicado el obturador.* Esta observación se realiza con la ayuda del geólogo encargado del estudio, ya que la zona donde quedará alojado el packer no puede presentar un gran número de fallas, de ser así las probabilidades de que el equipo quede atrapado por derrumbe de la zona de ensayo aumentan significativamente. También se verifica con los operadores del taladro o el personal encargado la profundidad a la cual debe quedar ubicada la broca de perforación y el momento en que el equipo queda asentado, con el fin que se encuentre ubicado en la zona que se desea.
2. *Inflado del Obturador antes de la prueba:* Con este proceso se verifica que el equipo, tanto las glándulas, la manguera o cualquier tipo de conexión, no presente ningún tipo de fuga para que al momento de aplicar la presión de ensayo al obturador se mantenga constante. Ver Anexo 10-Figura 2. La

presión que se utiliza en este caso debe ser muy baja, aproximadamente 15 Psi.

3. *Inflado del Obturador*: Es indispensable tener en cuenta la presión que ejerce la columna de agua sobre el equipo, al igual que la presión mínima de inflado del mismo. En el caso del obturador que emplea la empresa, esta es de 180 Psi.

Ecuación 2
$$P_i^{(9)} = P_w + H_{wc} \times 1.45 \text{ psi /m}$$

Donde:

P_i = presión de inflado del obturador

P_w = presión de trabajo de obturador

H_{wc} = altura de la columna de agua sobre el obturador

Para poder realizar este proceso se tiene una válvula reguladora de presión y un manómetro que permite controlar de forma más eficaz la cantidad de nitrógeno que se hace pasar al obturador. Ver Anexo 10-Figura 3.

En el Anexo 11 se muestra un ejemplo del cálculo a realizar para obtener la presión de inflado correcta cuando se presentan los siguientes casos:

1. Nivel freático por encima de la profundidad inicial de la cámara
 2. No se registra Nivel freático
 3. Nivel freático igual a la profundidad inicial de la cámara. (Pozo artesiano)
4. *Instalación del Prensaestopas*: En este paso se debe verificar que el prensaestopas y los sellos no presenten ningún tipo de fuga y así garantizar que las presiones se mantengan durante todo el tiempo del ensayo. Ver Anexo 10-Figura 4.
 5. *Montaje de la Línea de Inyección*: se puede observar claramente en la Figura 5 del Anexo 10. Es indispensable garantizar que no se presente ningún tipo de fuga antes y después del medidor de flujo, una vez esto sea verificado se procede a llenar el pozo con agua y registrar la presión máxima de ensayo a la cual puede llegar. Conocido este dato se definen las presiones de ensayo y se inicia la prueba. Es fundamental que cada presión se mantenga constante durante la toma de datos.

⁹ ROYLE, Michael. Standard operating procedures for borehole packer testing. Pag 8.

6. *Registro de datos:* Una vez se establezca la presión inicial de ensayo, se inicia el cronómetro y se registra el valor del medidor del flujo como la lectura inicial. Para cada minuto se debe registrar el caudal que pasa y constantemente verificar la presión. Ver Anexo 12.

4.4. Control de Costos.

El control de costos se realizó a la obra ejecutada por la empresa para SP Explanaciones; la cual básicamente consistía en la construcción de 1860 metros de drenes horizontales perforados con tubería de $\Phi=3''$ y entubados con tubería sanitaria PVC de $\Phi=2''$.

Inicialmente el tiempo de ejecución de la obra fue de 60 días pero por distintos inconvenientes que se presentaron, los equipos debieron permanecer en campo aproximadamente 120 días sin generar ningún costo adicional a lo pactado cuando se realizó la contratación.

Para poder llevar a cabo este control, como primera medida se identificaron todos los gastos generados por el proyecto tomando como base la contabilidad realizada en el mismo y el costo de los equipos durante los 120 días, es decir se incluyó el tiempo en stand by de los mismos. Obtenido el total de gastos se comparó con el valor pagado generando una utilidad proyectada y una utilidad ganada, y así una primera perspectiva del resultado económico del proyecto.

Teniendo en cuenta que los equipos utilizados en el proyecto son de propiedad de la empresa, su costo en los primeros 60 días se calculó con el precio pactado en el análisis de precios unitarios pero para los 60 días restantes, es decir el tiempo en stand by de los equipos, se asumió el precio de alquiler de los mismos.

Con el fin de clarificar la idea expuesta anteriormente a continuación se indica un ejemplo del cálculo realizado.

Precio pactado en el APU por el equipo: \$800/ metro

Precio de alquiler del equipo: \$ 1.500 /hora

El costo total del equipo durante los 120 días:

$\$800 * \text{Cantidad metros perforados} + 1.500 * \text{\#horas (tiempo en stand by)}$

Como segunda medida se comparó el valor proyectado con el valor gastado de cada uno de los elementos del análisis de precios unitarios, permitiendo identificar aquellos aspectos críticos del proyecto.

4.5. Propiedades de la lechada de cemento para inyección de anclajes

Como parte del proceso de identificación de las propiedades de la lechada se analizaron dos escenarios: muestras obtenidas en obra y muestras desarrolladas en laboratorio. En los dos casos se estudiaron muestras cilíndricas de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura aproximadamente y muestras cúbicas de 5 cm * 5 cm.

4.5.1. Muestras obtenidas en obra

Este proceso se llevó a cabo durante la inyección de anclajes en una obra específica desarrollada por la empresa, tomando del primer lote de lechada producida la cantidad suficiente para obtener las 12 muestras.

La mezcla utilizada en este proceso tenía una relación agua/cemento de 0.45 y aditivo acelerante (accelguard-90), del cual se utilizó por cada 2 bultos de cemento 625 ml del mismo, es decir 0.87% en relación al peso del cemento. Cada uno de los especímenes se marcó e identificó con el número del anclaje, la fecha de vaciado y un consecutivo; lo cual se puede apreciar de forma clara en el Anexo 13.

Ya que la resistencia a la compresión de estas muestras se ve afectada directamente desde el momento de su obtención, el desencofrado y el transporte al lugar de curado; se tuvo un cuidado especial con todos estos procesos con el fin de garantizar que los resultados no presentarán ningún tipo de alteración por estas causas.

Se ensayaron 2 especímenes de cada uno (cubos y cilindros) a los 7, 28 y 56 días y se relacionó la resistencia a la compresión obtenida en los tipos de muestras, resaltando que la NTC 3546 establece que la resistencia del cilindro podrá considerarse igual al 85% de la resistencia a la compresión del cubo. Es importante mencionar que el fin de definir este parámetro no es establecer un factor de relación sino simplemente observar el comportamiento de cada elemento.

4.5.2. Muestras desarrolladas en laboratorio

En laboratorio inicialmente se desarrollaron diferentes mezclas de lechada con relaciones A/C de 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 y 0.65 sin ningún tipo de aditivo y

ensayadas a los 7, 28 y 56 días. Al igual que las muestras obtenidas en campo se tomaron 6 muestras cilíndricas y 6 muestras cúbicas.

Como fase previa a la determinación de las cantidades necesarias de agua y cemento en cada una de la relaciones, se determinó la densidad del mismo siguiendo los parámetros especificados por la normativa Invias (INV E-307-07). Debido a que no se contaba con el frasco Le-chatelier, se utilizó un picnómetro graduado de 500 cc, ver Anexo 14-Figura 10, siguiendo los principios que establece la norma. Es importante resaltar que el uso de este equipo no altera los resultados y por lo tanto tendrán el mismo grado de confiabilidad que si se utiliza el frasco Le-chatelier.

En la tabla 1 se muestran los parámetros que se tuvieron en cuenta para el cálculo de la densidad de cemento.

Tabla 1. Densidad del cemento con picnómetro.

Masa del picnómetro	P_1
Masa del picnómetro + Cemento	P_2
Masa de Cemento	
Masa de picnómetro+ cemento +ACMP	P_3
Masa de picnómetro + 500 cc ACPM	P_4
Peso específico del ACPM (ρ_{acpm})	$\frac{P_4 - P_1}{500}$
Peso específico del Cemento (gr/cm^3)	$\left(\frac{\text{Masa de Cemento}}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)}\right) * \rho_{acpm}$

Una vez obtenidos los resultados de resistencia de las mezclas mencionadas anteriormente, se seleccionó la lechada con relación A/C: 0.45 para aplicar diferentes cantidades de aditivo y estudiar características como la fluidez y la resistencia. Esta mezcla fue escogida ya que presentó una resistencia a la compresión a los 28 días superior a 3000 Psi.

Los porcentajes de aditivo (accelguard 90) seleccionados se basaron en los parámetros mínimos y máximos recomendados en la ficha técnica del producto, 0.87% y 7.8% respectivamente, y adicionalmente valores intermedios: 3.2% y 5.5%, todos en relación al peso del cemento.

El ensayo de fluidez con cono de Marsh, Ver Anexo 14-Figura 11, consiste en introducir en el cono 1725 ml de lechada obstruyendo la salida con un dedo o un tapón. Se acciona el cronómetro y simultáneamente se retira el tapón o el dedo deteniendo el cronómetro en el primer quiebre del flujo continuo de lechada.

Previamente a la realización del ensayo la ASTM C939 recomienda verificar la calibración del mismo aplicando el procedimiento mencionado anteriormente; la única diferencia es que el fluido utilizado es agua y debe tener un tiempo de flujo de 8 segundos.

Para los porcentajes de aditivo utilizados, las mezclas a las cuales se adicionó un 3.2% y 5.5% cumplen con los parámetros del Artículo 631-07 del INVIAS, el cual establece que el tiempo que tarda en salir un litro (1L) de lechada por el cono de Marsh debe estar comprendido entre diecisiete y veinticinco segundos (17s -25s).

De igual manera que para las mezclas sin aditivo, se hicieron pruebas de compresión en cubos y cilindros ensayados a 4, 7 y 28 días, ver Anexo 14-Figura 12 y 13.

5. OTRAS ACTIVIDADES RELEVANTES

5.1. Digitalización de datos obtenidos en campo.

En la realización de esta actividad se digitalizaron básicamente los datos obtenidos en campo por sondeos y calicatas en los formatos que se muestran en el Anexo 1 y Anexo 15 respectivamente.

Durante este proceso es importante tener cuidado; ya que la información debe ser exactamente la misma a la de los registros de campo. Cualquier modificación en las observaciones realizadas puede afectar significativamente el estudio que se está realizando.

Las calicatas permiten realizar una inspección directa del suelo que se desea estudiar; por lo tanto es importante que se identifique claramente el espesor de cada estrato y una descripción visual del mismo en la que se indique el tipo de suelo, tamaño de las partículas, color y cualquier otra información que se considere importante. Así mismo en el Anexo 15 se debe indicar la resistencia y la estabilidad de la excavación, si la muestra que se obtiene es alterada o inalterada y los ensayos que se recomiendan aplicar con el fin de obtener las características y clasificación del suelo.

5.2. Distribución de los Informes de Laboratorio.

Durante las dos semanas previas a la finalización de la práctica se realizó el envío de los informes de laboratorio, en su mayoría, ensayos de resistencia a la compresión en cilindros.

Una vez obtenidos los datos del ensayo se verifica con la ayuda de las órdenes de servicio, enviadas por cada cliente, y con las boletas de entrada de las muestras al laboratorio la edad de los cilindros, la descripción de la muestra, la fecha de toma y datos generales de la empresa. Simultáneamente en el último documento se registra la fecha de elaboración y el número del informe (un consecutivo interno) permitiendo llevar un control de los ensayos realizados. Una vez es confirmada toda esta información se envía el informe tanto física como electrónicamente y se archiva en la empresa un recibido del mismo.

6. RECOMENDACIONES

- Consultar previamente la normativa que rige el procedimiento realizado y no simplemente usar las hojas de cálculo como única ayuda para la elaboración de informes.
- Digitalizar los datos obtenidos en campo de forma cuidadosa debido a que las descripciones del suelo, el número de golpes aplicado al martillo, la penetración acumulada, la cantidad de agua consumida por la roca o en general cualquier otro parámetro importante en la realización del ensayo son cruciales para garantizar una interpretación y análisis adecuadamente.
- Dar a conocer la especificación interna de anclajes, por todo el personal involucrado en el diseño y construcción de los mismos.
- Incluir en el ítem “materiales en obra” del análisis de precios unitarios para la construcción de drenes y en general para cualquier otra actividad, el aceite lubricante de la herramienta; ya que en el análisis de costos se pudo observar que la cantidad gastada en el proyecto es relevante cuando se usan martillos neumáticos.
- Mantener la cantidad de personal establecido inicialmente en el presupuesto. Específicamente en el proyecto analizado se aumentó la mano de obra presupuestada generando una diferencia significativa entre el valor gastado y el proyectado afectando la economía del proyecto. De igual manera se debe evitar cargar personal que no esté relacionado con el proyecto debido a que se presenta un sobre-costo del mismo.
- Previa realización del ensayo de permeabilidad en roca revisar el manual de procedimiento, para así identificar aquellos aspectos, manipulables, que son claves para la realización exitosa del ensayo.
- Preparar el mezclador utilizado para producir la lechada garantizando su limpieza y humedeciéndolo previamente. Emplear el cuenta-litros con el que viene equipada la mezcladora con el fin garantizar la exactitud de la medida.
- Adicionar inicialmente el agua, pero no en su totalidad, mezclar el aditivo con el agua y no directamente con el cemento, a menos que en la ficha técnica del

producto se indique lo contrario. Agregar el cemento poco a poco y finalmente el agua restante.

- Tomar las muestras para los ensayos de resistencia a la compresión del primer lote de lechada producido, en formaletas libres de suciedad y previamente engrasadas Ubicarlas en un lugar donde se encuentren libres de vibraciones y comprobar su fluidez con el cono de Marsh.
- En el momento de desencofrar los cilindros o los cubos es de vital importancia que no se genere ningún tipo de golpe a la muestra; ya que esto se refleja directamente en la resistencia de los mismos.

7. CONCLUSIONES

- Realizar el control de costos a los proyectos ejecutados por la empresa facilita identificar si la utilidad esperada es la misma, superior o inferior que la utilidad ganada y también aquellos elementos críticos del proyecto.
- El manual de procedimiento interno de Lugeon de la empresa, es un documento práctico que permite conocer rápida y efectivamente los materiales, el procedimiento, los cálculos, el equipo empleado para la realización de los ensayos e interpretación de los datos tomados en campo.
- Se investigaron diferentes especificaciones internacionales de anclajes en suelo roca, con lo cual se amplió el conocimiento respecto al tema y se generó una especificación interna para la empresa que resalta lineamientos claves que deben tenerse en cuenta en la ejecución de estas obras.
- Se elaboran ensayos de resistencia a la compresión y de fluidez con cono de Marsh siguiendo los parámetros establecidos en las normas que los rigen. Encontrando que con una relación A/C de 0.45, sin aditivo, se obtienen valores de resistencia muy cercanos a los especificados por INVIAS e igualmente se estableció que con porcentajes de aditivo entre el 3.2% y 5.5% se obtiene una lechada que cumple con los requisitos mencionados por este ente regulador.

Es importante mencionar que la resistencia a la compresión para las mezclas con diferentes proporciones de aditivo presentó un comportamiento poco común; por lo que es indispensable estudiar más a fondo este parámetro.

- Se apoyó al ingeniero residente de la empresa mediante la elaboración de informes, supervisión de ensayos de Lugeon, digitalización de datos de campo y demás actividades que él considerara pertinente realizar.
- La parte investigativa jugó un papel muy importante para la realización de muchas de los objetivos propuestos para el desarrollo de la práctica. Fue un complemento clave para la culminación exitosa de este proceso.

BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (Flow cone method). United States: ASTM, 2010. 3p. (ASTM C-939)
- CAWANGAN, Kejuruteraan Cerun. Section 6: Specification for ground anchor. 22p.
- HERNANDEZ, Francisco. Pruebas de permeabilidad (resumen). México: Escuela superior de ingeniería y arquitectura, unidad Zacatenco, 2010. 27p.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Densidad del cemento hidráulico. Bogotá: INVIAS, 2007. 4p. (INV E-307)
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Ensayo de penetración normal (SPT). Bogotá: INVIAS, 2007. 11p. (INV E-111)
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Lechada para ductos de concreto preesforzado. Bogotá: INVIAS, 2007. 6p. (Artículo 631)
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Resistencia a la compresión cilindros de concreto. Bogotá: INVIAS, 2007. 16p. (INV E-410)
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Bogotá: INVIAS, 2007. 9p. (INV E-323)
- NORMA TECNICA COLOMBIANA. Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra de mortero para unidades de mampostería simple y reforzada. Bogotá: ICONTEC, 2003. 37p. (NTC 3546)
- PETROS P, Xanthakos. Ground anchors and anchored structures. 1st Edition. Washington D.C: Wiley-Interscience, 1991. 680P.
- POST-TENSIONING INSTITUTE. Recommendations for prestressed rock and soil anchors. U.S.A: ADSC, 2004. 98p (PTI-DC 35)
- ROYLE, Michael. Standard operating procedures for borehole packer testing. 23p.

- UNE. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales: Anclajes. Madrid- España: AENOR, 2001. 68p. (UNE- EN 1537)
- UNIFIED FACILITIES GUIDE SPECIFICATIONS. Division 31 Earthwork: Section 31 32 23 Foundation drilling and grouting. [En línea]. 2da actualización (2006); 28p. [Consultado 9 ago. 2012]. Disponible en < http://www.wbdg.org/ccb/browse_cat.php?c=3>. (UFGS)
- U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION .Standard Specifications for construction of roads and bridges on Federal Highway Projects: Division 250 Slope reinforcement and retaining walls. [En línea]. 20 p. [Consultado 30 jul. 2012]. Disponible en < <http://es.scribd.com/doc/7197143/FP03-Metric-Final-062003>>.

ANEXOS

ANEXO 2: Formato para el cálculo del N60

P&P	Profundidades (m)	
	Nivel Freático:	
	Total del Sondeo :	

PROYECTO :	
LOCALIZACIÓN:	
SONDEO N°:	

Profundidad(m)		ENSAYO SPT.								GRADACION	W %	LIMITES			SUCS	
Ensayo de penetración		Resultados de campo			Valores Corregidos							LL %	LP %	IP %		
De	A	Revestimiento	(GOLFES / 6")			N g/p	N1 g/p	A	ERr/60							N60 g/p
			6"	12"	18"					% G	% A	% F				

ANEXO 3: Registro de datos del Ensayo Lugeon

P&P	
Packer Test	
Sondaje:	
Profundidad del Sondaje (m)	
Ensayo N°	
Tipo de Ensayo	
Fecha:	
Hora inicio de ensayo:	
Hora termino de ensayo:	
Profundidad inicial d (m):	
Profundidad final a (m):	
Altura de la Camara L (m)	
Nivel estatico Inicial (m):	
Nivel estatico final (m):	
Altura del manometro h1 (m):	
Presión de inflado Packer (PSI):	
Longitud de manguera Lm (m)	
Diámetro de manguera (")	
Altura brocal Hb (m):	

Profundidad superior del packer					
Factor	Presión de ensayo (PSI) / bar				
	P1	P2	P3	P2	P1
	0,51				
	0,069				

Intervalo de Tiempo (minutos)	P1		P2		P3		P2		P1	
	L. Ini (m³)	L. Fin. (m³)	L. Ini (m³)	L. Fin. (m³)	L. Ini (m³)	L. Fin. (m³)	L. Ini (m³)	L. Fin. (m³)	L. Ini (m³)	L. Fin. (m³)

Mediciones de campo - Volumen de agua inyectada (Litros)					
Intervalo de Tiempo (minutos)	P1	P2	P3	P2	P1
	Volumen (litros)	Volumen (litros)	Volumen (litros)	Volumen (litros)	Volumen (litros)
Caudal de inyección (litros/segundo)					

ANEXO 4: Cálculo permeabilidad Lugeon

P&P

CÁLCULO PERMEABILIDAD LUGEON

PROYECTO: _____
 LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: _____
 EMPRESA QUE REALIZA EL SONDEO: _____
 EMPRESA QUE REALIZA EL ENSAYO: _____
 SUPERVISOR: _____
 FECHA: _____ COTA O ALTITUD: _____
 OBSERVACIONES: _____

PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA PERMEABILIDAD

- Cálculo del caudal (Q) [l/min]
- Presión efectiva en el tramo (P) [Kg/cm²]

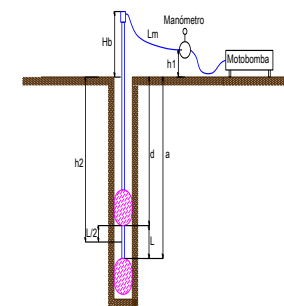
$$P = p_1 + (p_2 - p_3)$$
 donde:
 p1 = presión leída en el manómetro en superficie
 p2 = presión hidrostática de la columna de agua

$$p_2 = (h_1 + h_2) / 10$$
 p3 = pérdidas por fricción en la tubería
- Cálculo del caudal específico (q) [l/min/m]

$$q = Q / L_{\text{tramo}}$$
- Cálculo de permeabilidad Lugeon:

$$\text{Lugeon} = (q * 10) / P$$

ESQUEMA ENSAYO LUGEON



DATOS Y MEDICIONES EN CAMPO

Sondeo:	Nivel estático inicial (m):
Ensayo N°:	Nivel estático final (m):
Fecha:	Altura del manómetro (h1):
Hora inicio de ensayo:	Presión inflado obturador (psi):
Hora término de ensayo:	Longitud de manguera de llenado (Lm):
Profundidad inicial cámara (d):	Diámetro de manguera de llenado ("):
Profundidad final cámara (a):	Altura brocal (Hb):

Profundidad Superior del obturador:	m	Factor
	pies	

UND	P ₁	P ₂	P ₃	P ₂	P ₁
PSI					
BARES					

LECTURAS EN MEDIDOR (m³)

Intervalo tiempo (minutos)	P 1 = 0 (bar)		P 2 = 0 (bar)		P 3 = 0 (bar)		P 2 = 0 (bar)		P 1 = 0 (bar)	
	Lect. Inicial (m3)	Lect. Final (m3)	Lect. Inicial (m3)	Lect. Final (m3)	Lect. Inicial (m3)	Lect. Final (m3)	Lect. Inicial (m3)	Lect. Final (m3)	Lect. Inicial (m3)	Lect. Final (m3)
0 - 1										
1 - 2										
2 - 3										
3 - 4										
4 - 5										
5 - 6										
6 - 7										
7 - 8										
8 - 9										
9 - 10										

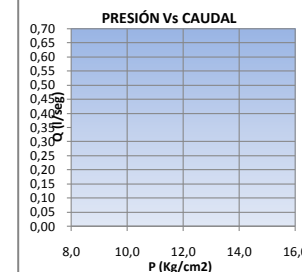
CÁLCULO CAUDAL (Q)

Intervalo tiempo (minutos)	VOLUMEN DE AGUA INYECTADA (litros)				
	P 1 = 0 (bar) = 0	P 2 = 0 (bar) = 0	P 3 = 0 (bar) = 0	P 2 = 0 (bar) = 0	P 1 = 0 (bar) = 0
	Volumen (litros)	Volumen (litros)	Volumen (litros)	Volumen (litros)	Volumen (litros)
0 - 1					
1 - 2					
2 - 3					
3 - 4					
4 - 5					
5 - 6					
6 - 7					
7 - 8					
8 - 9					
9 - 10					
Caudal Inyección Q (l/seg)					

CÁLCULO PERMEABILIDAD LUGEON

Caudal (Q) l/min	p1 (Kg/cm ²)	p2 (Kg/cm ²)	p3 (Kg/cm ²)	P (Kg/cm ²)	q (l/min/m)	Perm Lugeon

Nota: Las pérdidas por fricción (P3) en la tubería, se calcularon a partir de gráficas resultantes de mediciones hechas en campo para varios caudales y longitudes de tubería según el anexo No 1., Cálculo de pérdidas por fricción.



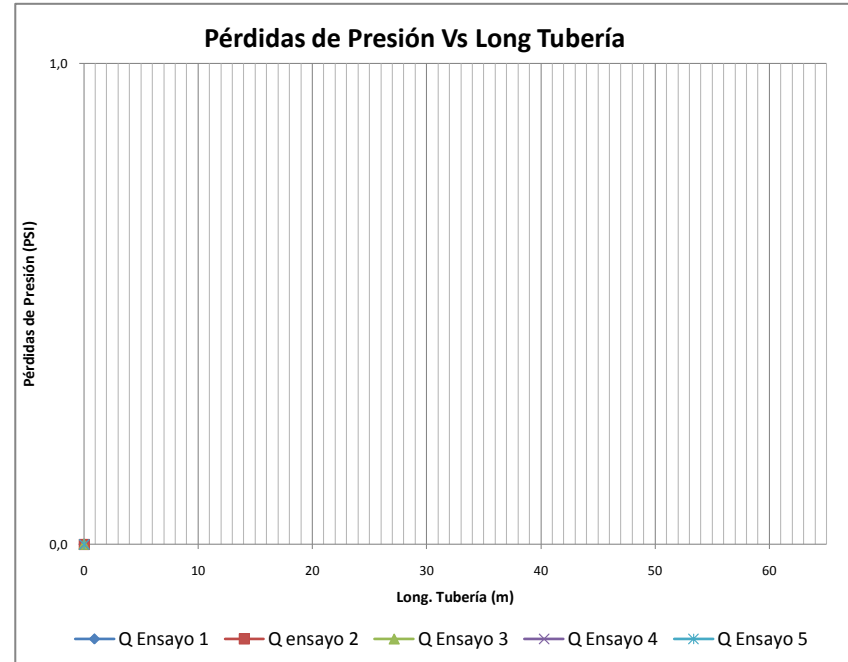
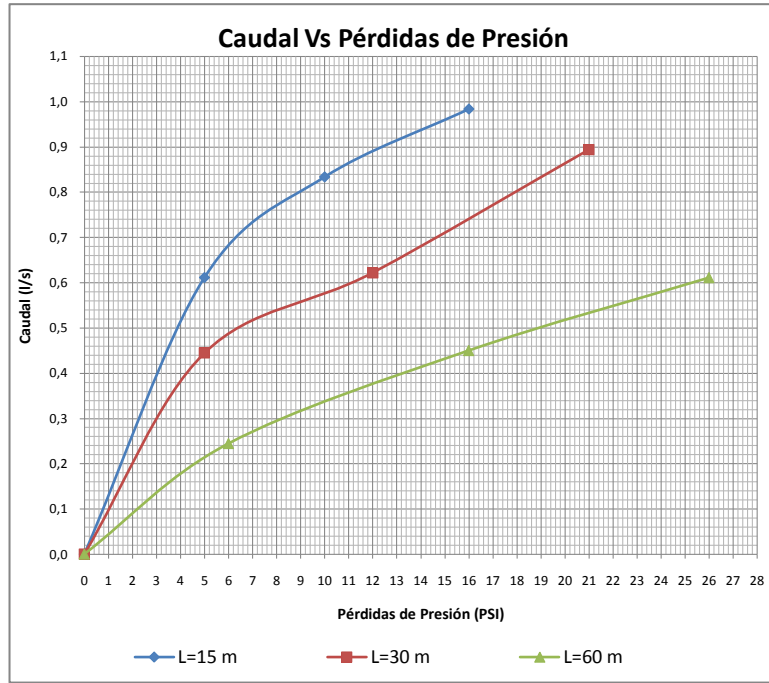
OBSERVACIONES:

RESPONSABLE: _____
 Ingeniero: Nelson León - Ingeniera: Liana Sossa

ANEXO 5: Cálculo de pérdidas por fricción

P&P		CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN													
DATOS Y MEDICIONES EN CAMPO															
Etapa 1 Salida tanque amortiguador				Etapa 2: Salida contador volumétrico				Etapa 3: Final del recorrido							
Long. Tubería:		15 m		Long. Tubería:		30 m		Long. Tubería:		60 m		Diámetro:		3/4 pulg	
Diámetro:		3/4 pulg		Diámetro:		3/4 pulg		Diámetro:		3/4 pulg		Diámetro:		3/4 pulg	
T (min)	T (s)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Gasto (L/s)										
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3											
		85	65	60											
		Lectura Inicial (L)	Lectura Final (L)	Volumen (L)											
1	60	7280	7316	36	0,600										
2	120	7316	7353	37	0,617										
3	180	7353	7390	37	0,617										
CAUDAL PROMEDIO					0,611										
T (min)	T (s)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Gasto (L/s)										
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3											
		80	50	40											
		Lectura Inicial (L)	Lectura Final (L)	Volumen (L)											
1	60	7425	7475	50	0,833										
2	120	7475	7525	50	0,833										
3	180	7525	7575	50	0,833										
CAUDAL PROMEDIO					0,833										
T (min)	T (s)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Gasto (L/s)										
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3											
		75	36	20											
		Lectura Inicial (L)	Lectura Final (L)	Volumen (L)											
1	60	7625	7684	59	0,983										
2	120	7684	7743	59	0,983										
3	180	7743	7802	59	0,983										
CAUDAL PROMEDIO					0,983										
T (min)	T (s)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Gasto (L/s)										
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3											
		80	65	60											
		Lectura Inicial (L)	Lectura Final (L)	Volumen (L)											
1	60	6786	6812	26	0,433										
2	120	6812	6839	27	0,450										
3	180	6839	6866	27	0,450										
CAUDAL PROMEDIO					0,444										
T (min)	T (s)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Gasto (L/s)										
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3											
		75	52	40											
		Lectura Inicial (L)	Lectura Final (L)	Volumen (L)											
1	60	6895	6933	38	0,633										
2	120	6933	6970	37	0,617										
3	180	6970	7007	37	0,617										
CAUDAL PROMEDIO					0,622										
T (min)	T (s)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Gasto (L/s)										
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3											
		80	66	60											
		Lectura Inicial (L)	Lectura Final (L)	Volumen (L)											
1	60	6057	6072	15	0,250										
2	120	6072	6086	14	0,233										
3	180	6086	6101	15	0,250										
CAUDAL PROMEDIO					0,244										
T (min)	T (s)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Gasto (L/s)										
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3											
		75	56	40											
		Lectura Inicial (L)	Lectura Final (L)	Volumen (L)											
1	60	6135	6162	27	0,450										
2	120	6162	6189	27	0,450										
3	180	6189	6216	27	0,450										
CAUDAL PROMEDIO					0,450										
T (min)	T (s)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Presión (PSI)	Gasto (L/s)										
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3											
		70	46	20											
		Lectura Inicial (L)	Lectura Final (L)	Volumen (L)											
1	60	6260	6297	37	0,617										
2	120	6297	6334	37	0,617										
3	180	6334	6370	36	0,600										
CAUDAL PROMEDIO					0,611										
Q (L/S)	0,000	0,611	0,833	0,983											
PÉRDIDA PRESIÓN (PSI)	0,0	5,0	10,0	16,0											
Q (L/S)	0,000	0,444	0,622	0,894											
PÉRDIDAS DE PRESIÓN (PSI)	0,0	5,0	12,0	21,0											
Q (L/S)	0,000	0,244	0,450	0,611											
PÉRDIDAS DE PRESIÓN (PSI)	0,0	6,0	16,0	26,0											

Con los datos de las tablas que se encuentran resaltadas, se procede a graficar Caudal Vs Presión, para cada una de las longitudes.



En el gráfico anterior, con los datos de los caudales del ensayo, se obtienen las presiones para las diferentes longitudes de tubería. Una vez obtenidos estos datos se procede a graficar Presión Vs Long. de tubería.

Finalmente, en el gráfico Presión Vs Long. de tubería, con la longitud de tubería para el ensayo se obtienen las presiones para cada uno de los caudales del ensayo.

Q ensayo 1:	l/s	Longitud (m)	0	15	30	60
		Pérdidas Presión	0,0			
Q ensayo 2:	l/s	Longitud (m)	0	15	30	60
		Pérdidas Presión	0,0			
Q ensayo 3:	l/s	Longitud (m)	0	15	30	60
		Pérdidas Presión	0,0			
Q ensayo 4:	l/s	Longitud (m)	0	15	30	60
		Pérdidas Presión	0,0			
Q ensayo 5:	l/s	Longitud (m)	0	15	30	60
		Pérdidas Presión	0,0			

Longitud Tubería para el ensayo: m

Caudales (l/s)	Pérdidas Presión (PSI)	Perdidas Presión (Kg/cm2)
Q1	0,00	0,00
Q2	0,00	0,00
Q3	0,00	0,00
Q4	0,00	0,00
Q5	0,00	0,00

ANEXO 6: Cálculo de pérdidas analíticamente

P&P

CÁLCULO DE PERDIDAS POR FRICCIÓN

diámetro	3/4"	0,01905	metros
gravedad	9,81	m/seg ²	
Viscosidad Dina (μ) =	0,001519	N-s/m ²	
Densidad del Agua	1000	Kg/m ³	
Longitud tramo		m	

$$Re = \frac{V * D * \rho}{\mu}$$

Si Re < 2000 (Flujo laminar)
Si Re > 4000 (Flujo Turbulento)

Flujo Laminar

$$f = \frac{64}{Re}$$

Flujo Turbulento

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{1}{3.7 * \frac{D}{\epsilon}} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^2}$$

Pérdidas por fricción $H = 0.0826 * f * \frac{Q^2}{D^5} * L$ Longitud

DARCY										
Q (Lt/seg)	Q (m3/seg)	V (m/seg)	Re	Flujo	Rugosidad (ε) mm	D/e	f	Hf (m)	Hf (psi)	Hf (Kg/cm2)
					0,000046					
					0,000046					
					0,000046					
					0,000046					
					0,000046					

Pérdidas por fricción $h = 6.1 * C * \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} * L$

FLAMMANT (Diametros menores a 2")									
Q (Lt/seg)	Q (Lt/seg)	D(m)	C	L(m)	Leq (m)	LT (m)	Hf(m)	Hf(psi)	Hf (Kg/cm2)
			0,00018						
			0,00018						
			0,00018						
			0,00018						
			0,00018						

Pérdidas por fricción $h = 10.674 * \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} * L$

HAZEN (Diametros mayores a 2" Y menores a 6")									
Q (Lt/seg)	Q (Lt/seg)	D(m)	C	L(m)	Leq(m)	LT (m)	Hf (m)	Hf (psi)	Hf (Kg/cm2)
			130						
			130						
			130						
			130						
			130						

Flamant	
Valores para el Coeficientes C	
Hierro Fundido	0,00031
Hierro Galvanizado	0,00023
Acero	0,00018
Cobre	0,00012
PVC	0,0001

Tomado de: RODRIGUEZ Jaime. Instalaciones Hidraulicas y Sanitarias


Hazen Williams		
Tipo de Tubo	Promedio	Diseño
Acero, Hierro dúctil o fundido con aplicación centrífuga de cemento o revestimiento bituminoso.	150	140
Plástico, Cobre, Latón, Vidrio.	140	130
Acero, Hierro fundido, sin recubrimiento	130	10
Concreto	120	100
Acero Corrugado	60	60

Tomado de: ROBERT Mott. Mecánica de fluidos. Tabla 9.2

Darcy	
Material	Rugosidad ε (m)
Vidrio, Plástico	0,0000015
Cobre, latón, plomo (tubería)	0,00024
Hierro fundido (sin revestir)	0,00018
Hierro fundido (revestido en asfalto)	0,00012
Acero comercial o soldado	0,000046
Hierro Forjado	0,000046
Acero remachado	0,0018
Concreto	0,0012

Tomado de: ROBERT Mott. Mecánica de fluidos. Tabla 9.1

ANEXO 7. Cálculo del índice PDC y el CBR

	Método de ensayo normal para el uso del Penetrómetro Dinámico de Cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad I.N.V. E-172	GO	CÓD: PR03-F024 V:1
---	--	----	---------------------------

CLIENTE: _____	APIQUE _____
PROYECTO: _____	PROFUNDIDAD: _____
LOCALIZACION: _____	FECHA: _____
LOCALIZACION EJE DE DISEÑO: _____	INFORME: _____
DESCRIPCION: _____	PESO MARTILLO: _____
CLASIFICACIÓN: _____	

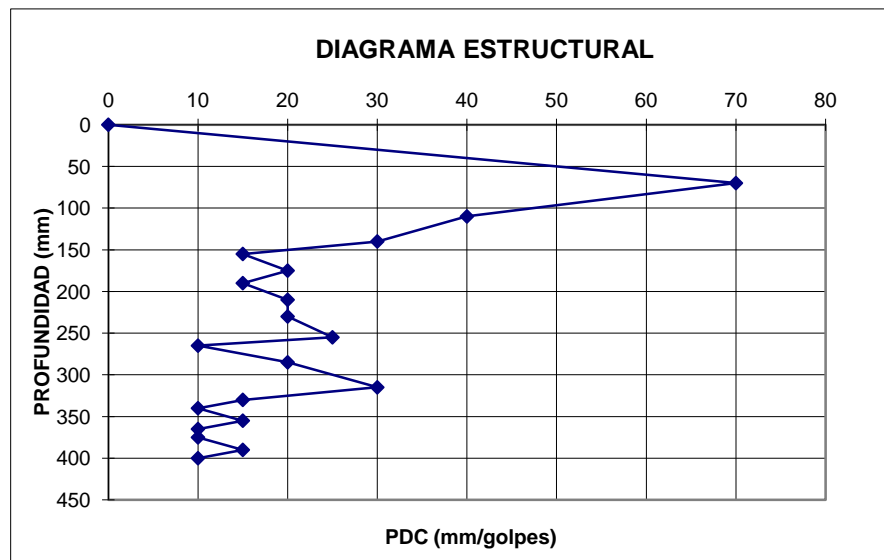
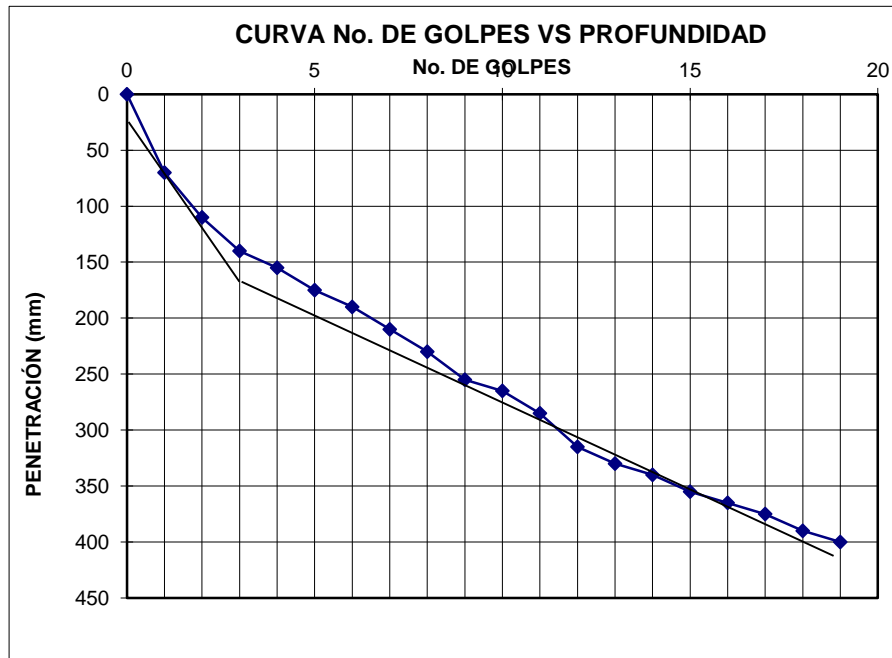
Nro. de Golpes	Penetración Acumulada	Penetración Por Golpe	Indice PDC mm/golpe	CBR

Formulas utilizadas:	PDC:		
CBR = 292 / (PDC)^{1,12}	CBR (%):		

REVISO: _____
ING. NELSON F. LEON

P&P	Método de ensayo normal para el uso del Penetrómetro Dinámico de Cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad	GO	CÓD: PR03-F024
	I.N.V. E-172		V:1

APIQUE _____



ANEXO 8: Propuesta de especificación técnica para anclajes en suelo y roca

1. OBJETO

Definir parámetros de calidad y recomendaciones básicas para la construcción de anclajes en suelo y roca.

2. GENERAL

Esta especificación es aplicable para estructuras nuevas donde el anclaje se instala después que la estructura se ha terminado o para la instalación de anclajes en estructuras pre-existentes. Si el tensionamiento debe hacerse antes de la terminación de la estructura se deben adicionar a esta especificación requisitos adicionales.

El personal encargo del diseño, ejecución y supervisión de los anclajes; ingenieros y operadores de perforación, deben contar con el conocimiento y la experiencia necesaria en la ejecución de este tipo de obras; así como cumplir en su totalidad los requisitos de esta especificación y los alineamientos establecidos en los planos.

2.1. PRECIOS UNITARIOS

2.1.1. Perforación de agujeros en suelo y/o roca

2.1.1.1. Pago

El pago se hará por los costos asociados con la perforación de agujeros en suelo y/o roca

2.1.1.2. Medida

La perforación de agujeros será medida por el pago de los agujeros perforados con una precisión de 300⁽¹⁾ mm, basados en los metros lineales perforados de acuerdo con los planos.

2.1.1.3. Unidades de medida

Unidad de medida: Metros

2.1.2. Anclaje en suelo y/o roca.

2.1.2.1. Pago

El pago se hará por los costos asociados con instalación y el suministro del anclaje. El precio deberá incluir la instalación del anclaje y los ensayos que se especifiquen. No se hará ningún pago por los anclajes que no cumplan los criterios de aceptación, excepto cuando el fracaso se deba por una menor resistencia que la prevista en la lechada del bulbo.

2.1.2.2. Medida

Los anclajes en suelo o en roca serán medidos por el pago de los anclajes instalados y aceptados.

¹ USACE, Et al. Unified facilities guide specifications: Division 31-Earthwork: 31 68 13 Soil and rock anchors. [On line] .2006 ;p 7. [23 Ago 2012]. <http://www.wbdg.org/ccb/browse_cat.php?c=3>

2.1.2.3. Unidades de medida

Unidad de medida: Metros

2.1.3. Inyección del anclaje

2.1.3.1. Pago

El pago se hará por los costos asociados con la inyección del anclaje.

2.1.3.2. Medida

La inyección de agujeros será medida por el pago de los agujeros inyectados basados en los metros perforados según los planos.

2.1.3.3. Unidades de medida

Unidad de medida: Metros

2.1.4. Tensionamiento del anclaje.

2.1.4.1. Pago

El pago se hará por los costos asociados con el tensionamiento de los anclajes instalados y aceptados.

2.1.4.2. Medida

El tensionamiento del anclaje será medido por el pago de los anclajes aceptados y tensionados.

2.1.4.3. Unidades de medida

Unidad de medida: Metros

2.2. DEFINICIONES

Alquitrán de hulla: Líquido marrón o negro de elevada viscosidad, con un olor parecido al de la naftalina. Resistente a ácidos y corrosivos como el agua salada.

Anclajes permanentes: Mecanismos que presentan larga durabilidad y mantienen la estabilidad de forma permanente.

Anclajes temporales: son de durabilidad limitada, pueden ser inútiles o inoperantes después de ciertas etapas de trabajo. Su duración aproximada es de 2 años²; dependiendo de las limitaciones y las condiciones del suelo.

Consolidación: Reducción de volumen del suelo por la actuación de cargas, presentándose durante un tiempo generalmente largo.

Cabeza del anclaje: Dispositivo que se encarga de transmitir los fuerzas de tracción del anclaje a la placa de apoyo.

Carga de alineamiento (AL): Es la carga nominal mínima aplicada al anclaje durante el ensayo con el fin de mantener el equipo de prueba correctamente ubicado.

² XANTHAKOS, Petros. Ground anchors and anchored structures. Washington, D.C: Wiley-Interscience. 1991. p 35.

Carga de bloqueo: Carga transmitida a la cabeza del anclaje inmediatamente después de cargar el anclaje.

Carga de ensayo (TL): Máxima carga a la cual se somete el anclaje durante el ensayo.

Carga Lift-Off: Permite verificar la carga en el tendón, en un momento específico, con el uso de un gato hidráulico.

Cuña: Dispositivo que transfiere la tensión del filamento a la cabeza del anclaje.

Junta de estanqueidad: Componente de material adaptable que sirve para sellar la unión entre las caras de dos elementos, evitando la fuga del fluido.

Lechada: Material que transmite la fuerza de tracción del tendón al terreno en la zona de bulbo. También funciona como agente protector de la corrosión en el resto de la perforación.

Longitud de bulbo: Longitud del tendón por medio de la cual se transmite la fuerza de tracción al terreno.

Longitud libre: Longitud comprendida entre la cabeza del anclaje y el comienzo de la zona de bulbo.

Movimiento Elástico: Movimiento recuperable que se mide durante los ensayos aplicados al anclaje.

Movimiento Residual: Movimiento no-elástico (no recuperable) de un anclaje medido durante la prueba de carga cuando retorna a la carga de alineación.

Prueba de desempeño: Cargar cíclica e incrementalmente el anclaje, donde se registra el movimiento total del anclaje para cada incremento, incluyendo la carga de alineamiento (AL).

Prueba de comprobación: Cargar incrementalmente el anclaje, donde se registra el movimiento total del anclaje.

Tendón: Parte del anclaje que transfiere la fuerza de tracción del bulbo a la cabeza del anclaje.

Trompeta: Dispositivo que provee protección contra la corrosión en la transición entre el anclaje y longitud libre de tensado.

Vaina: Tubo corrugado o liso que protege el acero de pre-tensado contra la corrosión

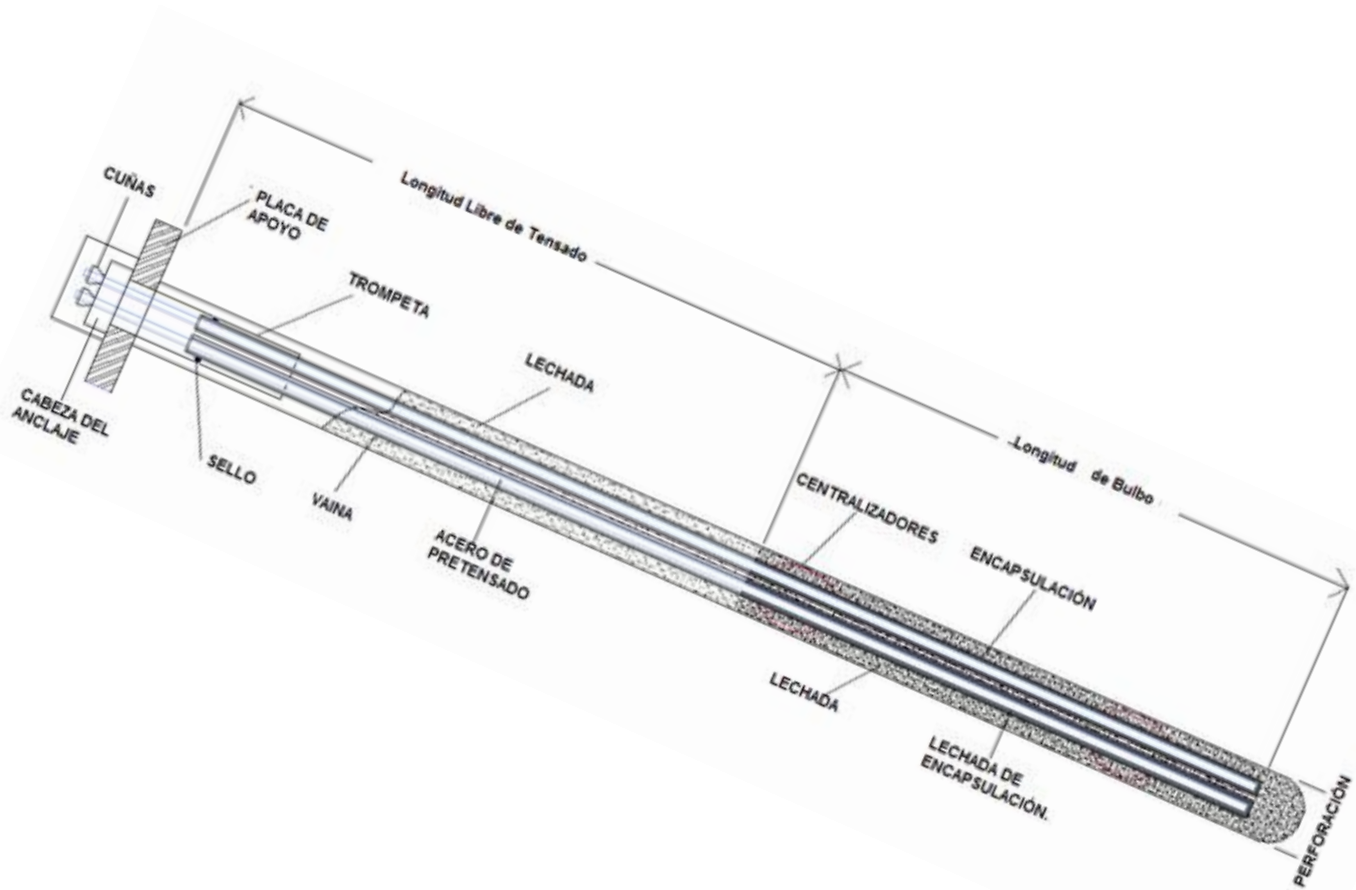


Figura 1. Componentes típicos de un anclaje

2.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Es indispensable que antes de iniciar cualquier trabajo todo el personal involucrado en la perforación e instalación de los anclajes se reúna con el fin de revisar planos, especificaciones y plan de trabajo.

2.3.1. Requisitos Generales

Suministrar planos y procedimientos de instalación donde se indique en forma clara los detalles del equipo y procedimientos de instalación y tensado, fabricación del anclaje, método de inyección, diseño de mezcla, ubicación del anclaje, tipo de protección contra la corrosión. En los planos deberá poder identificar fácilmente la ubicación del anclaje y el tipo de anclaje cuando no sean iguales y los espaciadores, centralizadores y/o cualquier otro elemento.

2.3.2. Alcance de las Obras.

La mano de obra, herramientas, materiales, transporte y todo el equipo que sea necesario para llevar a cabo las siguientes obras deben incluirse en el contrato:

- Diseño, suministro, construcción, instalación y pruebas del anclaje
- Cualquier otra obra necesaria para garantizar la seguridad y desempeño del sistema de retención.

2.3.3. Diseño del Anclaje.

La localización del anclaje, la carga de diseño y la inclinación serán determinadas según la estructura que se va a anclar, así como la resistencia la lechada del bulbo será determinada a partir de las pruebas realizadas a la roca o al suelo donde se instalará el anclaje.

El diseñador deberá considerar los efectos de ubicar los anclajes muy próximos entre sí al momento de determinar la carga de diseño y el espaciamiento mínimo, y adicionalmente tener en cuenta los siguientes parámetros al momento de diseñar:

- Los anclajes en suelo o en roca deberán tener barras roscadas o filamentos
- La información descrita en la Tabla 1

Tabla1. Parámetros de diseño.³

Carga de diseño	< 60% de F_u
Carga de Bloque (Lock-off)	< 70% de F_u
Carga máxima	< 80% de F_u
Esfuerzo de flexión de la placa	< Punto de fluencia del acero cuando la carga es igual al 95% de la resistencia a la tracción
Esfuerzo de la estructura de apoyo	< 24.1 Mpa (3500 Psi)

Fu: Resistencia última del acero pre-tensado.

El diseñador debe suministrar al ingeniero encargado de la realización de la obra los cálculos de diseño para el anclaje, la placa de apoyo y las zonas de bulbo. Incluir dibujos, las hipótesis de diseño, y cualquier otra información que sea necesaria para verificar el diseño propuesto.

Los planos que sean suministrados deben contener los siguientes detalles:

- Número y ubicación del anclaje
- Diámetro del agujero.
- Angulo de inclinación del anclaje, medido desde la vertical.
- Carga de diseño del anclaje
- Tipo y Tamaño del tendón, especificando sus propiedades
- Resistencia de la lechada de inyección, relación A/C, tipo de cemento y aditivos cuando sea el caso.
- Separación vertical y horizontal entre anclajes.

³ USACE. Op. cit., p. 16.

- Longitud de bulbo
- Longitud Libre
- Ubicación de separadores y/o centralizadores
- Tipo del sistema de protección contra la corrosión
- Protección de la cabeza del anclaje.

2.3.4. Métodos de construcción.

Antes de iniciar las obras se debe dar a conocer al ingeniero encargado un documento que contenga la siguiente información:

- Secuencia detallada de la construcción.
- El método de perforación propuesto
- Métodos y detalles de la instalación del anclaje
- Procedimiento para la inyección del anclaje
- Sistema de tensado a utilizar.
- Detalles del sistema de protección a utilizar; ya sea clase I o II, encapsulado de tendón o tendones protegidos con lechada respectivamente.
- Material, maquinaria y mano de obra necesaria en cada etapa de la construcción.
- Tasa de producción basado en los recursos asignados, tales como la producción media en metros lineales de anclajes instalados por cuadro de perforación por día de trabajo normal de 8 horas

Una vez sean estudiados los anteriores punto por el ingeniero, deberá informar al contratista que está de acuerdo con los métodos propuestos o en que aspecto, según su opinión, los métodos no cumplen las condiciones contractuales.

3. EQUIPO

Todo el equipo utilizado en la fabricación y suministro del anclaje deberá utilizarse según las recomendaciones del fabricante.

Las bombas, gatos y todo el equipo de tensado deberán ser calibrados por un laboratorio autorizado con 3 meses de anterioridad como máximo. Es responsabilidad del interventor verificar que los equipos utilizados sean los mismos que se presentaron para su aprobación.

Al igual, se deben proveer descripciones de los gatos de tensado, dinamómetros, células de carga o cualquier otro dispositivo utilizado.

3.1. Equipo de Perforación.

El equipo de perforación debe ser el adecuado para realizar los agujeros a las profundidades y alineaciones requeridas.

3.2. Equipo de inyección.

El equipo de inyección deber ser capaz de mezclar mecánica y continuamente la mezcla de lechada y producir una sustancia libre de grumos de cemento. Un sistema colector con una serie de válvulas deber permitir la circulación continua y el bombeo de la lechada con un control preciso de la presión.

3.2.1. Mezclador de lechada

Deberá ser de alta velocidad, de alta cizalladura y capaz de producir lechada uniforme. Es indispensable que este equipado con un medidor de agua adecuado; calibrado y que permita leer en centímetros cúbicos diseñado de modo que pueda colocarse en ceros después de cada entrega.

3.2.2. Bomba de lechada

La bomba para la inyección de lechada debe ser de desplazamiento positivo, se recomienda que tenga una capacidad de bombeo para caudales inferiores a 75 L/min y capaz de bombear una presión de como mínimo 50 Psi (345 Kpa). La bomba debe tener un tamiz de 3 mm para tamizar la lechada antes de introducirla en la bomba. Si la bomba es de alta cizalladura no necesita el tamiz.

Lo ideal es tener una bomba capaz de bombear lechada con y sin arena y con un medidor de presión de al menos 150 Psi o el doble de la presión requerida para la inyección.

3.3 Equipo de Tensado

Debe realizar operaciones hidráulicamente y con una capacidad como mínimo de la carga de prueba especificada en el tendón. El equipo debe permitir el tensado del tendón en incrementos de carga (subir o bajar).

El equipo al igual que el manómetro debe estar calibrado y tener los certificados y graficas de calibración en el lugar de la obra, contar con un medidor dial o algún dispositivo que permita medir la elongación del tendón en cada incremento de carga.

3.4. Equipo de Prueba.

Los equipos de prueba deben estar compuestos por un indicador dial capaz de medir 0.025 mm, un dispositivo de movimiento con un recorrido, como mínimo, igual a la elongación elástica teórica del anclaje en la carga de prueba máxima y que permita medir sin restablecer el dispositivo.

Utilizar un gato hidráulico y un manómetro calibrados por una empresa independiente dentro los 45 días de iniciados los trabajos. También se debe tener un indicador de referencia calibrado; el cual debe estar en el lugar del proyecto constantemente.

4. MATERIALES.

La manipulación, almacenamiento y uso de materiales deberán cumplir con las instrucciones de fabricación. Los anclajes no deberán contener materiales que sean mutuamente incompatibles entre sí ni con el ambiente circundante.

4.1. Acero de Pretensado

El acero de pre-tensado usado en los anclajes; ya sean filamentos o barras roscadas debe ser de acero de alta resistencia y contar con un certificado que debe entregarse al ingeniero que contenga la siguiente información:

- Nombre del fabricante, fecha y lugar de fabricación
- Diámetro, área de la sección trasversal y masa

- Resultados de las pruebas para determinar las propiedades mecánicas.
- Carga de rotura, modulo de elasticidad y el porcentaje (%) del alargamiento bajo la carga máxima de relajación.

4.2. Lechada

La elección y diseño de un adecuado sistema de sellado depende de las condiciones del terreno en las que se va a colocar y del tiempo de fraguado, fuerza, y funciones previstas.

La elección de la lechada debe considerar la agresividad del suelo hacia la misma y la del cemento hacia el tendón de acero. Es importante seleccionar una lechada que pueda funcionar como agente protector del acero.

Algunas de las funciones que cumple la lechada son:

- Formar una zona de transferencia de carga entre el tendón del anclaje y el suelo.
- Llenar vacios dentro y fuera del tendón y así aumentar la protección contra la corrosión.
- Llenar fisuras en el suelo antes de instalar el tendón; en este caso la pre-lechada es necesaria.

4.2.1. Lechada de cemento

La lechada de inyección debe ser homogénea, bombeable y debe contener los informes correspondientes de los ensayos que garanticen la consistencia de la mezcla y sus propiedades.

El contenido de agua deberá ser el mínimo necesario de modo que permita una colocación correcta, sin exceder una relación A/C de 0.45 y con resistencia a la compresión mínima de 21 Mpa o 3000 Psi aproximadamente al momento del tensado⁴. Este ensayo se debe realizar según lo descrito en INV E-323.

4.2.1.1. Cemento

El cemento utilizado para la lechada debe ser Portland tipo I, II y III; pero cuando la temperatura ambiente se encuentre por debajo de los 10°C será indispensable el uso de cemento Tipo III.

El uso de un contenido mínimo de cemento es indispensable si se quiere asegurar una durabilidad de la lechada; dado el caso que la lechada se encuentre en un ambiente agresivo (ataques por químicos) el uso de cementos sulfato-resistentes y endurecedores rápidos mejora su protección contra los mismos.

4.2.1.2. Agua.

El agua utilizada debe estar fresca, limpia y libre de cantidades perjudiciales de aguas residuales, aceite, ácido, álcali, sales, o materia orgánica.

4.2.1.3. Agregados

A menos que se especifique lo contrario no se utilizarán agregados para la elaboración de la lechada si el diámetro de perforación del agujero es inferior a 15⁵ cm.

⁴ POST-TENSIONING INSTITUTE. Recommendations for prestressed rock and soil anchors. U.S.A: ADSC, 2004. p 49

⁵ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Lechada para ductos de concreto preesforzado. Bogotá: INVIAS, 2007. p 2.

Dado el caso que sean empleados en la mezcla de lechada deberán cumplir con siguientes requisitos de gradación según la ASTM C144 (Lechada de pre-inyección) y no podrá retener más del 50% entre dos tamices consecutivos ni más del 25% entre el tamiz No 50 y No 100:

Tabla 2. Gradación de la arena para lechada

	Tamiz	Porcentaje que pasa	
		Arena Natural	Arena Procesada
4.75 mm	No 4	100	100
2.36 mm	No 8	95 -100	95-100
1.18 mm	No 16	70-100	70-100
600 µm	No 30	40-75	40-75
300 µm	No 50	10-35	20-40
150 µm	No 100	2-15	10-25
75 µm	No 200	0	5-10

4.2.1.4. Aditivos.

Solo se permitirá su uso si se demuestra que mejora las propiedades de la lechada y no causan efectos sobre el acero de pre-esfuerzo; por lo tanto no es adecuado el uso de aceleradores ya que pueden causar corrosión en el mismo.

Es permitido el uso de aditivos que controlan la exudación, mejoran la fluidez y reducen el contenido de agua y que tengan una buena compatibilidad con el cemento. Se recomienda que este último aspecto sea revisado en mezclas de prueba antes de uso.

Los aditivos expansivos se pueden usar en la lechada que llenará la encapsulación, trompeta, revestimiento del anclaje o para inyección secundaria y dentro de una vaina. No se deberá usar este tipo de aditivos en la longitud de bulbo.

4.2.1. Lechada con resina de poliéster.

Este tipo de lechada no deberá utilizarse en anclajes donde los orificios estén húmedos. La resina utilizada debe ser de alta resistencia, insaturada con agregado no reactivo, inorgánico y un catalizador contenido en un tubo de película de poliéster o vidrio.

La lechada con resina de poliéster debe cumplir con los requisitos que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3⁶. Requisitos para la lechada con resina.

Resistencia a la compresión	83 Mpa -12 000 Psi
Resistencia a la Tensión	27.6 Mpa – 4 000 Psi
Resistencia al corte	20.7 Mpa – 3 000 Psi

4.3. Grasas

La utilización de este material en los anclajes tiene como objetivo principal proteger contra la corrosión y lubricación a los tendones de alta resistencia. Su uso será permitido siempre y cuando sean hidrófugas, auto-conservantes y resistentes a la degradación microbiológica y no se permitirá el uso de diferentes tipos de grasa en el anclaje.

Es importante que se proporcionen los datos de identificación del producto, tales como el nombre del fabricante, la marca, tipo y fecha de fabricación del mismo. También se deben indicar las instrucciones de utilización que establece el fabricante.

4.4. Plásticos.

Cualquier componente plástico utilizado en el anclaje como protección contra corrosión debe estar hecho a partir de materiales termoplásticos de alta densidad y de al menos 1 mm⁽⁷⁾ de espesor.

El acabado de las superficies del revestimiento deben ser lisas, limpias, libres de defectos, de un material homogéneo, estable térmicamente y químicamente inerte, resistente a agentes químicos, bacterias y hongos.

Los plásticos utilizados no deberán deslizarse en la zona de la longitud fija del anclaje y ser resistentes a la transferencia de carga.

De este tipo de materiales se debe proporcionar la siguiente información:

- Nombre del fabricante, marca y fecha de fabricación del producto.
- Diámetro interior y exterior
- Espesor de la pared
- Cuando el revestimiento sea ondulado, la amplitud en mm
- Longitud estándar y las técnicas de unión.

5. COMPONENTES DEL SISTEMA

El anclaje debe ser una combinación de una placa de apoyo en acero con una cabeza y cuñas o una placa de apoyo en acero con una tuerca roscada.

El anclaje será diseñado de modo tal que permita desarrollar el 95% de la resistencia última a la tensión del acero y que las fuerzas de compresión dentro de la longitud libre no dañen la protección contra la corrosión.

No se permite usar los componentes del anclaje suministrados por diferentes proveedores así como re-usar la cabeza del anclaje.

⁶ USACE. Op. cit., p. 25.

⁷ CAWANGAN, Kejuruteraan Cerun. Section 6: Specification for Ground anchor. P 7.

5.1. Longitud Libre y fija del anclaje

La longitud libre del anclaje es la distancia entre la cabeza del anclaje y el extremo proximal de la lechada. La longitud de bulbo es la distancia sobre la cual la carga de tracción se transmite al suelo circundante.

La longitud de bulbo es cementada con lechada de inyección tanto en suelo como en roca; sin embargo también ayuda a proteger el acero de pre-esfuerzo contra la corrosión.

En la longitud libre se asume que no existe transferencia de carga y el requisito principal de esta zona es estar totalmente libre para elongarse cuando se aplica el tensionamiento.

5.2. Separadores y Centralizadores

Los espaciadores permiten en el anclaje asegurar una separación entre componentes individuales y que su posición este de manera uniforme sobre la sección transversal del orificio de perforación.

Los centralizadores se deben colocar en intervalos apropiados de modo que cumplan los siguientes requisitos⁸:

- Cubrir con lechada al tendón en mínimo 10 mm dentro de la longitud de bulbo.
- Garantizar una distancia mínima de 10 mm entre el tendón y los lados de la perforación

5.3. Componentes de la cabeza del anclaje.

La cabeza del anclaje es uno de los tres componentes principales del anclaje, su montaje incluye la tensión en la cabeza, cuñas y una distribución de la carga a la estructura por medio de la placa. Adicionalmente se puede ubicar una tapa protectora; la cual permite acceso y vigilancia.

El diseño de la cabeza del anclaje no debe inducir esfuerzos secundarios en el tendón. Las cuñas se deben colocar entre la cabeza del anclaje y el apoyo, a menos que la cabeza del anclaje permita la compensación de desviaciones angulares del tendón. Cuando el anclaje es permanente, la cabeza del anclaje debe permitir ensayos cuando sean requeridos.

Se debe instalar de forma detallada de modo que permita desarrollar las siguientes funciones:

- Tensar y bloquear el tendón con hasta el 80% de la resistencia especificada.
- Someter ajustes de carga según las especificaciones de tensionamiento.
- Todos los hilos puedan tensionarse simultáneamente pero bloquearse individualmente por medio de cuñas.

5.4. Acopladores

Deberán ser capaces de desarrollar al 100% la resistencia mínimo a la tracción especificada por el tendón o los filamentos. El uso de empalmes en los filamentos se permite.

⁸ Ibid., p. 10.

5.5. Vainas y tubos plásticos

Deben ser continuos, resistentes al envejecimiento por rayos ultravioleta durante su almacenaje, transporte y puesta en obra y a ataques químicos causados por la agresión del medio ambiente, lechada y los componentes inhibidores de la corrosión. Cuando se realicen uniones entre los componentes de plástico deberán sellarse para evitar la entrada de agua; ya sea por contacto o con juntas de estanqueidad.

Cuando los tubos plásticos sirven para transmitir las fuerzas deberán presentar ondulaciones o ser corrugados. La altura y la cantidad de ondulaciones deben ser proporcionales a los tubos a fin de permitir la trasmisión de esfuerzos.

El espesor mínimo de un tubo corrugado deberá ser de 1.0 mm, 1.5 mm y 2.0 mm para diámetros internos <80 mm, entre 80 mm y 120, y mayores de 120 respectivamente. En el caso de las vainas o tubos lisos deberá ser 1 mm mayor al de los tubos corrugados⁹.

6. FABRICACIÓN DEL ANCLAJE.

El anclaje podrá ser fabricado en taller o en campo, utilizando personal calificado y capacitado para realizar el trabajo. Debe estar libre de suciedad, oxido o cualquier sustancia que pueda afectar su resistencia y durabilidad.

Antes de su instalación debe estar completamente ensamblado con los centralizadores, espaciadores, tubos de lechada y ventilación, y protegido adecuadamente contra la corrosión.

6.1. Tendón.

Se deben proveer filamentos lo suficientemente largos de modo que no necesiten acoplamientos o empalmes. Los materiales del tendón deberán ser intachables, libres de picaduras, grasa o cualquier defecto que perjudique su comportamiento.

Al momento de realizar el montaje del tendón dentro del agujero, se deben instalar separadores y/o centralizadores en intervalos de máximo 3¹⁰ metros, medidos de centro a centro, a lo largo de toda la longitud de enlace.

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos recomienda que la carga de diseño no debe exceder el 60% ni la carga de prueba el 80% de la resistencia a la rotura mínima del tendón.

6.2. Longitud de bulbo y la longitud libre.

Deben ser determinadas por el diseñador teniendo en cuenta que permitan desarrollar la capacidad de carga del tendón. Se debe proporcionar protección contra la corrosión, si las condiciones del suelo así lo exigen mediante el revestimiento con un plástico ondulado o un tubo de acero deformado lleno de lechada o un revestimiento con epoxi.

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos recomienda una longitud de bulbo mínima de 3m en roca y 4.5 en suelo y una longitud libre de 4.5 metros; sin embargo estas dos longitudes serán especificadas por el diseñador en los planos y serán las mínimas a utilizar.

⁹ UNE. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales: Anclajes. Madrid-España: AENOR, 2001. p 23. (UNE-EN 1537)

¹⁰ USACE. Op. cit., p. 27.

6.3. Centralizadores y espaciadores

Deben ser fabricados de plástico, acero o cualquier otro material que no perjudique el acero. Cuando el tendón consta de elementos múltiples el uso de espaciadores a lo largo de la longitud de bulbo permite separar cada uno de los elementos. Los centralizadores garantizan un espesor mínimo de lechada de 13 mm (0.5 pulgadas) sobre el tendón en la longitud de bulbo y cuando se usan dentro de la vaina un recubrimiento de 5 mm (0.2 pulgadas)¹¹.

Los centralizadores se ubicaran a 1.5 metros desde la parte superior de la longitud de bulbo y a un máximo de 30 cm desde el fondo de la misma.

Es importante que el tipo de centralizador utilizado permite que la lechada fluya libremente hasta la perforación. El uso de centralizadores no es necesario si los tendones son inyectados a más de 1 Mega-pascal de presión y el suelo sobre el cual se está trabajando es de grano grueso.

El uso primordial de los espaciadores es separar los filamentos o las barras individualmente o en pequeños grupos.

Estos elementos al garantizar un recubrimiento mínimo de lechada permiten transferir adecuadamente la carga y una adecuada protección contra la corrosión.

6.4. Cabeza del anclaje

Se encuentra conformada por la placa de apoyo con cuñas para los filamentos del anclaje o una placa de apoyo con tuerca para anclajes de barras, por la trompeta y la protección contra la corrosión.

Al momento de definir el tamaño de la placa se deben tener en cuenta los esfuerzos de flexión de la misma; ya que no deben exceder el límite elástico del acero cuando se aplica una carga igual al 95% de la resistencia mínima a la tracción del tendón.¹²

Las cuñas deben diseñarse de modo tal que no generen un fallo en el acero debido al corte. Si el filamento presenta algún recubrimiento epóxico se deben garantizar cuñas adecuadas; ya que no se debe permitir remover la capa de recubrimiento con el fin de usar cuñas estándar.

Todos los elementos roscados del anclaje para las barras recubiertas de epoxi deben ser diseñados para que encajen en la capa de epóxica y no afecten la capacidad del acero.

La trompeta se debe soldar a la placa de apoyo y el diámetro interior de la trompeta debe ser igual o mayor que el agujero en la placa de apoyo. La trompeta debe estar protegida contra la corrosión y se debe proporcionar un sello permanente entre la trompeta y la longitud libre del tendón de cómo mínimo 300 milímetros según el Departamento de Transporte de los Estados Unidos.

6.5. Recubrimiento del anclaje

El recubrimiento debe encapsular completamente la cabeza del anclaje y la parte final del tendón y estar fabricado en acero o plástico. Este material no deberá estar expuesto

¹¹ PTI. Op. Cit.,p 14

¹² U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Standard specification for construction of roads and bridges on federal highway projects. p 154.

al contacto con el cemento, grasas inhibidoras de la corrosión ni ser susceptible a degradación por la luz ultravioleta y debe impermeabilizarse el punto de unión entre el recubrimiento y la placa de apoyo. Si el recubrimiento va a estar lleno de grasa, este recubrimiento debe ser permanente en el anclaje.

6.6. Protección contra la corrosión

La protección contra la corrosión deberá hacerse como se indique y aplicarse a todo el anclaje, a la cabeza del anclaje, la longitud de bulbo y libre, la trompeta y cualquier otro elemento según se especifique. Su elección debe considerar la vida de servicio de la estructura, la agresividad del medio ambiente, consecuencias de falla y el incremento de costos en obra. Cuando los anclajes permanentes están expuestos a la atmósfera se recomienda cubrirlos con una grasa inhibidora de la corrosión o lechada.

La lechada de cemento se considerará adecuada protección contra la corrosión si no permite la penetración de agua, por otro lado los recubrimientos epóxicos no son muy recomendados como protección ya que pueden dañarse durante su fabricación o instalación. En anclajes temporales no se podrá exigir protección contra la corrosión.

Cuando la protección contra la corrosión se aplica en forma de revestimiento, un material deberá ser introducido en el espacio entre el tendón y la vaina con el fin de llenar completamente el espacio entre ellos. Estos elementos deben ser capaces de transmitir la tensión aplicada a los tendones.

6.6.1. Cabeza del Anclaje.

La tapa de la cabeza del anclaje que funciona como protección debe estar hecha de acero galvanizado o acero inoxidable. Si el anclaje requiere pre-tensado o inspección durante la vida útil se debe utilizar un componente inhibidor de la corrosión, y de no requerirlo más adelante se utilizará lechada.

La protección contra la corrosión de la parte interna de la cabeza del anclaje debe unirse con la protección de la zona libre, a fin de proteger la parte del anclaje situada bajo la placa de apoyo y que pasa a través de ella.

Cuando los anclajes son permanentes se recomienda que la placa de apoyo y todos los elementos de la cabeza del anclaje estén protegidos contra la corrosión antes de su disposición en obra.

La placa de apoyo debe ser de acero galvanizado o revestida de un material duradero y resistente a la luz ultravioleta. Los recubrimientos plásticos deben ser de un material estabilizado contra los rayos UV.

6.6.2. Trompeta.

La trompeta proporciona continuidad entre la protección contra la corrosión del anclaje y la protección de la longitud libre.

Deberá sellarse a la placa de apoyo y superponerse a la encapsulación de la longitud libre en como mínimo 100⁽¹³⁾ mm, sellándose con un compuesto inhibidor o lechada. Si se utiliza el compuesto inhibidor debe realizarse un sello

¹³ USACE. Op. cit., p.27.

permanente entre la trompeta y la protección de la longitud libre, de usarse lechada deberá tener un sello temporal o un tubo de transición.

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos recomienda extender la protección contra la corrosión que rodea la longitud libre hasta 300 mm dentro de la trompeta; ya que la longitud de la trompeta debe permitir los movimientos de la estructura y el tendón durante los ensayos y el tensado del anclaje.

El exterior de la trompeta de acero debe protegerse de la corrosión. Según el Instituto de Post-tensión un medio adecuado de protección puede ser recubrirla con mínimo 50 mm (2 pulgadas) de lechada o concreto, galvanizarla, o recubrirla de una fusión epóxica o con alquitrán de hulla. Estos dos últimos compuestos solo se podrán usar si la trompeta no estará expuesta a la luz solar.

6.6.3. Tendón.

Este elemento debe recibir una adecuada protección que conserve su eficacia durante la vida útil del anclaje y no podrá afectarse durante el almacenamiento, transporte, instalación o tensado de los anclajes y se aplicará por lo menos a la longitud libre del tendón sin obstaculizar su deformación.

Antes de aplicar la protección contra la corrosión el tendón debe estar libre de cualquier tipo de sustancias, grasa, suciedad, hielo, partículas de oxido, etc.; que puedan afectar la funcionalidad del sistema de protección.

Los anclajes no deberán manifestar florecimiento de la corrosión (capa uniforme de oxido, sin picaduras, visible y removible) hasta el momento en que se esté anclando.

6.6.3.1. Protección de la longitud libre de tensado:

Esta zona deberá estar protegida por una vaina inyectada con lechada o algún compuesto inhibidor o un manguito termo-contráctil cubierto con una masilla. Los compuestos inhibidores de la corrosión deben recubrir completamente todos los elementos del tendón.

La protección puede estar compuesta por una vaina de polietileno liso o un tubo de polipropileno, de 1.5 mm de espesor, o un tubo de PVC liso de 1mm de espesor, o un tubo de acero de 5 mm de espesor.

La encapsulación se extenderá dentro de la trompeta, pero no deberá estar en contacto con la placada de apoyo durante los ensayos ni la tensión del tendón. Si se usan tubos corrugado deberá emplearse un antiadherente por separado.

6.6.3.2. Protección de la longitud libre de bulbo:

En esta zona el encapsulamiento del tendón a demás de intentar proteger contra la corrosión, transfiere la tensión del acero a través de la lechada. Estará compuesta por un tubo corrugado de polietileno de 1.5 mm de espesor como mínimo o un tubo de PVC corrugado de 1 mm mínimo de espesor.

Cuando se utiliza lechada de protección en los tendones, esta es la única protección contra la corrosión en la zona de bulbo y no se especifica encapsulación por separado si las condiciones del suelo no son agresivas

y las condiciones de instalación aseguren que la lechada recubra completamente el tendón.

La transición entre la protección de la longitud libre y la de bulbo debe diseñarse y fabricarse de tal manera que asegure la continuidad de la protección.

La clase de protección se debe definir en función del tipo de anclaje que se desee instalar; ya sea temporal o permanente, debe ser compatible con el tendón, el método de perforación, el método de inserción y de inyección. La Figura 2 puede ayudar al momento de definir la clase de protección que se debe usar.

Protección Clase I: Este sistema encapsula el acero de pre-tensado dentro de un recubrimiento plástico lleno de lechada o cualquier inhibidor de la corrosión.

Protección Clase II: Este sistema encapsula el acero de pre-tensado en la longitud libre y utiliza la lechada de cemento para proteger el acero a lo largo de la longitud de bulbo.

Los recubrimientos epóxicos en las barras proporcionan una protección adicional y mejor la protección Clase II, pero no califica como protección Clase I.

En la tabla 4 y tabla 5 se muestran algunos requisitos para cada clase de protección y ejemplos dependiendo del tipo de anclaje, respectivamente.

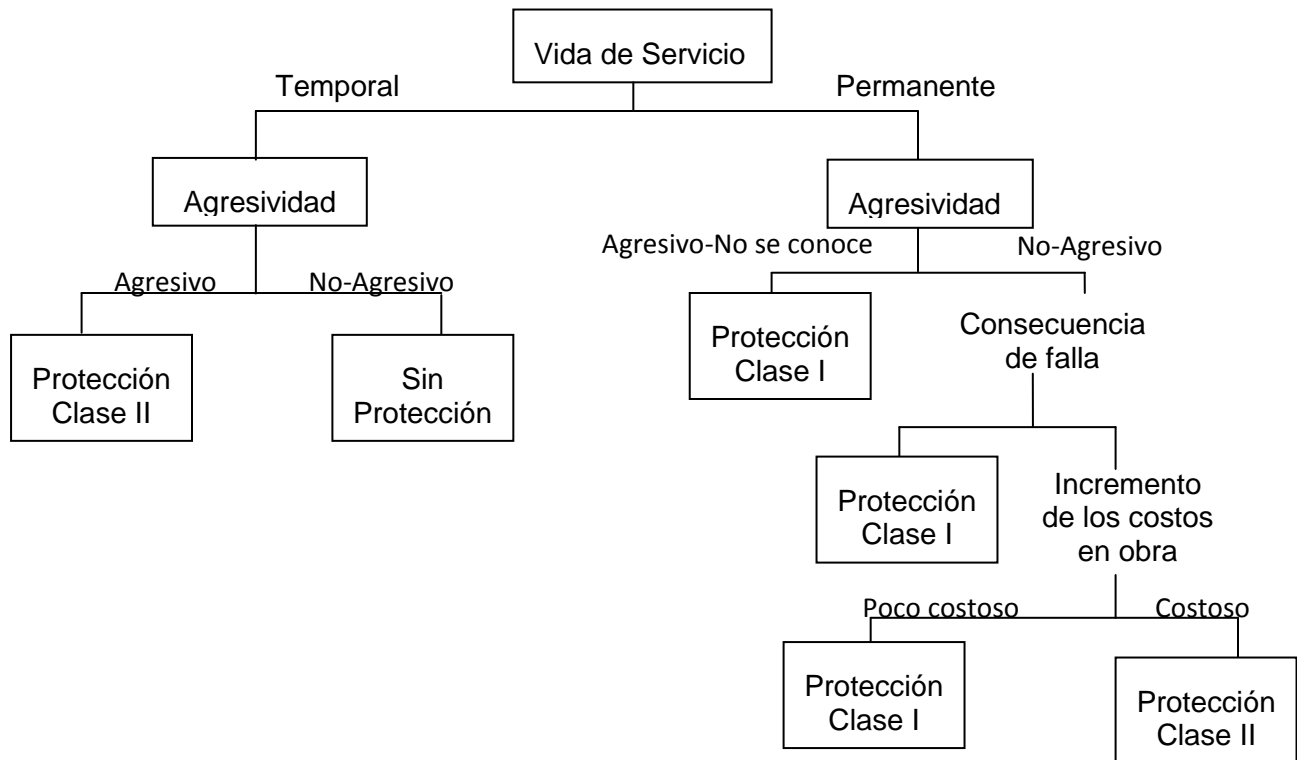


Figura 2. Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor. USA: ADSC, 2004. p21 (PTI-DC 35)

Tabla 4. Requisitos de protección contra la corrosión.

Clase	Requisitos de protección contra la corrosión.		
	Anclaje	Longitud Libre	Longitud de Bulbo
I Encapsulación del Tendón.	Trompeta	-Componente inhibidor de corrosión dentro de la vaina recubierto con lechada, o	-Encapsulación inyectada con lechada, o
	Recubrimiento si estará expuesto	-Vaina inyectada con lechada, o -Recubrimiento de cada tendón con lechada epóxico probado exitosamente a presión.	-Recubrimiento de cada tendón con epoxi probado exitosamente a presión.
II Protección con Lechada.	Trompeta	-Componente inhibidor de corrosión dentro de la vaina recubierto con lechada, o	-Lechada
	Recubrimiento si estará expuesto	-Manguito termo-contráctil, o -Revestimiento epoxico en tendón y lechada, o -Resina de poliéster para la totalidad de la barra terreno rocoso con nivel freático no agresivo.	-Resina de poliéster en terreno rocoso con nivel freático no agresivo.

Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor. USA: ADSC, 2004. p25 (PTI-DC 35)

Tabla 5. Ejemplos de protección contra la corrosión dependiendo del tipo de anclaje.

Protección contra la corrosión	
Anclaje Temporal.	Anclaje Permanente.
<p>Zona de Bulbo: Recubrimiento mínimo de lechada de 10 mm, en relación a la pared de perforación, a todos los tendones. Si el terreno es agresivo se puede usar un tubo corrugado alrededor.</p>	<p>Zona de Bulbo: Se pueden usar los siguientes elementos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tubo plástico corrugado rodeando el tendón y la lechada. • Dos tubos de plástico corrugados concéntricos rodeando el tendón con cemento o resina pre-inyectada. • Un único tubo de plástico corrugado con lechada de cemento. El recubrimiento mínimo entre los dos elementos debe ser de 5 mm. • Un tubo manguito de acero o plástico corrugado (3mm de espesor) con lechada de cemento en su interior. • Un tubo corrugado de acero, trabajando a compresión, rodeado con lechada de cemento de 10 mm de espesor.

Zona Libre:

Debe presentar la menor fricción posible y permitir el desplazamiento del tendón. Algunos ejemplos de protección son los siguientes

- Vaina plástica para cada cable y sellada para evitar la entrada de agua o llena de producto anticorrosivo.
- Vaina plástica o de acero común para todos los cables y sellada para evitar la entrada de agua o llena de producto anticorrosivo.

La vaina común para todos los anclajes es útil cuando la utilización del anclaje será por tiempo prolongado.

Zona Libre:

Un sistema de protección que permita el libre desplazamiento del tendón en la perforación, como los siguientes ejemplos:

- Una vaina de plástico en cada elemento rellena de un producto flexible de protección.
- Una vaina plástica para cada elemento y llena de lechada de cemento más a) o b)
- Una vaina de plástico común para todos los elementos y llena de lechada de cemento más b)
 - a) Un tubo común o vaina plástica con protección flexible contra la corrosión.
 - b) Un tubo común o vaina plástica sellada en sus extremidades
 - c) Un tubo común o vaina plástica rellena de lechada.
 - d) Un tubo común en acero relleno de lechada de cemento denso.

Para permitir el movimiento, durante la puesta en carga las vainas no deben estar selladas a la armadura o tener una superficie de contacto lubricada.

Empalme de la cabeza del anclaje y la zona libre:

Unir la vaina o tubo de la zona libre a la placa de apoyo o cabeza del anclaje; también se puede usar un manguito metálico o un tubo soldado a la placada de apoyo dejando una longitud de traslapo entre el manguito o el tubo y la vaina de la zona libre.

Empalme de la cabeza del anclaje y la zona libre:

Soldar un racor metálico o empalmar un tubo plástico rígido al tubo de la parte libre del tendón añadiendo una protección contra la corrosión de resina o cemento.

Cabeza del Anclaje:

Si la cabeza debe permitir la inspección o un cambio del recubrimiento, se pueden usar las siguientes protecciones:

- Capa anticorrosiva no fluida.
- Combinación de un producto anticorrosivo y una banda impregnada del mismo.

Cuando es necesaria una inspección, se instalará una tapa metálica o de plástico con un producto anticorrosivo.

Cabeza del Anclaje:

Tapa metálica pintada y/o galvanizada con espesor de 3 mm o de plástico rígido de 5 mm de espesor unido a la placa de apoyo. Si es movable se rellena con un producto flexible contra la corrosión y una junta de estanqueidad, en caso que no lo sea se puede inyectar con cemento o resina

7. CONSTRUCCIÓN

7.1. Fabricación

Todos los reportes del material del tendón deben estar disponibles en obra todo el tiempo para la supervisión del ingeniero. Los anclajes podrán comprarse o fabricarse en obra siempre y cuando cumplan con los planos y con personal idóneo para la realización de las tareas.

Cuando se necesite cortar el acero de pre-tensado se realizará con una sierra abrasiva, con un soplete de oxiacetileno o se indicará con anterioridad al proveedor¹⁴.

Toda la longitud de bulbo del tendón debe estar libre de suciedad, grasas provenientes de su producción, o cualquier otra sustancia que pueda afectar la iteración lechada-tendón o su vida de servicio.

Cuando el encapsulamiento del tendón debe ser inyectado, se debe hacer sobre un marco rígido e inclinado desde la parte inferior del mismo. El tipo de lechada utilizada para este proceso debe ser bastante fluida y estable con el fin de evitar segregación y con una resistencia adecuada que permita transferir las cargas aplicadas.

7.2. Perforación.

Cuando se encuentren agujeros existentes se deben tener limitaciones de distancia con los que serán perforados a fin de evitar que el agua de la perforación entre en contacto con la lechada fresca.

Los tubos de revestimiento (casing) serán del tipo y tamaño necesario para permitir la perforación de los huecos para el anclaje y la colocación del mismo de manera apropiada. Su uso ayuda a mantener el eje limpio y abierto, y así evitar el lavado de finos. Normalmente se utiliza en suelos inestables y debe avanzar con un perforador rotativo.

El método de perforación o cualquier otro método alternativo utilizado deben ser aprobado por el ingeniero encargado y seleccionado según las condiciones del suelo de modo que se provoque una modificación mínima o una mejora en su capacidad de anclado.

Esta modificación deberá limitarse a fin de reducir efectos negativos, como la apertura de grietas, pre-consolidación y post-consolidación asociadas a la operación. Se recomienda establecer un perfil del terreno que se está perforando mediante datos como la clase de terreno, el color o la pérdida del fluido de retorno.

Los agujeros deberán ser perforados en la ubicación, inclinación, profundidad y diámetro determinados por el diseñador, perforando siempre con el eje longitudinal del taladro paralelo al eje longitudinal del tendón. En lo posible evitar la perforación en un radio de 15 m de un agujero recién inyectado. Estas dos operaciones no deben hacerse al mismo tiempo.

Los agujeros deberán ser perforados 1 metro más allá de la longitud de bulbo y si van a durar más de 10 días en esas condiciones proveer un tapón temporal.

¹⁴ USACE. Op. cit., p.51.

7.2.1. Perforación a través de estructuras existentes.

La perforación deberá hacerse con un equipo de núcleo o cualquier otro método que no cause daños a la estructura circundante. Se debe tener presente cualquier material extraño que se pueda encontrar durante la perforación.

7.2.2. Perforación en suelo.

Los agujeros en suelo pueden ser perforados con un perforador rotativo, o de percusión rotatoria, o una unidad vibratoria del casing. Si es necesario el uso del casing, este deberá retirarse antes o durante la inyección de lechada.

Cuando el suelo es susceptible de formar cavidades, los agujeros a través del suelo serán perforados por el método dúplex mediante un casing interior y otro exterior con retorno del flujo de agua entre los casing.

7.2.3. Perforación en roca.

Los agujeros en roca pueden ser perforados por un perforador rotativo, de núcleo, de percusión o un martillo de fondo.

El método de perforación no puede causar daño en las estructuras existentes; si esto se presenta se recomienda la perforación de núcleo. Estos agujeros pueden requerir una re-perforación con una broca tipo tricono con el fin de hacer rugoso el perímetro y permitir una correcta unión de la lechada.

Los núcleos obtenidos por la perforación se deben conservar hasta que el contrato finalice. Si se perfora más de lo establecido se debe extender la protección contra la corrosión en la longitud libre dentro de la trompeta y de modo que permita el tensionamiento del anclaje.

7.2.4. Alineamientos.

7.2.4.1. Tolerancias.

Los agujeros deberán localizarse con una desviación de 300 mm e inclinación de 3° respecto a los planos¹⁵. Si estos requisitos no se cumplen, el agujero deberá ser inyectado con lechada de cemento o arena en su totalidad y perforar un agujero adyacente.

7.2.4.2. Verificación de la Alineación.

Esta verificación se hará cuando el alineamiento es crítico para el diseño de la estructura; por ejemplo: cuando los anclajes se pueden cortar entre sí o donde el propósito de los anclajes es anular la resistencia.

Este proceso debe realizarse cuando se termine la perforación y antes de iniciar la inserción del anclaje. La inclinación debe verificarse cada 3 metros a lo largo del agujero midiéndola en la línea central del agujero.

Todos los equipos utilizados para revisar el alineamiento de los agujeros deberán ser operados por personal con experiencia en la manipulación de estos equipos.

¹⁵ USACE. Op. cit., p.31.

7.2.4.3. Equipo de verificación.

Puede ser utilizado por un instrumento de inspección magnético o cualquier equipo semejante. La cámara y la plomada se seleccionan teniendo en cuenta la desviación máxima permitida. Si se cree que el metal incrustado puede tener efectos sobre la brújula magnética; se procederá a usar un girocompás propio para el agujero.

7.2.5. Prueba de permeabilidad.

Este tipo de pruebas se hará cuando se presenten las siguientes condiciones:

- La formación rocosa presenta fracturas que generar una pérdida de lechada alrededor del acero.
- Existe flujo artesiano o filtración de agua donde se encuentra la roca.
- Interconexión entre agujeros de perforación existente.

Si la roca se encuentra muy fracturada, lo ideal es que antes del ensayo se realice una pre-inyección de lechada y una re-perforación.

La impermeabilización evita la pérdida de lechada en la zona rocosa, previene la dilución de lechada antes de cementarse y la corrosión del tendón. Para este tipo de ensayos se utilizará un obturador cuando se necesiten facilitar los ensayos de presión en la zona de bulbo. Si la pérdida de agua es de 9.5 litros en 10 minutos aproximadamente, deberán ser impermeabilizados.

7.2.6. Impermeabilización de agujeros.

Si la cantidad de lechada que se debe aplicar es excesiva, se recomienda el uso de una lechada de cemento con arena.

Los agujeros cementados deberán ser re-perforados mientras que la resistencia se considere menor a la de la roca circundante, pero en un tiempo no menor a 24 horas después de la inyección de la lechada.

7.2.6.1. Lechada de cemento con arena.

Este tipo de lechada está compuesta por una mezcla de cemento portland, agregado fino (arena) y agua. La proporción de estos materiales será de una parte de cemento portland y dos partes de agregado fino, mezclada con la cantidad de agua mínima necesaria, la cual permita una consistencia uniforme¹⁶.

7.3. Instalación

Los agujeros en roca y los casing deberán limpiarse con aire presurizado y/o agua para eliminar residuos de perforación y el barro.

Todo el equipo utilizado para la manipulación y la inserción del anclaje deberá ser tal que no dañe el tendón del anclaje y su protección contra la corrosión. Los tubos de inyección se deberán lavar con agua o aire comprimido para asegurar que están limpios.

¹⁶ USACE. Op. cit., p. 26

7.3.1. Inserción del Anclaje.

Todos los anclajes deberán ser inspeccionados antes de su inserción y si se presenta algún daño en la protección contra la corrosión deberá repararse antes de su instalación. Cuando se estén instalando varios filamentos debe tenerse un mayor cuidado con el recubrimiento de los mismos, ya que el peso de los mismo puede dificultar el proceso de instalación.

Se recomienda llevar un registro donde se especifique el tipo de anclaje, longitud, ubicación y fecha de instalación, al igual que el ingeniero encargado debe inspeccionar su instalación en las siguientes etapas:

1. Fin de la perforación
2. La inserción del tendón.
3. La Inyección de la Lechada.
4. Finalización de la instalación.

El anclaje se insertará 24 horas después de finalizar la perforación, y a una velocidad controlada para evitar daños al mismo y que cualquier movimiento puedan afectarlo.

Se debe insertar hasta la profundidad requerida sin tener que forzar; si no se puede hacer completamente, retire el tendón y limpie o re-perfore si es necesario.

7.3.2. Inyección de lechada.

La inyección se debe realizar desde la parte más baja, antes o después de insertar el tendón controlando las presiones para evitar un agitado excesivo o fractura, a una velocidad baja y constante hasta que la lechada de la misma composición sea totalmente inyectada. Si el tubo de inyección de lechada se va a dejar dentro del anclaje se debe llenar completamente y esperar un mínimo de 3 días antes de tensionar.

Se recomienda no mantener por más de 30¹⁷ minutos la lechada de inyección en la mezcladora y asegurar que la presión de inyección en la longitud de bulbo permitirá la unión entre la lechada y el tendón.

Si la inyección se realiza en una sola etapa, se debe usar antiadherente en la zona libre de tendón para evitar que la adherencia entre la lechada y el tendón en la zona de pre-esfuerzo. Si se realiza en dos etapas debe realizarse después que el anclaje es tensado.

7.3.2.1. Inyección de los anclajes en roca.

Los anclajes en roca son inyectados en la mayoría de los casos por gravedad; sin embargo la inyección a presión puede usarse para incrementar la interacción entre la roca y la lechada en la zona de bulbo o proporcionar una cortina de lechada y así evitar el flujo a través de la roca.

Todos los anclajes se inyectarán en una sola etapa y comenzará desde el fondo de la zona de lechada hasta la parte superior de la misma.

¹⁷ PTI. Op. Cit., p59

7.3.2.2. Inyección de los anclajes en suelo.

Los anclajes en suelos cohesivos deberán tener mayor resistencia en la zona de bulbo cuando son inyectados a presión. Los procedimientos escogidos para la inyección de la lechada dependen significativamente de las condiciones del suelo; ya que deben permitir que se desarrolle la capacidad de diseño.

En la zona de bulbo la colocación de la lechada deberá hacerse de modo tal que se eviten los vacíos. Se recomienda que la inyección se realice dentro de las 48 horas después a la perforación.

- Inyección por gravedad: Se hará desde el fondo del agujero hasta la parte superior del mismo, o hasta la zona de bulbo.
- Inyección a presión: Tanto la presión de inyección como la velocidad de las bombas deberá ser controlada para evitar un levantamiento o fractura del suelo y deberá incrementarse hasta que sea bombeada una cantidad aceptable.

La bomba debe estar equipada con un manómetro capaz de medir hasta el doble de la presión de inyección. La lechada debe estar bien mezclada, libre de grumos u otros indicios de hidratación anticipada y se debe agitar continuamente y colocar en una operación continua.

- Post-inyección: Consiste en una inyección adicional después que se ha cementado la lechada en la zona del bulbo; con el fin de incrementar su capacidad. En algunas condiciones se pueden considerar 3 etapas de post-inyección; pero serán determinadas por el diseñador.

La presión de inyección y la velocidad de la bomba deberán ser controladas.

7.3.3. Montaje de la cabeza del anclaje.

La cabeza del anclaje, o la tuerca, y la placa de soporte deberán instalarse perpendicularmente al tendón, centrado y sin doblar el acero de tensión. Se recomienda que la ubicación de la cabeza del anclaje presente una desviación de $\pm 3^\circ$ ⁽¹⁸⁾. Cualquier fuga en el orificio del anclaje o en la cabeza del mismo deberá ser sellada según el método aprobado.

7.4. Tensado del Anclaje.

Una vez la zona de bulbo ha alcanzado la resistencia necesaria, el anclaje deberá tensarse. Antes de proceder, la superficie sobre la que se apoyará el quipo debe estar limpia y el equipo alineado con el centro del agujero. Antes de instalar los medidores de carga se debe aplicar una carga de alineación, correspondiente al 10% de la carga de diseño.

¹⁸ USACE. Op. cit., p.36.

La carga de diseño y la de bloqueo deben especificarse en los planos. La tensión nunca debe superar el 80% de la resistencia última del acero y se aplicará de modo que la elongación que sufre el acero del anclaje pueda ser medida y comparada con los cálculos realizados.

Todos los elementos deben ser tensados simultáneamente y evitar que se realicen trabajos delante o detrás durante el proceso de tensado. En ningún momento se podrá desconectar el equipo durante el tensado.

7.4.1. Carga de Bloqueo.

La carga de bloqueo deberá ser una función de la estructura tolerar o anticipar movimientos que puedan causar cambios de carga en el tendón. Normalmente la carga de bloqueo es igual o ligeramente mayor a la carga de diseño.

8. CONTROL DE CALIDAD

El diseño, fabricación e instalación del anclaje deben ser realizados por ingenieros y personal que cuente con la experiencia necesaria en la realización de proyectos similares; al igual que los planos y los cálculos deben estar firmados por un ingeniero profesional. Estas características permiten en cierto modo asegurar el éxito de los trabajos.

Los anclajes deberán ser instalados de modo que la carga residual en el tendón pueda ser controlada y que no se presente sobrecarga o daños en el anclaje.

Durante el tensado de los anclajes se llevará un registro del manómetro y de la elongación del anclaje en cada etapa de tensado o la carga de bloqueo. El ensayo de carga no debe ser excesivo

El contratista debe inspeccionar el tapón del anclaje, la tapa de protección, la cabeza y su protección contra la corrosión y presentar un informe con las observaciones de cada uno. Así mismo se inspeccionará la grasa de la cabeza del anclaje.

Cada anclaje se ensayará de acuerdo con los procedimientos de la prueba de fluencia o desempeño. Si el anclaje se instala en suelo muy susceptible a una fluencia, los procedimientos de la prueba de desempeño deberán ampliarse de acuerdo con la sección 8.1.4.

8.1. Pruebas del Anclaje.

Este tipo de ensayos puede llevarse a cabo en anclajes que construidos bajo condiciones idénticas a los anclajes de trabajo y cargados de la misma manera. Estas pruebas indican los resultados que se deben obtener en campo.

Cuando las pruebas de idoneidad se llevan a cabo en los anclajes de campo, se deben realizar a todos los que se instalen permitiendo demostrar la capacidad a corto plazo del anclaje de soportar cargas mayores a la carga de diseño y la eficiencia de transmisión de carga a la zona de bulbo. Un análisis adecuado de las pruebas a corto plazo permite una guía para el comportamiento a largo plazo.

Estas pruebas se realizarán una vez la lechada alcance su resistencia y se utilizará una celda para medir la carga y relojes de comparación para medir los desplazamientos.

8.1.1. Prueba de pre-producción.

Se basaran en los alineamientos de la prueba de desempeño; pero con detalles más rigurosos. Por el costo y el tiempo solo se realizan en circunstancias extraordinarias y la cantidad puede varias según el tamaño del proyecto y los anclajes que se instalarán.

Con estos ensayos se demuestra o investiga, antes de la instalación del anclaje, la calidad y la adecuación de los diseños, materiales y métodos constructivos.

8.1.2. Prueba de desempeño

Esta prueba se realizará a los anclajes seleccionados y bajo condiciones y métodos similares a las previstas para el proyecto.

La PTI recomienda realizar estos ensayos a los 2 o 3 anclajes producidos inicialmente y como mínimo al 2% de los anclajes que se ejecuten después.

Con este tipo de pruebas se determina si el anclaje tiene la suficiente capacidad de carga, si la longitud libre del tendón tiene suficiente estabilidad, la magnitud del movimiento residual y si la tasa de fluencia se encuentra dentro de los límites.

La realización de la prueba debe realizarse como se indica en la tabla 5. Cargando y descargando cíclica e incrementalmente el anclaje. La carga debe retornar a la carga de alineamiento (Al) después de cada ciclo de carga y en cada incremento de carga registrar el movimiento de la cabeza con aproximación de 0.03 mm (1 pulgada) respecto a un punto fijo de referencia y durante un tiempo suficiente que permita obtener está lectura pero sin excederse de 1 minuto.

Cuando se aplique la Carga de Prueba (1.33 DL, la cual podrá aumentarse siempre y cuando no aumente en más del 80% Fu y el punto de referencia no pueda estabilizarse prácticamente) se registrará el movimiento a los 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 10 minutos después de alcanzar la carga de ensayo. Si durante este tiempo el desplazamiento excede 1 mm (0.040 pulgadas), la carga deberá mantenerse por 50 minutos adicionales y registrar el movimiento los 20, 30, 40, 50 y 60 minutos. No se debe permitir que la carga en el anclaje cambie la presión de ensayo en más de 0.35 Mpa (50 Psi).

Es importante tener en cuenta que la lectura se registrará antes de alcanzar la Carga de Prueba en cada intervalo y esta última no podrá excederse en el periodo de observaciones.

Las figuras 3.a. y 3.b. son un ejemplo claro de cómo deben graficarse los resultados obtenidos. La primera figura relaciona el movimiento total en función de la carga y la segunda se deriva de la Figura 3.a mostrando el movimiento residual y elástico para la carga máxima que se alcanza en cada ciclo.

El análisis del movimiento elástico permite calcular la longitud libre aparente del tendón, en cada carga máxima con la siguiente relación:

$$\text{Longitud Libre aparente del tendón: } \frac{A_t \cdot E_s \cdot \delta_e}{P}$$

Donde;

At: Sección transversal del tendón.

Es: Modulo de elasticidad para el acero de pre-esfuerzo

δ_e : Movimiento elástico (Movimiento total del anclaje menos el movimiento residual subsiguiente para AL)

P: TL-AL

Tabla 5. Etapas del ensayo de desempeño

Carga	Mov. total en el ciclo Max de carga δ_t	Mov. Residual después del ciclo máximo. δ_r	Mov. Elástico en el Ciclo de carga Max. δ_e
AL 0.25 DL	δ_{t1}		$\delta_{t1} - \delta_{r1} = \delta_{e1}$
AL 0.25DL		δ_{r1}	
0.50DL	δ_{t2}		$\delta_{t2} - \delta_{r2} = \delta_{e2}$
AL 0.25 DL		δ_{r2}	
0.50 DL			
0.75 DL	δ_{t3}		$\delta_{t3} - \delta_{r3} = \delta_{e3}$
AL 0.25 DL		δ_{r3}	
0.50 DL			
0.75 DL			
1.00 DL	δ_{t4}		$\delta_{t4} - \delta_{r4} = \delta_{e4}$
AL 0.25 DL		δ_{r4}	
0.50 DL			
0.75 DL			
1.00 DL			
1.20 DL	δ_{t5}		$\delta_{t5} - \delta_{r5} = \delta_{e5}$
AL 0.25 DL		δ_{r5}	
0.50 DL			
0.75 DL			
1.00 DL			
1.20 DL			
1.33 DL	δ_{t6} Carga de prueba (Lectura de cero para ensayo de fluencia)		$\delta_{t6} - \delta_{r6} = \delta_{e6}$
	δ_{tn} mantener la carga final para lectura.		
AL Ajusta la carga de Bloqueo.		δ_{r6}	

Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor. USA: ADSC, 2004. p71 (PTI-DC 35).



Figura 3.a. Datos obtenidos en el ensayo de desempeño. Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor. USA: ADSC, 2004. p73 (PTI-DC 35)

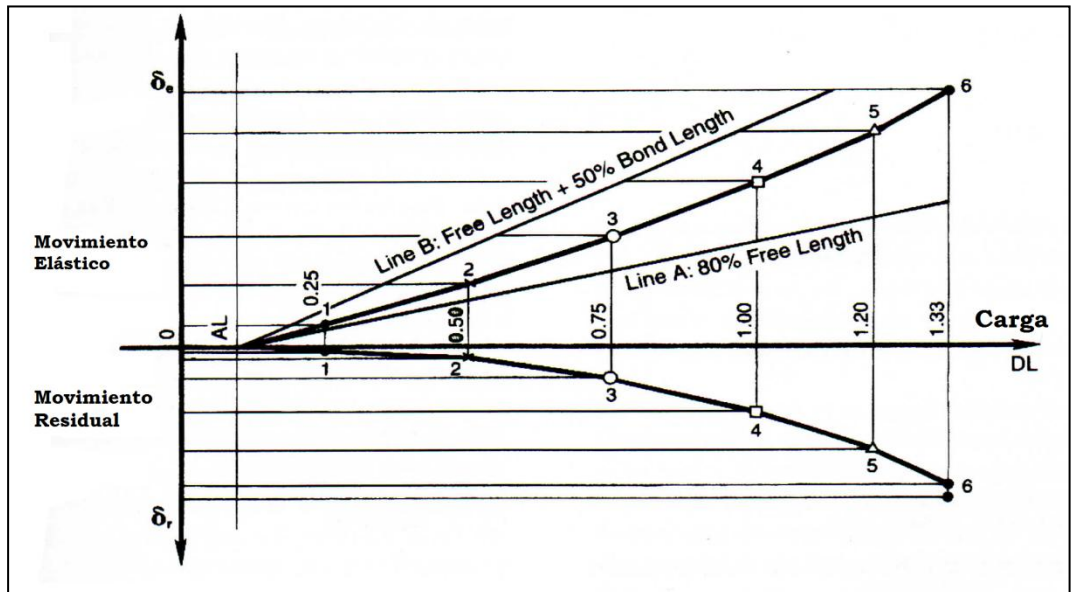


Figura 3.b. Análisis de los datos del ensayo de desempeño. Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor. USA: ADSC, 2004. p73 (PTI-DC 35)

La longitud libre aparente del tendón es la longitud equivalente del tendón que con la carga total menos la carga de alineamiento presenta la misma elongación que la medida en el ensayo. En la figura 4, el área bajo la curva (carga Vs profundidad) dividida entre $A_t \cdot E_s$ es igual al movimiento elástico del anclaje. La longitud libre aparente del tendón es un indicador útil de transferencia de carga a lo largo de la longitud de bulbo

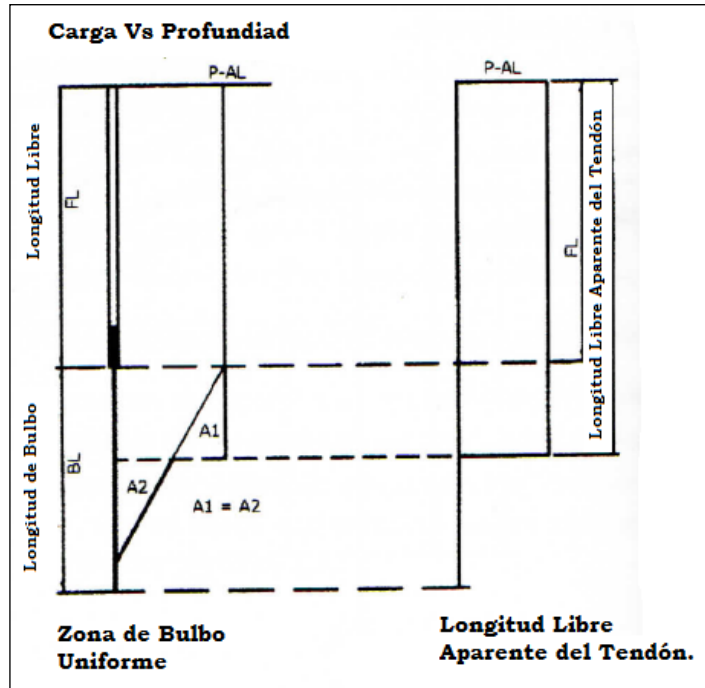


Figura 4. Longitud Libre Aparente del Tendón. Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor. USA: ADSC, 2004. p74 (PTI-DC 35)

8.1.3. Prueba de Comprobación.

Estas pruebas serán aplicadas a aquellos anclajes que no recibieron prueba de desempeño. Con este ensayo se determina rápida y económicamente si el anclaje tiene la suficiente capacidad de carga, si la longitud aparente del tendón tiene suficiente estabilidad y si la tasa de fluencia se estabiliza en los límites especificados.

El ensayo debe llevarse a cabo por incremento de carga, como se muestra en la Tabla 6, manteniendo la carga de ensayo constante por 10 minutos y registrando el movimiento en el minuto 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 10. Si la fluencia del movimiento excede 1 mm (0.040 pulgada) entre el minuto 1 y 10, la carga deberá mantenerse por 50 minutos adicionales y registrar el movimiento a los 20, 30, 40, 50 y 60 minutos. En estos periodos de observación la carga de prueba no podrá excederse.

Las figuras 5.a y 5.b son un ejemplo claro de cómo deben graficarse los resultados obtenidos. Cuando estos resultados no se pueden comparar con los del ensayo de desempeño directamente, el anclaje deberá regresarse a AL después de haber mantenido por 10 minutos la carga de prueba y llevarse de

nuevo a la carga de bloqueo (lock-off). Esto permitirá la determinación del movimiento residual, y de esta manera calcular el movimiento elástico con la Carga de Ensayo.

Tabla 6. Etapas del ensayo de comprobación

AL
0.25 DL
0.50 DL
0.75 DL
1.00 DL
1.20 DL
1.33DL (Carga de Prueba) –Mantenerse por 10 minutos.
AL (opcional)
Ajusta la carga de bloqueo.

Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor.USA: ADSC, 2004. p75 (PTI-DC 35).

8.1.4. Ensayo complementario de Fluencia.

Deben hacerse al menos en dos (2) anclajes permanentes que se encuentren en suelos con índice de plasticidad mayor a 20¹⁹ y normalmente para anclajes en roca no se realiza este tipo de pruebas a menos que se presenten movimientos dependientes o estén instalados en roca descompuesta o arcillosa.

Este ensayo se realizará por carga y descarga cíclica e incrementalmente y mantenerse constante como se especifica en la Tabla 7.

Tabla 7. Etapas del ensayo de complementario de fluencia

Carga	Periodo de Observación (minutos)
AL	10
0.25 DL	10
0.50 DL	30
0.75 DL	30
1.0 DL	45
1.2 DL	60
1.33 DL	300

Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor.USA: ADSC, 2004. p77 (PTI-DC 35).

Siempre y cuando sea apropiad se tomar lecturas del movimiento por fluencia a los 1, 2, 3, 5, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90, 100, 120, 150, 180, 210, 240, 270 y 300 minutos.

¹⁹ PTI. Op. Cit., p77.

Durante los periodos en que se mantenga la carga, la desviación de la carga no deberá ser mayor al 0.25% de la carga y si excede de 2 mm la tasa de fluencia se debe extender el periodo de observación hasta que este valor disminuya a 2 mm.

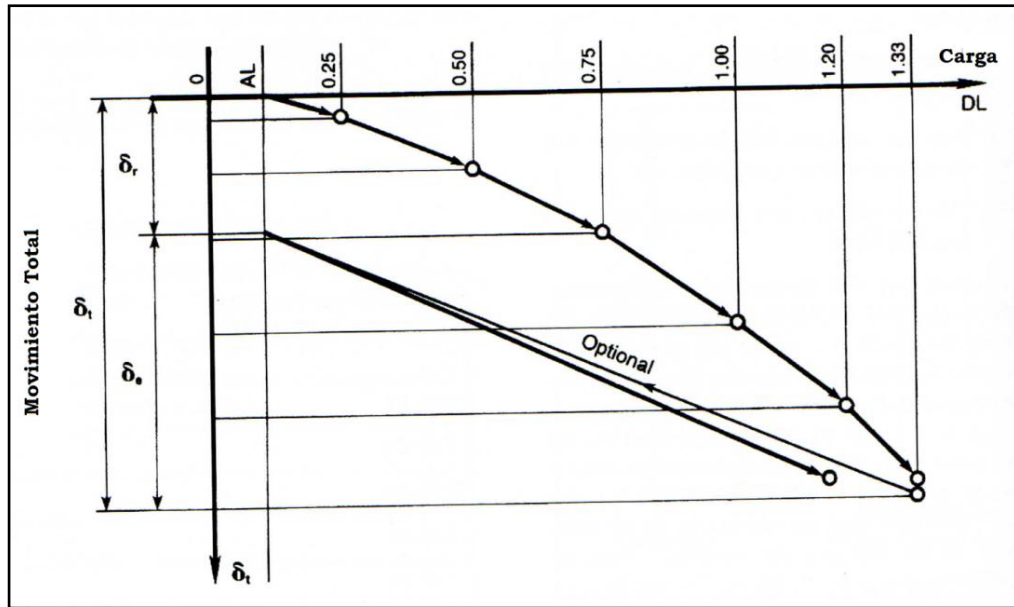


Figura 5.a. Datos obtenidos en el ensayo de comprobación. Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor. USA: ADSC, 2004. p76 (PTI-DC 35)

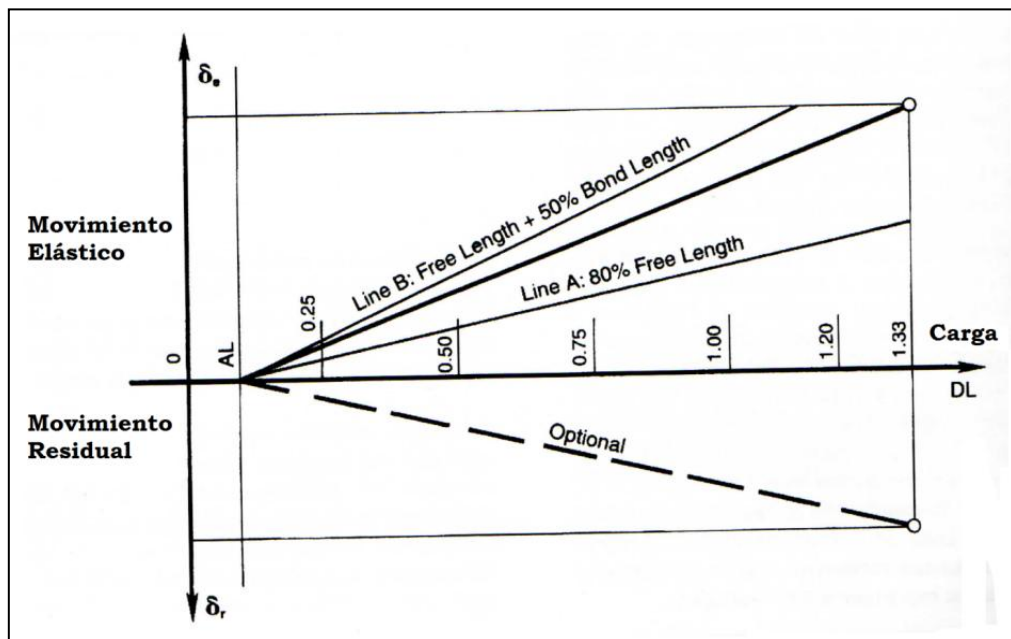


Figura 5.b. Análisis de los datos del ensayo de comprobación. Tomado de: PTI. Recommendations for prestressed rock and soil Anchor. USA: ADSC, 2004. p76 (PTI-DC 35)

8.2. Bloqueo del Anclaje.

Una vez finalizado los ensayos y el anclaje se retorne a la carga de alineamiento (AL) se debe transferir al tendón la carga de bloqueo y la carga lift-off. Esta última después de ubicar las cuñas.

La magnitud de la carga de bloqueo debe ser especificada por el ingeniero sin exceder el 70% Fu. Las cuñas debe bloquearse con una carga mínima del 50% Fu que evita un deslizamiento de las barras a través de estas, si esta carga es menor deberán usarse bajo la placa y asentarse con el 50% de Fu. Fijar las cuñas fuertemente no evita deslizamientos de las barras.

El procedimiento consiste básicamente en llevar el tendón a la carga de bloqueo estipulada y antes de bloquear extender el pistón del gato rápidamente por una longitud equivalente y así adelantarse a la perdidas.

8.3. Carga Lift-Off

Después de transferir la carga de bloqueo al anclaje y antes de remover el gato, se debe aplicar una carga Lift-Off; con la cual se verifica la magnitud de la carga del tendón.

Al aplicar la carga del tendón nuevamente las cuñas o la tuerca del tendón no deben elevarse o girarse respectivamente. Si la lectura Lift-Off supera el 5% de la carga de bloqueo se debe reajustar y realizar nuevamente esta lectura.

Es importante tener en cuenta que cuando el anclaje es de múltiples filamentos las cuñas pueden soltarse durante el ensayo Lift-Off debido a la desigualdad de las cargas.

8.4. Registros de Perforación.

Estos registros de perforación permiten verificar las hipótesis de diseño y documentar las condiciones encontradas. Dependiendo del tipo de perforación que se haga (Suelo, roca u obtención de núcleos) la información será editada y se llevarán los registros. Los cuales deben mantenerse exactos, en buenas condiciones, en orden y con copias legibles para suministrar al contratista en cualquier momento.

Los registros deben estar separados para cada agujero y contener como mínimo la siguiente información:

1. Designación del agujero y elevación
2. Inclinación
3. Marca y modelo de los equipos de perforación.
4. Fecha y hora de la iniciación de las operaciones.
5. Tiempo requerido para cada agujero.
6. Profundidad a la que se recupero el núcleo.
7. Clasificación o descripción estratigráfica de las profundidades, realizada inmediatamente se tome el núcleo.
8. Profundidad y elevación de cualquier incidencia inusual.
9. Nivel del agua subterránea.

8.5. Registros del Anclaje.

Terminada la instalación del anclaje se debe entregar al contratista los resultados de los ensayos aplicados al anclaje, los de permeabilidad y las medidas correctivas, si fueron

necesarias, que se aplicaron. Al igual se entregará un informe donde se especifique la elevación y la longitud de la zona de bulbo y de la zona de tensado, la mezcla de lechada, la presión de inyección, la cantidad de bolsas de cemento utilizadas y el reporte de los ensayos aplicados según se indica en el formato PR05-IT01-F001.

Los resultados de los ensayos aplicados al anclaje deberán incluir las profundidades de los agujeros, la longitud total del anclaje, la carga y las elongaciones que se presentaron, con graficas de resultados e interpretación de los mismos.

También se deben presentar los planos de construcción donde se muestre la instalación del anclaje.

9. ACEPTACIÓN.

La aceptación del anclaje será determinada por el ingeniero encargado quien determinará la aceptación o no del anclaje teniendo en cuenta los siguientes criterios:

Fluencia: No deberá exceder en 1 mm entre el minuto 1 y el 10. Si supera este límite, se aplica el ensayo por 60 minutos adicionales y no deberá superar los 2 mm. Si el deslizamiento supera los 2 mm en los 60 minutos, el anclaje deberá ser rechazado.

Longitud libre mínima aparente: Se calcula con el fin de verificar que la carga del anclaje se transfiere sin ninguna falla y en base al movimiento elástico. Esta longitud no deberá ser menor al 80% de la longitud libre establecida más la longitud del cable necesaria para atravesar el gato de tensionamiento. Si no se cumple este criterio se aplica de nuevo la carga de alineamiento y se calcula de nuevo. Si después de 3 intentos no cumple se deberá:

- a) Investigar la causa de la ineficiencia en la carga de transferencia, o
- b) Rechazarse.

Este aumento puede presentarse cuando movimientos causados por la redistribución de la fricción en la longitud libre genera un movimiento estructural inaceptable. También puede presentarse cuando se transfiere un valor significativo de carga a la “zona de no carga” a lo largo de la longitud libre.

La “zona de no carga” es la parte del suelo o la estructura entre la cabeza del anclaje y la zona de bulbo donde estará anclado y los movimientos son inaceptables.

Longitud libre máxima aparente: La longitud libre calculada no deberá exceder el 100% de la longitud libre designada del tendón más el 50% de la longitud de bulbo, más el 50% de la longitud del cable que se necesita para atravesar el gato de tensionamiento. Si el anclaje no cumple este criterio y no se puede explicar la causa, se debe rechazar.

Longitud Lift-Off: Deberá estar entre el 5% de la carga de bloqueo de diseño. Si no se cumple, entonces la carga del tendón deberá ajustarse adecuadamente y repetirse la lectura Lift-off.

9.1. Reemplazo de los anclajes rechazados.

Cualquier anclaje que falle en los criterios de aceptación o si es rechazado por el contratista deberá ser reemplazado y no se pagará ningún costo asociado con la instalación del anclaje adicional, ni por retirarlo del lugar ni por dejar el agujero limpio.

Ninguna perforación para los anclajes de remplazo se llevará a cabo hasta que la lechada de los anclajes ubicados en un radio de 15 m este totalmente cementada.

10. FINALIZACIÓN DE LOS TRABAJOS.

10.1. Corte de la Longitud de tensado.

Una vez se apliquen las pruebas, se tense en anclaje y se realice la prueba Lift-Off se corta la longitud de tensado con discos abrasivos o sierra. La PTI recomienda dejar al menos 13 mm (0.5 Pulgadas) por encima de las cuñas o la tuerca del anclaje; pero si el anclaje requiere ser re-tensado se debe dejar una longitud mayor.

10.2. Monitoreo durante el tiempo de servicio.

Es apropiado monitorear la estructura del anclaje durante y después de la construcción, en esta última etapa permite determinar si el anclaje ha mantenido la carga y/o ha sufrido daños de corrosión. Esto puede hacerse midiendo las cargas en el anclaje usando celdas de carga, aplicando la prueba Lift-Off o midiendo el desempeño de la estructura o la excavación.

Es responsabilidad del diseñador definir el programa de monitoreo, a que anclajes se aplicará, la frecuencia y los procedimientos de notificación. Así mismo determinará la pérdida o ganancia de carga mínima aceptable durante la vida de servicio del anclaje.

Esta observación es importante ya que permite determinar las causas de los cambios de carga y si es necesario tomar medidas correctivas.

La PTI recomienda iniciar las observaciones en intervalos cortos de 1 a 3 meses seguidos con intervalos posteriores que no superen los 2 años y dependiendo del proyecto entre el 3 y el 10% de los anclajes producidos.

El monitoreo se realiza mediante celdas de carga ya que son mas exactas que otros sistemas de medición (medidores de deformación)

11. REFERENCIAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for aggregate for masonry mortar. United States: ASTM, 2011. 2p. (ASTM C 144-11)
2. CAWANGAN, Kejuruteraan Cerun. Section 6: Specification for ground anchor. 22p.
3. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Lechada para ductos de concreto preesforzado. Bogotá: INVIAS, 2007. 16p. (Artículo 631)
4. POST-TENSIONING INSTITUTE. Recommendations for prestressed rock and soil anchors. U.S.A: ADSC, 2004. 98p (PTI-DC 35)
5. UNE. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales: Anclajes. Madrid- España: AENOR, 2001. 68p. (UNE- EN 1537)

6. USACE, et al. Unified facilities guide specifications: Division 31-Earthwork: 31 68 13 soil and rock anchors. 2006. 41p.
7. U.S department of transportation. Standard specification for construction of roads and bridges on federal highway projects. 716 p.
8. XANTHAKOS, Petros. Ground anchors and anchored structures. Washington, D.C: Wiley-Interscience. 1991. 680p.

ANEXO 9: Manual de procedimiento para ensayos de Lugeon

1. OBJETIVO

Definir una metodología para ejecutar el ensayo de permeabilidad de Lugeon y una descripción de los accesorios del obturador.

2. DEFINICIONES

- **Permeabilidad:** Un material es permeable cuando contiene huecos continuos por medio de los cuales puede fluir el agua y atravesar el material. Es importante tener en cuenta que casi todos los materiales son permeables; su única diferencia es que lo serán en diferente grado.

Este parámetro como tal, varía mucho dependiendo del tipo de suelo. A continuación se muestran algunos valores típicos para diferentes clases de suelos.

TIPO DE SUELO	PERMEABILIDAD (cm/sg)
Gravas	100 a 0.1
Arenas	0.1 a 10^{-3}
Limos, Arenas arcillosas	10^{-3} a 10^{-7}
Arcillas	10^{-7} a 10^{-9}

1 TABLA 1

3. DESCRIPCION GENERAL²

La prueba por Inyección o prueba de Lugeon, se realiza en pozos perforados con niveles estáticos debajo de la superficie. Mediante perforaciones por escalones (a diferentes profundidades), inyectando agua a una presión determinada, cuando esta se ha estabilizado, se debe registrar y será la presión resultante.

La perforación por escalones permite subir y bajar desde y hasta la presión máxima del ensayo. La inyección de la presión y su recuperación puede brindar información útil sobre el comportamiento de la roca y de sus fracturas, así como el consumo de la inyección.

4. MATERIALES

Línea de Inyección:

Obturador

Línea de Inyección de igual diámetro que la del Obturador. (d=3/4")

Accesorios para el acople de los elementos.

¹ SANZ LLANO, Juan .Mecánica de Suelos. Reunión de Ingenieros. Editores técnicos asociados S.A. Barcelona, 1975. Pag 81

² ROYLE Michael. Standard Operating Procedures for Borehole Packer Testing. Pag 4.

Manómetros: Dos, Calibrados previamente y no deben colocarse directamente en la manguera o tubería de desfogue de la bomba, ya que sufrirá un golpeteo por el funcionamiento irregular de los pistones de la bomba.

Mangueras de acople

Tanque de estabilización de flujo

Fuente de agua: Limpia y sin materiales de suspensión para evitar taponamientos.

Sonda de medición de niveles freáticos.

Inflado con Gas (Nitrógeno):

Botella de Gas

Válvula reguladora de Presión: Capaz de reducir la presión a la que viene envasado el gas a la presión de inflado del obturador. La válvula debe estar dotada de manómetros que permitan controlar la presión de inflado.

Manómetro (3000 Psi): En el caso que no se cuente con una válvula reguladora, que permitirá verificar la presión en la botella de gas.

Manómetro (1000 Psi): Con el fin de controlar la presión de inflado.

Accesorios: tees y válvulas para la línea de vaciado y llenado

Es indispensable que se espere un tiempo prudencial antes de retirar el obturador del pozo, con el fin de permitir que el gas salga completamente de la glándula y esta pueda moverse libremente.

5. METODOLOGIA

Para la realización del ensayo de permeabilidad en roca, es utilizado Fundamentalmente el Método de Lugeon; el cual consiste básicamente en aislar una sección del pozo e inyectarle, a la roca, agua bajo presión.

Se debe medir el caudal Inyectado a presión constante durante un periodo de tiempo entre los 5 a 10 minutos. Se repite la operación aumentando la presión en intervalos entre 2.5 y 5 kg/cm². No debe superar este último valor para evitar hidro-fracturación de la roca. También se deben realizar ensayos con presiones decrecientes y así poder efectuar un estudio cualitativo del ensayo mediante gráficos.

La unidad de Lugeon corresponde a la absorción de un Litro de agua por minuto, por metro de sondeo, con una inyección de presión de 10 gr/cm²

Preparación del Permeámetro:

El permeámetro utilizado para la realización de los ensayos es de marca Geopro, de doble glándula, de 76 mm de diámetro, apto para la obturación en sondeos perforador con diámetro HQ. Es recomendable revisar los núcleos recuperados durante el proceso de perforación con el fin de seleccionar una zona de ensayo apta y evitar que las glándulas puedan quedar atrapadas por algún derrumbe del pozo como consecuencia del ensayo.

Determinación de la Presión de Inyección

El inflado del Obturador a una presión indicada permite que se realice un sello adecuado. Cuando el obturador está inflado en el fondo del pozo, se debe tener en cuenta la presión Hidrostática; es decir la presión de la columna de agua que cubre el obturador.

$$^3 P_i = P_w + H_{wc} * 1.4 \text{ psi/m}$$

Donde

P_i = Presión de Inflado del Obturador

P_w = Presión de trabajo del Obturador

H_{wc} = Altura Vertical de la Columna de agua sobre el obturador.

Es decir; H_{wc} = (Profundidad Inicial de la cámara – Nivel Freático)

Es importante resaltar que cuando los niveles de agua están muy cerca o en la superficie, la columna de agua sobre la línea de inflado y en el pozo será prácticamente la misma, y por lo tanto la presión en la línea de inflado será extremadamente alta presentando un problema significativo en el uso del gas.

Determinación de las pérdidas de presión en la Inyección:

Una vez conocida la longitud de ensayo y las presiones, se puede determinar en superficie las pérdidas de cabeza hidráulica que se producirán al mantener los rangos de presión asignados. Esta determinación puede realizarse de dos formas y será aplicable cuando el sistema es con tubería de inyección. Para el sistema Wireline las pérdidas de presión por fricción son despreciables.

- *De forma teórica:* Inventariando la longitud de la tubería usada, el diámetro, el número y tipos de accesorios (codos, válvulas, etc.) y aplicando la fórmula de Hazen Williams o similares, teniendo en cuenta las longitudes equivalentes de los accesorios utilizados.

$$\text{Ecuación de Hazen William} \rightarrow h = 10.674 * \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} * L$$

$$\text{Ecuación de Darcy Weisbach} \rightarrow h = 0.0826 * f * \frac{Q^2}{D^5} * L$$

En el Anexo N° 1, Se establece como hallar estas pérdidas de presión, con la utilización de estas dos fórmulas.

Es importante resaltar que se pueden utilizar otras fórmulas para calcular estas pérdidas, simplemente deben tenerse en cuenta las pautas de aplicación de cada una de ellas.

- *Por medición directa:* Armar la línea de inyección con las longitudes que proporcionan las profundidades y con los diversos caudales, medir las pérdidas

³ ROYOLE, Michael. *Ibíd.*, P.8

que se producen, para poder realizar este proceso se deben instalar dos manómetros patronados, uno en cada extremo, de tal forma que se pueda registrar la caída de presión. Con estos datos se pueden elaborar las graficas que faciliten la determinación de las perdidas.

Procedimiento:

El procedimiento que se describe a continuación es aplicable tanto para sistemas "Wireline" como para sistemas con "Tubería de Inyección". En la figura 1 se puede apreciar claramente la diferencia entre los dos.

1. *Verificación del Sello:* La colocación de los empaques en la perforación, es muy delicada, por lo que se debe verificar la calidad del sello, inyectando agua y observando si se presenta alguna pérdida de la misma.

2. Longitudes

Longitud del tramo: L_T : Tramo medido desde el Suelo superior hasta el fondo del sondeo (obturador sencillo) o Intervalo de Prueba si se hace con obturador de doble glándula.

Altura de la instalación del manómetro: H_1 : Donde se realiza la lectura de Presión de inyección.

Altura del centro de gravedad del tramo ensayado: H_2 : $(d+(L_T/2))$

Altura del Nivel Freático: H_{nf}

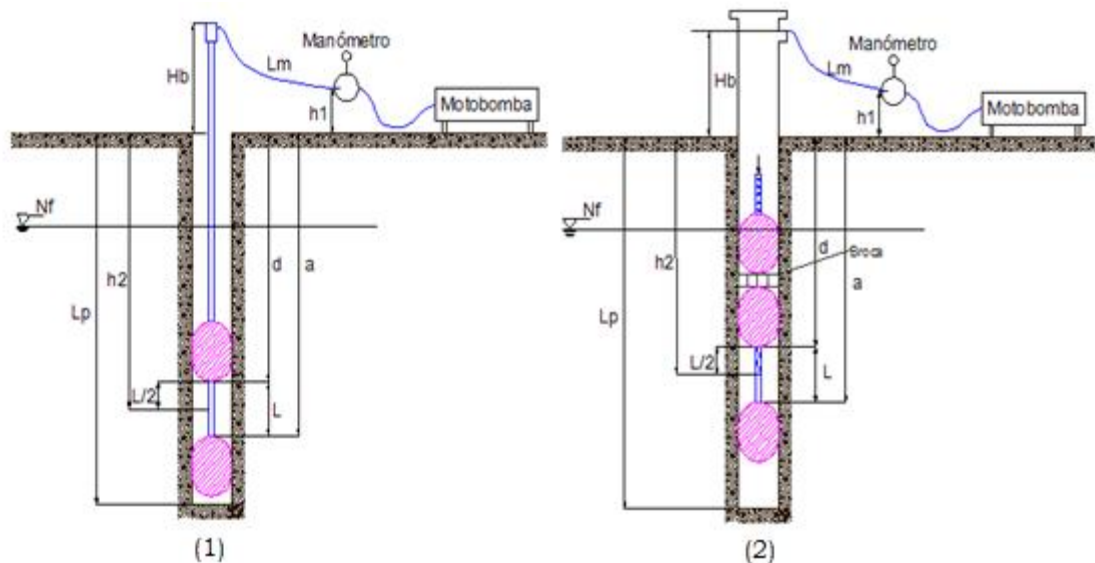


Figura 1. Esquema de un obturador doble en el sistema con tubería de inyección (1) y Wireline (2).

3. *Caudal:* Q ; Conocido el Volumen de agua de agua inyectada y el tiempo de inyección, es posible hallar este parámetro.

4. Realización de la Prueba:

Verificado el Sello y tomadas las longitudes mencionadas anteriormente, se procede a aplicar el primer incremento de presión de Inyección, se observa el

gasto correspondiente y se espera a que este se normalice. Se toman los valores, y se procede a registrarlos. Ver Anexo N°2

Este mismo proceso se repite hasta llegar a una presión máxima y se aplican, así mismo decrementos de presión. Con estos valores se pueden trazar graficas de Gasto-Presión y así observar ciertas particularidades de la prueba realizada.

5. Presión efectiva del tramo: $P = P1 + (P2 - P3)$
Donde: P1: Presión leída en el manómetro en superficie
P2: Presión Hidro-estática de la columna de agua⁴: $(H_1 + H_2)/10$
P3: Perdida de Presión por la Tubería (fricción)
6. Caudal Especifico: q , $q = Q/L_{\text{tramo}}^5$
7. Permeabilidad de Lugeon : **LUGEON⁶: (q*P)/10**

A continuación se indican unos apartes del documento de Michael Royle, que serán un complemento importante al momento de realizar el ensayo anteriormente mencionado.

Preparación del Ensayo:

1. Comprobar la línea de conexión de inflado de los obturadores y accesorios. Evite ajustar en exceso.
2. Verificación del Montaje: Inflar la glándula a la máxima presión de trabajo, usando un tramo de tubería de perforación o de revestimiento.
3. Revise los conectores de cable de la línea, del montaje del obturador y el prensaestopas.
4. Sistema de alimentación: compruebe el tanque, el suministro, la bomba, las mangueras de conexión, medidores de presión, válvulas y medidor de flujo.
5. Parámetros de la prueba: Verificar la longitud de la zona de prueba y la profundidad, la posición de los obturadores, la presión de inflado y presión de agua para las tres etapas de ensayo.
6. Preparación del Sondeo: Eliminar lodos de la perforación y los cortes lavando con agua.
7. Niveles de agua subterránea: Medir varias veces antes de instalar el sistema de obturación, para medir el nivel estático del agua.
8. Inflar lentamente el obturador (fracciones de 50psi) hasta que la presión de trabajo se alcance. (teniendo en cuenta la presión hidrostática)

⁴ Se divide en 10, para convertirlo más o menos en kg/cm^2

⁵ La longitud es la del tramo ensayado.

⁶ Expresado el q en lt/min y la longitud expresada en metros.

9. Presión en la línea de Inflado: Controlar durante 2 minutos como mínimo, para identificar alguna fuga del sistema. Si no hay escapes;
10. Selle la línea de inyección y conecte el sistema de agua de alimentación.
11. Si el agua fluye bajo condiciones artesianas, espere a que se normalice la presión y registre el valor.
12. En el momento de la estabilización de la presión, puede realizarse una parada en la prueba.
13. Parada en la prueba: Verificar las líneas de inflado y la presión para garantizar que no producen fugas, compruebe el sistema de alimentación, prepare el cronometro y el formato de la prueba.
14. Una vez realizados los anteriores pasos el sistema está listo para la prueba.

Procedimiento de Prueba Básico:

1. Abrir la válvula de agua y mantener la presión constante (puede tomar entre 10-15 minutos)
2. Durante el tiempo anteriormente indicado, medir el volumen de agua y registrar el tiempo cada minuto hasta completar el tiempo.
3. Después de estabilizada la Primera presión, se espera 3 minutos y se procede a aumentarla a la Segunda presión. Se registran los mismos valores que para la presión inicial (Caudal y Tiempo).
4. Una vez estabilizada la Segunda presión, en aproximadamente 3 minutos se pasa a la Tercera presión. Registrando los valores mencionados en el numeral anterior.
5. Se repite este mismo procedimiento hasta completar 5 mediciones de presión (aquí se incluyen las dos mediciones de descenso), o hasta que la capacidad de incremento del sistema de bombeo lo permita. El caudal de la bomba no debe superar el 80% de su máximo.
6. Prueba de Recuperación: Cerrar la válvula de alimentación y registre el descenso de la presión en función del tiempo. Realizar este procedimiento durante 10 o 15 minutos, o hasta que el 90% de la recuperación se haya producido.
7. Desinfle el Obturador
8. Espere a que todo el nitrógeno se escape de las glándulas, y adicional a esto, espere 5 minutos para sacar el conjunto. Teniendo cuidado para evitar que impacte la polea de lanzamiento.
9. Mida varias veces el nivel de las aguas subterráneas para evaluar la recuperación a varios niveles y determinar el nivel estático.

6. INTERPRETACION DE DATOS:

Los datos de Caudal vs Presión deben graficarse para cada etapa de presión. La forma de la curva, especialmente en el tramo de descenso de la presión, se utiliza para evaluar los resultados de la prueba. En la figura 2 se presentan unas curvas tipo de comportamiento, comúnmente observados. Es importante tener en cuenta que la curva de recuperación de presión es el segmento que se muestra discontinuo, de no presentarse indicaría que la curva de recuperación se confunde con la curva de presión ascendente mostrando comportamientos similares.

GRAFICA	OBSERVACIONES.
1	Flujo: Laminar. Resultado Ideal, Probablemente fracturas limpias y la descarga es proporcional a la carga de presión.
2	Material impermeable y fracturas apretadas.
3	Fracturas abiertas de gran tamaño, alta permeabilidad. La aceptación de agua supera la capacidad del sistema, y la presión se registra debido a la fricción en el sistema de suministro.
4	Flujo: Cambia de Laminar a Turbulento, generando una permeabilidad bastante alta y disminución del flujo con el tiempo; así como la obstrucción parcial de las fracturas con el tiempo.
5	Baja Permeabilidad, pero el lavado de la arcilla de las fracturas, incremento la permeabilidad.
6	Flujo: Laminar. Permeabilidad moderada, pero con un aumento del flujo con la presión. El aumento de presión trae el flujo de regreso a una relación lineal con la presión, indicando un aumento del flujo de fuga atrás del obturador.
7	Aumento de permeabilidad a medida que aumenta la presión, y la curva de recuperación presenta el mismo comportamiento. Indicando que las fracturas se han abierto debido al exceso de presión (Hidrofracturado)
8	Disminución progresiva de la permeabilidad con la presión, indicando bloqueo incompleto de las fracturas por el material.
9	Flujo: Turbulento a mas de 15 Bares, presentando similitud en las curvas de ascenso y descenso. Permeabilidad moderada. Caudal no lineal.

TABLA 2

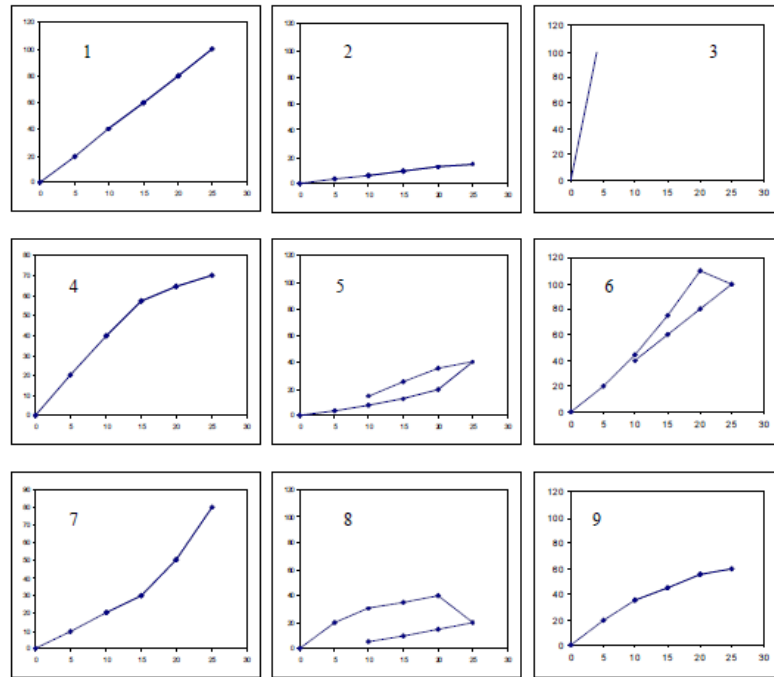


FIGURA 2. Tomado: Standard Operating Procedures for Borehole Packer Testing. Michael Royle.

7. ACCESORIOS DEL OBTURADOR

Se realizará una descripción breve de los accesorios de obturadores de pozos, con su respectiva imagen, para facilitar su visualización y comprensión de la función de cada uno de ellos. La cantidad de accesorios puede variar dependiendo si el sistema es Wireline o con tubería de inyección.

Reguladores de Inflado: Se utilizan para controlar la presión de inflado de los obturadores de pozo. Hay dos modelos disponibles: 0-350 psi y 0-1500 psi. Cada regulador incluye: Una conexión rápida (para conectar la línea de llenado de inflado) y el conector para la botella estándar de nitrógeno.



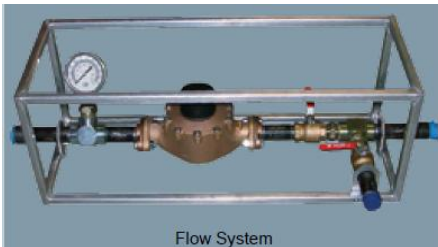
Prensaestopas: El prensaestopas proporciona un sello entre las barras de perforación y las líneas del Wireline y de llenado del obturador. Esto permite que el agua pueda ser bombeada, bajo presión, hacia abajo por las varillas de perforación.

Adaptadores de alimentación: Los adaptadores permiten llevar los cables de la instrumentación y de otros equipos a la zona por debajo del obturador.



Ganchos de Elevación: Los ganchos de elevación se utilizan para subir y bajar el obturador empleando el Wireline. Si ya hay disponible una unión giratoria para el Wireline, está disponible un juego del conjunto elevador modificado, roscado al conector de la unión giratoria.

Asiento de Cono: Es utilizado para asentar el conjunto del obturador en su lugar sobre la broca.



Sistema de llenado: Se utiliza para supervisar y controlar la cantidad de agua inyectada durante la prueba de fondo de pozo. Cada sistema incluye un contador de agua (medidor de flujo), manómetro, válvula de cierre, válvula de derivación, la manguera de conexión y el bastidor de aluminio

Carrete Portátil para la Línea de Inflado: Es un accesorio conveniente y fácil para controlar el inflado durante los ensayos y el almacenamiento. Cada bobina incluye una conexión rápida para conectar a un regulador de inflado y un conector para conectar la línea de inflado al obturador.



Sistema de Inflado del Obturador: Tiene todas las características de un regulador de inflado con la comodidad añadida de que todos los artículos necesarios están ensamblados en un estuche tipo "Pelicano" resistente a la intemperie. Un medidor de carátula grande permite un control más preciso de las presiones de inflado.

Obturadores de sondeos: Los obturadores son accionados neumáticamente o hidráulicamente e incorporan un cabezal que desliza y otro fijo unido a un eje central. Este cabezal deslizante permite que la glándula se retraiga sobre el eje central a medida que se infla.

Las cabezas de los obturadores se construyen ya sea de acero cromado o aluminio, mientras que el eje es de acero inoxidable pulido o de aluminio. La glándula consta de una membrana de caucho reforzado ya sea con tejido de poliéster o de acero. Los obturadores con cabezas de acero, eje de acero inoxidable y glándula de acero reforzado son adecuados para aplicaciones de presión media, mientras que los obturadores con cabezas de aluminio, eje de aluminio y glándula reforzada con poliéster son adecuados para aplicaciones de baja presión.

Principio de funcionamiento: Los obturadores de pozo RST son adecuados para el muestreo en pozos de monitoreo, zonas de ensayo y monitoreo, pruebas de permeabilidad, hidro-fracturas de las formaciones, determinación de presión de inyección y sellado de flujos artesianos en pozos abiertos y/o entubados.

Un obturador instalado en un pozo abierto o revestido aísla la zona desde el obturador hasta el fondo del pozo. Esto permite que el agua sea bombeada a presión por debajo del obturador para la prueba de permeabilidad o para producir la hidro-fractura y permite monitorear por debajo del obturador las muestras que deben tomarse o la presión de ensayo que se quiere ingresar en la zona.

Dos obturadores separados por una longitud específica de tubería perforada empleada como espaciador, se puede utilizar para probar una zona o formación a una profundidad determinada. Mediante el uso de dos obturadores, sólo la zona entre las glándulas se ve afectada. Dos glándulas también se pueden utilizar con un sistema de Wireline. El agua puede ser bombeada por las barras de perforación para probar la zona debajo de la segunda glándula, eliminando la necesidad de retirar las barras para cada prueba y, por lo tanto, minimizar las perturbaciones en el agujero y las re-perforaciones que son costosas.

Múltiples obturadores se pueden combinar para probar y monitorear un número ilimitado de zonas. Mediante la utilización de múltiples configuraciones instaladas en varios pozos, pueden ser investigadas la extensión horizontal y vertical de la contaminación de las aguas subterráneas. Todas las glándulas de un conjunto múltiple son idénticas, maximizando la intercambiabilidad de las piezas. Las glándulas del obturador pueden ser reemplazadas en el campo.



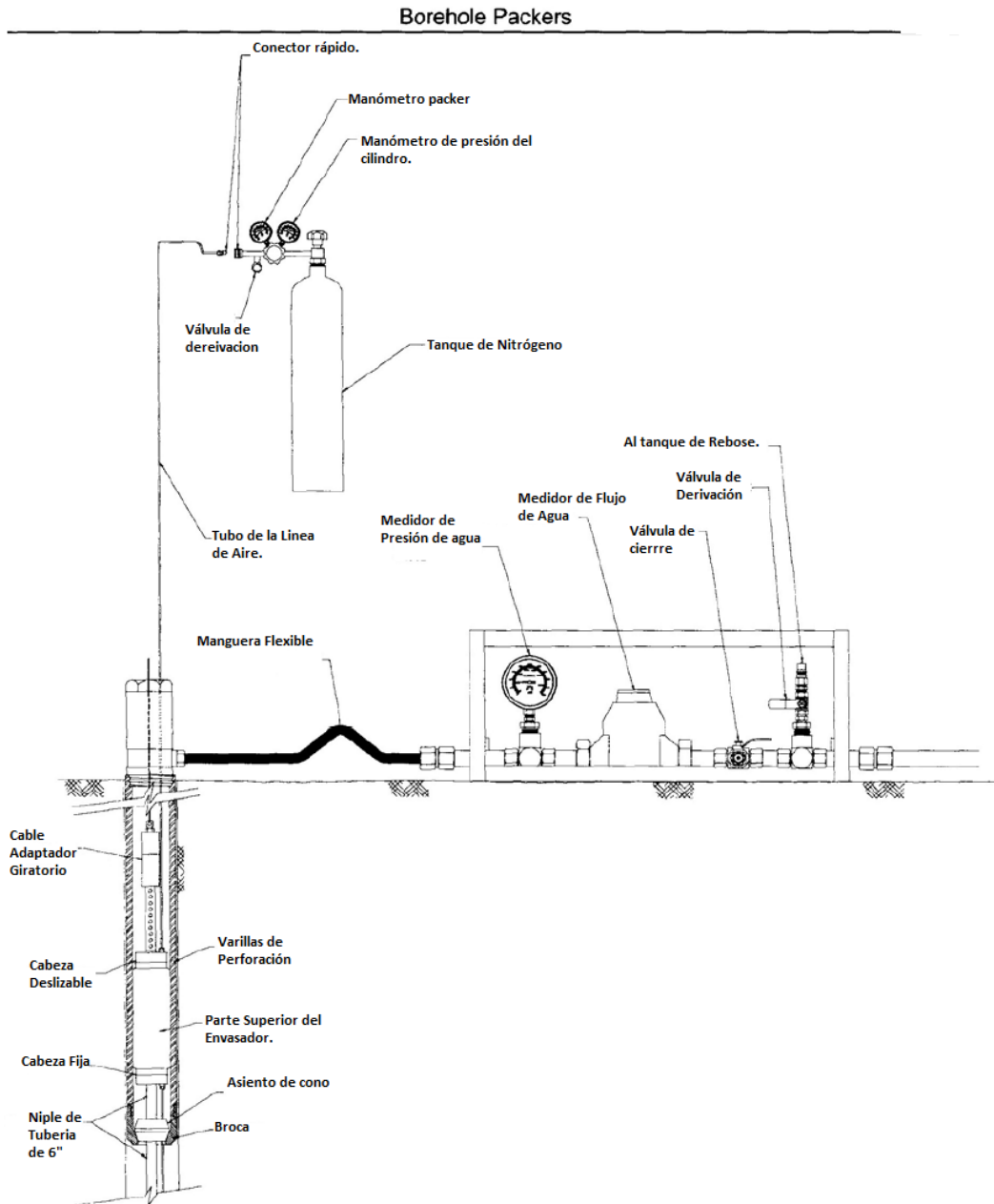


FIGURA 3. Tomado: Manual de Obturador de RST instruments Ltda.-Sistema Wireline.

9. REFERENCIAS.

ROYLE Michael. Standard Operating Procedures for Borehole Packer Testing. 22 pag.

RST INSTRUMENTS. Borehole Packer Accesories. [En línea] < www.rstinstruments.com>

RST INSTRUMENTS. Borehole Packer. [En línea] < www.rstinstruments.com>

SANZ LLANO, Juan .Mecánica de Suelos. Reunión de Ingenieros. Editores técnicos asociados S.A. Barcelona, 1975. 223 pag.

ANEXO 10. Registro fotográfico de supervisión de ensayos de Lugeon



Figura 2. Prueba de inflado del obturador marca Geopro antes de ensayo.



Figura 3. Válvula de regulación de presión de inflado del obturador.



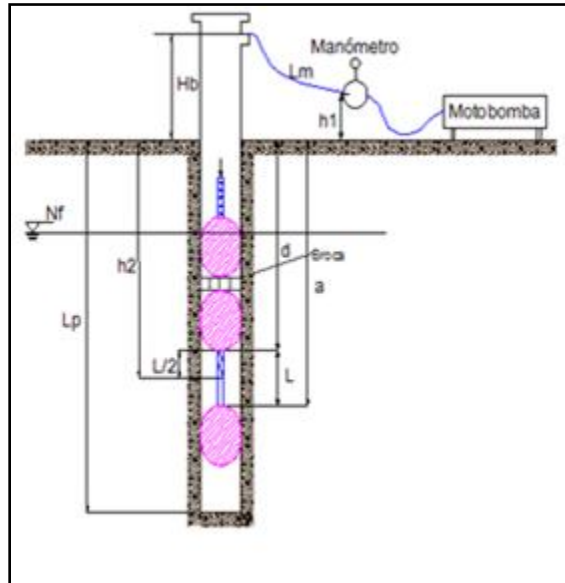
Figura 4. Sistema de Inyección de agua al pozo.



Figura 5. Montaje del sistema de medición del caudal de inyección y control de presiones de ensayo.

ANEXO 11. Ejemplos del cálculo de la presión de inflado del obturador

En todos los casos que se indican a continuación, se tendrá en cuenta la siguiente figura.



Caso 1: Nivel freático por encima de la profundidad inicial de la cámara

Profundidad inicial de la cámara (d): 92 m

Nivel Freático (Nf): 68.2 m

Presión mínima de trabajo del obturador (Pw): 180 Psi.

$$\text{Ecuación 2} \quad P_i^{(1)} = P_w + H_{wc} \times 1.45 \text{ psi/m}$$

$$H_{wc}: 92\text{m} - 68.2\text{m} = 23.8 \text{ m}$$

$$\text{Aplicando la ecuación 2: } P_i: 180\text{psi} + 23.8\text{m} \times 1.45\text{psi/m}$$

$$P_i: 214.51 \text{ Psi}$$

Para el caso 1, la presión de inflado que requiere el obturador para contrarrestar la presión ejercida por la columna de agua sobre el obturador y garantizar un sello efectivo es de 220 Psi aproximadamente.

¹ ROYLE, Michael. Standard operating procedures for borehole packer testing. Pag 8.

Caso 2: No se presenta nivel freático.

Profundidad inicial de la cámara (d): 92 m

Nivel Freático (Nf): No se encuentra

Presión mínima de trabajo del obturador (Pw): 180 Psi.

En este caso por no presentar nivel freático a la profundidad de ensayo, $H_{wc} = 0$ y aplicando la ecuación 2 se obtiene lo siguiente:

$$P_i: 180\text{psi} + 0\text{m} * 1.45\text{psi/m}$$

$$P_i: 180 \text{ Psi}$$

Para el caso 2, la presión de inflado del obturador es de 180 Psi, la misma presión que necesita el equipo para garantizar una obturación eficaz de la zona de prueba.

Caso 3: Obturación de un pozo artesiano que fluye.

Profundidad inicial de la cámara (d): 92 m

Presión mínima de trabajo del obturador (Pw): 180 Psi.

Como en este caso el agua se encuentra al mismo nivel de la perforación, la columna de agua vertical que se encuentra ejerciendo presión sobre el obturador es la misma profundidad inicial de la cámara; es decir $H_{wc} = 92 \text{ m}$

$$\text{Aplicando la ecuación 2: } P_i: 180\text{psi} + 92\text{m} * 1.45\text{psi/m}$$

$$P_i: 313.4 \text{ Psi}$$

Para el caso 3, la presión de inflado necesaria para contrarrestar la presión de la columna de agua es de 315 Psi aproximadamente.

En este caso es importante tener en cuenta que cuando los pozos tienen profundidades significativas, la presión de inflado aumentará y por lo tanto se presenta un problema de seguridad por el uso del gas.

ANEXO 12: Formato de campo del ensayo de Lugeon

P&P	ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CAMPO: LUGEON- WIRELINE (SENCILLO)									
Sondaje: Profundidad del Sondaje (m) Ensayo N° Tipo de Ensayo Fecha: Hora inicio de ensayo: Hora termino de ensayo: Profundidad inicial d (m): Profundidad final a (m): Altura de la Camara L (m) Nivel estatico Inicial (m): Nivel estatico final (m): Altura del manometro h1 (m): Presión de inflado Packer (PSI): Longitud de manguera Lm (m) Diámetro de manguera (") Altura brocal, Línea de Inyección Hb (m):										
Profundidad superior del packer			m							
			pie							
Factor	Presión de ensayo (PSI) / bar									
	P1	P2	P3	P2	P1					
0,51										
0,069										
						Presión PSI				
						Presión BAR				
Mediciones de campo - Lecturas en medidor (m³)										
Intervalo de Tiempo (minutos)	P1		P2		P3		P2		P1	
	Lect. Ini (m ³)	Lect. Fin. (m ³)	Lect. Ini (m ³)	Lect. Fin. (m ³)	Lect. Ini (m ³)	Lect. Fin. (m ³)	Lect. Ini (m ³)	Lect. Fin. (m ³)	Lect. Ini (m ³)	Lect. Fin. (m ³)
0 - 1										
1 - 2										
2 - 3										
3 - 4										
4 - 5										
5 - 6										
6 - 7										
7 - 8										
8 - 9										
9 - 10										
OBSERVACIONES:										
SUPERVISOR: _____ INGENIERO: _____										

ANEXO 13: Registro fotográfico de muestras obtenidas en obra



Figura 6. Cilindros de lechada con aditivo de \varnothing : 7.5 cm y h: 15 cm aproximadamente



Figura 7. Cubos de lechada de 5cm * 5 cm con aditivo



Figura 8. Cubos y Cilindros con aditivo antes de ser ensayados. Edad: 28 días



Figura 9. Ensayo de resistencia a la compresión en cilindros.

ANEXO 14. Registro fotográfico de ensayos realizados en laboratorio



Figura 10. Balón volumétrico graduado de 500 cc con ACPM para la realización del ensayo de densidad del cemento.



Figura 11. Cono de Marsh, ensayo de fluidez



Figura 12. Muestras de Laboratorio con 0.87% de aditivo Accelguard-90.



Figura 13. Muestras de Laboratorio con 3.2% de aditivo Accelguard-90.

ANEXO 15: Formato de campo de descripción de calicatas

<b style="font-size: 1.5em;">P&P	DESCRIPCIÓN EN CAMPO DE CALICATAS			CLIENTE: _____	PROFUNDIDAD CALICATA: _____
				LOCALIZACIÓN CALICATA: _____	FECHA INICIO: _____
PROYECTO: _____			CALICATA No. _____	FECHA TERMINACIÓN: _____	
			COORDENADAS: N: _____ E: _____	RESPONSABLE: _____	
			ELEVACIÓN (msnm): _____		

Profundidad (m)	Profundidad del techo de la capa (m)	Espesor capa (m)	Clasificación del Suelo (SUCS)	Descripción litológica (1b)	Profundidad del nivel freático (m)	Espesor de tierra vegetal (m)	Tipo de muestra (MI / MA) (1c)	Resistencia a la excavación				Grado de estabilidad de las paredes				Ensayos realizados (Informe No.)																				
								Baja	Media	Alta	No ripable	Estable	Caída de material	Caída de bloques	Descalce	Rotura circular	Desplome	Limites de Aterberg	Granulometría	Densidad	Partículas sólidas	Densidad Máxima y Mínima	Próctor Modificado	Clasificación USCS	CBR	Densidad	Densidad Campo	Humedad Natural								
0,00																																				
0,10																																				
0,40																																				
0,50																																				
1,50																																				
2,00																																				
3,00																																				
4,00																																				
6,00																																				

Legenda:

(1a) Colores y trama, según Cartografía MAGNA.

(1b) Incluir descripción de la granulometría, grado de alteración, color, restos orgánicos y antrópicos, clave MAGNA (Ej. TA1-2, Q1...)

(1c) Tipo de muestra tomada: (MI = muestra inalterada, MA = muestra alterada)

Firma: _____

RESPONSABLE: