

**INSTRUMENTACIÓN PARA PRODUCIR INFORMACIÓN GEOTÉCNICA EN
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES**

GINET TATIANA ACUÑA BORBÓN



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ
2019**

**INSTRUMENTACIÓN PARA PRODUCIR INFORMACIÓN GEOTÉCNICA EN
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES**

GINET TATIANA ACUÑA BORBÓN

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERÍA CIVIL**

OPCIÓN DE TRABAJO DE GRADO: Trabajo de investigación

**Docente Asesor:
HEBERTO RINCON RODRIGUEZ
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN:

FIRMA DEL PRESIDENTE DE JURADO

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

BOGOTÁ D. C. 2019



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. ANTECEDENTES	14
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. OBJETIVOS	18
4.1. OBJETIVO GENERAL	18
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
5.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
6 ALCANCES Y LIMITACIONES	20
6.1. ALCANCES	20
6.2. LIMITACIONES	20
7. MARCO DE REFERENCIA	22
7.1. MARCO TEÓRICO	22
7.2. MARCO CONCEPTUAL	26
7.3. MARCO HISTÓRICO	31
7.4. MARCO LEGAL	35
8. ESTADO DEL ARTE	37
9. METODOLOGÍA	40
10. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA	43
11. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA INTERNACIONAL:	46
11.1. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN CHILE	49
11.2. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN ECUADOR	50
11.3. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN MÉXICO	51
11.4. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN PERÚ	52
11.5. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN ESPAÑA	52
12. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EMPLEADA EN CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES	55
12.1. INSTRUMENTACIÓN CONVENCIONAL ESTÁNDAR:	57

12.1.1. INSPECCIÓN VISUAL DIRECTA:	57
12.1.2. CONVERGENCIAS	58
12.1.3. SONDAS PARA MEDIDA DE NIVEL DE AGUA.....	59
12.1.4. REGISTRADORES DE NIVEL DE AGUA:	60
12.1.5. TOPOGRAFIA:	61
12.1.6. DIANA REFLECTANTE:	62
12.1.7. HITOS DE NIVELACIÓN:	62
12.1.8. TIRAS DE CORTANTE:.....	63
12.1.9. INCLINOMETRIA MANUAL.....	63
12.1.10. TUBERIAS INCLINOMÉTRICAS CONVENCIONALES.....	63
12.1.11. TUBERIAS DE JUNTA RÁPIDA	64
12.1.12. COLUMNAS INCLINO-EXTENSOMÉTRICAS	65
12.1.13. SONDAS INCLINÓMETRICAS.....	66
12.1.14. INCLINÓMETROS FIJOS.....	66
12.1.15. CLINÓMETROS.....	67
12.1.16. SISTEMAS DE PÉNDULO:	69
12.1.17. EQUIPOS DE EXTENSOMETRÍA:	70
12.1.18. DEFORMÍMETROS:	76
12.1.19. PIEZOMETROS.....	76
12.1.20. CÉLULAS DE PRESIÓN DE TIERRAS	78
12.1.21. CÉLULAS DE PRESIÓN NATM	79
12.1.22. CINTA DE CONVERGENCIA	79
12.1.23. FISURÓMETROS:	80
12.1.24. TDR - REFLECTORIA DE ONDAS ELÉCTRICAS	82
12.1.25. ACELEROGRÁFOS.....	82
12.1.26. CELDAS DE PRESIÓN	83
12.1.27. SISTEMA DE CELDAS DE ASENTAMIENTO MULTIPUNTO	84
12.1.29. AUSCULTACIÓN GEODÉSICA.....	84
12.2. SISTEMAS DE AUSCULTACIÓN AUTOMÁTICA:	85
12.2.1. SENSORES DE CUERDA VIBRANTE	85
12.2.2. SISTEMAS MICRO ELECTROMECAÑICOS	85
12.2.3. FIBRA ÓPTICA.....	86
12.3. SOFTWARE.....	86
12.4. TECNOLOGIA DE RADAR	88
12.4.1. SSR – XT	89
12.4.2. SSR – FX.....	89
12.4.3. SSR – SARX.....	90
12.4.4. GMS.....	91
12.4.5. GML.....	92
12.4.6. SSR – VIEWER	93
12.4.7. GEOEXPLORER	93
13. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EMPLEADA EN CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES EN COLOMBIA	94

13.1. DISEÑO, PLANEACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL MULATOS.....	101
13.1.2. CONTROL Y REGISTRO GEOTÉCNICO	103
14. RESULTADOS OBTENIDOS POR MEDIO DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN COLOMBIA	105
15. VARIABLES A MEDIR EN LA CONSTRUCCIÓN DE TUNELES VIALES Y LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA QUE PUEDE UTILIZARSE	108
16. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBJETIVO GENERAL	114
17. CONCLUSIONES	116
18. BIBLIOGRAFIA	118
19. ANEXOS	122

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Equipos principales empleados en instrumentación y monitoreo en túneles	25
Tabla 2. Túneles vehiculares más largos de Latinoamérica	48
Tabla 3. instrumentos de medición	54
Tabla 4. Túneles viales de Colombia	97
Tabla 5. Túneles viales de Colombia que han usado instrumentación geotécnica	98
Tabla 6. Instrumentación geotécnica empleada en túneles de Colombia	99
Tabla 7. Instrumentación geotécnica empleada en túneles de Colombia	99
Tabla 8. Instrumentación geotécnica empleada en túneles de Colombia	100
Tabla 9. Parámetros a medir en la ejecución del túnel	111

LISTA DE IMAGENES

	Pág.
Imagen 1: Proceso de investigación	17
Imagen 2: Proceso de investigación	20
Imagen 3. Estudio y monitoreo de deslizamientos	23
Imagen 4. Excavación de túneles con explosivos.....	30
Imagen 5: Metodología	41
Imagen 6. Almacenamiento recopilación bibliográfica	43
Imagen 7. Información organizada en carpetas	44
Imagen 8. Información de objetivos ordenada por carpetas	44
Imagen 9. Información de objetivos 1 y 2.....	45
Imagen 10. Información de objetivos 3 y 4.....	45
Imagen 11. Etapas en la construcción de un túnel	50
Imagen 12. Plan de Auscultación de un Túnel.....	56
Imagen 13. Parámetros medidos e instrumentación empleada	57
Imagen 14.Cinta para medir convergencias.....	58
Imagen 15. Medidas perimetrales.....	59
Imagen 16. Medidas diametrales	59
Imagen 17. Especificaciones Técnicas Sonda.....	60
Imagen 18. Especificaciones Técnicas Registrador Nivel de Agua	61
Imagen 19. Diana reflectante adhesiva.....	62
Imagen 20. Tuberías Inclinométricas	64
Imagen 21: Especificaciones Técnicas Tuberías Inclinométricas	64
Imagen 22.Tuberia Inclinométrica de junta rápida	65
Imagen 23. Especificaciones Técnicas Tuberías de Junta	65
Imagen 24. Especificaciones Técnicas Columnas Inclino-Extensométricas	66
Imagen 25. Especificaciones Técnicas Sondas Inclinométricas	66
Imagen 26. Inclinómetro fijo.....	67
Imagen 27. Especificaciones Técnicas Inclinómetros Fijos	67
Imagen 28. Clinómetro Portátil.....	68
Imagen 29. Especificaciones Técnicas Clinómetro Portátil.....	68
Imagen 30. Especificaciones Técnicas Clinómetro de Superficie	69
Imagen 31. Péndulos directos y inversos.....	69
Imagen 32. Especificaciones Técnicas Péndulo	70
Imagen 33. Extensómetro Magnético.	71
Imagen 34. Extensómetro Incremental	72
Imagen 35. Especificaciones Técnicas Extensómetro T-REX	73
Imagen 36. Extensómetro fijo	73
Imagen 37: Especificaciones Técnicas Extensómetros	74
Imagen 38. Especificaciones Técnicas Extensómetro de varilla.....	74
Imagen 39. Extensómetro de Terraplén.....	75
Imagen 40. Especificaciones Técnicas Extensómetros de Terraplén.....	75
Imagen 41. Deformímetro de hilo.....	76

Imagen 42. Piezómetro Casa grande y Tubo abierto.....	77
Imagen 43. Especificaciones Técnicas Piezómetros	77
Imagen 44. Piezómetro Multipunto	78
Imagen 45. Especificaciones Técnicas Células de Presión	79
Imagen 46. Especificaciones Técnicas Cinta de Convergencia	80
Imagen 47. Especificaciones Técnicas Fisurómetros	80
Imagen 48. Fisurómetro y medidor de juntas	81
Imagen 49. Especificaciones Técnicas Fisurómetro de Hilo	82
Imagen 50. Acelerógrafo Triaxial	83
Imagen 51. Celda de presión	84
Imagen 52. Extensómetro de cuerda vibrante	85
Imagen 53. Fibra Óptica.....	86
Imagen 54: WMS WEB MONITORING SYSTEM	87
Imagen 55. KLION software for inclinometers and T-Rex extensometers.....	88
Imagen 56. SSR-XT	89
Imagen 57. SSR-FX.....	90
Imagen 58: SSR-SARX.....	91
Imagen 59: GMS.....	92
Imagen 60. GML	92
Imagen 61. SSR – VIEWER.....	93
Imagen 62. Túneles en Colombia	94
Imagen 63. Túneles a cargo de la ANI.....	95
Imagen 64. Túneles en Colombia	96
Imagen 65. Túnel Mulatos.....	101
Imagen 66. Excavación y soporte Túnel Mulatos.....	102
Imagen 67. Control y registro Geotécnico Túnel Mulatos	103
Imagen 68. Instalación de extensómetros, Túnel Mulatos	104
Imagen 69. Instalación inclinómetros en el Túnel Mulatos.....	104
Imagen 70. Fases importantes en la ejecución de un túnel	107
Imagen 71. Análisis de riesgos en construcción de túneles.....	113

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 1	124
Anexo 2. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 1	125
Anexo 3. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 2	133
Anexo 4. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 2	134
Anexo 5. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 3	139

GLOSARIO

ASENTAMIENTO: movimiento descendente vertical del terreno debido a la aplicación de cargas que causan cambios en las tensiones dentro del terreno. (ingeniero-de-caminos.com)

AUSCULTACIÓN EN TÚNELES: Procedimiento que proporciona información de gran valor, tanto para el control de la excavación, como para el control de las afecciones al entorno del mismo, información que permite evaluar el estado de las obras en sus distintas fases realizando comparaciones entre el comportamiento real y el previsto. De esta forma posibilita la toma de decisiones, así como el diseño y aplicación de medidas correctivas en caso necesario. (Guía AETOS)

CONVERGENCIA: Movimiento relativo producido entre dos puntos del túnel. Esta medida es la información de mayor importancia para el análisis del estado de una obra subterránea, habitualmente se toman de forma manual con cinta o estaciones topográficas. (Guía AETOS)

GEOTECNIA: aplicación de métodos científicos y principios de ingeniería para la adquisición, interpretación y uso del conocimiento de los materiales de la corteza terrestre y los materiales de la tierra para la solución de problemas de ingeniería y el diseño de obras de ingeniería. Es la ciencia aplicada de predecir el comportamiento de la Tierra, sus diversos materiales y procesos para hacer que la Tierra sea más adecuada para las actividades humanas y el desarrollo. (Wikipedia)

INSTRUMENTACIÓN: Instalación y disposición de los diversos sensores destinados a la lectura de las distintas magnitudes geotécnicas que se pretenden controlar en el proceso de auscultación del elemento constructivo para conocer su evolución y comportamiento durante sus fases constructiva y de explotación, incluso en fase de proyecto para evaluar las condiciones iniciales y determinar los parámetros de diseño. (Guía AETOS)

MONITOREAR: Observar mediante aparatos especiales el curso de uno o varios parámetros fisiológicos o de otra naturaleza para detectar posibles anomalías. (RAE, 2014)

TÚNEL VÍAL: Túnel que se diseña para favorecer el paso fluyente, continuo, y seguro de vehículos motorizados, a través de los obstáculos topográficos que imponen el trazado de una carretera cruzando montañas y perforando macizos rocosos, con objeto de lograr un trazado común y funcional. (RAE)

TÚNEL: Obra subterránea de carácter lineal que comunica dos puntos para el transporte de personas o materiales. Normalmente es artificial.

1. INTRODUCCIÓN

La geotecnia se refiere a la aplicación de principios geológicos y de ingeniería para realizar estudios y análisis del comportamiento de suelos, rocas, aguas subterráneas y composición de todos los materiales provenientes de la tierra. En las etapas de construcción de túneles se incluyen algunos de estos estudios a través de instrumentos existentes para la captura, proceso y análisis de la información geotécnica. Los elementos de soporte que se definen en el diseño de un túnel están influenciados por las condiciones del terreno encontrado, es por ello que instrumentar el túnel permitirá identificar parámetros del comportamiento estructural y supervisar probables cambios para deducir la posibilidad de fallo.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad principal conocer y analizar mediante una investigación documental con una exploración bibliográfica y la aplicación de una herramienta cualitativa el tema de instrumentación empleada en la construcción de túneles viales para describir el comportamiento del terreno y medir parámetros geotécnicos que controlan el mecanismo de falla del mismo.

La revisión bibliográfica y la información de algunos expertos que han realizado trabajos en construcción de túneles son herramientas importantes que permitieron ampliar el conocimiento en el tema de instrumentación geotécnica empleada en Colombia y algunos lugares del mundo.

2. ANTECEDENTES

El análisis y estudio de las características y comportamientos de los materiales que componen el suelo son factores muy importantes a la hora de construir cualquier proyecto de obra civil, determinar estas propiedades sirve para diseñar las cimentaciones de las estructuras y en el caso específico de la construcción de túneles, determinar el trazado de este, el proceso constructivo y el sistema de perforación adecuado.

La construcción de túneles subterráneos depende de las propiedades del macizo rocoso que va a ser perforado y del análisis del riesgo ante fenómenos naturales, ambientales o provocados por la actividad humana, de aquí nace la necesidad de conocer y emplear la instrumentación geotécnica para la supervisión, condiciones de operación, medición y planteamiento de alternativas para el control y seguimiento de los proyectos.

Las necesidades de infraestructura en el mundo son diversas, dentro del desarrollo de cualquier país los túneles son esenciales en el proceso de integración social y crecimiento económico de este, a lo largo del tiempo se han desarrollado varios métodos para la construcción de túneles partiendo del uso de explosivos, maquinaria y demás instrumentación.

El uso de instrumentación geotécnica es un tema relevante que en algunos países es poco tratado, pero que es una herramienta útil a la hora de tomar medidas correctivas, buscar posibles soluciones y hacer un buen seguimiento en caso de que el comportamiento del suelo afecte el desarrollo del proyecto. La aplicación de instrumentación para mediciones no garantiza en su totalidad que no se produzcan fallas, pero un monitoreo constante si puede permitir que el ingeniero civil esté seguro de diferentes factores existentes y poder controlarlos y así dar mejores soluciones.

Una de las obras más representativas en la ingeniería Colombiana es la construcción del túnel falso "El Cune" ubicado en un lugar llamado El Cune en el kilómetro 80 + 800 de la autopista Bogotá – Villeta, Cundinamarca, donde se muestra un buen planteamiento de monitoreo con instrumentación geotécnica en las diferentes etapas del proyecto, primordiales para determinar profundidad de falla, movimiento de los desplazamientos, nivel freático y demás factores básicos en el diseño de este tipo de obras.

Los representantes de la Concesión Sabana de Occidente aseguran que con este proyecto se intentó corregir los problemas y fallas geológicas en la cual el deslizamiento más destacado era Cune con una longitud de 200 metros generados por la inestabilidad geológica que presentaba la zona ubicada en el corredor Bogotá-Medellín a la altura del kilómetro 80 vía a Villeta por la calle 80.

En cuanto a la instrumentación geotécnica empleada se tomaron muestras mediante ejecución de sondeos, se realizaron estudios geofísicos de refracción sísmica y levantamiento topográfico, se instalaron en nueve de las once perforaciones de tubería hecha de una resina termoplástica llamada acrilonitrilobutadienoestireno (ABS) para lecturas de inclinómetro, adicionalmente, se instalaron siete piezómetros de casa grande y cinco piezómetros de Hilo Vibrátil.¹

Con los resultados de los inclinómetros, se pudo determinar que la superficie de falla en el movimiento principal se encontró a 25 m de profundidad de la superficie del terreno. En cuanto a los resultados de los piezómetros instalados, se determinó que existen niveles de agua con presiones o cabezas hidráulicas totales, mayores a las de un nivel normal y la masa de suelo en general está saturada, con la presencia de un acuífero inferior.

Se proyectó un plan de monitoreo con instrumentación ya que, debido a la inestabilidad del sitio, se requerían tener datos de control en cada una de las etapas para el correcto desarrollo del proyecto, el cual comprendió la instalación de inclinómetros, piezómetros, deformímetros y el seguimiento topográfico². La instrumentación geotécnica empleada permitió identificar, monitorear y solucionar las dificultades presentadas, especialmente en épocas invernales y de acuerdo a los resultados en donde las gráficas indicaron un comportamiento estable, se concluyó que la obra mostraba un funcionamiento óptimo y condiciones de deformaciones y desplazamientos estables.

Todos estos antecedentes plantean que en Colombia se está utilizando instrumentación geotécnica en algunos proyectos, pero no tan amplia como se piensa, de aquí lo que se quiere investigar, ya que este es el único antecedente disponible que existe con una especificación más o menos clara del uso de instrumentación geotécnica, alguna de ella incluida en la avanzada, pero todavía faltarían muchas más aplicaciones que son las de objeto de estudio de este trabajo. Lo que quiere decir que todos los demás túneles y demás aplicaciones requerirían una información específica respecto a cómo se están haciendo y la posibilidad de ampliarlo con las otras técnicas.

¹ GARZON CORREA, Juan David. "Instrumentación Geotécnica, Aplicación y Soporte para la toma de decisiones de Ingeniería". Bogotá D.C., 2018, 117p. Trabajo de Grado (Título Ingeniero Civil). Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Civil.

² GARZON CORREA, Juan David. "Instrumentación Geotécnica, Aplicación y Soporte para la toma de decisiones de Ingeniería". Bogotá D.C., 2018, 117p. Trabajo de Grado (Título Ingeniero Civil). Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Civil.

3. JUSTIFICACIÓN

Se determina el interés de investigación en este trabajo debido a que no se conoce con precisión como se emplea la instrumentación geotécnica en la parte de construcción, mantenimiento y control en los túneles actualmente en Colombia. Este estudio no se enfoca en un modelo empírico analítico de experimento o algoritmos de laboratorio o pruebas con resultados estadísticos de variables, se trata de un estudio exploratorio documental con la búsqueda de información, recopilación, sistematización y análisis de acuerdo a la categoría de instrumentación para la información geotécnica en túneles, con el ánimo de procurar la disponibilidad de su información en los contextos académicos, en especial en la Universidad Católica de Colombia.

De acuerdo con los trabajos encontrados referentes al tema de instrumentación geotécnica se puede deducir que este tipo de sistema de investigación es un medio eficiente para que el ingeniero civil conozca, vigile el comportamiento de una obra y evalúe su seguridad mediante la información obtenida para cuantificar el impacto de un problema, conocer las causas y evaluar otros parámetros de interés. Este trabajo de grado también se propone como parte de un documento integrado por otros estudios de TG con el asesor asignado, como es la Investigación en: “Tecnología para producir información espacial en proyectos de construcción de túneles viales en Colombia”.

En el presente documento se presenta la instrumentación geotécnica más usada en la construcción de túneles de algunos países del mundo como España, Chile, México y otros, incluyendo en esta propuesta a Colombia, con el fin de desarrollar su detalle y contenido en el trabajo de grado (TG) propuesto, explicando su funcionamiento, aplicación, ventajas, además de algunas tecnologías de tipo software existentes para la captura, proceso y análisis de la información.

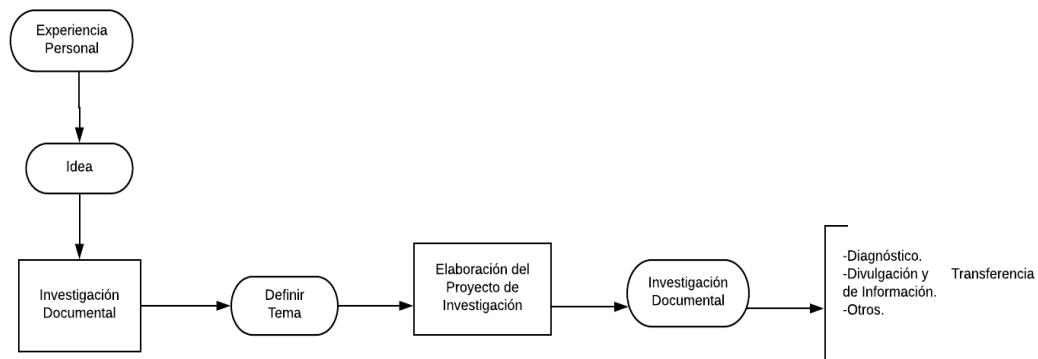
Generalmente este no es un tema de profundización en las universidades del país, ni tampoco existe una oferta académica de cursos electivos sobre túneles u obras subterráneas, pero se debe hacer énfasis en que el país tiene expectativas en infraestructura vial y minería que demandan conocimientos específicos.

Respecto al rol de la autora en este trabajo cito el siguiente asunto, teniendo en cuenta el nivel académico en el que me encuentro que es pregrado: “Para el estudiante universitario sus trabajos de investigación y de tesis estarán todos dentro del ámbito de las teorías vigentes; son los investigadores profesionales los que están obligados a estudiar los fenómenos y problemas de la frontera de las ciencias”³. Una vez cerrado el ciclo total del proceso, el haber realizado una investigación y haber alcanzado resultados retroalimenta la experiencia personal

³ ZAPATERO CAMPOS. Juan Armando. Fundamentos de Investigación para Estudiantes de Ingeniería. México: 2010. 176p.

del estudiante / investigador, por lo que será un ciclo enriquecedor de su vida como estudiante y como profesional, en este caso mucho más teniendo en cuenta que se está alimentando el contexto inmediato académico de donde se está estudiando. De acuerdo con la finalidad del presente trabajo de investigación se presenta el siguiente esquema que nos da una visión general del proceso que se lleva a cabo en una investigación:

Imagen 1: Proceso de investigación



Fuente: Propia

Experiencia personal en este caso se refiere a la experiencia educativa que es fundamental.

Investigación documental ubicar la complejidad y profundidad del tema de investigación dentro de los alcances académicos del investigador, así como explorar el estado del arte del avance científico y tecnológico del tema delimitado. El investigador entra en contacto con su objeto de estudio con el propósito de observar, describir y explicar claramente los alcances de la investigación dentro de los límites definidos para el tema escogido.

Elaboración del proyecto de Investigación Una vez delimitado el tema y aprobado como objeto de investigación, el siguiente paso será bosquejar un documento que planea y describe etapas y resultados esperados. “No siempre sucede que el conocimiento tenga aplicación práctica o que el estado actual de la tecnología lo permita. Pero cuando es el caso, el reporte debe mencionar las aplicaciones realizadas, como aquellas que representan ventajas tecnológicas. El conocimiento beneficia siempre al ser humano y a la sociedad a la que pertenece y, en ocasiones, es posible aplicarlo”.⁴

⁴ ZAPATERO CAMPOS. Juan Armando. Fundamentos de Investigación para Estudiantes de Ingeniería. México: 2010. 176p.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Conocer y describir el uso de la instrumentación empleada para la obtención de datos de tipo geotécnico en la construcción de túneles viales.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una compilación bibliográfica de la instrumentación geotécnica y tecnología aplicada en las mediciones de construcción de túneles viales en algunos países del mundo.
- Describir el funcionamiento de los equipos de medición más empleados en la construcción de túneles viales.
- Conocer y describir que instrumentación geotécnica y tecnología se han aplicado en los procesos de construcción de túneles en Colombia.
- Investigar y mostrar resultados obtenidos por medio de la instrumentación geotécnica en proyectos de construcción de túneles en Colombia.
- Analizar y detallar las principales variables que se miden en la construcción de túneles y la instrumentación geotécnica que puede utilizarse.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es de vital importancia y de carácter obligatorio realizar estudios geotécnicos en obras civiles para poder determinar la resistencia del suelo, comprender la naturaleza de las diferentes amenazas y desarrollar las etapas de los proyectos; es por esto que en la construcción de túneles es primordial conocer y emplear instrumentación geotécnica que permita monitorear, medir, controlar y obtener información acerca de las variables que existen durante el proceso constructivo en cuanto al comportamiento y características del terreno, con el fin de tener una mejor planificación de la obra, predecir hechos que puedan ocurrir durante la construcción de la misma, tomar decisiones y hacer estudios y análisis respectivos para producir obras más seguras y eficientes.

El tema de la instrumentación geotécnica es tan amplio y a veces tan desconocido para los ingenieros que solamente trataré el campo de aplicaciones como un conocimiento nuevo para la carrera y para las posibles electivas y avances del estudio. Partiendo de la necesidad académica, adquisición de conocimiento, labor práctica y aplicación en obras subterráneas en Colombia y siendo esto un tema fundamental por comprender y aplicar se plantea la siguiente situación problemática para este proyecto en cuanto a la necesidad de investigación documental sobre el escenario de aplicaciones y conocimientos ampliado para los estudiantes, docentes y profesionales de la ingeniería civil.

5.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Qué instrumentación puede ser empleada en la obtención de información geotécnica que permita un mejor desarrollo, mayor detalle espacial y menores riesgos en proyectos de construcción de túneles?

6 ALCANCES Y LIMITACIONES

6.1. ALCANCES

El alcance del trabajo es documental, puede hacer parte de un futuro estado del arte para un proyecto de investigación analítico experimental de largo alcance en una maestría.

El presente trabajo abarca la exploración bibliográfica inicial e información básica de fuentes secundarias para desarrollar un avance detallado en cada aspecto de los logros con respecto a los objetivos.

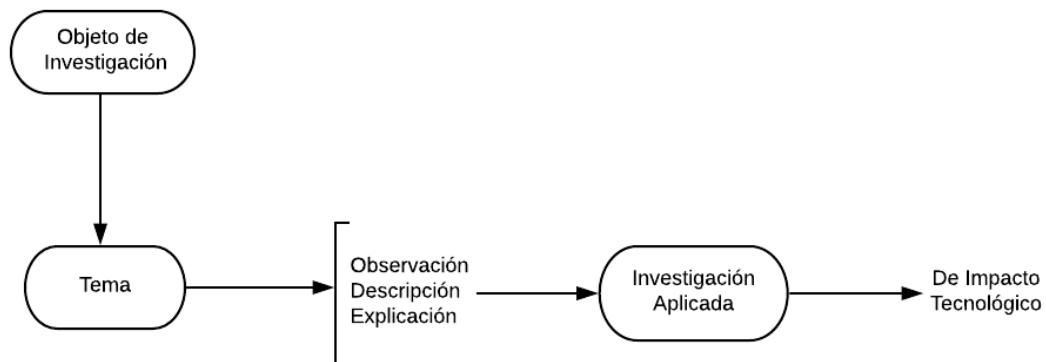
Los entregables tendrán la siguiente extensión mínima:

Trabajo escrito, 100 páginas

Artículo, 12 páginas

El siguiente esquema muestra los niveles y la finalidad de impacto del presente trabajo:

Imagen 2: Proceso de investigación



Fuente: Propia

Dependiendo del tipo de investigación, existen diversos instrumentos que hacen posible la observación, recopilación, validación de la información y datos relacionados con la hipótesis. Para este trabajo se utilizará como recurso la entrevista a expertos en el tema y otros recursos como libros, artículos, revistas y páginas de internet que puedan aportar al tema de investigación.

6.2. LIMITACIONES

El trabajo se desarrolla en un tiempo corto de aproximadamente tres meses, por lo cual el contenido del trabajo se considera como un acercamiento preliminar al tema, la exploración bibliográfica fue de fuentes secundarias y también se encontraron

algunas restricciones de información en fuentes posterior de tipo privado. No se incluye el desarrollo de un documento extenso (200 a 300 páginas) por la limitación del tiempo disponible para el desarrollo del trabajo de grado.

Se debe tener en cuenta que generalmente este no es un tema de profundización en las universidades del país, ni tampoco existe una oferta académica de cursos electivos sobre túneles u obras subterráneas, a lo cual se quiere aportar este trabajo como un aporte inicial al asunto.

La disponibilidad de los entrevistados, escogidos para recibir su aporte para el logro del segundo objetivo específico respecto a “Conocer y describir que instrumentación geotécnica y tecnología se han aplicado en los procesos de construcción de túneles en Colombia”, se obtuvo en un máximo de 4 profesionales debido, debido a factores como el tiempo de ocupación de los profesionales no fue posible obtener más entrevistas.

Algunas limitaciones en la investigación documental del presente trabajo son:

- El tiempo disponible, ya que durante los estudios universitarios es siempre limitado.
- El tiempo de asesoría con los profesores
- Alcances académicos respecto al tema de estudio
- Acceso a información más actualizada
- Localización de fuentes de información

7. MARCO DE REFERENCIA

7.1. MARCO TEÓRICO

Básicamente este trabajo se enfoca fundamentalmente en la teoría de las ciencias físico matemáticas aplicadas al espacio, estas ciencias aplican los conceptos de la geometría euclidiana, la trigonometría y la medición con instrumentos patronados que garanticen la precisión de las medidas y de alguna forma puedan dar cuenta del estado en los desplazamientos de las superficies rocosas para la geotecnia.

Desde el punto de vista físico matemático este trabajo se realiza desde la disciplina de la ingeniería civil y fundamentalmente se relaciona con las asignaturas vistas durante el pensum académico: Geomática, Geología, Mecánica de Suelos y Laboratorio, Geotecnia y Pavimentos y Laboratorio. Esta teoría aplicada al concepto industrial nos referencia la importancia de su aplicación a lo largo del tiempo.

“La industria de la construcción de obras subterráneas se incrementa a lo largo del tiempo por la demanda de soluciones a la problemática que plantea el tráfico de las grandes ciudades, el uso del espacio subterráneo en el medio urbano y la realización de conexiones rápidas interurbanas”⁵.

El avance de maquinaria para construcción de túneles, explosivos más eficientes y el desarrollo tecnológico dan paso a mejores técnicas, las condiciones medio ambientales son también los factores que ofrecen los mayores retos para establecer rutas debido a que el suelo contiene gran variedad de elementos, lo que condiciona los métodos seleccionados en la realización del proyecto.

“En geotecnia uno de los factores fundamentales y tal vez el más importante es hacer bien la investigación, conocer muy bien la zona donde se va a trabajar, ya que el impacto del diseño en las obras subterráneas es alto, entre más investigación se haga más sustentables y cercanos a la realidad serán los costos, lo que permitirá mitigar los impactos más eficientemente, por lo cual siempre es recomendable mejorar, optimizar y controlar la calidad de todo lo que sea investigación geotécnica”.⁶

A la hora de realizar una construcción de túneles es necesario hacer una buena investigación geotécnica e identificar que riesgos ambientales se pueden producir,

⁵ CORNEJO ÁLVAREZ, Laureano. “Los grandes proyectos internacionales de construcción de obras subterráneas, un reto tecnológico para el siglo XXI”. {Enero 2005} disponible en: (<http://nuevatecnologiasymateriales.com/wp-content/uploads/edd/2014/04/Primeras-paginas-GrandesProyectosInternacionalesSigloXXI.pdf>)

⁶ PARDO, Germán “Cuando se hace bien, la construcción de túneles es muy segura” {16 de enero del 2018}. Disponible en internet: (<https://www.vanguardia.com/marcas/minesa-cuenta/cuando-se-hace-bien-la-construccion-de-tuneles-es-muy-segura-HDVL421611>).

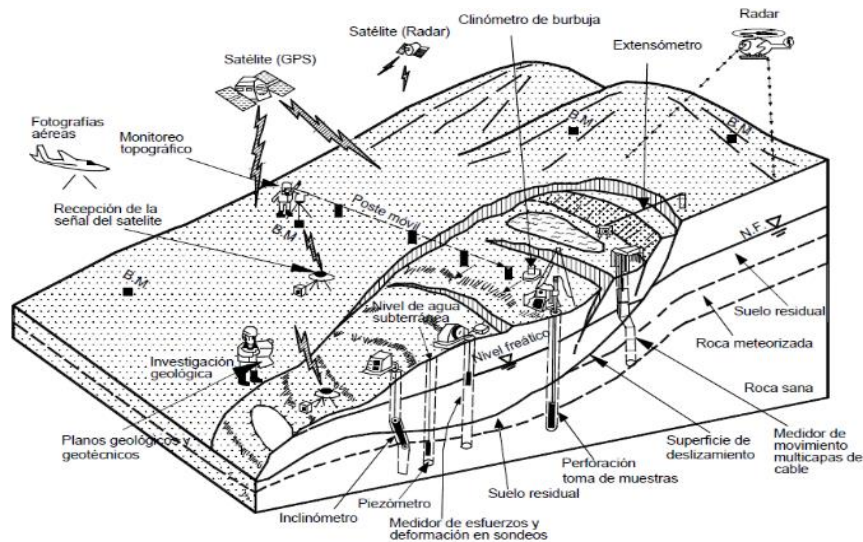
esto es posible gracias al buen uso de la tecnología e instrumentación de monitoreo geotécnico, así como cumplir con la normatividad y códigos aplicables para realizar un buen diseño y evitar que se produzcan derrumbes y fallos. En la buena práctica de ingeniería de túneles se deben implementar factores de seguridad, análisis de rocas con la mayor investigación detallada, control y calidad en los ensayos técnicos y búsqueda de las más avanzadas prácticas de construcción empleadas en el mundo.

La instrumentación geotécnica es parte de las nuevas tecnologías y su objetivo principal es monitorear el comportamiento del terreno a lo largo del tiempo, el uso de estos sistemas permite obtener información y medir algunas variables que controlan el mecanismo de falla del terreno. El uso de instrumentación geotécnica requiere de un análisis y planificación que permita obtener respuestas específicas a preguntas concretas en el proceso constructivo.

Para establecer un programa de monitoreo se debe conocer la geología del sitio, realizar una evaluación preliminar sobre causas de deslizamiento y límites del movimiento de tierra en cuanto a profundidad y extensión y de acuerdo a esto se deben seguir unos criterios específicos como son los siguientes:

- Analizar y definir qué tipo de medición que se requiere.
- Utilizar Instrumentación que mejor se adapte a la necesidad de la obra.
- Establecer la ubicación y profundidad de instalación de la instrumentación.
- Definir la frecuencia de lecturas de las mediciones.
- Establecer valores límite que generen alarmas.
- Tomar decisiones sobre el manejo y presentación de los datos obtenidos.

Imagen 3. Estudio y monitoreo de deslizamientos



Fuente: SUAREZ, Jaime.2004

Respecto a la teoría y los elementos que se van a analizar en el presente trabajo se refiere a los instrumentos de uso manual, que toman medidas a partir de temas patronados, de ángulos y distancias respecto a medidas directas con rayos infrarrojos, medición sísmica, electrónica, mecánica y de diferentes softwares. Olalla (2007), menciona que la aplicación de instrumentación en terrenos y obras se puede realizar por dos métodos:

- Método Clásico
- Sistemas de Auscultación Automática

Método Clásico: Son técnicas de control tradicional que se realizan para un buen conocimiento geológico. De acuerdo a Olalla (2007), una lista básica de los instrumentos que se utilizan en el método clásico es:

- Inspección visual directa
- Adquisición manual de topografía (DGPS)
- Inclínometría manual
- Sistemas de péndulo directo e inverso
- Deformímetros multipunto y magnéticos
- Equipos de extensometría de control manual
- Piezometría manual
- Células de presión y carga
- Cintas de convergencia
- Aparatos para medir la evaluación de fisuras como fisurómetros
- Controles meteorológicos, en particular temperatura, viento y precipitación
- TDR – Reflectoria de ondas eléctricas
- Otros

Sistemas de Auscultación Automática: Consiste en evaluar en qué condiciones se encuentra una estructura por medio de control remoto. Según Olalla (2007) se utilizan los siguientes:

- Software de monitoreo
- Sistemas de alarma que avisan deslizamientos
- Monitorización de estructuras empleando software como sistema DEX, Strain-gauge, VW rebar, entre otros.
- Sistemas de control de ruido y vibraciones

La frecuencia de uso de los sistemas anteriores y la obtención de los datos depende de varios factores, como observar los datos recogidos en la última lectura contrastando dichos valores con el histórico de resultados, tomar mediciones en periodos de lluvias y cambios de clima, magnitudes a medir y el tipo de instrumentos a utilizar, velocidad del proceso a controlar. Por estos motivos la frecuencia de lecturas a establecer en la obra se debe estudiar de forma particular y a partir de un plan de monitoreo constante.

Tabla 1. Equipos principales empleados en instrumentación y monitoreo en túneles

Función	Aparato o equipo	Utilización
Medida de desplazamientos	Hitos de nivelación	Asientos terreno
	Regletas o clavos	Asientos en estructuras
	Dianas, prismas, etc.	Control topográfico
	Cinta de convergencia	Desplazamientos entre puntos a distancia métrica
	Electroniveles	Registro continuo de asientos
	Inclinómetros	Desplazamientos o flechas
	Extensómetros	Desplazamientos o asientos relativos entre puntos
	Fisurómetros o "crack meters", micrómetros, comparadores, transductores de lectura manual o de registro automático, etc.	Medida de apertura de grietas, movimientos entre partes de una estructura, etc.
	TriVec	Extensómetro múltiple
	Clinómetros	Inclinación de edificios
Medida de deformaciones	Extensímetros o strain-gauges	Medida de deformaciones en elementos estructurales
	Fibra óptica	Id.
Medida de fuerzas o tensiones	Células de presión total	
	Células de carga en anclajes	
	Células de presión intersticial	
	Células tipo Osterberg	
Medida de presión intersticial	Piezómetros de tubo abierto o de Casagrande	
	Piezómetros de cuerda vibrante	
	Manómetros	

Fuente: GONZALEZ, Mauricio.2016.

7.2. MARCO CONCEPTUAL

En los países del mundo el desarrollo de infraestructura vial es su principal inversión, ya que permite un crecimiento económico y una conexión social a nivel nacional como internacional; por esto no se debe olvidar la importancia de construir túneles. Un túnel es un paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación a través de una montaña, por debajo de un río u otro obstáculo.

Dentro de los estudios que se deben realizar en la construcción de túneles están los de estudio geológico, donde a través del uso de instrumentación geotécnica se obtendrá información aproximada de depósitos aluviales, tipos de roca que se pueden encontrar en la excavación, fallas y otros accidentes geológicos que se deben investigar. La ingeniería geotécnica es el punto de partida de los estudios en todo proyecto de ingeniería civil, por lo cual es importante entender como los aspectos geotécnicos afectan el desarrollo de las obras de construcción.

Según Dunnycliff (1993), el nacimiento de la instrumentación geotécnica, como una Herramienta para ayudar a las observaciones de campo, se produjo en los años 1930 y 1940. En los primeros años, eran predominantes y simples la topografía, los instrumentos mecánicos e hidráulicos y la mayoría de los programas de instrumentación se encontraban en manos de los ingenieros que tenían un claro sentido en cuanto al propósito y la motivación para realizar los programas exitosamente. En los últimos años la tecnología ha evolucionado aceleradamente y el papel de la instrumentación geotécnica se ha vuelto más seguro y confiable, el reto del ingeniero está entonces en descubrir la hipótesis que se ajuste al comportamiento y que permita su explicación, la instrumentación entre otras, sirve para definir esta hipótesis.

Instrumentación geotécnica es una combinación entre aparatos y técnicas de medición para obtener información cuantitativa y cualitativa necesaria en los diseños geotécnicos. Dentro de mi trabajo de investigación voy a incluir todos los temas referentes a conocer y evaluar el comportamiento de las estructuras en las diferentes etapas de construcción para verificar criterios de diseño y detectar oportunamente cualquier amenaza que se presente, esto mediante el uso de instrumentación geotécnica que abarca gran cantidad de instrumentos de diferentes tipos, posibilitando el uso y adaptación en construcciones.

Respecto a la aplicación de la teoría en lo que se refiere este proyecto menciono los siguientes títulos:

OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTECNICA

De manera general los principales objetivos de la instrumentación geotécnica son los siguientes⁷:

- Evaluar técnicas de construcción en cuanto a efectividad, seguridad, tiempo de ejecución.
- Determinar la profundidad y forma de la superficie de falla en un deslizamiento activo.
- Determinar la velocidad de deslizamientos.
- Evaluar los riesgos para saber cómo prevenirlos.
- Monitorear continuamente la obra para toma de decisiones.
- Monitorear los niveles de agua subterránea.
- Establecer mecanismos de alarma.

PRINCIPALES PARAMETROS A MEDIR POR LA INSTRUMENTACIÓN GEOTECNICA

La medición de parámetros dentro de la instrumentación geotécnica en túneles construidos se divide básicamente en dos grupos que se refieren a como está afectando la obra en el exterior y al interior del túnel, por cual se clasifica de la siguiente manera:

Mediciones en superficie del túnel:

- Deformaciones
- Presión
- Esfuerzos
- Desplomes
- Inclinación

Mediciones en el interior del túnel:

- Extensión
- Cargas
- Deformaciones
- Temperatura
- Agua

TIPOS DE TECNOLOGÍA

⁷ SUAREZ, Jaime. Deslizamientos: Análisis Geotécnico. Bucaramanga: Erosión, 1998. 25cap.

Algunos tipos de tecnología más comunes utilizadas en el mundo para capturar, procesar y analizar información geotécnica en construcción de túneles son:⁸

AUSCULTACIÓN GEODÉSICA

Es un control geométrico intenso, de alta precisión en una estructura, se realiza mediante un equipo topográfico, del cual se obtienen lecturas sobre puntos que informan el desplazamiento que sufre la estructura.

CUERDA VIBRANTE

Son medidores de deformación y presión que consisten en una cuerda vibrante que sometida a una frecuencia de vibración responderá cuando el sistema entre en resonancia dando lugar a diferentes masas y cargas de fuerza. La frecuencia de la señal se transmite por cable a las unidades de lectura que puede ser un modelo portátil de adquisición de datos.

SISTEMAS MICRO ELECTROMECANICOS

Son dispositivos microscópicos diseñados y utilizados para producir cambios dentro de un ambiente controlado, en este grupo se encuentran sensores químicos, de movimiento, térmicos y ópticos, interruptores, antenas entre otros.

FIBRA OPTICA

Consiste en una luz emitida por un diodo emisor (LED) lanzada en una fibra dirigida hacia un sensor. Se utiliza como sensor de medida de deformaciones estructurales.

INSTRUMENTACIÓN GEOTECNICA

Dentro de la instrumentación geotécnica más usada en construcción de túneles se encuentra:⁹

- **Medición Topográfica:** se utiliza para la representación gráfica de la superficie terrestre.
- **GNSS Diferencial:** se utilizan como seguimiento de deslizamientos superficiales.

⁸ GONZALES SANTIAGO, José. "Proceso de Instrumentación Geotécnica para Túneles construidos en Suelos Blandos". México, 2011, 160p. Trabajo de Grado (Título Ingeniero Civil). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería Civil.

⁹ GARZON CORREA, Juan David. "Instrumentación Geotécnica, Aplicación y Soporte para la toma de decisiones de Ingeniería". Bogotá D.C., 2018, 117p. Trabajo de Grado (Título Ingeniero Civil). Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Civil.

- **Extensómetros de Convergencia, Mecánicos y Eléctricos:** se utilizan para medir la deformación, presión y carga del terreno.
- **Inclinómetros:** usados para registrar movimientos horizontales, normalmente usado en taludes y zonas inestables.
- **Deformímetros multipunto:** se usan para excavaciones profundas y desplazamiento en rocas.
- **Deformímetros magnéticos:** miden los asentamientos o rebotes en excavaciones, cimientos, presas y terraplenes.
- **Celdas de Asentamiento:** son un instrumento que mide deformaciones verticales en un punto de interés del suelo.
- **Péndulos:** según Hunt (2007) los péndulos son utilizados para medir la distancia horizontal entre dos puntos diferentes elevaciones, con este instrumento se pueden medir los movimientos estructurales.
- **Tiras de Cortante:** consisten en un circuito eléctrico que está hecho de resistores, donde se mide la resistencia eléctrica para determinar la profundidad de la rotura de la cinta y obtener una profundidad del plano de falla.
- **Piezómetro:** utilizado como medidor de presión para la realización de las cimentaciones y relleno.
- **Celdas de presión embebidas:** esta instrumentación es usada para medir presiones en el revestimiento de túneles.
- **Acelerómetros:** son sensores que detectan emisiones acústicas y sirven para detectar los movimientos sísmicos.
- **Acelerógrafos:** se utilizan para medir la aceleración del suelo provocada por un sismo.

SOFTWARE

“Algunos softwares destacados en construcción de túneles para captura de información geotécnica son”¹⁰ :

- Slope Indicator, instrumentación geotécnica y estructural.
- Trumer Schutzbauten, sistemas de protección contra avalanchas y caídas de rocas.
- 3G Software & Measurement, sistemas de fotografía digital de alta resolución para análisis y modelamiento 3D.

PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN TUNEL

¹⁰ Geodata Andina. Instrumentos Geotécnicos. {En línea}. abril 2003. {abril 2019}. Disponible en <http://www.geodataandina.cl/news.html>

“Las etapas más representativas en la construcción de un túnel son”¹¹ :

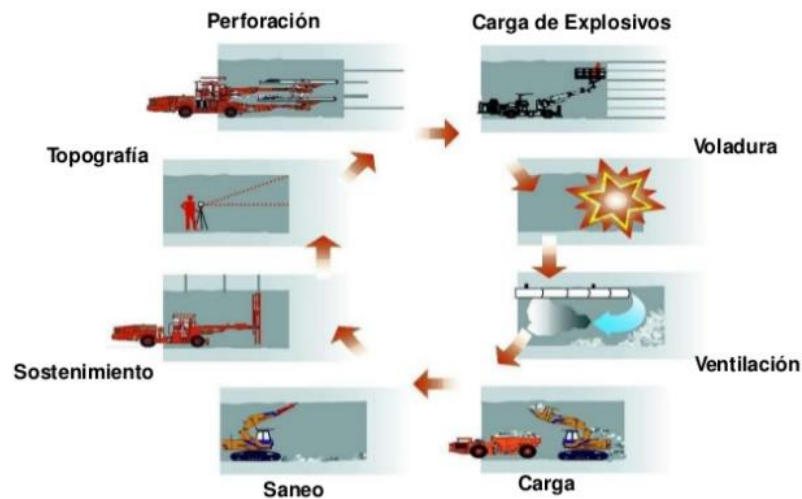
- Exploración Geotécnica
- Trazo y ubicación topográfica
- Diseño y construcción de dovelas
- Construcción de lumbreras
- Uso de tuneladoras e instrumentación
- Excavación
- Revestimiento

METODOS DE EXCAVACIÓN DE TÚNELES

Los métodos tradicionales de excavación de túneles son:

- Método Inglés
- Método Belga
- Método Alemán
- Método Austriaco
- Método Italiano

Imagen 4. Excavación de túneles con explosivos



Fuente: López, 2015

¹¹ GONZALES SANTIAGO, José. “Proceso de Instrumentación Geotécnica para Túneles construidos en Suelos Blandos”. México, 2011, 160p. Trabajo de Grado (Título Ingeniero Civil). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería Civil.

7.3. MARCO HISTÓRICO

Según Ardila (2013)¹², la historia de los túneles en Colombia se origina inicialmente con los caminos precolombinos, que posteriormente serían mejorados durante la ocupación española siendo de especial relevancia el camino entre Sogamoso y Yopal, a través del Morro y La braza grande construido entre los siglos XVI a XIX, donde existe dos (2) pequeños túneles cuya longitud total no supera los veinticinco (25) metros los cuales a su vez constituyeron la primera muestra relevante en cuanto a construcción de túneles para el transporte de personas, bienes y mercancía realizada en el territorio colombiano.

El auge ferroviario nacional emprendido a mediados del siglo XIX y principios del siglo XX, daría inicio a la construcción masiva de este tipo de obra de infraestructura, llegándose a construir en el país cerca de once (11) kilómetros en más de 85 túneles.

En los años de 1950 y 1960 comienza la historia de los túneles en Colombia específicamente en el departamento del Valle del Cauca en la vía Laboguerrero – Buenaventura donde se construyeron 5 túneles con longitudes entre 85 y 480 m, los cuales se inauguraron en 1966 con el fin de comunicar el Valle del río Cauca con el Pacífico atravesando la Cordillera Occidental por el cañón del río Dagua.

Luego se construyeron 15 túneles de longitudes de 90 y 1600 m en la vía Guateque, departamento de Boyacá, atravesando La Cordillera Oriental con el objetivo de construir la hidroeléctrica Chivor. En 1970 en el departamento de Antioquia se construyó el primer túnel de Guarne en la carretera de Medellín – Bogotá con 295 m de longitud, también en la vía que conduce de Pasto a Popayán, departamento de Nariño, se construyeron los túneles de La Llana y Peñalisa de 200 m.

Durante los gobiernos de Misael Pastrana Borrero (1970 – 1974) y Alfonso López Michelsen (1974 – 1978) se construyeron más de 20 túneles que no superaban los 850 metros de longitud. En los últimos 15 años este tipo de proyectos han tenido un resurgimiento durante los gobiernos de Álvaro Uribe y Juan Manuel Santos donde se han entregado y están en proyectos 8 túneles con distancias lineales entre los 1000 y los 10000 metros.

Entre 1973 y 1976 se construyó el túnel El Espejo de 180 m de longitud en el departamento de Caldas. En 1975 también se construyeron los primeros túneles de la vía Bogotá – Villavicencio conocidos como Quebrada Blanca. Entre los años de 1993 y 1995 se construyó el túnel La Llorona de 435 m de longitud en la carretera que conduce de Medellín al Golfo de Urabá, luego en la carretera entre Neiva y Florencia se construyeron 4 túneles con longitudes de 171 a 421m.

¹² Ardila, J. (2013). Una luz para la competitividad en nuestra movilidad. Noticreto.

En la década de 1980, cuando la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) en conjunto con Ingetec Ltda., suscribió un convenio con el Ministerio de Obras Públicas y Transporte se inició la etapa de los túneles de carretera en Colombia, donde básicamente las alternativas principales evaluadas fueron Bogotá – Buenaventura e Ibagué – Armenia, con longitudes de 8,4 a 16,3 kilómetros, donde se llevaron a cabo la realización de los estudios de prefactibilidad y factibilidad.

En la carretera Bogotá – Villavicencio se construyó el túnel Bijagual de 185 m de longitud, el cual atraviesa la Cordillera Oriental, seguido a este túnel se construyó el túnel Argelino Durán conocido como el túnel Boquerón de 2405 m de longitud, también se construyó el túnel Buenavista que es uno de los más largos del país con una longitud de 4520 m.

En el año 2000 se construyó el segundo túnel de Guarne semejante al primero, en la carretera de Medellín – Bogotá siendo el primer túnel con dos sistemas paralelos de tránsito unidireccional. En el año 2002 Colombia ya tenía casi 33 túneles que sumaban una longitud de 18 km, en esta época empezaron los mayores retos de ingeniería con proyectos de túneles.

En el año 2005 en el departamento de Antioquía se construyó el túnel de Occidente con 4603 m de longitud. Entre los años 2008 y 2010 en el departamento de Risaralda se construyó el túnel Helicoidal que comunica a Pereira con Manizales con 125 m de longitud.

En la vía Buenaventura – Bogotá se encuentra el túnel Guillermo León Valencia conocido como el túnel de Sumapaz ubicado entre Boquerón y Melgar de 4,2 km de largo, puesto en servicio en el año 2010. Posteriormente se emprendió el proyecto Laboguerrero – Cisneros de 14 km de longitud y luego se construyó el túnel Daza con 1,8 km de longitud en la vía Pasto – Chachagui.

A nivel nacional el tipo de obra representativo es el Túnel de Buenavista ubicado en Villavicencio, Meta, esta obra hace parte del tramo III de la Carretera Santa Fe de Bogotá - Villavicencio, se trata de un túnel vial totalmente revestido en concreto con una longitud de 4519.50 m. En cuanto al método constructivo, está basado en el NATM (Nuevo Método Australiano) el sostenimiento usado es a base de concreto neumático o lanzado reforzado con malla de acero, marcos de acero y pernos de anclaje, el proceso constructivo comprende la excavación por medios mecánicos o con el uso de explosivos (según el tipo de roca). Adicionalmente se provee al túnel con sistemas de drenaje, iluminación, ventilación, sistema contra incendio, seguridad y señalización.

El túnel más representativo del corredor Bogotá – Buenaventura por su complejidad, condiciones climáticas y por los antecedentes históricos es el de “La Línea” el cual se empezó a construir en el año 2009, la entrega de esta obra estaba planeada para julio de 2013 pero por dificultades geológicas se alargó la entrega para el año 2014,

y debido a nuevos inconvenientes se aproximó al año 2016 lo cual no se cumplió, pero se estima que este entraría en servicio para el año 2020.¹³

Colombia es considerada uno de los países más atrasados en materia de infraestructura, un ejemplo de proyecto con serios problemas en cuanto a diseño y ejecución en el país es el nacimiento de la obra: “TÚNELES DEL II CENTENARIO – TÚNEL DE LA LÍNEA Y SEGUNDA CALZADA CALARCÁ - CAJAMARCA” que incluye los siguientes diseños:

Las obras de conexión entre el Portal Quindío y la Intersección Américas Intersección Versalles para la conexión con el tramo Calarcá - Armenia.

La segunda calzada unidireccional entre Calarcá y Armenia. Segundo túnel en sentido Calarcá – Cajamarca, mediante la ampliación del Túnel Piloto.

Este proyecto vial ha sido causal de críticas por variables de retrasos y aumento de costos en la elaboración de las obras. El presidente de la Cámara Colombiana de Infraestructura, Juan Martin Caicedo Ferrer, explica tres (3) razones por las cuales fue mal planteado y estructurado el túnel de la línea:¹⁴

Los gobiernos desecharon las recomendaciones sobre construir el túnel sobre la base de la cordillera y no justamente en su parte más elevada, zona de alta complejidad geológica.

No se presupuestaron con juicio las obras y no se previeron los riesgos geológicos de la zona escogida.

En la zona de construcción se hallaron unas ocho (8) fallas geológicas, pues muy seguido se presentaban derrumbes o pequeños deslizamientos

El gobierno cumplió su ultimátum y decidió caducar el contrato con el consorcio Unión Temporal Segundo Centenario, que ejecutaba las obras del túnel de La Línea, proyecto crucial para facilitar el comercio exterior, desde el centro del país al puerto de Buenaventura. La caducidad del contrato deja grandes lecciones ya que como lo dijo la ministra de Transporte “el túnel de La Línea es el ejemplo de lo que no tiene que pasar en el país”.

¹³ OSORIO, Jesús David. “COLOMBIA, UN PAÍS DE TÚNELES”. Bogota, 2016 : 360 GRADOS, 2016, Vol. I.

¹⁴ Revista Dinero. Pecados Capitales del Túnel de la Línea. {En línea}. Enero 2019. {marzo 2019}. Disponible en <https://www.dinero.com/pais/articulo/que-fallo-en-la-construccion-del-tunel-de-la-linea/266436>

A pesar de que el proyecto ha avanzado en un 75 por ciento, falta terminar la excavación del túnel, que tiene 8,6 kilómetros, pavimentarlo, hacer el revestimiento, instalar los sistemas de iluminación y ventilación y terminar las obras anexas. Estas últimas contemplan construir 23 puentes y 18 túneles que están a medio camino. En total, el proyecto abarca 27 kilómetros entre Cajamarca (Tolima) y Calarcá (Quindío).

Las entidades que se encuentran en este país, relacionadas con la infraestructura vial, túneles y obras subterráneas son:

- Agencia nacional de infraestructura (ANI)
- Sociedad colombiana de ingenieros (SCI)
- Asociación de túneles y obras subterráneas (ACTOS)
- Instituto nacional de vías (INVIAS)

“A nivel mundial la construcción de túneles en su mayoría es de tipo férreo, ya que las condiciones técnicas y económicas son más favorables. De los veintiocho (28) Túneles más largos del mundo construidos en diferentes países y Continentes tan solo cuatro son de carretera, los cuales son: el San Gotardo en Suiza, el Arlberg en Austria, Frejus en Francia y el Mont Blanc en Francia”¹⁵.

La competencia internacional es uno de los objetivos principales de las políticas públicas en cuanto a inversión de infraestructura en los países, en Colombia no se ha tenido un desarrollo económico pleno por diferentes inconvenientes en la formulación y ejecución de proyectos, lo que tampoco ha permitido que las actividades desarrolladas por los concesionarios y el estado se desarrollen de la mejor manera.

La construcción de túneles viales es una necesidad en un territorio como el colombiano debido a su geografía montañosa, además por los beneficios en cuanto a reducción en los tiempos de transporte de las personas y mercancías desde un lugar a otro, incremento del turismo, costos de transporte entre otros. Para poder garantizar estos aspectos, se debe recurrir a nuevas tecnologías y dotación de equipos modernos que se ajusten a la ingeniería civil, en este caso a construcción de obras subterráneas para que la seguridad y funcionalidad del túnel sean posibles.

¹⁵ GUERRERO PACHECO. Descripción del Proyecto Túnel de la Línea. {En línea}. Año 2017. {marzo 2019}. (<https://repository.unilibre.edu.co>).

7.4. MARCO LEGAL

Todos los trabajos de diseño de los equipos electromecánicos, sus sistemas e instrumentación, se elaborarán de acuerdo con lo establecido en las últimas versiones de las normas publicadas por las entidades listadas a continuación y que sean aplicables para el diseño y la construcción de túneles, todas las cuales deberán ser aplicadas de forma integral, es decir, cumpliendo con todas las especificaciones de las diferentes normas:¹⁶

- ICONTEC. Instituto Colombiano de Normas Técnicas
- NTC 2050. Código Eléctrico Colombiano
- NTC 1500 Código Colombiano de Fontanería

El Concesionario estará obligado a cumplir, también, con las especificaciones y/o normas técnicas de carácter internacional listadas a continuación:

- IEC. International Electrotechnical Comisión
- IEEE. Institute of Electrical and Electronic Engineers.
- ANSI. American National Standards.
- CIE. Comité Internacional de Iluminación.
- NFPA. National Fire Protection Association.
- RFC. Internet Request for Comments. Red Local.
- ITU-T. International Telecommunication Union –Series G, V, L, M, H, K, O.
- NTSC. National Television Standards Committee –Video.
- ASTM. American Society for Testing and Materials.
- ISA. Instrument Society of America.
- ICEA. Insulated Cable Engineers Association, USA.
- NEC. National Electric Code.
- NEMA. National Electric Manufactures Association.
- ISO. International Standards Organization.
- PIARC. Permanent International Association Road Committee.
- FHWA. Federal Highway Administration.
- Directiva Europea 2004/54/CE.
- SIA-280. Swiss Standard Schweizer Norm 1994.
- American Institution of Steel Construction (AISC)
- American Society of mechanical Engineers (ASME)
- American Wire Gage (AWG)
- American Welding Society (AWS)
- Guide for Lighting of Road Tunnels and Underpasses (CIE 88-1990)
- Deutsche Institute für Normen (DIN)
- Under Writers Laboratories (UL) RAS 2000 ALCANCE DE LOS ES

¹⁶ CONTRATO DE CONSECIÓN DE OBRA PÚBLICA. Proyecto Ruta del Sol. {En línea}. {marzo 2019}. Disponible en (<ftp://ftp.ani.gov.co>)

La construcción de túneles en Colombia se basa en la siguiente normatividad:

Acuerdo 20 De 1995

Por el cual se adopta el Código de Construcción del Distrito Capital de Bogotá, se fijan sus políticas generales y su alcance, se establecen los mecanismos para su aplicación, se fijan plazos para su reglamentación prioritaria y se señalan mecanismos para su actualización y vigilancia

Agencia Nacional de Infraestructura (ANI)¹⁷

Apéndice técnico 3 - especificaciones generales.

Especificaciones Generales de Carreteras del INVIAS

Especificaciones técnicas de construcción para cada una de las obras y equipos a instalar en los túneles.

Manual para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera- Colombia (2015)¹⁸

Establece cuales son los requisitos mínimos para el correcto funcionamiento de los túneles de carretera bajo condiciones de seguridad vial y diseños adecuados a las condiciones propias topográficas y del parque automotor de Colombia.

Resolución 1283 de 2006

Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción de túneles y sus accesos.

¹⁷ MINISTERIO DE TRANSPORTE. AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Apéndice Técnico 3 Especificaciones Generales. {Consultado en marzo de 2019}.

¹⁸ MANUAL PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TÚNELES DE CARRETERA- Colombia (2015)

8. ESTADO DEL ARTE

Se encontraron algunos documentos sobre la construcción de túneles y la implementación de instrumentación geotécnica que sirven como fuente de información para el presente trabajo, como son los siguientes:

El trabajo de grado “Diseño y Construcción de Túneles de Ladera en Colombia” (Arias. Ospino, 2016), este trabajo se enfoca en la investigación y análisis del diseño constructivo de los túneles de ladera (túneles que debido a su ubicación geográfica poseen baja cobertura lateral) y la identificación de las problemáticas que se presentan en condiciones geotécnicas desfavorables. Entiende la importancia de la investigación en la caracterización del terreno, contemplando y describiendo básicamente la topografía del sector, estructura del macizo rocoso, propiedades de resistencia y deformación a través del uso de herramientas tecnológicas que permitan una obtención de información geotécnica confiable y segura.

También está la tesis “Proceso de Instrumentación Geotécnica para Túneles Construidos en Suelos Blandos” (Gonzales, 2011), la cual detalla la diversa instrumentación utilizada en túneles y los parámetros a tener en cuenta durante la etapa constructiva y operativa, presenta el tema de instrumentación geotécnica como parte fundamental de en los criterios de diseño, especificaciones de materiales y su colocación para generar vida útil a una estructura. Esta tesis presenta la planeación de un sistema de instrumentación definiendo los aspectos más importantes hacia los cuales deberá dirigirse un monitoreo evaluando variables a medir tanto en la superficie como al interior del túnel; reconoce que un túnel es una obra de ingeniería que requiere de técnicas, productos, equipos especiales, software de análisis geológico, geotécnico e hidráulico.

Un documento de la empresa internacional “SISGEO Latinoamérica” acerca de los suministros y servicios de instrumentación geotécnica y sistemas de monitoreo para construcción de obras civiles, SISGEO Latinoamérica es uno de los líderes mundiales en la fabricación de instrumentación geotécnica ha proyectado e instalado en todo el mundo sistemas de medidas para túneles. Los principales parámetros monitorizados son:

- Temperatura del aire, agua y hormigón
- Lluvias y condiciones meteorológicas
- Eventos sísmicos
- Esfuerzos y tensiones en estructuras
- Deformaciones locales
- Desplazamientos horizontales y verticales
- Rotación y movimiento de juntas y grietas
- Estabilidad de las laderas adyacentes
- Fallas / abultamientos
- presiones de poro

- caídas de roca y derrumbes

Los principales instrumentos de medida que ofrece SISGEO son:

- Piezómetros, transductores de presión y medidores de nivel;
- Medidores de asentamientos, prismas, objetivos ópticos y estaciones totales robóticas;
- Extenso- inclinómetros;
- Fisurómetros y medidores de juntas;
- Vertederos y medidores de flujo;
- Clinómetros y medidores de inclinación;
- Péndulos directos e invertidos;
- Termómetros;
- Bandas extenso métricas;
- Acelerómetros;
- Estaciones meteorológicas.

También se encuentra el trabajo de grado “Instrumentación y Monitorización Geotécnica del Nuevo Túnel el Melón” de la ciudad de Chile (Morera, 2016) donde se describe el importante desarrollo de la instrumentación geotécnica en la ingeniería civil y se centra en la explicación y el detalle de la instrumentación necesaria para el diseño y monitorización del túnel El Melón situado en Chile, presenta los principales equipos utilizados en ingeniería civil centrándose en los túneles hasta llegar al caso específico de El Melón. En este trabajo también detallan la importancia de emplear instrumentación geotécnica abarcando una gran cantidad de instrumentos de distinta clase que permitan obtener una mayor información de manera que se afecte lo menos posible los proyectos de infraestructura en desarrollo.

El contrato No 2121825 “Diseño Conceptual de Túneles Corredor Ibagué – La Paila” (agosto 2013) el cual analiza la normatividad aplicable, consideraciones en el diseño de túneles, estudio de geotecnia para túneles y equipamiento del túnel.

El libro “Deslizamientos. Análisis Geotécnico” del ingeniero Jaime Suarez Díaz, capítulo 12 donde expone el tema de instrumentación y monitoreo Geotécnico, los objetivos y parámetros de medición.

El trabajo de grado “Instrumentación Geotécnica, Aplicación y Soporte para la toma de decisiones en Ingeniería” (Garzón, 2018) detalla el uso de la instrumentación geotécnica como una valiosa herramienta dentro del control y seguimiento de proyectos y se enfoca en las diferentes técnicas de monitoreo y su aporte en obras de construcción en Colombia, este trabajo de grado se centran en un conocimiento básico sobre técnicas empleadas, procesos, análisis y la importancia de implementar instrumentación geotécnica en las obras civiles. Se describen también las ventajas y desventajas y los resultados reales en algunos proyectos con el uso de la instrumentación geotécnica en el entorno colombiano.

Estos documentos expuestos anteriormente sobre la construcción de túneles y el empleo de instrumentación geotécnica tienen información específica en común, comparten temas de interés para la presente investigación documental y apoyan la intención de comprensión del problema tratado o por tratar; pero aún existen vacíos sobre la Instrumentación actual para lograr información geotécnica empleada en Colombia y otros lugares del mundo.

9. METODOLOGÍA

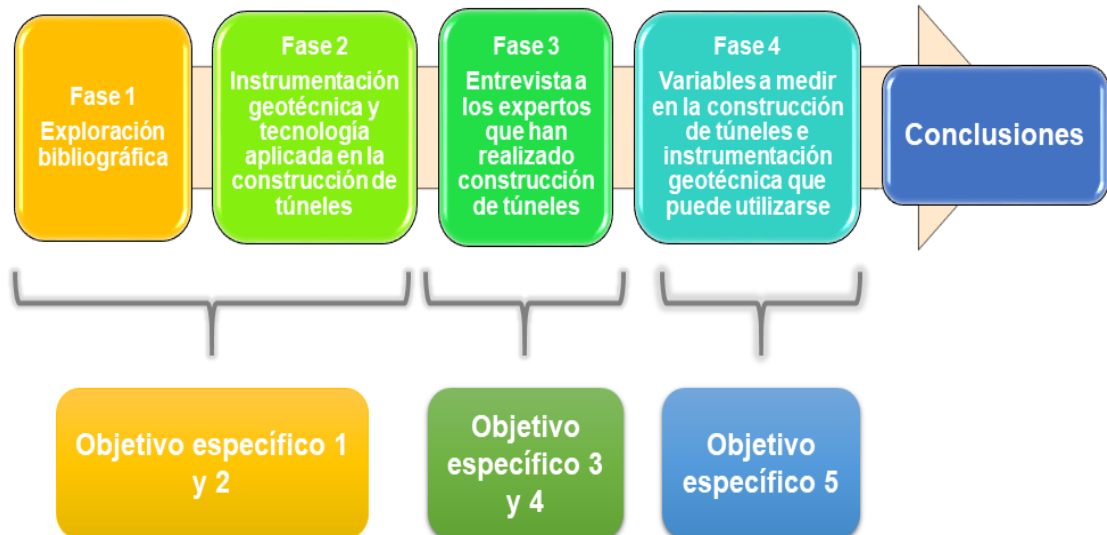
Este estudio no se enfoca en un modelo empírico analítico de experimento o algoritmos de laboratorio o pruebas con resultados estadísticos de variables, se trata de un estudio exploratorio documental con la búsqueda de información, recopilación, sistematización y análisis de acuerdo a la categoría de instrumentación para la información geotécnica en túneles.

Este trabajo se realizó mediante una exploración bibliográfica, recopilación, análisis, información resumida y con un enfoque bibliográfico, cualitativo y descriptivo mediante el siguiente proceso:

Una primera etapa fue la selección de documentos para la búsqueda de la información (libros, artículos, revistas, actas, etc.) y una segunda fase consistió en seleccionar los materiales y medios que finalmente fueron objeto de la investigación documental como el resultado de las entrevistas a expertos que han trabajado en construcción de túneles viales y conocen la importancia de emplear instrumentación.

Para el desarrollo de este trabajo de grado se contó con el apoyo e información de profesionales directivos de la Asociación Colombiana de Túneles y Obras Subterráneas (ACTOS), profesionales del INVIAS, Académicos y Empresarios proveedores de instrumentación geotécnica como SISGEO y GROUNDPROBE que ven la necesidad de contar con instrumentos y sistemas de monitorización y seguimiento adaptados al túnel para cuantificar con precisión parámetros de comportamiento del terreno, identificar los posibles cambios, deducir fallas y supervisar la estabilidad del túnel aplicando medidas correctivas en el momento oportuno. Por lo anterior se considera relevante el tema de este trabajo de grado, entendiendo el uso de la instrumentación geotécnica como algo fundamental para que el ingeniero civil en el proceso de construcción del túnel pueda obtener información real de los diseños geotécnicos, así como seguridad y eficiencia en la toma de decisiones.

Imagen 5: Metodología



Fuente: Propia

Fase 1: Exploración bibliográfica

Se realizó la búsqueda de información sobre instrumentación aplicable para la captura de información geotécnica en la construcción de túneles en algunos países del mundo, a través de internet, artículos, revistas, tesis de grado, libros, entrevistas, conferencias del XIV Seminario de Túneles y Obras Subterráneas realizado durante los días 10 y 11 de octubre del 2019 en la ciudad de Medellín.

Fase 2: Instrumentación geotécnica y tecnología aplicada en construcción de túneles

Se identificó las tecnologías de software existentes en la construcción de túneles, sus funciones y usos.

Se investigó sobre los diferentes tipos de instrumentación geotécnica que son utilizados actualmente para la construcción de túneles.

Fase 3: Entrevista o información de los expertos que han realizado trabajos constructivos de túneles en Colombia

Se realizaron entrevistas a los expertos a cargo de proyectos de túneles del país mediante un instrumento cualitativo, indagando sobre la instrumentación, aplicaciones y métodos utilizados para la construcción de túneles.

También se amplió la información con empresarios y proveedores de instrumentación geotécnica que presentaban su stand y muestra comercial en el XIV Seminario de Túneles y Obras Subterráneas realizado durante los días 10 y 11 de octubre del 2019 en la ciudad de Medellín.

Fase 4: Variables a medir en la construcción de túneles e instrumentación geotécnica que puede aplicarse

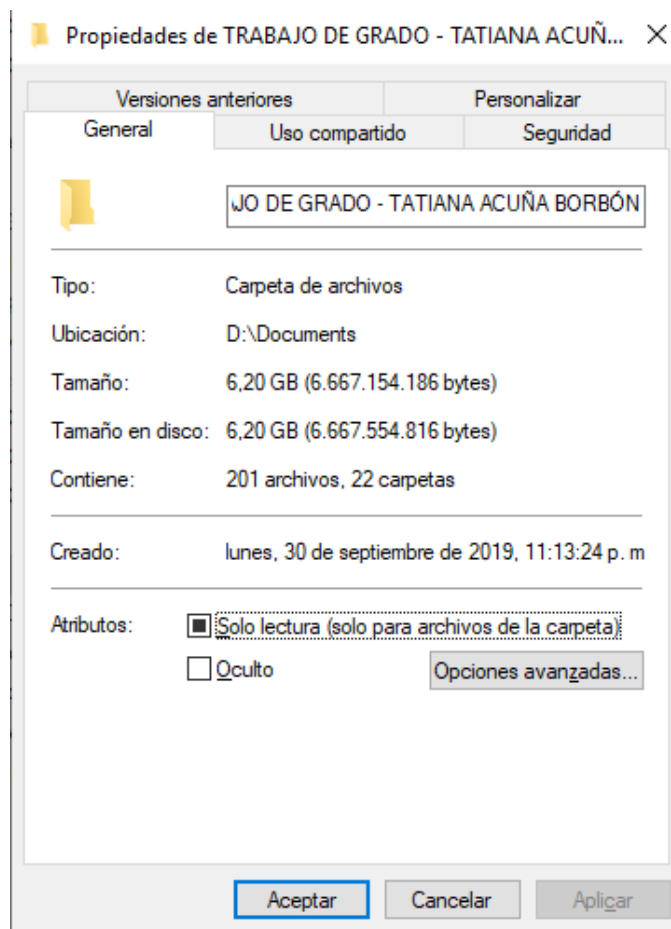
Se analizó el desarrollo de todos los objetivos y de acuerdo al análisis y resultados se identificaron algunos parámetros de medición importantes e instrumentación que mejor se adecua a la instrumentación.

10. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

Se realizó una gran compilación de información bibliográfica para el desarrollo del presente trabajo, en total se utilizaron 201 archivos organizados en 22 carpetas, 6.20 GB de almacenamiento, los cuales se organizaron según el tema de cada objetivo.

En la siguiente figura se muestra el total de archivos empleados para el desarrollo del trabajo de grado:

Imagen 6. Almacenamiento recopilación bibliográfica



Fuente: Propia

Para el desarrollo del trabajo de grado la información recopilada se organizó en varias carpetas, en el siguiente orden.

Imagen 7. Información organizada en carpetas

Este equipo > DATOS (D:) > Documentos > TRABAJO DE GRADO - TATIANA ACUÑA BORBÓN

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
AVANCES ANTEPROYECTO	28/10/2019 8:19 a. ...	Carpeta de archivos	
Norma NTC 1486	30/09/2019 11:13 ...	Carpeta de archivos	
OBJETIVOS	28/10/2019 8:58 a. ...	Carpeta de archivos	
PRESENTACIONES XIV SEMINARIO TÚNELES Y OBRAS SUBTERRANEAS MEDELLIN	24/10/2019 7:32 p....	Carpeta de archivos	
Trabajos guía	28/10/2019 8:14 a. ...	Carpeta de archivos	
TUNELES - PRESENTACIONES	30/09/2019 11:14 ...	Carpeta de archivos	
Conclusiones	26/10/2019 11:17 a...	Documento de Mi...	2.845 KB
Información de consulta	30/09/2019 5:48 p....	Documento de Mi...	17 KB
Libro K Fundamentos Investig Ing (1)	20/04/2019 5:42 p....	Archivo PDF	1.571 KB
Libro K Metodología Investig	20/04/2019 5:43 p....	Archivo PDF	15.811 KB
TG Instr Inf Geotecn Tuneles Viales - Tatiana Acuña 20191028	28/10/2019 9:02 a. ...	Documento de Mi...	3.901 KB

Fuente: Propia

Para el desarrollo de los objetivos se realizó una matriz que permitió organizar la información siguiendo el orden de cada objetivo del trabajo de grado dividida en carpetas de acuerdo a la importancia de cada tema.

Imagen 8. Información de objetivos ordenada por carpetas

Este equipo > DATOS (D:) > Documentos > TRABAJO DE GRADO - TATIANA ACUÑA BORBÓN > OBJETIVOS

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
OBJETIVO 1 y 2	30/09/2019 11:14 ...	Carpeta de archivos	
OBJETIVO 3 y 4	28/10/2019 8:31 a. ...	Carpeta de archivos	
OBJETIVO 5	28/10/2019 8:34 a. ...	Carpeta de archivos	
MATRIZ DE OBJETIVOS	28/10/2019 8:58 a. ...	Hoja de cálculo d...	30 KB

Fuente: Propia

Para el objetivo 1 y 2 la información se subdividió en 2 carpetas, una donde se archivó toda la información encontrada sobre instrumentación Geotécnica y la otra sobre la documentación que se pudo obtener de la instrumentación que están empleando algunos países internacionales.

Imagen 9. Información de objetivos 1 y 2

Este equipo > DATOS (D:) > Documentos > TRABAJO DE GRADO - TATIANA ACUÑA BORBÓN > OBJETIVOS > OBJETIVO 1 y 2

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
INSTRUMENTACIÓN GEOTECNICA	28/10/2019 8:35 a. ...	Carpeta de archivos	
INVESTIGACIÓN PAISES	26/10/2019 10:59 ...	Carpeta de archivos	

Fuente: Propia

Para el desarrollo del objetivo 3 y 4 la información recopilada se subdividió en 4 carpetas, donde se organizó los audios de las entrevistas realizadas a expertos, los formatos físicos que se aplicaron en las entrevistas, los informes de túneles en Colombia encontrados en páginas como el INVIAS y la ANI y los videos que se pudieron obtener del seminario de túneles en Medellín.

Imagen 10. Información de objetivos 3 y 4

Este equipo > DATOS (D:) > Documentos > TRABAJO DE GRADO - TATIANA ACUÑA BORBÓN > OBJETIVOS > OBJETIVO 3 y 4

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
Audio entrevistas	28/10/2019 8:23 a. ...	Carpeta de archivos	
Formatos fisicos entrevistas	28/10/2019 8:31 a. ...	Carpeta de archivos	
Informes Túneles en Colombia	28/10/2019 8:20 a. ...	Carpeta de archivos	
Videos Seminario Tuneles Medellín	15/10/2019 10:30 ...	Carpeta de archivos	

Fuente: Propia

11. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA INTERNACIONAL:

La construcción de grandes vías de comunicación exige atravesar importantes barreras naturales como cadenas montañosas que durante milenios no se han pensado ni podido franquear, en muchos casos el modo más seguro y económico de remover estas barreras geográficas será la realización de importantes obras subterráneas que exigirá el desarrollo de nuevos métodos de construcción más seguros y eficaces lo que necesitará también de nuevos avances tecnológicos.

El auge de las obras subterráneas se verá acrecentado por la demanda de soluciones a la problemática que plantea el tráfico de las grandes ciudades, el uso creciente del espacio subterráneo en el medio urbano y la realización de conexiones rápidas interurbanas. En el ámbito de la Unión Europea, la política de infraestructura del transporte, en la que se incluyen los proyectos más importantes implican la construcción de unos 2100 Km de túneles hasta el horizonte temporal de año 2030 y los países europeos que mayor número de túneles construirán en los próximos 20 años son:¹⁹

- España: 567 Km.
- Noruega: 481 Km.
- Islandia: 109 Km
- Suecia: 63 Km.
- Escandinavia-Dinamarca: 58 Km

La construcción subterránea mundial se mueve en un medio internacional muy competitivo. La construcción subterránea europea tiene a nivel internacional, unos competidores como:

- Japón
- Estados Unidos
- Corea
- Canadá
- Australia

Estos países están invirtiendo en programas de Investigación e Innovación tecnológica que les permite desempeñar el papel de líderes en el mundo. En el presente siglo XXI se realizará en el mundo la construcción importantes proyectos de ingeniería que permitirán mejorar las conexiones terrestres, por ferrocarril y carretera entre países y continentes. Gran parte de estos proyectos exigirán la

¹⁹ CORNEJO, Laureano. Los grandes proyectos internacionales de construcción de obras subterráneas, un reto tecnológico para el siglo XXI. En: Revista de obras públicas. No 3464 (mar, 2006); p. 45. Ibid., p 74.

construcción de largos túneles a través de importantes accidentes geográficos, estrechas y grandes cadenas montañosas.

Estos retos tecnológicos que se plantean, serán superados por un gran esfuerzo de innovación tecnológica que se producirá como: La tecnología de los nuevos materiales compuestos, la mecatrónica y la nanotecnología, cuyos primeros frutos aparecerán en la presente década, con un desarrollo considerable hacia el año 2025.²⁰

Tomando como referencia que Colombia es un país de América Latina, para conocer sobre el uso y avances de instrumentación geotécnica internacional se incluye en esta investigación información de algunos de los países de América Latina que cuentan con los túneles vehiculares más largos y que tienen relación con Colombia en cuanto a la producción de sus bienes y servicios según la posición de su Producto Interno Bruto (PIB). Se detalla información de instrumentación geotécnica de los siguientes países:

- Chile
- Ecuador
- México
- Perú

“En la siguiente tabla se recogen los túneles más largos de Latinoamérica cuyo destino sea el tráfico de vehículos. Los marcados con fondo azul están en construcción. Se incluyen túneles en función, en construcción real y en proyecto”²¹.

²⁰ CORNEJO, Laureano. Los grandes proyectos internacionales de construcción de obras subterráneas, un reto tecnológico para el siglo XXI. En: Revista de obras públicas. No 3464 (mar, 2006); p. 45. Ibid., p 74.

²¹ Túneles vehiculares más largos de Latinoamérica”. {En línea}. {27 octubre de 2019} disponible en: (https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:T%C3%BAneles_vehiculares_m%C3%A1s_largos_de_Latinoam%C3%A9rica)

Tabla 2. Túneles vehiculares más largos de Latinoamérica

Nombre	Localización	País	Longitud	Año de inicio de construcción	Año de inauguración
Túnel del Toyo	Cañasgordas-Giraldo	 Colombia	9840 m.	2015	2022 (en construcción) ¹
Túnel de La Línea (Túnel del Bicentenario)	Ibaqué-Calarcá	 Colombia	8652 m.	2008	2020 (en construcción) ²
Túnel de Oriente (Santa Elena 1 y 2)	Medellín-Rionegro	 Colombia	8229 m.	2015	2019 ³
Fernando Gómez Martínez (Túnel de Occidente)	Medellín-San Jerónimo	 Colombia	4603 m.	2003	2006
Túnel Buena Vista Misael Pastrana Borrero	Villavicencio-Bogotá	 Colombia	4560 m.		1996
Túnel Las Raíces	Curacautín-Longuimay	 Chile	4528 m.	1930	1939
Túnel Renacer	Villavicencio-Bogotá	 Colombia	4350 m.	2012	2016
Túnel de Sumapaz - Guillermo León Valencia	Mejgar-Bogotá	 Colombia	4200 m.		2010
Túnel de la Quebra	Medellín-Cisneros	 Colombia	4200 m.	2017	2021 (en construcción)
Macrotúnel Zona Diamante Acapulco	Acapulco de Juárez	 México	3200 m.	2013	2017
Túnel del Cristo Redentor	Uspallata-Los Andes	 Argentina  Chile	3080 m.		1980
Maxitúnel Interurbano Acapulco	Acapulco de Juárez	 México	2953 m.		1996
Túnel Chacabuco 1	Santiago-Los Andes	 Chile	2045 m.		1972
Túnel Chacabuco 2	Santiago-Los Andes	 Chile	2000 m.		2011
Túnel Línea Amarilla	Lima	 Perú	1800 m.	2012	2018
Túnel de Daza	San Juan de Pasto	 Colombia	1710 m.		2012
Túneles Ruta Nacional 75	La Rioja-Los Sauces	 Argentina	1450 m.	2017	2021 (en construcción) ⁴
Túnel Punta Olímpica	Áncash	 Perú	1380 m.	2011	2013
Túnel el Zocuitán	Autopista 320 México-Tuxpan	 México	1380 m.	2012	2015

Fuente: Wikipedia, 2019

Según el Foro Económico Mundial (FEM) en un informe de competitividad global se clasifica a España como uno de los países con mejor infraestructura, además de ser un país europeo con mayor número de túneles, por lo que es importante mencionar cuál ha sido la aplicación que se le ha dado al uso de instrumentación geotécnica en la construcción de túneles viales en este país.

11.1. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN CHILE

Dentro de la red vial de Chile actualmente existen en operación 23 túneles con una longitud de 22.091 metros. En el desarrollo de estas obras el monitoreo durante y después de la construcción está tomando gran importancia dado que:

- Las estructuras se hacen más complejas a asentamientos
- El costo de imprevistos aumenta de manera rápida
- El cliente busca manejar riesgos
- Nuevas tecnologías están entregando información en tiempo real y remoto

En las obras de construcción de túneles en Chile los programas de monitoreo geotécnico son aplicados para salvar vidas, reducir costos y entregar información de comportamientos inesperados. En algunas universidades de Chile se dictan cursos electivos sobre “Instrumentación en Ingeniería Geotécnica”.

En los proyectos de construcción de túneles viales se han empleado las siguientes herramientas instrumentales y softwares de última generación.

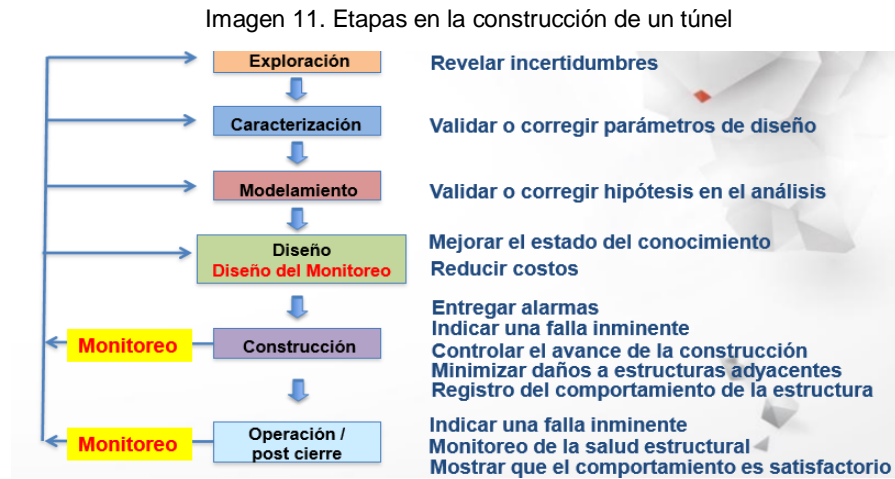
TECNOLOGÍA SOFTWARE

- Sensores de presión
- Software MEMS: muestra la aceleración de una masa que se desplaza.
- 3G Software y Measurement: sistemas de fotografía digital de alta resolución.
- Software Trumer Schtzbauten: sistemas de protección contra avalanchas y caídas de rocas.
- Refraction Technology: medición de distancias para aplicaciones de sismología.

INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA MÁS USADA

- Piezómetros
- Extensómetros
- Inclínómetros
- Cuerda vibrante
- Acelerógrafos

Las herramientas mencionadas son aplicadas en las etapas de construcción y operación del proyecto:



Fuente: Gonzales, Lenart (2015)

11.2. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN ECUADOR

Ecuador es un país donde se han construido varias obras de movilización y la instrumentación se ha convertido en una herramienta importante para la ingeniería de este país. A lo largo de las décadas se han ido implementando proyectos nuevos con la ayuda de la instrumentación que avanza tecnológicamente todo el tiempo, lo que ha permitido evaluar la seguridad de las obras en tiempo real.²²

Dentro de la instrumentación geotécnica no existe una normativa oficial que indique procedimientos exactos de como tomar las mediciones, por lo que se toman guías de ensayos concretos en los que se emplea instrumentación como:

- Guía Técnica de AETOS muy utilizada en Europa.
- Uso de inclinómetros para instrumentación geotécnica en proyectos de transporte, utilizada en Estados Unidos.
- El libro “Ingeniería Geotécnica para monitorear el desempeño de campo” de John Dunnycliff.

El tipo de instrumentación que se utiliza para la construcción de túneles es:

Instrumentación para medir tensiones, esfuerzos y empujes:

²² GUILLEN, José. Auscultación en la construcción de túneles en zonas urbanas y aplicación a la primera línea del metro de Quito. Quito, 2018, 107p. Trabajo de investigación (Ingeniero Civil). Universidad San Francisco de Quito. Facultad de ingeniería.

- Células de presión

Instrumentación para medir deformaciones:

- Extensómetro de varilla
- Extensómetro de cuerda vibrante

Instrumentación para medir los movimientos del terreno:

- Inclínómetros verticales
- Hitos de nivelación

Instrumentación para medir la presión del agua:

- Piezómetro abierto
- Piezómetro de cuerda vibrante

11.3. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN MÉXICO

De acuerdo con el manual de diseño y construcción de túneles de carretera de México de 2016, se encuentra un capítulo dedicado a la instrumentación geotécnica denominado “Seguimiento técnico y Auscultación”, donde se describen las actividades técnicas que se recomiendan para el seguimiento de proyectos de túneles y se mencionan los instrumentos que se deben utilizar para las mediciones del comportamiento de las excavaciones del túnel, como lo son:

- Inclínómetros para medir la inestabilidad de taludes
- Piezómetros para detectar la saturación y flujo de agua
- Topografía para nivelación y precisión
- Cintas extensométricas para para las mediciones de convergencia

En ese capítulo no se indica como utilizar o instalar el instrumento ni los niveles de precisión que se deben utilizar en las mediciones.

En la publicación de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, Volumen 2 de la Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica en la sesión 7 sobre: “Instrumentación” se habla de la implementación de un sistema de instrumentación geotécnica que consistió en:

- Medidores de juntas para determinar desplazamientos en los puntos trazados
- Inclínómetros para determinar desplazamientos horizontales a lo largo de una tubería
- Estaciones satelitales GPS para determinar desplazamientos en tiempo real

- Extensómetros de barra para determinar desplazamientos debido a la descompresión de roca

De acuerdo con esta referencia concluyeron que el sistema de instrumentación geotécnica implementado en la zona inestable permitió delimitar la zona en movimiento y logró información para conocer la velocidad y dirección de estos movimientos, también identificaron la efectividad en las medidas de estabilización para la toma de decisiones respecto a la seguridad de la obra.

11.4. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN PERÚ

En Perú la ingeniería subterránea se presenta como una oportunidad de desarrollar una cultura frente a la explotación del espacio subterráneo, la construcción de túneles viales es una práctica sostenible. El sistema de auscultación de los proyectos de túneles en este país se centra en la determinación de la convergencia interior del túnel, así como las mediciones en la superficie.

Dentro de la instrumentación empleada en algunos proyectos está:

- Para medir desplazamientos: Inclínómetros, extensómetros e hitos de nivelación.
- Para medir deformaciones; Extensómetros y fibra óptica.
- Para medir fuerzas y tensiones: Células de presión
- Para medir la fuerza ejercida por el agua en el terreno: Piezómetros de tubo abierto

Para asegurarse que la instrumentación funcione adecuadamente los profesionales recomiendan tomar medidas periódicamente de forma que se puedan alejar lo más posible errores.

La instrumentación empleada en los túneles que usan el Método Austriaco, El Sistema Bernold, El Método Belga entre otros utilizan la instrumentación limitada para medir únicamente las convergencias a lo largo de tramos del túnel, donde se sitúan una serie de puntos anclados a la roca para realizar mediciones de la distancia entre puntos.

También definen niveles de actuación donde en caso de que se den deformaciones en roca puedan definir cuando son movimientos naturales y cuando pueden convertirse en un riesgo.

11.5. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN ESPAÑA

España cuenta con alrededor de 300 túneles viales construidos con el objetivo de mejorar la seguridad de los conductores y facilitar el transporte de personas y mercancías reduciendo el tiempo de viaje. Para la construcción de estos túneles la

Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas (AETOS) cuenta con unas guías técnicas de instrumentación y auscultación para el desarrollo de sus obras.

El propósito de la guía técnica es exponer las técnicas disponibles para instrumentar las obras de túneles y terreno afectado, mostrar los problemas de medida, calibración y utilización de la instrumentación, enfatizar en que la instrumentación no termina cuando lo hace la obra, sino que debe diseñarse también para conocer el comportamiento de la obra en servicio. El desarrollo de la guía cuenta con los siguientes ítems:

- Magnitudes a medir e instrumentación que puede utilizarse
- Criterios y recomendaciones para el uso de la instrumentación
- Frecuencia habitual de lectura
- Umbrales de control y medidas de actuación

Entre la instrumentación geotécnica que se emplea en España en la construcción de proyectos de túneles viales se encuentra:

- Piezómetros de cuerda vibrante
- Piezómetro abierto
- Extensómetro de varillas
- Hitos de nivelación
- Clavos de nivelación
- Sensores
- Arquetas de subsidencia
- Bases de nivelación
- Pernos de convergencia
- Inclinómetros
- Escala graduada con mira de nivelación
- Puntos de inserción
- Control topográfico
- Dianas
- Cinta extensométrica
- Células de presión
- Células de carga
- Softwares robotizados
- Sismógrafos - acelerómetros

En la siguiente tabla tomada de la Guía de Instrumentación de AETOS se relacionan los principales instrumentos de medición con el parámetro que controla cada instrumento.

Tabla 3. instrumentos de medición

Aparato de medición	Parámetro que controla
Piezómetro de cuerda vibrante	Medir la presión intersticial
Piezómetro abierto	Medir la profundidad del nivel freático
Extensómetro de varillas	Desplazamientos verticales en profundidad del terreno en el trasdós de la pantalla. Proporcionan desplazamientos relativos entre distintos puntos, en el interior de un sondeo respecto de un punto accesible situado en la superficie. Su objeto es determinar el radio de influencia de las deformaciones en obra. Como la medida es relativa (al tomar como referencia un punto de superficie) se controlarán también los posibles asentamientos mediante medidas topográficas en arquetas coincidentes con las cabezas de los extensómetros.
Hitos de nivelación	Extensómetros de una sola varilla, anclada a profundidad variable.
Arquetas de subsidencia	Asientos verticales en superficie. Realmente suele ser la protección de un extensómetro de varilla muy cortos (1-2 m.)
Bases de nivelación.	Referencia
Pernos de convergencia	Alargamientos y acortamientos de las dimensiones de la cavidad, con el objeto de estudiar las deformaciones internas de la sección como respuesta al equilibrio entre terreno y la estructura.
Inclinómetros	Movimientos horizontales. Midiendo la deformación continua en profundidad de la pantalla o terreno, respecto a un punto que se considere inmóvil.
Escala graduada con mira de nivelación	Asientos verticales en edificios.
Puntos de inserción	Para el control de grietas de los edificios.

Fuente: Guía de Instrumentación de AETOS

12. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EMPLEADA EN CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES

El monitoreo en la construcción de túneles requiere de un seguimiento periódico con el objetivo de conocer el comportamiento real de la estructura. El monitoreo geotécnico de la estructura es el soporte de la ingeniería para el diseño, implementación y gestión de obras con la finalidad de reducir el riesgo de colapso de estas. Para este monitoreo es necesario la implementación de instrumentos que varían en función de la aplicación y el propósito de medición.

“Se define instrumentación como la instalación y disposición de los diversos sensores destinados a la lectura de las distintas magnitudes geotécnicas que se pretende controlar durante el proceso de auscultación del elemento constructivo, en este caso un túnel, para conocer su evolución y comportamiento durante sus fases constructiva y de operación, incluso en la fase de proyecto para evaluar las condiciones iniciales y determinar los parámetros de diseño”²³

Para la elección de la instrumentación se deben tener en cuenta algunos factores como:

- Magnitudes fiables y precisas
- Calibración y mantenimiento
- Frecuencia de las mediciones
- Obtención de datos

Al momento de utilizar instrumentación se deben definir los siguientes aspectos:

- Objetivo de la instrumentación
- Variables que se van a medir
- Aparatos de medida
- Descripción de los aparatos de medida (precisión, rango, frecuencia, instalación, obtención de datos)
- Secciones a instrumentar
- Intervalo de lecturas
- Situaciones de alerta
- Plan de contingencia

Entendiendo la auscultación como el procedimiento por el cual se evalúa las condiciones en las que se encuentra una infraestructura y el comportamiento de la obra. Para el caso de los túneles la auscultación brinda información sobre las propiedades y el comportamiento del terreno a excavar, información que permitirá evaluar el estado de la obra en todas sus fases.

²³ AETOS, Guía Técnica de Instrumentación y Auscultación en Proyectos de Construcción de Túneles Urbanos. España.

Imagen 12. Plan de Auscultación de un Túnel



Fuente: Guía de Instrumentación de AETOS

De acuerdo con la recopilación bibliográfica e investigación realizada se concluye que la instrumentación geotécnica empleada en obras de construcción de túneles se puede clasificar en los siguientes grupos:

- Convencional Estándar
- Auscultación Automática
- Software

Imagen 13. Parámetros medidos e instrumentación empleada

MONITOREO DE TUNELES		EXCAVACIONES EN CORTE ABIERTO
Convergencia	Extensómetro de cinta, Dianas reflectante	
Deformaciones en el macizo Rocoso alrededor de la excavación	Extensómetro de varilla	Celda de carga
Strain en el arco	Strain-gauge	Deformación del suelo Alrededor de la excavación
Tensión en las secciones	celdas NATM, strain-meter	Presión del suelo/roca sobre la estructura
Esfuerzo en las secciones	Celdas de presión	Stress en los puntales
Deformación al frente	Extensómetro incremental T-REX	Deformaciones laterales En las paredes de la excavación
Carga en pernos y tendones	Celda de carga	Tensión en el concreto o sobre estructuras
Presión de agua	Piezómetros	Movimientos del suelo
Asentamiento del terreno	Extensómetro T-REX, Extensómetro magnético	Movimiento con referencia a una posición conocida
Deformaciones en el macizo Rocoso alrededor de la excavación	Sistema DEX	Movimientos laterales Alrededor de la excavación
Deformaciones/rotaciones de los edificios	Tiltmetro, fisurometro	Sobrepresiones
Asentamientos diferenciales De los edificios	Tiltmetro de barra	Deformaciones y rotaciones de los edificios
Aceleraciones en los edificios	Acelerómetro	Asentamientos diferenciales de los edificios
Movimiento con referencia a una posición conocida	diana reflectante	Aceleraciones en los edificios



Fuente: www.sisgeo.com

12.1. INSTRUMENTACIÓN CONVENCIONAL ESTÁNDAR:

Es la instrumentación tradicional de control que realizan un buen reconocimiento del terreno y se han venido utilizando en la actualidad.

12.1.1. INSPECCIÓN VISUAL DIRECTA:

Consiste en observar anomalías topográficas, consultar fuentes de información secundaria vinculada a mapas geológicos y visitas técnicas de campo que permitan obtener la información necesaria para realizar el diseño de factibilidad del túnel, trámites de licencias y permisos que requiera el proyecto. Algunas fuentes de información secundaria que se deben evaluar son:

- Mapas topográficos
- Mapas históricos de los usos del suelo
- Mapas y descripciones geológicas y geomorfológicos
- Mapas geotécnicos
- Reportes de sismicidad
- Reportes de movimientos en masa, caída de rocas, etc.
- Imágenes satelitales
- Mapas con fuentes de agua

La inspección visual de un túnel tiene tres fases fundamentales:

- **Fase Inicial:** consiste en la recopilación inicial de documentación, análisis previo y elaboración de informe con la información encontrada.

- **Fase de desarrollo:** consiste en las inspecciones para verificar el adecuado funcionamiento y condiciones óptimas del túnel.
- **Fase de evaluación:** análisis de cada sistema del túnel para verificar los grados de cumplimiento y seguridad del mismo.

Los equipos empleados para la inspección visual directa son básicos y corresponden a instrumentos de iluminación, medida y aumento. Una afectación detectada usualmente son las discontinuidades entre juntas que provocan filtraciones de agua, mediante las inspecciones visuales es posible detectar fácilmente discontinuidades como:

- Grietas
- Orificios
- Corrosión
- Deformaciones en la superficie, etc.

12.1.2. CONVERGENCIAS

Controlan el cierre de la excavación, estas medidas son fundamentales para conocer el comportamiento del túnel durante su ejecución, las medidas pueden hacerse con cinta extensométrica.

Imagen 14. Cinta para medir convergencias

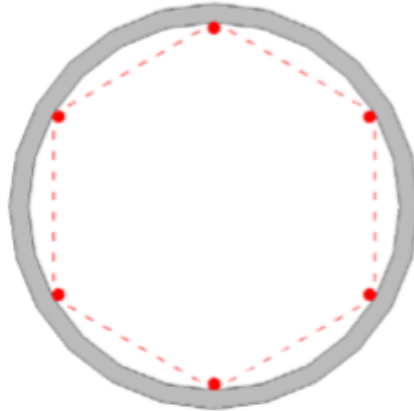


Fuente: https://www.instop.es/accesorios/cinta_de_convergencias.php

Para medir las convergencias del túnel se emplea la cinta invar en dos casos:

Medidas perimétricas durante la ejecución del túnel:

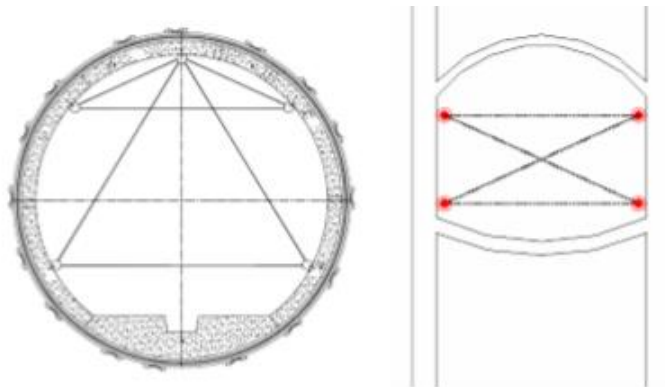
Imagen 15. Medidas perimétrales



Fuente: Corrales (2009)

Medidas diametrales se utilizan en la fase de operación del túnel:

Imagen 16. Medidas diametrales



Fuente: Corrales (2009)

12.1.3. SONDAS PARA MEDIDA DE NIVEL DE AGUA

Se emplean para realizar medidas del nivel freático en pozos, piezómetros de Casagrande y piezómetros abiertos, consisten en un dispositivo portátil alimentado por baterías equipado con una sonda sumergible conectada a un cable graduado, enrollado en un tambor. Cuando la sonda sumergible entra en contacto con el agua activa tanto una alarma acústica como un indicador luminoso montado en una de las caras del tambor. Su objetivo es controlar el nivel de agua en pozos, tuberías, sondeos en suelos, rocas, control y seguimiento de laderas y terraplenes.

Esta sonda mide la altura a la que se encuentra el agua en la tubería, se hace mediante una tubería de PVC ranurada en toda su longitud instalada en la sonda, el espacio anular entre el sondeo y la tubería se rellena de material filtro seleccionado, esto sirve para determinar el nivel freático del acuífero. Para determinar el nivel del agua o infiltraciones de agua en túneles se desciende la sonda por medio de la manivela hasta que ésta entra en contacto con el agua, momento en el que se activa una señal luminosa, la lectura se efectúa sobre la cinta métrica, dividida en metros, decímetros y centímetros.

El instrumento presenta mediciones de temperatura y conductividad estables, desplegadas en una pantalla digital giratoria. Las mediciones de nivel se toman sobre la cinta plana la cual tiene marcaciones permanentes en milímetros (o pies) y longitudes hasta 100m (300 pies). La cinta es flexible y se mantiene recta en el pozo.

La Sonda es ideal para perfilar temperatura y conductividad en pozos o cuerpos de agua para obtener una indicación general de niveles de contaminación química, intrusión de agua salada y salinidad.

Imagen 17. Especificaciones Técnicas Sonda

Sonda	Detector de nivel de agua y sensor de temperatura
Longitudes de cable	30, 50, 100 m 150, 200, 300, 400, 500 m
Diámetro del tambor	260 mm, 320 mm, 420 mm
Diámetro de la sonda	10 mm
Display	3.5 LCD (sólo para C112T)
Batería	9V DC desechable

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.4. REGISTRADORES DE NIVEL DE AGUA:

Sistema integrado diseñado para el control automático y continuo del nivel de agua y temperatura dentro de pozos, piezómetros abiertos y piezómetros de Casagrande. El registrador de nivel de agua graba presión absoluta, la cual es convertida posteriormente a nivel de agua por el software Hoboware, empleando medidas barométricas.

El software Hoboware permite comprobar el estado del registrador, verificar la configuración antes de iniciar las medidas, verificar su estado operativo durante el registro de datos, mostrar medidas en tiempo real e informar de la memoria usada y del voltaje de la batería. La herramienta de gráficos del software permite graficar

y filtrar los datos para una presentación personalizada de los mismos. El asistente de compensación barométrica permite compensar las medidas de nivel de agua con las variaciones de presión atmosférica.

La conexión óptica USB proporciona una descarga de los datos segura y fiable, incluso en malas condiciones ambientales.

Imagen 18. Especificaciones Técnicas Registrador Nivel de Agua

Rango de nivel de agua*	9, 30, 76 m
Rango de temperatura	-20°C +50°C
Exactitud	
- nivel de agua**	±0.05% F.S.
- temperatura	±0.5°C
Tipo de memoria	No volátil
Capacidad de memoria	64kbyte
	>21.000 medidas combinadas
Intervalo de medida	Programable
	min 1 s, máx. 18 horas
Puerto de comunicaciones	Interface óptica USB
Rango de temperatura operativa	-20°C +60°C
Vida de la batería***	Típica 5 años con intervalo min. de medida de 1 min.
* valor nominal utilizando el WLL al nivel del mar	
** error típico usando medidas relativas y compensación barométrica	
*** depende también de la temperatura de utilización	

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.5. TOPOGRAFIA:

Describe la zona por donde atravesará el proyecto y los puntos geográficos que se van a unir. Para el monitoreo topográfico se pueden utilizar equipos ópticos o electrónicos para determinar los movimientos laterales y verticales de los taludes, se pueden realizar mediciones usando tubos dentro del deslizamiento de manera que se puedan medir deformaciones, movimientos de grietas, etc.

Las medidas que se llevan a cabo son:

- Nivelación de alta precisión
- Seguimiento de la alineación horizontal y vertical con las estaciones totales de alta precisión y prismas
- Seguimiento de la alineación horizontal y vertical a través de GPS
- Otros instrumentos empleados en la toma de lecturas son una estación total y prismas fijos o móviles.

La estación total es un instrumento cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica, algunas características de este son leds de aviso, calculadora, distanciómetro. Los datos de lectura que se obtienen de este instrumento son: ángulos verticales y horizontales, distancias, cálculo de coordenadas en campo, entre otros.

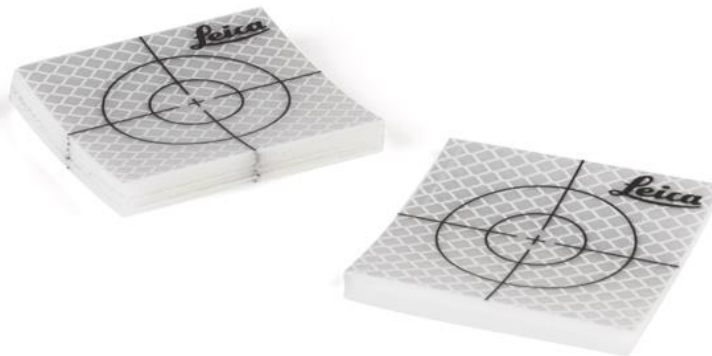
TOPOGRAFIA CONVENCIONAL: Se utiliza para determinar los movimientos verticales y laterales de los taludes. El monitoreo topográfico se realiza colocando bancos de marca (BM) en sitios estables, que son las marcas colocadas que ayudan a establecer la altura con respecto al nivel del mar (altimetría o nivelación).

TOPOGRAFÍA (DGPS): Se utiliza para monitorear los movimientos superficiales de deslizamientos, estas medidas se relacionan con las condiciones climáticas del terreno.

12.1.6. DIANA REFLECTANTE:

Se instalan en elementos estructurales en los que la aparición de un asiento implique una inclinación peligrosa de la estructura, son usadas para tomar medidas de desplome. Se instalan a dos alturas, una en la parte alta y otra en la parte baja de la estructura, la distancia horizontal entre los puntos de medida constituye el desplome.

Imagen 19. Diana reflectante adhesiva



Fuente: https://www.instop.es/accesorios/dianes/dianas_adhes.php

12.1.7. HITOS DE NIVELACIÓN:

Consisten en una varilla anclada en el terreno mediante una inyección de cemento, la varilla debe ser entre 1 y 1,5 metros de profundidad. Permiten el control de los movimientos de la superficie del terreno.

12.1.8. TIRAS DE CORTANTE:

Circuito eléctrico hecho de resistores sobre una cinta que es colocada dentro de perforaciones. Los resistores se colocan con intervalos de 1 metro, es máximo número de resistores es 100. Se utiliza para analizar la profundidad del plano de falla.

12.1.9. INCLINOMETRIA MANUAL

“Un sistema inclinométrico comprende un sensor con forma de torpedo que contiene un transductor de inclinaciones, el sensor va conectado a una unidad de lectura digital mediante un cable graduado que mide la profundidad. El sensor se introduce, por medio de un sistema de guías rodantes, en una tubería especial de instalación que se coloca en el interior del sondeo del relleno o estructura a auscultar. El transductor de inclinación permite una desviación horizontal entre el eje del sensor y el plano cuya verticalidad se mide, las medidas de inclinación y de profundidad del sensor recogidas se utilizan para calcular la desviación horizontal (dada en mm) de la tubería respecto a la vertical. El sensor inclinométrico del que se dispone en el Laboratorio cuenta con dos servo-acelerómetros que proporcionan la desviación horizontal según dos ejes perpendiculares entre sí.”²⁴

Un sistema de inclinómetra está compuesto por los siguientes componentes:

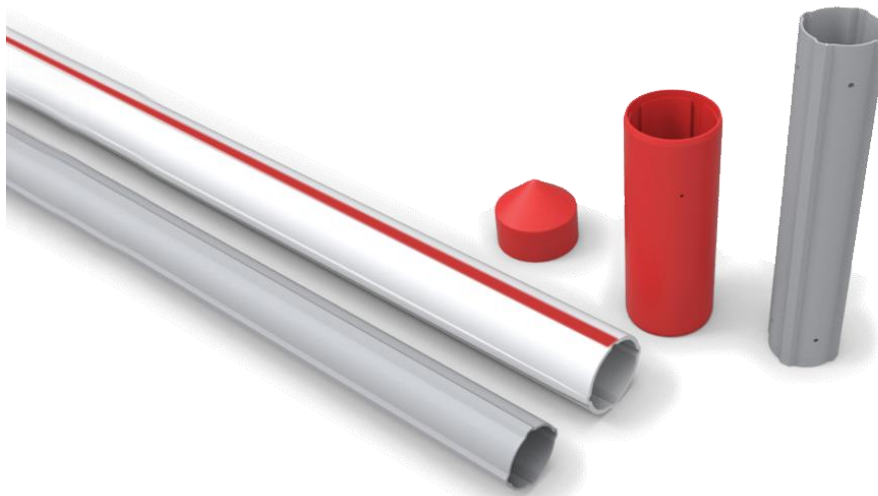
- Un tubo de aluminio instalado dentro de una perforación
- Un sensor portátil
- Un cable de control que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie
- Un equipo de lectura

Los equipos de inclinometría permiten controlar los desplazamientos horizontales a profundidad, tomando lectura a lo largo de todo el recorrido de la tubería. Miden los deslizamientos, laderas inestables y excavaciones profundas.

12.1.10. TUBERIAS INCLINOMÉTRICAS CONVENCIONALES

¹ Guía Técnica del Laboratorio de Geotecnia CEDEX. Disponible en: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/5D7AABC0-3867-4A93-A46B-5E29AC8947E5/132410/EQUIPOSDEAUSCULTACIONEINSTRUMENTACION.pdf>.

Imagen 20. Tuberías Inclinométricas



Fuente: www.sisgeo.com

Es un tubo de forma larga y estrecha instalado en un sondeo y empleado para determinar movimientos horizontales del terreno, esta tubería refleja las deformaciones del suelo o roca en la que se instale.

Imagen 21: Especificaciones Técnicas Tuberías Inclinométricas

Material	Aluminio	Aluminio
Diámetro exterior del tubo	86.4 mm	63.0 mm
Diámetro interior del tubo	76.1 mm	53.6 mm
Diámetro interior en acanaladuras	82.0 mm	59.06 mm
Espesor	2.2 mm	1.7 mm
Longitud	3 metros	3 metros
Peso	1.4 kg/m	0.85 kg/m
Deformación espiral	<1.0°/ 3 m	<1.0°/ 3 m
Diámetro exterior del manguito	92.0 mm	67.5 mm
Longitud del manguito	300 mm	300 mm

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.11. TUBERIAS DE JUNTA RÁPIDA

Imagen 22. Tubería Inclínométrica de junta rápida



Fuente: www.sisgeo.com

Diseñada principalmente para presas de materiales sueltos y sondeos profundos, los tramos de la tubería se montan sellados con una cinta especial, evitan la entrada de agua. Principalmente diseñadas para perforaciones profundas en tierra de relleno. Las juntas evitan la entrada de agua.

Imagen 23. Especificaciones Técnicas Tuberías de Junta

Diámetro exterior del tubo	70 mm
Diámetro interior del tubo	59 mm
Diámetro interior en acanaladura	62.5 mm
Espesor	5.5 mm
Longitud total del tramo	3100 mm
Diámetro del tramo	84 mm
Color	Blanco/rojo
Deformación espiral	<0.6°/3m
Test de colapso (*)	15 bar
Rango de temperatura	-20°C +80°C

(*) Los tests se realizan en una cámara de presión de agua con un tubo vacío sellado en sus dos extremos.

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.12. COLUMNAS INCLINO-EXTENSOMÉTRICAS

Son empleadas para un control de movimientos verticales, consiste en tubería equipada con manguitos telescópicos y anillos magnéticos. Los anillos pueden ser para sondeo y para terraplén.

Imagen 24. Especificaciones Técnicas Columnas Inclino-Extensométricas

Tapón de boca / fondo	
Tapón de boca con cierre	Tapones sencillos para evitar atascos Tapón con placa identificativa y punto de nivelación topográfica. Diseñado para ajustar la polea.
Kit de montaje	Incluye cemento, remaches, cinta de sellado y cinta adhesiva.
Válvula de inyección por fondo	Permite la inyección a través de la tubería mediante una válvula de inyección.

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.13. SONDAS INCLINÓMETRICAS

Mide desviaciones de la inclinación dentro de tuberías inclinométricas verticales permitiendo un seguimiento a movimientos laterales. Las lecturas se obtienen con un dispositivo electrónico portátil.

Imagen 25. Especificaciones Técnicas Sondos Inclinométricas

Equipada con un acelerómetro de estado sólido uniaxial esta sonda está diseñada para medir en tubería inclinométricas instaladas horizontalmente.

Rango de medida	$\pm 30^\circ$
Repetitividad	0.05% FS
Diámetro	28 mm
Longitud	750mm (sin conector)

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.14. INCLINÓMETROS FIJOS

Imagen 26. Inclinómetro fijo



Fuente: www.sigeo.com

Permiten controlar la deformación de la tubería. Los sensores de este instrumento permiten el monitoreo automático de puntos críticos.

Imagen 27. Especificaciones Técnicas Inclinómetros Fijos

Rangos	$\pm 14.5^\circ, \pm 30^\circ$
Resolución	0.001% FS
Exactitud total	Mejor que $\pm 0.07\%$ FS
Factor de escala de sensibilidad térmica	$\pm 0.002\%$ FS/ $^\circ\text{C}$
Señal de salida	± 1 V at FS
Rango de comp. de temp.	$0^\circ\text{C} + 50^\circ\text{C}$

CARACTERÍSTICAS DE LA SONDA

Diámetro general	30 mm
Longitud de base	1000 mm
Material	Acero inox. y resina termoplástica
Conexión del cable	Sellado epoxi hasta 200 kPa

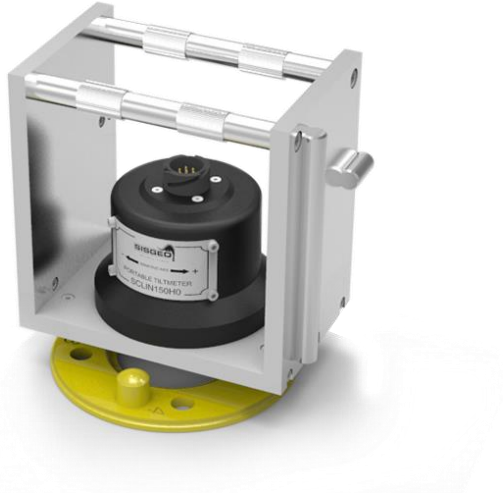
Fuente: www.sisgeo.com

12.1.15. CLINÓMETROS

Esta instrumentación permite medir cambios en la inclinación del terreno.

CLINÓMETRO PORTÁTIL

Imagen 28. Clinómetro Portátil



Fuente: www.sisgeo.com

Es un marco de acero inoxidable con una carcasa de aluminio, permite un posicionamiento exacto durante las medidas, este instrumento se sitúa sobre la superficie de la estructura. Pueden obtenerse medidas a 90° y 180°. Las mediciones se pueden hacer horizontales o verticales.

Imagen 29. Especificaciones Técnicas Clinómetro Portátil

Sensor	Servoacelerómetro uniaxial
Rango de medida	±14.5° desde la vertical
Resolución	Mejor que 0.001° con unidades LEONARDO y TORRICELLI
Exactitud total (linealidad, histéresis, repetitividad)	Mejor que ±0.04% FS
Factor de escala de sensibilidad térmica	±0.002% FS/ °C
Señal de salida	± 1 V at FS
Rango de comp. de temp.	-20°C +60°C
Material	Marco de acero inoxidable Carcasa de AL anodizado
Peso	3 Kg (solo el TILLI)
Maletín de transporte	Plástico resistente al golpeo IP68

Fuente: www.sisgeo.com

CLINÓMETROS DE SUPERFICIE Y ELECTRONIVELES

Son sensores de inclinación empleados para medir cambios en la inclinación de estructuras.

Imagen 30. Especificaciones Técnicas Clinómetro de Superficie

Rangos de medida	$\pm 10^\circ$, $\pm 14.5^\circ$, $\pm 30^\circ$
Exactitud total	mejor que $\pm 0.07\%$ FS
Factor de escala de sensibilidad térmica	$\pm 0.002\%$ FS/ $^\circ\text{C}$
Voltaje de excitación	$\pm 15\text{V DC} \pm 1\%$
Señal de salida	$\pm 1.5\text{V}$, $\pm 5\text{V at FS}$
Rango de temperatura	$- 20^\circ\text{C to } + 80^\circ\text{C}$

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.16. SISTEMAS DE PÉNDULO:

Diseñados para controlar los movimientos horizontales, es un instrumento que actúa con la gravedad, informan sobre los movimientos en estructuras.

PÉNDULOS DIRECTOS E INVERTIDOS

Imagen 31. Péndulos directos e inversos



Fuente: www.sisgeo.com

Se compone de un cable de acero, el péndulo invertido proporciona un punto fijo desde el cual pueden ser medidos los movimientos estructurales. Se utiliza un cable que va anclado en una perforación por debajo de la estructura y fijado en su extremo superior a un flotador. El péndulo directo consta de un alambre de acero anclado en el extremo superior de la estructura con un peso suspendido en el extremo inferior que queda libre para moverse. El péndulo invertido proporciona un punto de referencia fijo, a partir del cual se puede medir movimientos estructurales.

Imagen 32. Especificaciones Técnicas Péndulo

El péndulo directo incluye:

- tanque de acero inoxidable para el fluido con tapa
- peso para tensionado del cable y unidad amortiguadora
- sistema de anclaje superior y deslizamiento de bloques
- Torniquete para posicionar la unidad amortiguadora

Dimensiones del tanque	Ø=415mm, altura 476mm
Material	Acero inoxidable
Fluido amort. (aceite mineral)	SAE 50-90 (no suministrado)

PÉNDULO INVERTIDO

(Código del producto 0S912006000)

El péndulo invertido incluye:

- tanque de acero inoxidable con tapa
- unidad flotante de acero inoxidable
- barra guía ajustable con carrera vertical de 100mm
- Tubo externo para control del nivel del fluido
- Contrapeso de acero para el cable de anclaje

Dimensiones del tanque	Ø=615mm, altura=495mm
Flotador	Permite un movimiento de ±72mm en cualquier dirección
Diámetro del anclaje inyectable	75mm, ajustable desde 80mm a 160mm con pines de centrado
Material	Acero inoxidable
Fluido tanque (aceite mineral)	SAE 10 (no suministrado)

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.17. EQUIPOS DE EXTENSOMETRÍA:

Los extensómetros son empleados para medir los desplazamientos entre dos puntos permitiendo evaluar las convergencias de movimientos en el terreno alrededor del túnel.

EXTENSÓMETROS DE POSICIONES MÚLTIPLES

Permiten medir movimientos entre varios puntos situados en el interior del túnel anclados al terreno, se utilizan varillas y permiten medir movimientos del terreno. Estos movimientos se transforman en desplazamientos de las varillas, su lectura es mecánica por medio de transductores eléctricos.

EXTENSÓMETROS MANUALES

Permite mediante un extensómetro manual registrar los desplazamientos producidos en las distancias que hay entre dos puntos en los sentidos vertical y horizontal.

EXTENSÓMETROS DE CUERDA VIBRANTE

Se emplean para monitorear la tensión en estructuras de acero o concreto. Son más empleados en los anillos de los túneles. Dentro del medidor se encuentra un termistor que proporciona la temperatura al punto de medición.

EXTENSÓMETRO MAGNÉTICO

Imagen 33. Extensómetro Magnético.



Fuente: www.sisgeo.com

Se emplea para medir asentamientos o desplazamientos a diferentes profundidades en suelos y terraplenes. El sistema consiste en una tubería de acceso con un tubo

corrugado externo, anillos magnéticos y una sección telescópica de fondo con un anillo de referencia y un cabezal de suspensión. Los anillos magnéticos se posicionan en el exterior de la tubería de acceso y se colocan en el terreno en el que se quieren medir movimientos. Los anillos se mueven junto con el suelo que los rodea, a lo largo del eje de la tubería de acceso. Las lecturas se obtienen con una sonda portátil que se introduce a través de la tubería de acceso. La comparación de las medidas registradas a lo largo del tiempo proporciona perfiles de asientos o levantamientos.²⁵

EXTENSÓMETRO INCREMENTAL T-REX

Imagen 34. Extensómetro Incremental



Fuente: www.sisgeo.com

Este software de análisis permite calcular desplazamientos por metro, tanto en instalaciones verticales como horizontales, consta de un cable, varillas de posicionamiento, unidad de lectura portátil y software de análisis. Este instrumento permite la medida metro a metro del desplazamiento en un sentido de la tubería empleando también una sonda.

²⁵Tomado de: www.sisgeo.com

Imagen 35. Especificaciones Técnicas Extensómetro T-REX

El extensómetro T-REX ofrece varias ventajas:

- amplio rango de medida (± 100 mm por metro) lo que permite su uso tanto en suelo como en roca
- totalmente compatible con el cable inclinométrico, conectores y unidad de lectura de Sisgeo
- sin contacto mecánico entre la sonda y las referencias
- combinado con medidas inclinométricas permite conocer el perfil de deformaciones del sondeo en 3-D

Base de medida	1.000 mm
Rango de medida	± 100 mm
Exactitud	± 0.02 mm
Resolución	0.01 mm
Rango de temperaturas	-10°C +60°C
Ambiental	IP68 hasta 1.5 MPa
Dimensiones	Dext 40mm, longitud 1530 mm
Material	Acero inox., bronce y aluminio

UNIDAD DE LECTURA PORTÁTIL

Las medidas se realizan mediante un datalogger Archimede equipado con un pack de baterías externo (Código de producto 0CDL012EXBP0). El pack de baterías está alojado en una caja resistente al agua, que se conecta al datalogger cuando el operador realice las lecturas.

Convertor A/D	24 bit, con autocalib. (19 bits reales)
Memoria de almacenamiento	2 MB
Puerto COMM	USB
Rango de temperaturas	-20 - +60 °C, IP67
Dimensiones (LxAnxA)	200 x 280 x 65mm

Fuente: www.sisgeo.com

EXTENSÓMETROS FIJOS

Imagen 36. Extensómetro fijo



Fuente: www.sisgeo.com

Están diseñados para el monitoreo automático de los asientos, las sondas son capaces de realizar un monitoreo en 3D del pozo. Se unen mediante cable de acero inoxidable, se pueden colocar a diferentes profundidades al fondo de la tubería, permite el control de deformaciones a lo largo del sondeo.

Imagen 37: Especificaciones Técnicas Extensómetros

Resolución del sensor	0.01mm
Exactitud del sistema	0.25% FS
Repetitividad	0.02mm
Señal de salida	0-10V DC
Rango de temperaturas	-20°C +60°C
Protección	IP68 (hasta 1.5 MPa)
Diámetro externo	35mm

Fuente: www.sisgeo.com

EXTENSÓMETROS DE VARILLA

Son empleados en suelos y rocas para controlar los movimientos de profundidad de varios puntos de medición mediante un sondeo. Las varillas de medida, disponibles en fibra de vidrio, acero o invar, vienen instaladas en el interior de una vaina de nylon con el fin de eliminar el rozamiento entre terreno y varilla. Las varillas de acero y de invar se suministran en barras de 2 metros de longitud y se necesita ensamblarlas en sitio. El extensómetro se ancla al terreno empleando dos tubos expresamente preparados para realizar la inyección en el punto de anclaje. Miden los desplazamientos verticales a profundidad del terreno, su objetivo es determinar el radio de influencia de las deformaciones en obra. Constan de una cabeza de medida y de anclaje.

Imagen 38. Especificaciones Técnicas Extensómetro de varilla

Numero de posiciones	1, desde 2 hasta 7 (multiple)
Cabeza instrumento	OD 120 mm
Varillas	FG fibra de vidrio continua Acero inoxidable en barras (2 m) Invar en barras (2 m)
Vaina de protección	nylon 11 (riisan), OD 12 mm
Andaje	FG: rebar 16mm OD, 400 mm long AC/IN: rebar 22m OD, 400 mm long

Fuente: www.sisgeo.com

EXTENSÓMETROS DE TERRAPLÉN

Imagen 39. Extensómetro de Terraplén



Fuente: www.sisgeo.com

Se instalan al interior de presas de tierra, con el objetivo de medir las distancias horizontales. El extensómetro de terraplén está compuesto por una serie de placas de anclaje unidas por medio de varillas de acero al elemento de medición. Las varillas de acero eran disponibles con longitud de 1,2 o 3 metros para cubrir cualquier tipo de necesidad de instalación. Para evitar la fricción que se genera entre el instrumento y el terreno, las varillas y el elemento de medición viene instalado en una vaina corrugada de PVC.

Imagen 40. Especificaciones Técnicas Extensómetros de Terraplén

Sensor	Cuerda vibrante con termistore
Rango de medición	50, 100, 150mm
Sensibilidad	0.01 mm (depiende del read-out)
Exactitud	<0.5% FS
Señal de salida	frecuencia
Rango de temp. operativa	-20°C +80°C
Material	Acero inoxidable

Fuente: www.sisgeo.com

EXTENSOMETRIA DE CINTA

Es una unidad portátil que sirve para medir la distancia entre anclas de referencia amarrados en puntos de excavación. Este instrumento se conforma de una cinta de acero perforada que incorpora un sistema tensor y una unidad de lectura de sensor.

Es utilizado para medir derrumbes, mediciones de convergencias del túnel, deformación de excavaciones y mediciones de estabilidad del terreno en la superficie.

EXTENSÓMETRO DE FIBRA ÓPTICA

Se emplean para determinar cambios de longitud en una línea de medición, este tipo de instrumentación se ve afectado por cambios en la temperatura. Se instalan con el objetivo de monitorear los desplazamientos a varias profundidades, usando varillas de diferentes materiales y longitudes.

12.1.18. DEFORMÍMETROS:

Son empleados para medir deformaciones en el concreto. Las aplicaciones típicas incluyen mediciones de grietas y monitoreo de convergencias.

Son dispositivos que constan de una cuerda vibrante, un tubo protector y una bobina que permite obtener la frecuencia de resonancia de la cuerda y a partir de esto se obtiene la deformación a la que está sujeto el tubo.

Imagen 41. Deformímetro de hilo



Fuente: www.sisgeo.com

12.1.19. PIEZOMETROS

Miden el nivel de agua subterránea, la presión de poro, presas de terraplenes, monitoreo de filtraciones y monitoreo del agua detrás del revestimiento de túneles.

PIEZOMETROS DE TUBO ABIERTO




Imagen 42. Piezómetro Casa grande y Tubo abierto



Fuente: www.sisgeo.com

Se emplean para medir el nivel freático en perforaciones abiertas se instala un tubo de PVC y la lámina de agua se mide por medio de una sonda.

Imagen 43. Especificaciones Técnicas Piezómetros

P101		Punta porosa de 40 μ para Casagrande/tubo abierto Conexión de un tubo único de 1 1/2" Longitud: 200 mm Diámetro externo: 61.5 mm
P112		Punta porosa de 40 μ para Casagrande Conexión de dos tubos de 1/2" Longitud: 200 mm Diámetro externo: 61.5 mm
TFH		Unidad de filtro para tubo abierto Tubo ranurado de PVC con geotextil Diámetros disponibles: 1", 1 1/2" and 2"

Fuente: www.sisgeo.com

PIEZOMETROS CASAGRANDE

Se emplean para la medida de presiones intersticiales (presencia de agua al interior del talud, presión del agua igual a la atmosférica). El filtro de este instrumento es empleado para medir la presión del agua en el suelo permeable.

Se disponen asilando el tramo de sondeo que se quiere estudiar mediante un tapón ranurado sólo en la tubería. La altura del agua medida corresponde a la altura piezométrica existente en el tramo en estudio.

PIEZOMETROS MULTI PUNTO

Son una serie de piezómetros de cuerda vibrante conectados por un cable multiconductor, este instrumento previene la formación de canales para la migración de agua entre los diferentes niveles del terreno.

Imagen 44. Piezómetro Multipunto



Fuente: www.sisgeo.com

12.1.20. CÉLULAS DE PRESIÓN DE TIERRAS

Se emplean para medir la presión total en el contacto de la estructura y el terreno. Es una placa formada por dos planchas de acero inoxidable, la placa está conectada con un tubo de acero. La presión se convierte en una señal eléctrica y puede ser leída de forma remota por las unidades de lectura.

Imagen 45. Especificaciones Técnicas Células de Presión

Rangos	350, 500, 700 kPa 1, 1.7, 2, 5, 7 MPa
Resolución	0.025% FS
Exactitud	< 0.5% FS
Tamaño placa	Circular Dext 230 mm Rectangular 100x200mm
Rango de temperaturas	-20°C +80°C
Espesor de la placa	Circular 12 mm Rectangular 6 mm
Tamaño del transductor	Dext 27mm, largo 180mm

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.21. CÉLULAS DE PRESIÓN NATM

Han sido diseñadas para optimizar las medidas de tensiones radiales y tangenciales en hormigón proyectado y en revestimientos de túnel de hormigón. Las células consisten en una placa de presión conectada a un transductor mediante una línea hidráulica.

CÉLULAS DE PRESIÓN HIDRÁULICA

Miden la tensión en la masa del hormigón y en el contacto de la estructura y el terreno. La placa de presión está formada por dos planchas de acero soldadas en su perímetro y separadas entre sí por una estrecha cavidad saturada (al vacío) con aceite desaireado. Esto garantiza la máxima rigidez.

12.1.22. CINTA DE CONVERGENCIA

Se emplean para medir distancias entre puntos de referencia instalados. Se compone de una cinta métrica de acero con orificios espaciados incorporada a un cuerpo de aluminio y acero inoxidable, con un dispositivo externo de tensionado neumático y un calibre. Son utilizadas en el monitoreo de convergencias del revestimiento de túneles.

Imagen 46. Especificaciones Técnicas Cinta de Convergencia

Calibre digital	5 dígitos LCD, altura 6mm
Rango del calibre	100 mm
Resolución	0.01 mm
Repetitividad	± 0.1 mm
Ancho de cinta	13 mm
Divisiones de cinta	Centímetros, perforada cada 25mm
Diámetro del cuerpo	60 mm
Longitud general	870 mm

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.23. FISURÓMETROS:

Monitorean el movimiento a través de grietas en la superficie y roca.

FISURÓMETROS MECÁNICOS

Instrumento simple que permite medir desplazamientos relativos de los bordes de fisuras en dos direcciones.

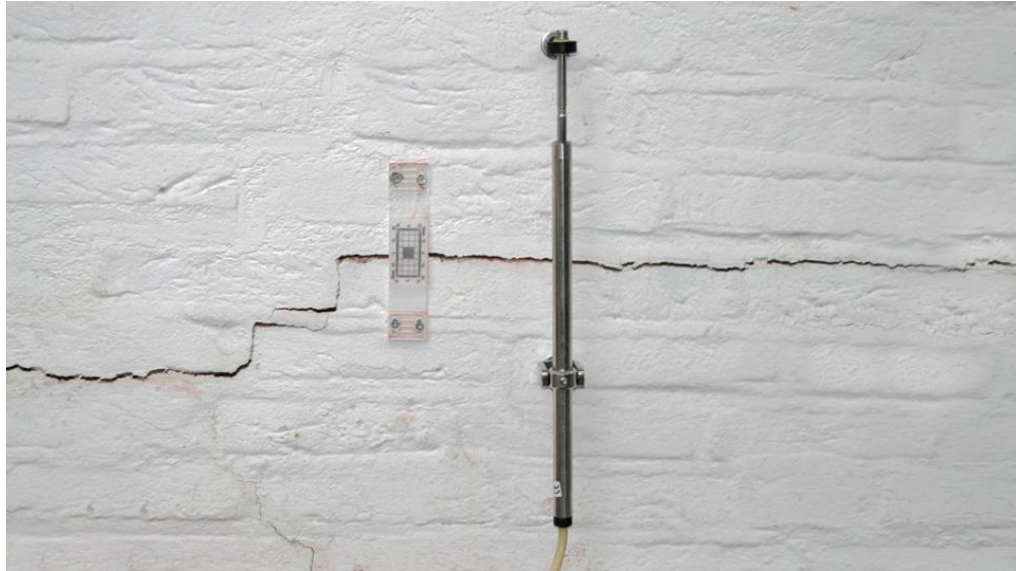
Imagen 47. Especificaciones Técnicas Fisurómetros

Rango	50mm
Longitud de base	Ajustable a 200, 300 o 500mm
Resolución	0.01 mm
Repetitividad	Mejor que ±0.02mm

Fuente: www.sisgeo.com

FISURÓMETROS Y MEDIDORES DE JUNTAS

Imagen 48. Fisurómetro y medidor de juntas



Fuente: www.sisgeo.com

Son empleados para controlar movimientos a través de fisuras superficiales. En el instrumento los anclajes se atornillan en los lados opuestos de la fisura, el transductor de desplazamiento alojado en el cuerpo del sensor se coloca de forma transversal a la fisura, permitiendo la medida de los cambios en la distancia entre los anclajes.

FISURÓMETROS DE HILO

Se emplea para medir distancias entre dos puntos de anclaje a una distancia de hasta 30 metros. Se compone de una caja de acero con un transductor, se utiliza para controlar el desplazamiento y la convergencia en túneles subterráneos.

Imagen 49. Especificaciones Técnicas Fisurómetro de Hilo

Rango mecánico	2000 mm
Sensibilidad	0.03 mm
Resolución	±1 mm (depende principalmente de los efectos térmicos del cable)
Repetibilidad	±0.03 mm
Señal de salida	4-20 mA (bucle de corriente)
Temperatura de utilización	-20°C +60°C
Diámetro del cable	2 mm, acero inoxidable
Max. tensión del cable	8 Kg
Longitud base (cable)	hasta 30 m distancia entre el transductor y el extremo
Carcasa del transductor	300x200x185 mm
Montaje del extremo	Perno expansivo terminado en argolla

Fuente: www.sisgeo.com

12.1.24. TDR - REFLECTORIA DE ONDAS ELÉCTRICAS

Es un sistema medidor de deformaciones, consiste en colocar un cable coaxial dentro de deslizamiento el cual envía pulsos de voltaje en forma de ondas permitiendo identificar roturas o esfuerzos en el cable. El medidor de TDR determina la localización de las deformaciones a lo largo del cable.

12.1.25. ACELEROGRÁFOS

Consta de una red de sensores de aceleración colocados sobre la estructura a monitorear. Estos instrumentos poseen tres sensores ortogonales que registran el movimiento del suelo y permiten el registro máximo de los eventos sísmicos.

Imagen 50. Acelerógrafo Triaxial

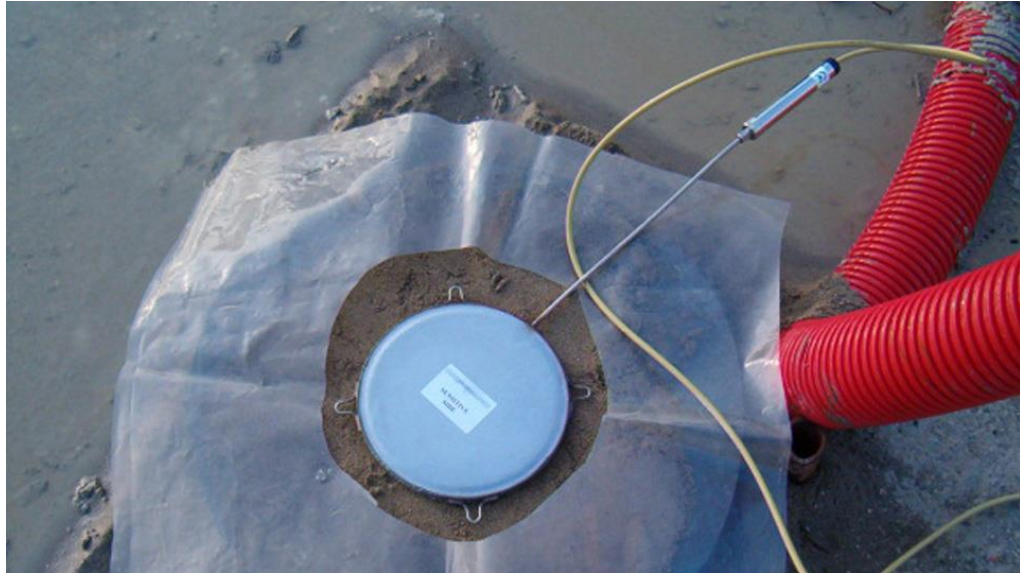


Fuente: <https://geoteknik.com.pe/producto/acelerografo-triaxial-de-fuerza-balanceada/>

12.1.26. CELDAS DE PRESIÓN

Son empleadas para monitorear la presión total en presas de relleno de tierra y terraplenes. Consisten en un plato conectado a un transductor por un tubo hidráulico. La presión que se aplica al plato del instrumento se convierte en una señal eléctrica.

Imagen 51. Celda de presión



Fuente: www.sisgeo.com

12.1.27. SISTEMA DE CELDAS DE ASENTAMIENTO MULTIPUNTO

Consiste en medidores de asentamientos conectados por un tubo a un tanque puesto en un terreno alto y estable, este sistema es un transductor de presión instalado en una placa. Su funcionamiento consiste en la variación de presión causada por la carga vertical de una columna.

12.1.29. AUSCULTACIÓN GEODÉSICA

Su principal objetivo es obtener información necesaria para comprobar el comportamiento del terreno, se realiza mediante un equipo topográfico preciso mediante estaciones totales, dianas, prismas colocadas en diferentes puntos para obtener lecturas sobre desplazamientos que sufra la estructura.

12.2. SISTEMAS DE AUSCULTACIÓN AUTOMÁTICA:

Consiste en la combinación de instrumentos electrónicos que permiten la obtención de información por medio de control remoto.

12.2.1. SENSORES DE CUERDA VIBRANTE

Imagen 52. Extensómetro de cuerda vibrante



Fuente: www.sisgeo.com

Consisten en una cuerda que sometida a una frecuencia de vibración se activará cuando el sistema entre en resonancia dependiendo de la presión externa a la que esté sometido dicho sistema. La penetración del agua o variación de la temperatura no afectan en las señales de salida. Estos sensores están constituidos por:

- Una cuerda de acero sujeta a un extremo inmóvil
- Un filtro de agua
- Transformadores eléctricos

12.2.2. SISTEMAS MICRO ELECTROMECÁNICOS

Son dispositivos de tamaño microscópico diseñados para modificar un ambiente controlado. La arquitectura del microsistema incorpora generadores de señal, receptores, electrónicos entre otros y se pueden clasificar en:

- Sensores de movimiento
- Sensores térmicos
- Sensores ópticos

- Sensores de fluidos

12.2.3. FIBRA ÓPTICA

Se utiliza como sensor de medida de deformaciones, es un sistema de menor peso, tamaño y complejidad. Se basa en las alteraciones que experimenta la transmisión de luz al atravesar una fibra óptica, produciendo alargamientos, contracciones y etc.

La luz emitida por un diodo emisor (LED) es lanzada en una fibra monomodo y dirigida hacia el sensor donde se divide a su vez en dos fibras, una de ella “activa” va unida a la estructura de la que se desea medir su deformación, la otra “pasiva” que sirve de referencia. Estos espejos reflejan la luz al final de ambas fibras que son conducidos hacia el analizador, en el cual un espejo móvil ajusta las diferencias de señal entre ambas fibras mediante comparación con las emitidas en la señal origen²⁶. Esta tecnología ofrece otra gran ventaja: permite transmitir los valores medidos a lo largo de grandes distancias, prácticamente sin pérdida de calidad.

Imagen 53. Fibra Óptica



Fuente: <https://tasc.es/deteccion-lineal-de-temperatura/fibra-optica/>

12.3. SOFTWARE

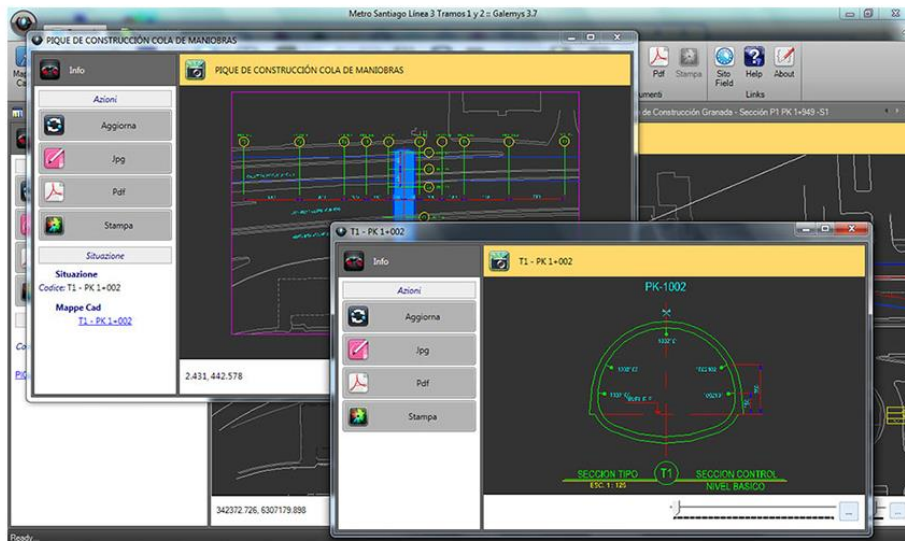
Son programas que permiten realizar supervisión constante y en tiempo real de los dispositivos de instrumentación instalados, generando y enviando mensajes de avisos, alertas y alarmas de acuerdo con las instrucciones configuradas por el usuario. De acuerdo con los softwares actualmente empleados como complemento para las mediciones con instrumentación geotécnica se encuentran:

- **SISTEMA DEX, STRAIN-GAUGE, VW REBAR** para monitorización de estructuras.
- **TRUMER SCHUTZBAUTEN** para prevención contra avalanchas y caídas de rocas.

²⁶ GONZALEZ SANTIAGO, José de Jesús. México. 2011. 160 pág. Trabajo de grado: Proceso de Instrumentación Geotécnica Para Túneles Construidos En Suelos Blandos. Universidad Nacional Autónoma de México.

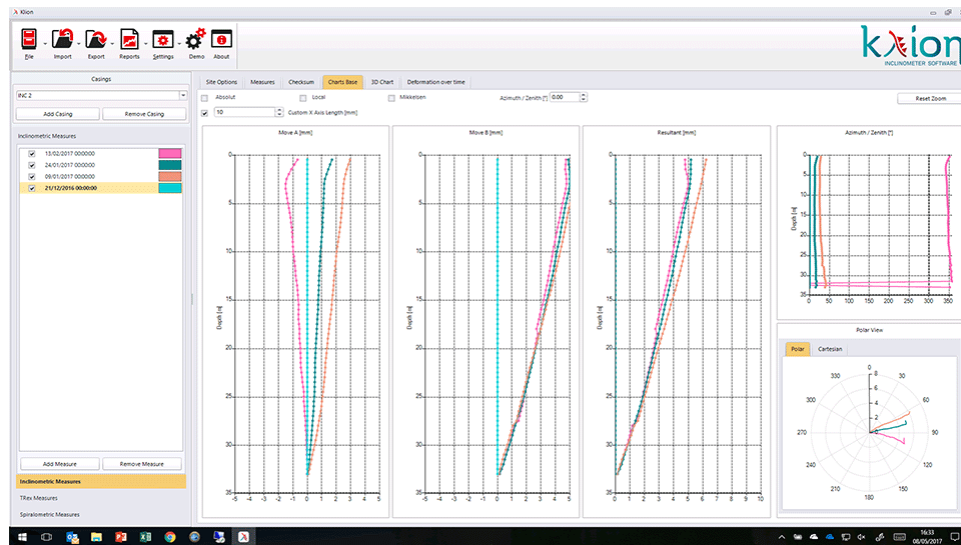
- **SISTEMA DIGITILT AT SLOPE INDICATOR** es una alternativa moderna del inclinómetro clásico que incluye sondas digitales, cable de señales. Conexiones inalámbricas y programas digitales.
- **3G SOFTWARE & MEASUREMENT** sistemas de fotografía digital de alta resolución para análisis y modelamiento 3d
- **WMS WEB MONITORING SYSTEM** plataforma de software diseñada y desarrollada por Field Srl para validar, procesar, convertir, gestionar y visualizar automáticamente los datos y gráficos de los sistemas de monitoreo geotécnicos, estructurales, dinámicos, meteorológicos y ambientales.
- **KLION SOFTWARE FOR INCLINOMETERS AND T-REX EXTENSOMETERS** es un software complementario para inclinómetros y extensómetros.

Imagen 54: WMS WEB MONITORING SYSTEM



Fuente: www.sisgeo.com

Imagen 55. KLION software for inclinometers and T-Rex extensometers



Fuente: www.sisgeo.com

12.4. TECNOLOGIA DE RADAR

Otro tipo de tecnología muy avanzada que permite el monitoreo de las deformaciones y mide las convergencias geotécnicas es la tecnología de RADAR, a través de esta tecnología se pueden detectar y controlar movimientos del terreno, entender cuando esto se convierte en un problema y predecir cuándo es probable que ocurra un colapso.

La tecnología de radar ayuda a profesionales a tomar decisiones confiables e informadas para gestionar mejor los riesgos, aumentar la productividad y garantizar una máxima seguridad. Es una herramienta ideal para el monitoreo, pues el radar es capaz de penetrar a través de lluvia, polvo y demás condiciones climáticas, además que es capaz de escanear desde varias distancias.

Los derrumbes en túneles pueden ser perjudiciales, destructivos y fatales. Pueden detener la producción impactando social y económicamente, el riesgo más grande de todos en poner en peligro vidas humanas. Por esto se ha usado la tecnología de radar para detectar colapsos, a través de su tecnología de monitoreo en tiempo real.

A continuación, se describen algunos tipos de tecnología que han sido específicamente desarrollados para detectar deformaciones geotécnicas y monitorear convergencias.

12.4.1. SSR – XT

Es un radar 3D que monitorea movimientos que representan una amenaza a la seguridad o productividad de las operaciones constructivas. Funciona generando un pequeño punto en la pared de la estructura se gira como una linterna y cubre completamente el área de alto riesgo.

Todos los datos procesados están inmediatamente disponibles para ser vistos y configurados para las alarmas después de cada escaneo, también muestra fotografías en tiempo real.

Imagen 56. SSR-XT



Fuente: www.groundprobe.com

12.4.2. SSR – FX

Es un radar 2D que detecta riesgos y peligros en áreas extendidas, monitorea amplias áreas durante largos periodos de tiempo con el fin de detectar puntos de movimiento y proveer un respaldo geotécnico. Genera finos ángulos azimut y pixeles de rango pequeños entregando mediciones de radar reales.

Imagen 57. SSR-FX



Fuente: www.groundprobe.com

12.4.3. SSR – SARX

Es un radar 2D que escanea a largo alcance con el objetivo de detectar movimientos pequeños que ocurren a lo largo de muchos meses. Tiene algoritmos de procesamiento inteligentes en un tiempo de exploración corto.

Imagen 58: SSR-SARX



Fuente: www.groundprobe.com

12.4.4. GMS

El Geotech Monitoring Station monitorea extensas áreas por largos periodos de tiempo, desde varios meses hasta muchos años. Al reflejar la señal de láser directamente desde la roca logra una alta precisión en la detección de deformaciones.

Imagen 59: GMS



Fuente: www.groundprobe.com/

12.4.5. GML

Geotech Monitoring Lidar es un sistema de alerta temprana que monitorea las convergencias, consiste en un monitoreo periódico que transmite datos en vivo hacia la superficie o cualquier ubicación remota en tiempo real.

Imagen 60. GML

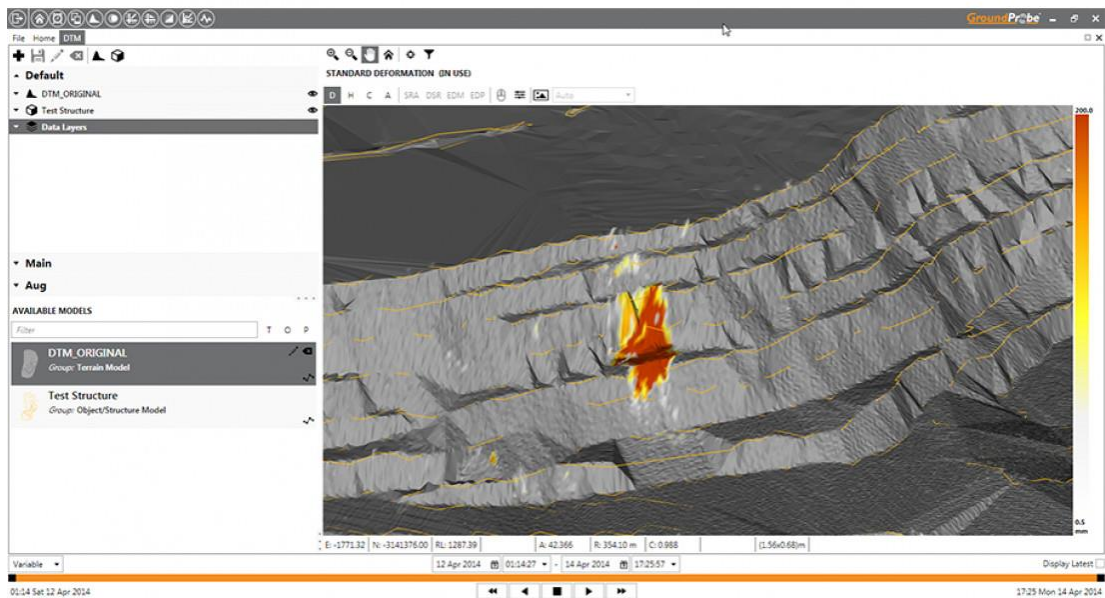


Fuente: www.groundprobe.com

12.4.6. SSR – VIEWER

Es un software que ubica datos, capas de mapeo desde arriba con fotos a nivel del suelo, fotos de capas geológicas y estructuras en una visualización 3D. Tiene un sistema de seguridad crítica con seis alarmas diferentes que se activan en cualquier dispositivo en cualquier parte del mundo y en tiempo real.

Imagen 61. SSR – VIEWER



Fuente: www.groundprobe.com

12.4.7. GEOEXPLORER

Integra datos de una amplia gama de sensores de monitoreo geotécnico, piezómetros, acelerómetros, extensómetros, para una solución específica en cada sitio.

13. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EMPLEADA EN CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES EN COLOMBIA

A continuación, se muestra la información encontrada sobre la instrumentación geotécnica empleada en construcción de túneles en Colombia, esta información fue obtenida por medio de:

- Entrevistas a ingenieros civiles que están a cargo de proyectos de construcción de túneles viales.
- Entrevistas a empresarios y proveedores de instrumentación geotécnica.
- Informes técnicos encontrados en internet, a través de páginas web como INVIAS, ANI y empresas del sector construcción a cargo de proyectos de túneles viales.
- Asistencia al XIV Seminario de Túneles y Obras Subterráneas, realizado en Medellín.

Según un reporte de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) en el año 2018, en Colombia actualmente hay 46 túneles viales en estudios y diseños, 28 túneles en construcción y 29 en operación,

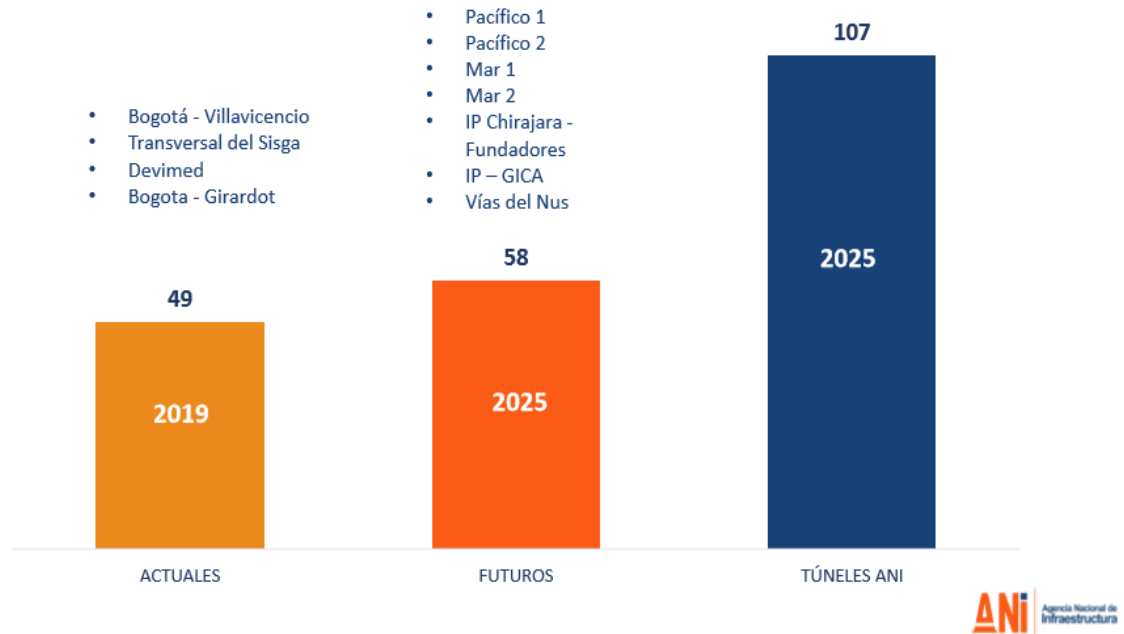
Imagen 62. Túneles en Colombia



Fuente: www.ani.gov.co

De acuerdo con la presentación sobre el estado actual de la túnelería en Colombia a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura – ANI en el seminario de túneles que se llevó a cabo en Medellín, en Colombia existen 49 túneles actuales y 58 futuros para un total de 107 túneles a cargo de la ANI.

Imagen 63. Túneles a cargo de la ANI



Fuente: Presentación ANI - XIV Seminario Túneles y Obras Subterráneas

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) indicó que en el cruce de la Cordillera Central se están ejecutando actualmente 22 túneles, con una inversión aproximada de \$1.5 Billones. De estos, 21 tienen un avance en promedio de 75% y una longitud de más de 20 km en total, en el corredor Buga- Buenaventura se adelanta la ejecución de un túnel de 226 m con un avance del 98%. En este corredor se entregaron ya 17 infraestructuras subterráneas.

Imagen 64. Túneles en Colombia



Fuente: Presentación ACTOS por Germán Pardo

La historia de los túneles en Colombia comenzó aproximadamente en la década de 1950 a 1960, específicamente en el Valle del Cauca. Para el año 1970 en el departamento de Antioquia se construyó el primer túnel llamado Guarne, entre 1973 y 1976 se construyó el túnel El Espejo en el departamento de Caldas y en el año 1975 se construyeron los primeros túneles conocidos como Quebrada Blanca en la vía de Bogotá – Villavicencio.

A comienzos del siglo XXI entre 1993 y 1995 fue construido el túnel La Ilorona en la carretera de Medellín. Para esta década en el departamento del Meta innovaron en los sistemas constructivos de los túneles Bijagual, Boquerón y Buenavista, mejorando la comunicación vial entre Bogotá y los llanos orientales. Para el año 2002 Colombia ya contaba con 33 túneles que sumaban 18 km de longitud. En el año 2005 en el departamento de Antioquia se construyó el túnel vial más largo en su momento llamado Túnel de Occidente, entre los proyectos carreteros más complejos también se encuentran el Túnel de Sumapaz y el Túnel de Gualanday en el departamento del Tolima.

Actualmente el túnel más representativo por su complejidad, condiciones de clima, antecedentes históricos y demás es el de La Línea que actualmente se encuentra en construcción. También se encuentran en construcción 19 túneles en la vía Bogotá – Villavicencio, en la Ruta del Sol 3 túneles, en la vía Buenaventura – Buga

22 túneles y en departamento de Antioquia se proyectan algunos túneles más. A continuación, se relacionan en una tabla los túneles viales de Colombia.

Tabla 4. Túneles viales de Colombia

	Túnel	Ubicación	Longitud (m)
1	Buenaventura Túnel I	Dagua-Valle del cauca	220
2	Buenaventura Túnel II	Dagua-Valle del cauca	130
3	Buenaventura Túnel III	Dagua-Valle del cauca	100
4	Buenaventura Túnel IV	Dagua-Valle del cauca	85
5	Buenaventura Túnel V	Dagua-Valle del cauca	480
6	El Polvorín	Santa María-Boyacá	1640
7	Las Juntas	Sutatenza-Boyacá	205
8	Pozo Azul	Garagoa-Boyacá	290
9	El Volador	Macanal-Boyacá	234
10	El Ventarrón	Macanal-Boyacá	612
11	El Salitre	Macanal-Boyacá	634
12	El Trapiche	Macanal-Boyacá	90
13	La Esmeralda	Santa María-Boyacá	400
14	La Presa	Santa María-Boyacá	475
15	Pluma de Agua	Santa María-Boyacá	770
16	La Cascada	Santa María-Boyacá	420
17	Moyas	Santa María-Boyacá	350
18	Muros I	Santa María-Boyacá	134
19	Muros II	Santa María-Boyacá	350
20	El Infierno (Figura 3.)	Garagoa-Boyacá	488
21	La Llana	Taminango-Nariño	204
22	Peñaliza	Chachagüi-Nariño	205
23	El Espejo	Rio sucio-Caldas	180
24	Quebradablanca	Guayabetal-Cundinamarca	726
25	La Llorona	Dabeiba-Antioquia	435
26	Caquetá I	Florencia-Caquetá	240
27	Caquetá II	Florencia-Caquetá	412
28	Caquetá III	Florencia-Caquetá	208
29	Caquetá IV	Florencia-Caquetá	171
30	Bijagual	Villavicencio-Meta	185
31	Buenavista-Misael Pastrana Borrero	Villavicencio-Meta	4520
32	Boquerón-Argelino Duran Quintero	Bogotá-Cundinamarca	2405
33	Túnel Guarne-Ascenso	Copacabana-Antioquia	235
34	Túnel Guarne-Descenso	Copacabana-Antioquia	295
35	Fernando Gómez Martínez-Occidente	Medellin-Antioquia	4603
36	Piloto de la línea	Calarcá - Quindío	8554
37	La Estrella	Calarcá - Quindío	326
38	Los Robles	Calarcá - Quindío	883
39	Los Chorros (Figura 4.)	Calarcá - Quindío	611
43	Guillermo León Valencia-Sumapaz	Icononzo-Tolima	4206
44	Túnel N1	Barrancabermeja-Bucaramanga	1098
45	Túneles de las Lajas	Caparrapi	390
46	Túnel de Daza	Pasto-Rumichaca-Chachagüi	1710
Longitud Total			41279

Fuente: Tesis Arias. Díaz. (2016)

El nacimiento de la instrumentación se asocia al monitoreo de estructuras de retención de agua, que data de las primeras décadas del siglo XXI, cuando en Europa los ingenieros de aquella época realizaban labores artesanales para observar los niveles de los embalses y los desplazamientos en las estructuras. A partir de entonces los avances en instrumentación se dieron con el desarrollo de la ingeniería en presas.²⁷

De los proyectos de túneles que fueron construidos entre los años 1970 y 2000 no se logró establecer una referencia del registro histórico sobre la aplicación ni avance de la instrumentación geotécnica en el desarrollo de estas construcciones, adicionalmente los profesionales que fueron entrevistados atienden proyectos realizados del año 2000 en adelante, por lo cual tampoco fue posible conocer el uso de la instrumentación en años anteriores.

De acuerdo a la información recibida y el análisis de lo observado se encontró referencia de la instrumentación geotécnica que se ha empleado en una primera mirada en el país. Con la información lograda se conoce de 43 túneles que aplicaron instrumentación geotécnica relacionados en la siguiente tabla.

Tabla 5. Túneles viales de Colombia que han usado instrumentación geotécnica

Túneles en Colombia	Longitud (m)	Año de inauguración	Conexión
Túnel La Llorona	435	1990	Medellín - Golfo de Urabá
Túnel del Boquerón	2352	1996	Bogotá - Villavicencio
Túnel del Occidente	4603	2006	San Jerónimo, Santa Fe de Anquioquia
Túnel Dos quebradas	126	2009	Armenia - Manizalez
Túnel de Sumapaz	4200	2010	Meigar - Bogotá
Túnel El Cune	200	2011	Villeta
Túnel de Daza	1710	2012	San Juan de Pasto
Túnel del Oriente	8229	2019	Medellín - Rionegro
Túnel Mulatos	2500	En construcción	Bolombolo, La Pintada, Primavera
Túnel de la Línea y 24 Túneles cortos (25 túneles)	8652	En construcción	Quindío, Cajamarca, Tolima
Túnel del Toyo	9840	En construcción	Cañasgordas - Giraldo
Túnel 13		En construcción	Bogotá - Villavicencio
Túnel Tercer Carril		En construcción	Bogotá - Girardot
Túnel Irra	3430	En construcción	Urabá, Antioquia, Puerto de Buenaventura
Túnel Tesalia	3400	En construcción	Urabá, Antioquia, Puerto de Buenaventura
Túneles de desvío Hidro-Ituango		En construcción	Antioquia
Ruta del sol: Túnel El Trigo, La Cumbre y Las	18000	En construcción	Honda, Villeta, Guaduas, Puerto Salgar

Fuente: Propia

²⁷Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/1224/6MarcoTeorico.pdf;jsessionid=817FDDC135622A88A295CEC31D2D7BCF?sequence=6>

Luego del análisis y la recopilación de información de la instrumentación geotécnica que se ha usado en la construcción de los túneles viales de Colombia se relacionan las siguientes tablas con la agrupación de toda la información.

Tabla 6. Instrumentación geotécnica empleada en túneles de Colombia

N°	Instrumentación	TÚNEL																
		La Llorona	Boqueron	Occidente	Dos Quebradas	Sumapaz	El Cune	Daza	Oriente	Mulatos	La Línea - 24 túneles cortos	Toyo	Túnel 13	Tercer Carril	Irra	Tesalia	Desvío Hidro-Ituango	Ruta del sol: El Trigo - La Cumbre - Las Lajas
1	Inspección visual directa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Sondas para medida de nivel de agua									✓				✓				
3	Registradores de nivel de agua																	
4	Transductores de presión eléctricos													✓				
5	Aforadores																	
6	Topografía		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓
7	Diana reflectante													✓				
8	Topografía (DGPS)				✓						✓			✓				
9	Hitos de nivelación		✓					✓			✓	✓		✓		✓		
10	Tiras de cortante													✓				
11	Tuberías inclinométricas convencionales																	
12	Tuberías de junta rápida																	
13	Columnas inclino-extensométricas													✓				

Fuente: Propia

Tabla 7. Instrumentación geotécnica empleada en túneles de Colombia

N°	Instrumentación	TÚNEL																
		La Llorona	Boqueron	Occidente	Dos Quebradas	Sumapaz	El Cune	Daza	Oriente	Mulatos	La Línea - 24 túneles cortos	Toyo	Túnel 13	Tercer Carril	Irra	Tesalia	Desvío Hidro-Ituango	Ruta del sol: El Trigo - La Cumbre - Las Lajas
14	Sondas inclinométricas																	
15	Inclinómetros fijos						✓			✓	✓			✓	✓	✓		
16	Clinómetro portátil																	
17	Clinómetros de superficie y electroniveles																	
18	Péndulos directos e invertidos													✓				
19	Extensómetro magnético									✓								
20	Extensómetro incremental																	
21	Extensómetros fijos									✓				✓				
22	Extensómetros de varilla		✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
23	Extensómetros de terraplén																	
24	Extensometría de cinta		✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
25	Extensómetros multipunto y magnéticos		✓	✓				✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	
26	Piezómetro Casagrande	✓					✓							✓	✓	✓		

Fuente: Propia

Tabla 8. Instrumentación geotécnica empleada en túneles de Colombia

N°	Instrumentación	TÚNEL																
		La Llorona	Boqueron	Occidente	Dos Quebradas	Sumapaz	El Cune	Daza	Oriente	Mulatos	La Línea - 24 túneles cortos	Toyo	Túnel 13	Tercer Carril	Irra	Tesalia	Desvío Hidro-Ituango	Ruta del sol: El Trigo - La Cumbre - Las Lajas
27	Hilo vibrátil										√							
28	Células de presión de tierras													√				
29	Células de presión NATM													√				
30	Células de presión hidráulica													√				
31	Manómetros																	
32	Cinta de convergencia				√					√			√	√				
33	fisurómetros mecánicos													√				
34	TDR - Reflectoria de ondas eléctricas													√				
35	Acelerógrafo							√		√								
36	Celdas de Presión										√							
37	Software de monitoreo										√			√			√	

Fuente: Propia

De acuerdo con los resultados se identifica que la instrumentación geotécnica que más se ha usado en proyectos de construcción de túneles en Colombia son instrumentos de topografía, hitos de nivelación y extensómetros. Para los ingenieros expertos lo que prima al interior del túnel son las medidas de convergencia y ya para los componentes hidrogeológicos son necesarios los piezómetros y las pruebas de bombeo, para las medidas de la superficie se emplean instrumentos más tradicionales como inclinómetros para detectar movimientos en masa del terreno.

En el caso de los extensómetros de diferentes tipos los emplean para medir convergencias, es decir el acercamiento del terreno en las paredes del túnel hacia el centro de este, buscando con la ubicación de soportes primarios que el túnel empiece a tener una estabilización para poder hacer el revestimiento.

En cuanto a los inclinómetros y los controles topográficos son utilizados para medir movimientos diferenciales que permitan identificar que un talud puede tener algún proceso de inestabilidad y con los medidores de esfuerzo miden el comportamiento del concreto y de las posibles fisuras que tenga la estructura para así decidir sobre la estabilidad del túnel.

Para los ingenieros expertos que usan esta instrumentación en el desarrollo de sus proyectos la principal instrumentación a tener en cuenta en las mediciones al interior del túnel es aquella que permite conocer cuáles son las convergencias del terreno (movimientos del terreno) después de excavado, como los extensómetros de cinta tradicional y electrónicos.

También se utiliza instrumentación tradicional para medir los comportamientos de taludes, como los piezómetros, inclinómetros, controles de topografía, radares, controles con GPS, fisurómetros y demás medidores de esfuerzos.

En las construcciones de túneles es importan contar con ingenieros geotécnicos altamente calificados y experimentados que hagan las mediciones con la mayor responsabilidad y conocimiento técnico de la instrumentación geotécnica que emplean pues dado que una lectura se pasa a un documento donde se realiza un análisis y se genera un resultado. Si las mediciones no las ejecutan de una manera correcta se puede inducir en un error grave en la toma de decisiones. Por lo anterior es necesario que el personal esté bien capacitado y que tenga un concepto de responsabilidad muy alto a la hora de emplear instrumentación geotécnica teniendo claro qué se debe medir, por qué medirlo, cómo medirlo y dónde y cuándo hacerlo.

Mucha de la instrumentación geotécnica disponible en el mundo es muy costosa quizás ahí haya una oportunidad de emprendimiento en el país para tratar de buscar formas más idóneas o menos costosas y menos complicadas para llevar a cabo la aplicación de toda la instrumentación geotécnica necesaria en la ejecución de un túnel. Por esto hay que buscar una forma de tener una instrumentación más sencilla, económica y de alcance que brinde la misma calidad de información y permita una gestión de riesgos efectiva a través de un soporte técnico integral.

13.1. DISEÑO, PLANEACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL MULATOS

En seminario de túneles y obras subterráneas que se llevó a cabo em la ciudad de Medellín, presentaron el desarrollo de la construcción del túnel Mulatos presentando también el uso de la instrumentación en el desarrollo de esta construcción.

Imagen 65. Túnel Mulatos



Fuente: Presentación de, XIV Seminario Túneles

La obra se ubica en el macizo rocoso entre el río Mulatos (que le da su nombre) y el río Cauca, es la unidad funcional o tramo más crítico del proyecto Pacífico 2, a cargo de la Concesión La Pintada y una de las vías de cuarta generación en Antioquia. La excavación inició con el portal entrada en septiembre de 2017 y el portal salida comenzó tres meses después, tiene 2,5 kilómetros de longitud

Las rocas que conforman el macizo que atraviesa el Túnel, son parte de la formación de Colombia, unidad conformada por rocas volcánicas, principalmente basaltos, aglomerados, brechas volcánicas y en menor proporción tobas y areniscas.

La geomorfología en el área del Túnel Mulatos, corresponde a una zona de ladera inclinada a muy inclinada, se localiza a lo largo de la depresión intramontaña del Valle del río Cauca.

Durante la fase de diseño y con el fin de conocer las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, y disposición de las estructuras que interceptan el túnel, se realizaron 11 perforaciones. Con base en la información geológica, geotécnica e hidrogeológica recopilada en la fase de estudio, se previeron 8 tipos de terreno

El Método Austriaco de Túneles (NATM) fue el empleado en la ejecución del túnel Mulatos, el cual maximiza la capacidad de resistencia y autosoporte inherente del propio terreno.

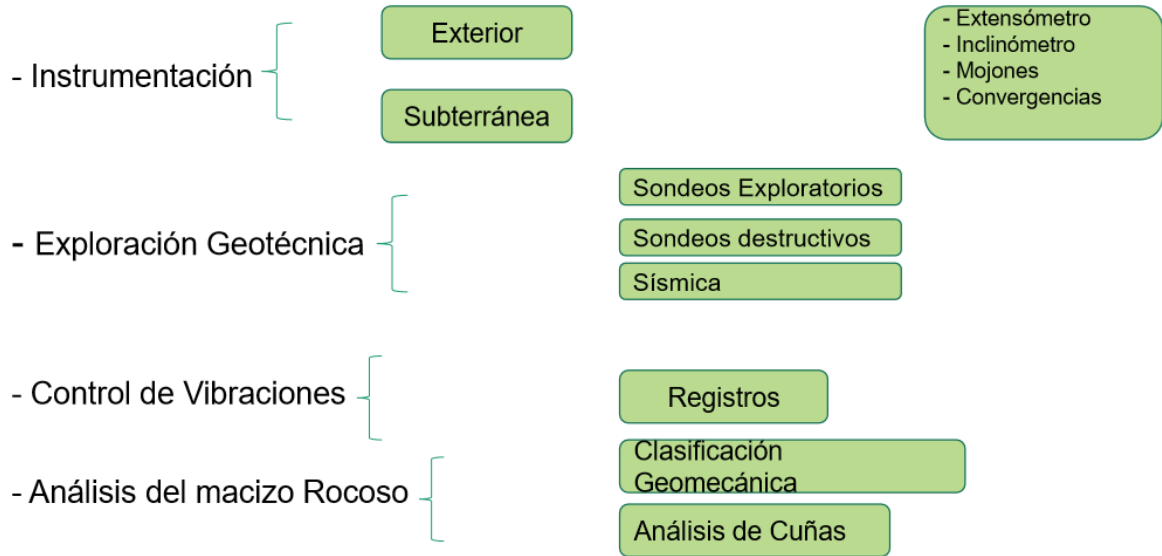
Imagen 66. Excavación y soporte Túnel Mulatos



Fuente: Presentación de, XIV Seminario Túneles

13.1.2. CONTROL Y REGISTRO GEOTÉCNICO

Imagen 67. Control y registro Geotécnico Túnel Mulatos



Fuente: presentación de Integral Ingenieros Consultores, XIV Seminario Túneles

INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

- Un (1) extensómetro horizontal multipunto de tipo MPBX de hilo vibrátil con anclajes a 3, 6 y 12 m de profundidad ubicado en el portal de entrada, entre los dos túneles.
- Un (1) inclinómetro, a una profundidad cercana de 20 m para el monitoreo de desplazamientos horizontales en el portal de salida.
- Control topográfico

A continuación, se muestran las fotografías de la instalación de la instrumentación en el túnel, las cuales se sacaron de la presentación en el seminario de túneles en Medellín.

Imagen 68. Instalación de extensómetros, Túnel Mulatos



Fuente: presentación de XIV Seminario Túneles

Imagen 69. Instalación inclinómetros en el Túnel Mulatos



Fuente: presentación de XIV Seminario Túneles

Los resultados obtenidos de las mediciones con la instrumentación geotécnica instalada en el túnel Mulatos fueron:

- No se presentaron movimientos, sólo en los 10 primeros metros de profundidad.
- Las deformaciones superficiales registradas no superaron los 5 mm.
- La medición para el control de convergencia se realizó mediante control con estaciones topográficas.

14. RESULTADOS OBTENIDOS POR MEDIO DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN COLOMBIA

Luego del análisis de la información que fue posible recopilar sobre la instrumentación geotécnica que se ha usado en algunos proyectos de construcción de túneles se evidencia en una primera mirada que actualmente en Colombia la instrumentación geotécnica si está implementando, aunque muchas veces los estudios previos no están siendo ejecutados con el rigor, la técnica y la profundidad que se requiere haciendo uso de esta instrumentación. Es así como muchas veces no se cumple con los presupuestos ni con los tiempos de los cronogramas por las grandes diferencias que se encuentran en las condiciones reales del terreno y lo que se tenía establecido en los estudios previos.

Los resultados a veces se alejan de la realidad porque mucha de esa instrumentación se planea y se diseña para unas condiciones dadas del terreno pero cuando ocurren otras variables inesperadas como por ejemplo el agua cuando actúa fuertemente, generando presiones fuertes de poros y presiones de filtración, probablemente esa instrumentación que se asignó no va a estar midiendo lo que se requería en ese momento, es por esto que la instrumentación hay que definirla muy bien, el rango de medida y el orden de magnitud hay que saberlo para que no se generen errores en las mediciones.

El uso de la instrumentación hay que planearlo desde los diseños e ir instrumentando el túnel para que durante todo el proceso constructivo se tengan datos sobre lo que le está pasando al terreno por el mismo proceso constructivo, porque si no se tienen datos de entrada y se espera que se construya el túnel y que se instale la instrumentación pues no se va a tener un punto de comparación y no se va a saber exactamente qué es lo que está pasando y cómo es que están cambiando las cosas.

En Colombia está el manual de túneles donde se presenta todo el tema de instrumentación geotécnica y demás, pero muchas veces estos manuales que hace el INVIAS sirven como una guía más no son exigibles. También se debe mejorar la práctica del uso de instrumentación para que los que trabajen con estos proyectos entiendan la importancia y la puedan proveer desde las fases iniciales, eso tendrá que suceder en algún momento, porque lamentablemente sucede cuando hay un colapso en la obra.

Toda instrumentación o monitoreo que se haga requiere una medición continua y discreta y requiere una periodicidad en la toma de medidas, hay que establecer cada cuanto se debe medir dependiendo de los tipos de materiales del terreno. En la ingeniería de estas obras se han visto muchos problemas porque la instrumentación se planea y se diseña considerando unas condiciones del terreno iniciales y cuando se hace la construcción de los túneles o la ejecución de la

excavación resultan unas condiciones totalmente distintas, es por esto que si no hay una selección adecuada sobre los sitios y elementos de sostenimientos que se deben monitorear entonces no se va a obtener la información confiable y real, así como también se debe asegurar el nivel de responsabilidad y experiencia de los operarios y técnicos que se encargan de instrumentar el túnel. Es importante capacitar a los ingenieros que emplean la instrumentación geotécnica para la interpretación de alarmas, análisis de datos y controles de monitoreo

Donde la instrumentación se utiliza en forma adecuada se entrega datos importantes para poderse anticipar a posibles mecanismos de falla, también arroja un mejor conocimiento del terreno porque cuando se hace la construcción es cuando realmente ocurren los problemas de ingeniería. Lo que permite la instrumentación es retroalimentar los modelos y los análisis de predicción que se hicieron antes sin la instrumentación sería imposible la ejecución correcta del túnel.

Las medidas de convergencia que se esperan en el diseño es la única opción válida para poder tomar decisiones de revestimiento del túnel y por tanto el avance en el proceso de excavación a un proceso secundario. Sin instrumentación no se pueden tomar decisiones que permitan la ejecución de la obra. El principal avance en instrumentación es la electrónica que cada vez permite que las medidas se puedan tomar de una forma más digital y menos analógica. Actualmente se cuenta con equipos ópticos de láser y computacionales, lo que falta es que haya más penetración en el mercado y las tecnologías permitan que se automatice mucho más un túnel durante el momento de su construcción.

Hay mediciones que se hacen diarias, cada tercer día o una vez a la semana. Siempre es durante la construcción, también hay mediciones que se hacen después de que se ha terminado la construcción durante operación. En un túnel vial se tiene muchísima instrumentación, por ejemplo: controlar los humos ya en operación, dado que túnel vial no puede funcionar si no se está controlando los niveles de óxido de carbono, de gases, humos, vapores etc.

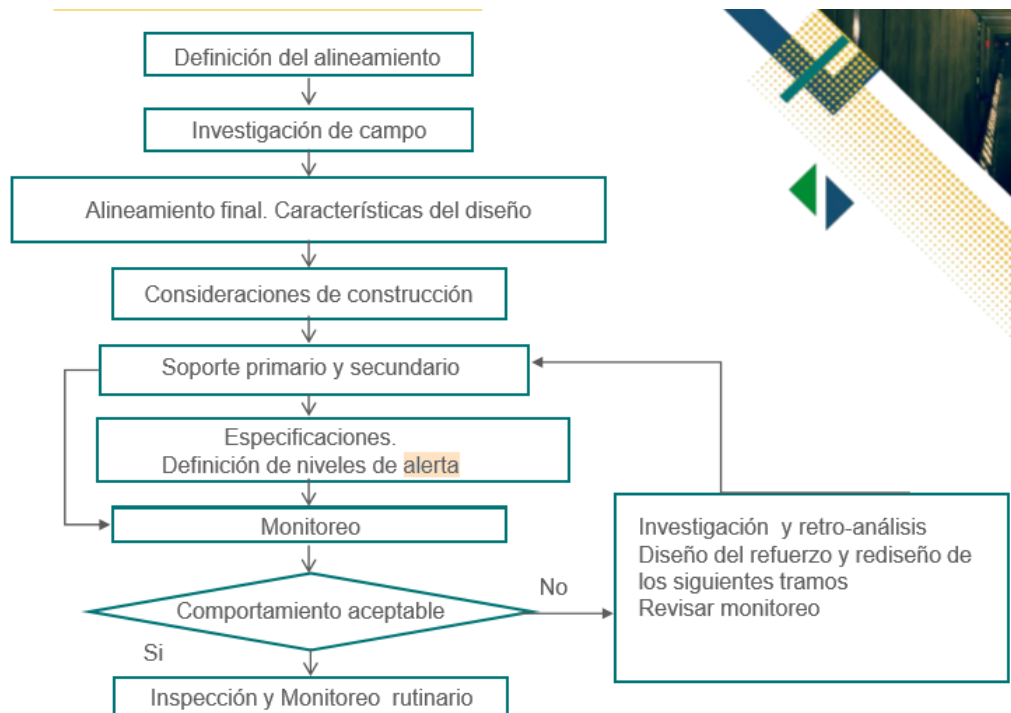
La tecnología avanza mucho, hoy en día hay instrumentación que puede estar entregando datos en tiempo real, lo cual hace algunos años no era tan común, hoy en día un piezómetro puede estar entregando datos en tiempo real al sistema y de esa manera el geotecnista a cargo puede ir haciendo las evaluaciones y las variaciones para saber si establece un sistema de alerta temprana, si lo decreta o declara por una emergencia. En Colombia hace falta esto hay pocas empresas que manejan el tema de la instrumentación geotécnica, ellos consiguen sus propios proveedores.

La mayoría de instrumentación viene acompañada de algún tipo de sistema de adquisición de datos tipo software el cual que hace un procesamiento inicial y después los profesionales a cargo harán la interpretación, proyecciones y predicciones correspondientes para la presentación y análisis de la información. El

principal avance es que la electrónica cada vez permite que las medidas se puedan tomar de una forma más digital y menos analógica, ya existen equipos ópticos de láser y computacionales, lo que falta es que haya más penetración en el mercado y las tecnologías permitan que se automatice mucho más un túnel durante el momento de su construcción.

Con el avance de la tecnología la instrumentación seguirá mejorando, la instrumentación entregará datos en tiempo real y lo más importante es que se pueda tener de forma inmediata las mediciones de convergencias para poder empezar a tomar decisiones desde el momento propio de la excavación. La tecnología, el análisis en tiempo real, la precisión, la transmisión de datos y los resultados gráficos con alertas garantizan métodos constructivos seguros y controlados correctivos en relación con el soporte adicional.

Imagen 70. Fases importantes en la ejecución de un túnel



Fuente: Presentación de Integral Ingenieros Consultores, XIV Seminario Túneles

15. VARIABLES A MEDIR EN LA CONSTRUCCIÓN DE TUNELES VIALES Y LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA QUE PUEDE UTILIZARSE

Para la medición de variables en la construcción de túneles es necesario realizar un reporte geotécnico del diseño del túnel. El reporte debe incluir lo siguiente:

- Métodos disponibles para la excavación y soporte.
- Límites y criterios en las modificaciones que surjan durante la construcción.
- Criterios para el monitoreo durante la construcción.
- Plan de monitoreo que permita una comparación continua entre las condiciones reales y las previstas.
- Definición de las características del terreno.

La instrumentación lo que hace es controlar el comportamiento de inestabilidad, evolución en el tiempo y efectos sobre las estructuras. Los parámetros principales que se miden con la instrumentación geotécnica son:

- Presión de poro
- Nivel freático
- Presiones totales
- Deformaciones y desplazamientos del talud

Un buen seguimiento a estos parámetros permite definir la superficie, volumen y profundidad del deslizamiento de la tierra, así como los movimientos del terreno de acuerdo con las condiciones climáticas.

Para obtener los parámetros a medir con la instrumentación geotécnica se deben hacer mediciones en la superficie y en el interior del túnel.

MEDICIONES EN LA SUPERFICIE

Realizar estas mediciones permite detectar las condiciones de inestabilidad o deformaciones inadmisibles como son:

- Desplomes
- Presión de agua en el subsuelo
- Deformaciones de la masa del suelo

MEDICIONES EN EL INTERIOR DEL TÚNEL

Realizar estas mediciones permite conocer cuáles son los esfuerzos actuantes sobre el revestimiento del túnel, y la distribución de las deformaciones en el terreno debido a la excavación.

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

Entendiendo que antes de iniciar la obra el terreno se encuentra en un estado de equilibrio natural, pero luego de la excavación ese estado se ve afectado por el efecto de descompresión del terreno (expansión y agrietamiento que se produce en rocas que se han formado a gran profundidad). Con la instrumentación lo que se busca es controlar los movimientos del terreno en diferentes puntos, tanto en la superficie como en la profundidad.

En obras subterráneas tales como construcción de túneles deben instalarse instrumentación que tenga en cuenta las mediciones de:

Movimientos verticales:

Los cuales dependen principalmente del tipo de terreno, presencia de agua y método constructivo del túnel. Las mediciones deben ser:

- En la superficie mediante instrumentos topográficos
- En la profundidad mediante el uso de extensómetros

Para medir los movimientos verticales se emplean los hitos de nivelación o extensómetros de varilla.

Movimientos horizontales:

Las mediciones se deben hacer en la profundidad mediante el uso de inclinómetros, los cuales miden la deformación normal al eje de una tubería. A lo largo de la tubería se desliza una sonda en cuyo interior hay un sensor capaz de medir las inclinaciones de la sonda.

Presiones:

Se mide mediante células de presión ubicadas en el interior del túnel o también piezómetros.

Niveles de agua subterránea:

Estas mediciones se realizan para observar el efecto del túnel dentro del modelo hidrogeológico generado. Para el monitoreo de esta variable se utiliza instrumentación como:

- Piezómetros en las paredes del túnel
- Piezómetros en superficie

Asentamientos superficiales:

Para medir los asentamientos superficiales se utilizan los desplazamientos absolutos 3D, Extensómetros e inclinómetros

Estructura geológica del terreno:

Para medir la estructura geológica del terreno se realiza a través del mapeo manual, digital y la inspección visual.

Cuando se define un programa de monitoreo para la ejecución de la obra, se evalúa requisitos y necesidad de los instrumentos de medición, el plan de trabajo para la toma de datos, frecuencia, ubicación y especificaciones de cada instrumento. En la construcción de túneles se deben medir parámetros como:

- Fallas
- Movimientos horizontales, verticales, profundos y superficiales
- Deformaciones estructurales
- Temperatura
- Convergencias y rotaciones
- Juntas y grietas
- Presiones de poro
- Caídas de roca y derrumbes

Algunas ventajas de medir y monitorear el terreno durante la ejecución de un túnel son:

- Eficacia en el método constructivo
- Interpretación en condiciones reales durante la medición de parámetros
- Verificación y mejoramiento del diseño del comportamiento real del suelo

Los riesgos que se pueden encontrar en el monitoreo geotécnico son:

Riesgos en la superficie:

- Asentamientos de estructuras como grietas, inclinación y daños.
- Vibraciones

Riesgos bajo el nivel del terreno:}

- Deformación
- Inestabilidad
- Caída de rocas

El monitoreo superficial en el túnel se hace a través de:

- Satélites
- Drones
- Medición con topografía
- Inclínómetros
- Piezómetros
- Fisurómetros

Tabla 9. Parámetros a medir en la ejecución del túnel

CONDICIÓN	PARÁMETROS	SITUACIONES DONDE SE EVIDENCIAN	INSTRUMENTO	UTILIDAD
MOVIMIENTOS SUPERFICIALES	Desplazamientos verticales	Asientos o levantamientos de la superficie del terreno que pueden producir distorsiones en las estructuras	Métodos topográficos: nivelación y triangulación Extensómetro vertical	Puede definirse la extensión superficial afectada por la inestabilidad Mide los asientos
	Desplazamientos laterales	Desplazamientos horizontales que pueden iniciar la actividad de una falla.	Métodos topográficos: colimación	Puede definirse la extensión superficial afectada por la inestabilidad
	Vibraciones	Movimientos en el terreno causados por voladuras que afectan a las estructuras existentes	Sismógrafos	Determinan la frecuencia, aceleración y desplazamiento de las partículas.
MOVIMIENTOS EN EL INTERIOR DEL TERRENO	Desplazamientos verticales	Asientos producidos por la compresión o consolidación del terreno entre una excavación subterránea y la superficie.	Extensómetro vertical Piezómetro	Para la medición de deformaciones entre la superficie del terreno y la excavación Determina variaciones de la presión intersticial. No se utiliza en suelos blandos
	Desplazamientos laterales	Movimientos hacia la excavación por la existencia de suelos blandos o fallas	Medidas de convergencia	Aporta datos sobre la necesidad de sostenimiento adicional
			Inclinómetro	Permite la medición continua de movimientos laterales a lo largo de la vertical de un sondeo en suelos blandos
			Deflectómetro	Se usa como instalación permanente en sondeos para medir movimientos laterales como los que pueden existir en zonas de falla u otros planos de debilidad en macizos rocosos
	Gradientes de deformación	Generados por el cierre de la excavación subterránea.	Extensómetros de sondeo	Pueden obtenerse las cargas para el diseño del sostenimiento.
	Actividad microsísmica	Liberación de tensiones en suelos y rocas. Cuando un material es tensionado genera ondas elásticas bajo el punto de rotura	Emisión acústica	Prevención de roturas

Fuente: CORRALES, Isabel (2009)

Tabla 8. Parámetros a medir en la ejecución de un túnel

PRESIONES IN SITU	Niveles de agua y presiones intersticiales		Piezómetros abiertos	Niveles de agua en que las medidas se realizan desde la superficie y el nivel está por debajo de ésta, y presiones intersticiales en un determinado nivel en terreno permeable.
			Piezómetros cerrados	Niveles de agua en que las medidas se realizan a distancia y el nivel se encuentra en cualquier situación, y presiones intersticiales a distintos niveles en cualquier clase de terreno.
			Pozos de observación	Para medir el nivel freático en terrenos permeables.
	Presiones de terreno contra revestimientos o sostenimientos		Células de presión	Para la medición de presiones contra el revestimiento.
	Tensiones bajo áreas cargadas o en elementos estructurales		Medidores de deformación	Para conocer la deformación de elementos metálicos del sostenimiento y del revestimiento, si es de hormigón armado, permitiendo conocer la tensión en la que se encuentra en cada momento.
Células de carga			Se utilizan para el control de anclajes o bulones cuando se desea conocer la evolución de la carga.	
TENSIONES IN SITU	Medición de las magnitudes y dirección de las tensiones principales	Estimar la respuesta del terreno frente a la variación de tensiones causadas por la excavación que influyen en la estabilidad de las mismas.	Sobrestificación	Se basa en el procedimiento de relajación. Se realiza en el interior de un sondeo y lo que se obtiene es el módulo de elasticidad del terreno
			Fracturación hidráulica	Se basa en el análisis de la distribución de tensiones tangenciales que se producen alrededor de un sondeo.
			Gato plano	Para la medición de tensiones paralelas a la superficie de la roca y en las proximidades de la misma.

Fuente: CORRALES, Isabel (2009)

GESTIÓN DEL RIESGO

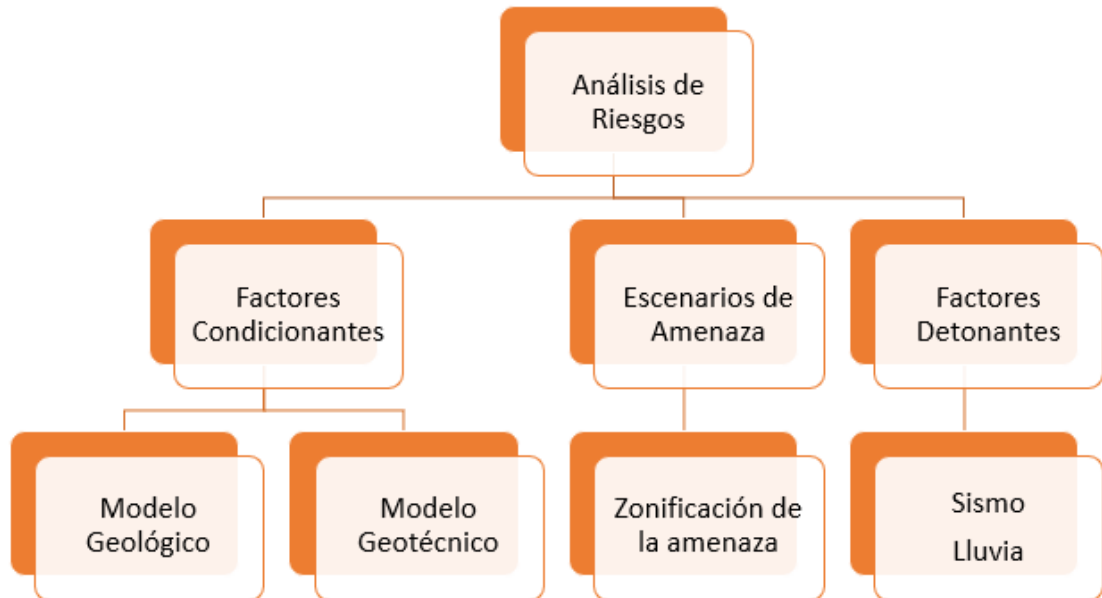
Pensando en la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible es fundamental definir un plan de riesgo para la ejecución de obras basado en las siguientes etapas:

- **Análisis del riesgo:** determina los posibles efectos sociales, económicos y ambientales e identifica el riesgo dependiendo los diferentes escenarios de amenaza.
- **Evaluación del riesgo:** a partir de esta etapa se definen los criterios de seguridad y la zonificación del riesgo para definir la intervención a que haya lugar.
- **Mitigación y prevención del riesgo:** en esta etapa se definen las medidas de reducción del riesgo.

Factores como la lluvia y los sismos se consideran agentes detonantes, debido a que pueden modificar las condiciones de estabilidad del terreno. En los deslizamientos el nivel freático es un condicionante de la inestabilidad, ya que los deslizamientos profundos ocurren por el incremento en la presión de poros del

suelo, asociado por los largos periodos de lluvia. En el caso de los sismos es necesario analizar curvas de amenaza sísmica disponibles en estudios regionales.

Imagen 71. Análisis de riesgos en construcción de túneles



Fuente: Propia

En la construcción de túneles para realizar los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por los movimientos en masa (suelo o roca se mueven cuesta abajo) es necesario disponer de la cartografía básica. Lo anterior se obtiene a partir de mediciones directas sobre el terreno real por medio de levantamientos topográficos, procesos fotogramétricos y la utilización de sensores remotos (instrumentos para captar información de un objeto a distancia).

Los modelos geológico y geotécnico permiten analizar la probabilidad de falla, deslizamientos superficiales o profundos y parámetros de resistencia del terreno. El modelo geológico representa la distribución espacial de los materiales, accidentes tectónicos y características hidrológicas; mientras que el modelo geotécnico indica la respuesta del terreno durante y después de la construcción de la obra.

16. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBJETIVO GENERAL

La instrumentación geotécnica es el mejor aliado y es una herramienta que garantiza tranquilidad, éxito y confianza para avanzar en la construcción del túnel, pues los túneles son las estructuras de ingeniería donde la relación del diseño y sistema constructivo definen el logro de la obra. La instrumentación debe tener un avance importante en cuanto a tecnología que haga que se economicen costos y que las universidades profundicen más en este tema y creen motivación en los estudiantes para emprender en este negocio.

La práctica del ingeniero también debe cambiar, pues debe tener entendimiento de la geotecnia para que los que trabajen con estos proyectos le den la importancia a la instrumentación y la puedan proveer desde las fases iniciales. Los ingenieros a cargo de las mediciones deben tener la experiencia y responsabilidad suficiente para atender la gestión de riesgos y brindar un soporte técnico integral.

Las variables que más se complican en la construcción del túnel es la presión del agua, primero es altísimamente variable y segundo es difícil de medir porque el macizo rocoso es un medio fracturado, muchas veces el agua está atrapada y no hay conectividad entre esas fracturas pero el agua sigue ejerciendo la acción de reducir la resistencia porque aumenta la presión de poros y afectar la calidad de los materiales por ejemplo la roca lodosa que es muy susceptible a desleírse, deteriorarse en sus propiedades por lo que puede ser el agua quien esté haciendo todo esos daños y a veces eso es muy difícil de hacerle seguimiento, por ese motivo pueden suceder una cantidad de sucesos inesperados.

Entre otras variables principales a medir con la instrumentación están las deformaciones del terreno, son esas deformaciones asociadas con cambios de esfuerzos en diferentes zonas del terreno donde el agua también ejerce una presión hidráulica o infiltración (la presión hidráulica o de poros reduce el esfuerzo efectivo de los materiales rocosos, eso es lo que conlleva a que los materiales pierdan resistencia en principio y fallen). La gran mayoría de instrumentación informa cómo se está comportando toda la masa del terreno entorno al túnel para saber cómo se dan los cambios de esfuerzos, los cambios de presión y en consecuencia las deformaciones que pueden llegar a presentarse si continua esas alteraciones en los cambios de esfuerzo. Los parámetros más comunes que se van a medir con la instrumentación son la presión de poro, el nivel freático, la permeabilidad del suelo, la resistencia mecánica, las presiones totales, las deformaciones y desplazamientos.

Las malas calidades de los terrenos, los altos fracturamientos de la estructura, la presencia de fenómenos de licuefacción de suelos (a causa de saturación de agua y particularmente en sedimentos recientes como arena o grava, los suelos pierden su firmeza y fluyen como resultado de los esfuerzos), las altas convergencias por las bajas calidades en las zonas de falla son los principales problemas que hay que

enfrentar en un túnel. Igualmente, los errores que se presentan en los instrumentos por la mala calibración y errores de medición.

El uso de toda la instrumentación geotécnica que existe es fundamental en el proceso de construcción del túnel pues permite conocer y evaluar el comportamiento de las estructuras desde la etapa de construcción, para verificar hipótesis y criterios de diseño, para ajustar especificaciones de materiales y durante la vida útil de la estructura, para detectar oportunamente cualquier anomalía que se presente. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que instrumentar el túnel no garantiza cien por ciento que los diseños sean buenos o las obras seguras, incluso puede ocurrir que instrumentos inadecuados o instalados en sitios equivocados proporcionen información errada y confusa. Por esto es importante que cada vez la tecnología avance en el tema de instrumentación para que se automatice mucho más un túnel.

Entre la instrumentación geotécnica que como requisito mínimo no puede dejar de usarse y que permite un mejor desarrollo y reducción de riesgos en la construcción de un túnel se encuentra:

- El uso de extensómetros para medir asientos alrededor de tuberías enterradas no visibles, para controlar los movimientos del terreno y para determinar si se están produciendo huecos por sobre excavación en la zona de la clave del túnel.
- El uso de inclinómetros que permiten el control de los movimientos horizontales de tierra, taludes, etc. Es un instrumento de gran utilidad para detectar y controlar deslizamientos y otros tipos de inestabilidades.
- El uso de Piezómetros que miden la presión de agua en el suelo en un punto determinado.
- El uso de instrumentos topográficos para el control de movimientos del terreno, control de subsidencias en superficie, control de convergencias y asentamientos del terreno.
- Sistemas de sismo.
- Software de monitoreo para detectar situaciones alarma.

Aunque la tecnología de radar no es tan usada en Colombia es un gran complemento para la instrumentación geotécnica tradicional pues implementan sistemas de monitoreo altamente efectivos y rigurosos en las mediciones brindando soporte en tiempo real, respondiendo a situaciones de alarma que detectan riesgo de forma temprana y ayudan a tomar decisiones confiables en obras de ingeniería.

17. CONCLUSIONES

- Para el desarrollo del trabajo de grado se logró realizar una gran compilación bibliográfica sobre instrumentación geotécnica, reuniendo cerca de 200 archivos que permitieron el desarrollo de la investigación. Aunque se identifica que en Colombia no se cuenta con la información de consulta disponible sobre los proyectos de túneles, debido a que varios de los informes detallados sobre la ejecución de las obras e instrumentación aplicada se encuentran en custodia y no son de fácil acceso, por lo que no se logró obtener información sobre el uso de instrumentación de la totalidad de los túneles de Colombia.
- De acuerdo a la investigación realizada se observa que existe gran variedad de instrumentos para la medición y monitoreo geotécnico en la ejecución de un túnel. Se logró mencionar y describir en su gran mayoría los instrumentos de tipo geotécnico más empleados en la construcción de túneles viales en Colombia.
- De acuerdo con las entrevistas realizadas a los ingenieros a cargo de proyectos de túneles en Colombia, se encuentra que una de sus grandes preocupaciones es que en Colombia son pocos los que tienen conocimiento sobre la empleabilidad de la distinta instrumentación que existe en el mundo y también consideran que los costos del proyecto se incrementan con el uso de esta instrumentación. Además, que en el país son muy pocas las empresas que manejan el tema de la instrumentación geotécnica.
- De acuerdo a la investigación y resultados obtenidos por medio de la instrumentación geotécnica en Colombia se concluye que donde la instrumentación se utiliza en forma adecuada se entrega datos importantes para poderse anticipar a posibles mecanismos de falla, también arroja un mejor conocimiento del terreno porque cuando se hace la construcción es cuando realmente ocurren los problemas de ingeniería. Lo que permite la instrumentación es retro alimentar los modelos y los análisis de predicción que se hicieron antes pues sin la instrumentación sería imposible la ejecución correcta del túnel. También se debe mejorar la práctica y capacitación del uso de instrumentación para que los que trabajen con estos proyectos entiendan la importancia y la puedan proveer desde las fases iniciales.
- De acuerdo a la recopilación y análisis de la información obtenida se concluye que las principales variables que se miden en la construcción de túneles son la presión de poro, el nivel freático, la permeabilidad del suelo, la resistencia mecánica, las presiones totales, las deformaciones y desplazamientos del terreno.

- De acuerdo al objetivo general se logró conocer y describir cual ha sido el uso de la instrumentación geotécnica en la construcción de túneles viales, así como identificar las principales variables a medir e identificar cual instrumentación permite un mejor desarrollo y reducción de riesgos durante y después de la ejecución del túnel. Los instrumentos que existen hoy en día en el mercado permiten precisiones con gran porcentaje de exactitud, dependiendo del tipo de terreno y el tipo de falla, pues en el túnel las convergencias pueden ser grandes o mínimas. Lo que se proyecta con el uso de la instrumentación geotécnica es que se diseñe un tratamiento para estabilizar el terreno, pues, los resultados pueden variar dependiendo del tipo de este y lo importante es que al final de la aplicación de los tratamientos los resultados se ajusten a lo previsto inicialmente en los diseños.

18. BIBLIOGRAFIA

- AETOS. (2014). *Guía Técnica Instrumentación y Auscultación en el Proyecto y Construcción de Túneles Urbanos*. España.
- ALPIZAR BARQUERO , A., & SANZ BERMEJO , C. (s.f.). *Monitoreo del Terreno mediante Instrumentación Geotécnica*. Obtenido de http://www.iigconsultores.com/assets/articulo_2monitoreo-del-terreno-mediante-instrumentaci%C3%B3n-geot%C3%A9cnica.pdf
- ALTUVE, O. (2019). Instrumentación Geotécnica. (T. ACUÑA BORBÓN, Entrevistador)
- AVILA ALVAREZ, G. E., CUBILLOS PEÑA, C. E., GRANADOS BECERRA, A. E., MEDINA BELLO, E., RODRIGUEZ CASTIBLANCO , E., RODRIGUEZ PINEDA , C., & RUIZ PEÑA , G. (s.f.). *Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa*. Obtenido de https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/1642_Guia-Metodologica-27-07-2016-SinGuias.pdf
- CEDEX LABORATORIO DE GEOTECNIA . (s.f.). *Equipos de Auscultación e Instrumentación*. España.
- FORNS CORRALES, I., & VALDES LOPEZ , M. (2009). *Desarrollo de un procedimiento de Auscultación para Obras Subterráneas Urbanas*. Barcelona.
- GROUNDPROBE. (s.f.). www.groundprobe.com. Obtenido de <https://www.groundprobe.com/?lang=es>
- INVIAS. (2015). *Manual para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera*. Colombia: Primera Edición.
- LINARES SANCHEZ, A., SAENZ GARCIA, C., JOGNA, L., YNZENGA CARAMANZANA, R., TIRADO, J. J., MARCHAL BUENO, F., WENZEL ROGGENBUK, K. (1977). *Túneles y Obras Subterráneas*. Barcelona España: Editores Técnicos Asociados S.A. .
- MEZA, J. (2019). Tecnología de Radar. (T. ACUÑA BORBÓN, Entrevistador)
- NAVARRO CARRASCO, S., ORTIZ GOMEZ, R., & RUIZ MARIN, J. (s.f.). *Geotecnia Aplicada a la Construcción de Túneles* . Obtenido de <https://civilgeeks.com/2013/09/23/libro-geotecnia-aplicada-a-la-construccion-de-tuneles/>
- PARDO ALBARRACIN , G. (2019). Instrumentación Geotécnica Empleada en Construcción de Túneles Viales . (T. ACUÑA BORBÓN, Entrevistador)

- SISGEO LATINOAMERICA. (s.f.). *www.latinoamerica.sisgeo.com*. Obtenido de <https://www.latinoamerica.sisgeo.com/es/>
- SUAREZ, J. (s.f.). *Instrumentación y Monitoreo*. Obtenido de file:///C:/Users/Acer/Downloads/librodeslizamientosti_cap12.pdf
- SUBTERRA. (s.f.). *subterra-ing.com*. Obtenido de <https://subterra-ing.com/>
- TORRES, M. C. (2019). Instrumentación Geotécnica Empleada en Construcción de Túneles Viales. (T. ACUÑA BORBÓN, Entrevistador)
- SUAREZ, Jaime. Deslizamientos: Análisis Geotécnico. Bucaramanga: Erosión, 1998. 25cap.
- FLOREZ PEREZ, Daniel. “Túnel de Il Centenario: Túnel de la Línea”. {En línea}. {Julio – septiembre de 2007} disponible en: (https://biblioteca.ucatolica.edu.co/cgi-bin/koha/opac-search.pl?idx=kw&q=tuneles&offset=20&sort_by=relevance_dsc).
- GONZALES SANTIAGO, José. “Proceso de Instrumentación Geotécnica para Túneles construidos en Suelos Blandos”. México, 2011, 160p. Trabajo de Grado (Título Ingeniero Civil). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería Civil.
- CORNEJO ÁLVAREZ, Laureano. “Los grandes proyectos internacionales de construcción de obras subterráneas, un reto tecnológico para el siglo XXI”. {Enero 2005} disponible en: (<http://nuevastecnologiasymateriales.com/wp-content/uploads/edd/2014/04/Primeras-paginasGrandesProyectosInternacionalesSigloXXi.pdf>)
- PARDO, Germán. “Cuando se hace bien, la construcción de túneles es muy segura” {16 de enero del 2018}. Disponible en internet: (<https://www.vanguardia.com/marcas/minesa-cuenta/cuando-se-hace-bien-la-construccion-de-tuneles-es-muy-segura-HDVL421611>).
- GARZON CORREA, Juan David. “Instrumentación Geotécnica, Aplicación y Soporte para la toma de decisiones de Ingeniería”. Bogotá D.C., 2018, 117p. Trabajo de Grado (Título Ingeniero Civil). Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Civil.
- Geodata Andina. Instrumentos Geotécnicos. {En línea}. Abril 2003. {abril 2019}. Disponible en (<http://www.geodataandina.cl/news.html>).
- Revista Dinero. Pecados Capitales del Túnel de la Línea. {En línea}. Enero 2019. {marzo 2019}. Disponible en <https://www.dinero.com/pais/articulo/que-fallo-en-la-construccion-del-tunel-de-la-linea/266436>
- GUERRERO PACHECO. Descripción del Proyecto Túnel de la Línea. {En línea}. Año 2017. {marzo 2019}. (<https://repository.unilibre.edu.co>).

- CONTRATO DE CONSECIÓN DE OBRA PÚBLICA. Proyecto Ruta del Sol. {En línea}. {marzo 2019}. Disponible en (<tp://ftp.ani.gov.co>).
- MINISTERIO DE TRANSPORTE. AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Apéndice Técnico 3 Especificaciones Generales. {Consultado en marzo de 2019}.
- ALPIZAR BARQUERO, Alicia. SANZ BERMEJO, César. Monitoreo del Terreno mediante Instrumentación Geotécnica. {En línea}. 19 de julio de 2013. {Consultado en marzo de 2019}. Disponible en (http://www.iigconsultores.com/assets/articulo_2monitoreo-del-terreno-mediante-instrumentaci%C3%B3n-geot%C3%A9cnica.pdf).
- ORTIZ OLMEARA, María Carolina. Vicisitudes de la Historia de la Infraestructura en Colombia: El caso del túnel de la Línea. {En línea}. Bogotá 2015. {Consultado en marzo de 2019}. Disponible en (<https://repository.unimilitar.edu.co>).
- PARRA ROJAS, Nancy Patricia. OLIVEROS CUADROS, Julián David. “Desarrollo en la Infraestructura del Transporte Terrestre en Colombia”. Bogotá D.C., 2013, 124p. Monografía de Grado (Título Ingeniero Civil). Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil.
- LUNARDI, Pietro. “Design and Construction of Tunnels, Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils”. Springer, 2008. 10cap.
- WHITTAKER, Robert. “Tunnelling: Design, Stability and Construction”. Transport and Road Research Laboratory. 1990.
- Bartlett, J V. Megaw, T M. “TUNNELS. PLANNING, DESIGN, CONSTRUCTION. VOLUME 1”. Transport Research Laboratory. 1981
- EGGER, Peter. “Design and construction aspects of deep tunnels with particular emphasis on strain softening rocks”. Elsevier, 2000.
- GUGLIELMETTI, Vittorio. GRASSO, Piergiorgio. MAHTAB, Ashraf. XU, Shulin. “Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control. CRC Press, 2008. 528p.
- SOTO SAAVEDRA, Pedro Roberto. “Construcción de túneles”. Chile, 2004, 144p. Trabajo de Grado (Título Constructor Civil). Universidad Austral de Chile. Facultad de Ingeniería Civil.
- RODRIGUEZ, Jorge. ARDILA . “Túneles Viales de Carretera en Colombia, Historia, Desarrollo y Perspectivas”. Buenos Aires actos, 2013.
- OSORIO, Jesús David. “COLOMBIA, UN PAÍS DE TÚNELES”. Bogota, 2016 : 360 GRADOS, 2016, Vol. I.

- ARIAS, Diana. DIAZ William. "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES DE LADERA: COLOMBIA". Bogota 2016: UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, Trabajo de Grado (Título Ingeniero Civil). Facultad de Ingeniería Civil.
- Hanna, T. H. "Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Trans Tech Publications, Federal Republic of Germany". Alemania, 1985.
- ZAPATERO CAMPOS. Juan Armando. Fundamentos de Investigación para Estudiantes de Ingeniería. México: 2010. 176p.

ANEXOS

**ENTREVISTAS A EXPERTOS SOBRE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA
EMPLEADA EN PROCESOS CONSTRUCTIVOS DE TÚNELES VIALES EN
COLOMBIA**

ENTREVISTA 1

**INGENIERO MARIO CAMILO TORRES – INGENIERO CIVIL CON MSC EN
GEOTECNIA**

**DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD LA GRAN
COLOMBIA**

De la instrumentación geotécnica descrita, seleccione la instrumentación que ha usado en proyectos de construcción de túneles viales:

Anexo 1. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 1



INSTRUMENTACIÓN PARA PRODUCIR INFORMACIÓN GEOTÉCNICA EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES

Nombre: Mario Camilo Torres Suárez
Ocupación: Decano Facultad de Ingeniería Universidad La Gran Colombia
Profesión: Ing. Civil; MSc. Geotecnia; Dr. Ingeniero.

A continuación, se presenta la instrumentación geotécnica más usada en la construcción de túneles, de acuerdo con su experiencia como ejecutor de algún proyecto de túneles en Colombia seleccione la instrumentación que ha usado:

TIPO DE INSTRUMENTACIÓN	MARQUE CON UNA X
Inspección visual directa	X
Sondas para medida de nivel de agua	X
Registradores de nivel de agua	X
Transductores de presión eléctricos	X
Aforadores	
Topografía	X
Diana reflectante	X
Topografía (DGPS)	X
Hitos de nivelación	X
Tiras de cortante	X
Tuberías inclinométricas convencionales	X
Tuberías de junta rápida	X
Columnas inclino-extensométricas	
Sondas inclinométricas	X
Inclinómetros fijos	X
Clinómetro portátil	
Clinómetros de superficie y electroniveles	
Péndulos directos e invertidos	X
Extensómetro magnético	
Extensómetro incremental	
Extensómetros fijos	X
Extensómetros de varilla	X
Extensómetros de terraplén	
Extensometria de cinta	X

Fuente 1: Propia

Anexo 2. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 1

Multipunto y magnéticos	
Casagrande	X
Hilo vibrátil	X
Células de presión de tierras	X
Células de presión NATM	X
Células de presión hidráulica	X
Manómetros	X
Cinta de convergencia	X
fisurómetros mecánicos	
Vertederos y medidores de flujo	X
TDR - Reflectoria de ondas eléctricas	X
Acelerógrafo	X
Celdas de Presión	
Software de monitoreo	X

Fuente 2: Propia

Proyectos de túneles en Colombia en los que ha trabajado:

El ingeniero está actualmente en el diseño y construcción del túnel de la vía tercer carril Bogotá – Girardot, participa como el interventor de los estudios y diseños. Hizo cursos de túneles en posgrado, hizo diplomado de túneles en la escuela colombiana de ingeniería y ha trabajado en túneles. Especialista en mecánica de roca

Entendiendo que en la construcción de obras de ingeniería se presentan múltiples problemas, desde los geológicos, culturales, climáticos, ¿etc. con esta instrumentación empleada Usted qué problema ha podido identificar y resolver?

El ingeniero a partir de su experiencia ha visto que en los estudios previos se hace una zonificación de terrenos y dependiendo de los resultados de la exploración y de la caracterización de los materiales, al momento de construir el túnel, esto sale totalmente distinto, es decir que los estudios previos no están siendo ejecutados con el rigor, la técnica y la profundidad que se requiere. Es así como muchas veces no se cumple con los presupuestos ni con los tiempos de los cronogramas por las grandes diferencias que se encuentran en las condiciones reales del terreno y lo que se tenía establecido en los estudios previos.

¿En los estudios previos se utiliza esa instrumentación?

No, la gran mayoría de esta instrumentación se utiliza durante la construcción, esto es para el monitoreo, con esto podemos saber que está sucediendo con presiones, esfuerzos, agua, deformaciones, cierre.

Ejemplo: los medidores de convergencia, entonces es el cierre natural que tiene toda excavación, hay que estarla monitoreando permanentemente para que no haya falla de los terrenos.

¿Variables principales que se han medido con la instrumentación?

Las principales variables son deformaciones del terreno, son esas deformaciones asociadas con cambios de esfuerzos en diferentes zonas del terreno; variaciones en esos esfuerzos, el agua que también ejerce una presión hidráulica o infiltración, (la presión hidráulica o de poros reduce el esfuerzo efectivo de los materiales rocosos, eso es lo que conlleva a que los materiales pierdan resistencia en principio y fallen) la gran mayoría de esto tiende es a mirar cómo se está comportando toda la masa del terreno, entorno al túnel para saber cómo se están dando los cambios de esfuerzos, los cambios de presión y en consecuencia las deformaciones que se están dando y que pueden llegar a presentarse si continua esas modificaciones o alteraciones en los cambios de esfuerzo.

¿Esas mediciones se hacen al interior y al exterior del túnel?

Sobre todo, al interior, los estudios previos han mostrado la posibilidad el fenómeno de subsidencia o el modelo hidrogeológico del túnel, plantean la posibilidad de que las fuentes de agua superficial, tenga problema o pueda haber hasta desecación de quebrada o de los sitios de donde se extrae el agua para los municipios, las veredas y demás. En estos casos se requiere la instrumentación superficialmente, para ver cómo se están comportando los niveles de agua, cuáles son los puntos fuente, cuál es el punto de mayor infiltración, se hace medición de agua superior y dentro del túnel para saber si está pasando toda el agua o que parte del agua está llegando al interior del túnel. La gran mayoría de instrumentación se instala dentro del túnel porque hay que estar monitoreando los cambios de esfuerzos que conllevan a cambios o deformaciones y esas deformaciones tiene unos límites máximos permisibles y también esta instrumentación permite disparar niveles de alerta temprana o un nivel de emergencia, cuando se ve que la tasa de deformación del túnel se está acelerando y eso conlleva a una falla afectando la obra, el personal, los equipos etc.

De acuerdo con la precisión en las mediciones obtenidas con esta instrumentación utilizada, ¿cuáles han sido los resultados?

Los resultados se alejan de la realidad, por que mucha de esa instrumentación se planea y se diseña para unas condiciones dadas del terreno. Si el agua empieza actuar fuertemente a generar presiones fuertes de poros y de presiones de filtración, probablemente esa instrumentación que se asigne no va a estar midiendo lo que se requiere, la instrumentación hay que definirla muy bien, el rango de medida y el orden de magnitud hay que saberlo, porque puede que se esté midiendo cosas diferentes y eso ha ocurrido.

Toda instrumentación o monitoreo que se haga requiere una medición continua o discreta y requiere una periodicidad en la toma de medidas, por ejemplo: en la topografía, los BM, hitos o nivelaciones con GPS, puede que no se haga todo el tiempo, pero hay que establecer cada cuanto, dependiendo de los tipos de materiales.

¿Generalmente cada cuánto se hacen las mediciones?

Hay mediciones que se hacen diarias, cada tercer día o una vez a la semana. Siempre es durante la construcción, también hay mediciones que se hacen después de que se ha terminado la construcción durante operación. En un túnel vial se tiene muchísima instrumentación, por ejemplo: controlar los humos ya en operación. Un túnel vial no puede funcionar si no se está controlando los niveles de óxido de carbono, de gases, humos, vapores etc.

Buscar la forma de que instrumentación le aporte a la otra parte del comportamiento del macizo y de los elementos de sujeción, cuando se habla de instrumentación geotécnica no es solo pensar en el terreno natural si no en los soportes, en el sostenimiento, etc.

De acuerdo con la recolección de datos obtenidos con la instrumentación ¿Que variables tienden a presentar mayores problemas en la ejecución de la obra?

Las variables que más se complican es la presión del agua, primero es altísimamente variable y segundo es difícil de medir porque el medio rocoso es un medio fracturado, entonces muchas veces el agua está atrapada en muchos sentidos, no hay conectividad entre esas fracturas pero el agua si está ejerciendo la acción de reducir la resistencia porque aumenta la presión de poros entonces reduce la resistencia efectiva o esta generado todo un trabajo de afectar la calidad de los materiales por ejemplo la roca lodosa que es muy susceptible a desleírse, deteriorarse en sus propiedades por lo que puede ser el agua quien esté haciendo todo esos daños y a veces eso es muy difícil de hacerle seguimiento, por ese motivo pueden suceder una cantidad de sucesos inesperados.

¿En ese momento como utilizan instrumentación?

Lo que se busca es que con la instrumentación se tenga un nivel de alerta, entonces se puede establecer un nivel de alerta donde si la instrumentación indica que la deformación está alcanzando cierto nivel, se prenden las alarmas y si está en operación se para el tráfico.

¿Aciertos y desaciertos observados?

El ingeniero ha visto muchos problemas porque la instrumentación se planea y se diseña considerando unas condiciones del terreno y cuando se hace la construcción de los tunes o la ejecución de la excavación resultan unas condiciones totalmente distintas, entonces la instrumentación muchas veces no sirve para nada, no obedece a los niveles de deformación que se requiere, no obedece a las características o no se atiende ciertas variables, a veces lo más importante es el agua pero no necesariamente, el cambio en los estados de esfuerzo, los sobreesfuerzos en los elementos de sostenimiento, si no hay una selección adecuada sobre los sitios y elementos de sostenimientos que se deben monitorear entonces no se va a obtener la información confiable y también el tema de la adquisición de los datos a partir de la instrumentación, tiene que haber un sistema redundante que esté tomando la misma información en un punto muy cercano para poder tener una buena cantidad de información que se vaya analizando permanentemente, con la mayor continuidad que se pueda para detectar a tiempo posibles problemas, la deficiencia más grande que ve el ingeniero es que casi siempre la instrumentación es como un tema más de cumplir un requerimiento

técnico o porque se están presentando los problemas y por ese motivo se instrumentan, que fue lo que ocurrió en el túnel 13 de Bogotá – Villavicencio pues no se tenía nada de instrumentación básicamente los extensómetros para medir la convergencia, y cuando se les empezó a deformar el túnel ahí si emplearon la instrumentación, muchas veces pasan los proyectos de no tener nada de instrumentación a ser la obra más instrumentada. Esto depende del conocimiento del Ingeniero a cargo del proyecto.

La instrumentación hay que planearla desde los diseños e ir instrumentando para que durante todo el proceso constructivo se tengan datos sobre que le está pasando al terreno por el mismo proceso constructivo, pero si no se tiene datos de entrada y se espera que se construya el túnel y que se instale la instrumentación pues no se va a tener un punto de comparación no se va a saber exactamente qué es lo que está pasando y cómo es que están cambiando las cosas por que desafortunadamente en Colombia utilizan la instrumentación es cuando ya está el problema

Aciertos

Donde la instrumentación se utiliza en forma adecuada se entrega datos importantes para poderse anticipar a posibles mecanismos de falla y arroja un mejor conocimiento del terreno porque cuando se hace la construcción es cuando realmente se enfrentan a los problemas.

Lo que permitiría la instrumentación es retro alimentar los modelos, los análisis de predicción que se hicieron antes.

¿Opina que todos los ingenieros tienen experiencia en esa instrumentación?

No, realmente son pocos los que tienen conocimiento, todo lo ven desde el punto de vista económico, que es una gran inversión, la instrumentación geotécnica es muy costosa quizás ahí haya una oportunidad de emprendimiento para tratar de buscar formas más idóneas o menos costosas, menos complicadas para llevar a cabo esa instrumentación, hay variables por ejemplo la presión del agua, si no tengo un medidor de presión entonces no voy a poder saber desde el punto de vista mecánico cuál es la presión que está ejerciendo en fluido del frente o de una zona del macizo entonces lo que hay que buscar es una forma de tener una instrumentación más sencilla, económica que brinde la misma calidad de información.

¿Respecto al tiempo cuáles han sido los avances tecnológicos de esta instrumentación y qué nos falta?

La tecnología avanza mucho, ya nos damos cuenta con instrumentación que puede estar entregando datos en tiempo real, lo cual hace algunos años no era tan común,

hoy en día un piezómetro puede estar entregando datos en tiempo real al sistema y de esa manera el geotecnista a cargo puede ir haciendo las evaluaciones y las variaciones para saber si establece un sistema de alerta temprana, si lo decreta o declara por una emergencia. En Colombia hace falta, esto casi no se hace, ni en los túneles, hay pocas empresas que manejan el tema de la instrumentación geotécnica, ellos consiguen sus propios proveedores y hay algunos desarrollos propios, pero seguramente no se han dado a conocer, que se puedan implementar.

¿En el uso de la instrumentación ha observado y determinado riesgos? ¿Y qué consecuencias pueden tener?

Las consecuencias son muy graves, porque la instrumentación se debe planear desde las fases iniciales desde estudios previos detallados y de más para saber qué es lo que hay que medir, en la medida de las posibilidades empezar a trabajar la instrumentación antes de la construcción para poder ver el proceso constructivo que efectos está generando, porque los materiales geológicos o las rocas su comportamiento depende mucho de estados de esfuerzos, como se le quita confinamiento al material el material se puede llegar a comportar totalmente distinto a como se ensayó las muestras del laboratorio que fue bajo carga, el material esta con una trayectoria de esfuerzo distinta a la que normalmente se tiene en la fase de estudios, ese tipo de riesgos es muy complicado y gravoso porque si no se hace la instrumentación si no se adecua oportunamente un sistema de monitoreo y de implementación geotécnica cuando ocurra un desastre sale muy más costoso de lo que puede costar la instrumentación por las pérdidas que genera, y el daño ambiental que se produce.

¿Cuál es su visión a futuro, expectativas y metas respecto al uso de instrumentación?

La instrumentación debe tener un salto bastante importante en cuanto a tecnología que haga que se economice los costos, porque es demasiada costosa, también tiene que haber un cambio de las prácticas, que las universidades también profundicen más en este tema y creen motivación en los estudiantes para emprender en este negocio. En el manual de túneles esta todo el tema de instrumentación geotécnica y demás pero muchas veces esos manuales que los hace el mismo INVIAS si las entidades no son exigibles por ejemplo en los contratos de concesión, como es de privados no los obligan, no hay como la obligatoriedad, tienen que mejorar también la practica el ingeniero piensa que la práctica va a mejorar el entendimiento a la geotecnia y los que trabajen con estos proyectos entiendan la importancia de la instrumentación y la puedan proveer desde las fases iniciales, eso tendrá que suceder en algún momento, porque lamentablemente eso sucede cuando hay una desgracia, entonces están esperando a que eso suceda en un túnel vial para obligar a muchas de esas cosas.

¿En los proyectos que ha participado ha trabajado con tecnología avanzada?

Esto es lo normal, pero también es lo más avanzado, casi siempre esta instrumentación viene acompañada de algún tipo de sistema de adquisición de datos y para adquirir los datos se tiene que contar con un software que hace un procesamiento inicial y después los profesionales a cargo harán la interpretación, proyecciones y predicciones correspondientes pero casi siempre todos estos elementos van acompañados de un software, entonces en ese sentido pues si todo va mejorando será más automatizado.

ENTREVISTA 2

**CARLOS FELIPE SABOGAL INGENIERO CIVIL
TRABAJA EN INVIAS**

De la instrumentación geotécnica descrita, seleccione la instrumentación que ha usado en proyectos de construcción de túneles viales:



**INSTRUMENTACIÓN PARA PRODUCIR INFORMACIÓN GEOTÉCNICA EN
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES**

Nombre: Carlos Felipe Sabogal Ocampo

Ocupación: Ingeniero Apesor Técnico del Proyecto Cruce de la Cordillera Central, Túnel de la Línea.

Profesión: Ingeniero Civil

A continuación, se presenta la instrumentación geotécnica más usada en la construcción de túneles, de acuerdo con su experiencia como ejecutor de algún proyecto de túneles en Colombia seleccione la instrumentación que ha usado:

TIPO DE INSTRUMENTACIÓN	MARQUE CON UNA X
Inspección visual directa	X
Sondas para medida de nivel de agua	
Registadores de nivel de agua	
Transductores de presión eléctricos	
Aforadores	
Topografía	X
Diana reflectante	
Topografía (DGPS)	X
Hitos de nivelación	X
Tiras de cortante	
Tuberías inclinométricas convencionales	
Tuberías de junta rápida	
Columnas inclino-extensométricas	
Sondas inclinométricas	
Inclinómetros fijos	X
Clinómetro portátil	
Clinómetros de superficie y electroniveles	
Péndulos directos e invertidos	
Extensómetro magnético	X
Extensómetro incremental	
Extensómetros fijos	
Extensómetros de varilla	X
Extensómetros de terraplén	
Extensometría de cinta	

Fuente 3: Propia

Anexo 4. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 2

Multipunto y magnéticos	
Casagrande	
Hilo vibrátil	X
Células de presión de tierras	
Células de presión NATM	
Células de presión hidráulica	
Manómetros	
Cinta de convergencia	
fisurómetros mecánicos	
Vertederos y medidores de flujo	
TDR - Reflectoria de ondas eléctricas	
Acelerógrafo	
Celdas de Presión	X
Software de monitoreo	X

Fuente 4: Propia

Proyectos de túneles en Colombia en los que ha trabajado:

Proyecto de Cruce de la Cordillera Central y la doble calzada entre Calarcá y Cajamarca y otros 24 túneles cortos, donde se han presentado retos muy grandes por las fallas geológicas.

¿En su experiencia como ejecutor de un proyecto de túneles en Colombia qué instrumentación ha usado, y en cuales proyectos?

Al interior del túnel la principal instrumentación a tener en cuenta es aquella que permite conocer cuáles son las convergencias del terreno (movimientos del terreno) después de excavado, como los extensómetros de cinta tradicional y electrónicos. En otra parte del túnel que es muy importante se utiliza instrumentación tradicional para medir los comportamientos de taludes, como los piezómetros, inclinómetros, controles de topografía, radares, controles con GPS, fisurómetros y demás medidores de esfuerzos.

Entendiendo que en la construcción de obras de ingeniería se presentan múltiples problemas, desde los geológicos, culturales, climáticos, ¿etc. con esta instrumentación empleada Usted qué problema ha podido identificar y resolver?

Sin la instrumentación sería imposible la ejecución correcta del túnel, las medidas de convergencia que se esperan en el diseño es la única opción válida para poder tomar decisiones de revestimiento del túnel y por tanto el avance en el proceso de excavación a un proceso secundario. Sin instrumentación no se pueden tomar decisiones que permitan la ejecución de la obra.

¿Variables principales que se han medido con la instrumentación?

Lo que prima al interior del túnel son las medidas de convergencia y ya para los componentes hidrogeológicos son necesarios los piezómetros y las pruebas de bombeo. Y en la superficie se toman medidas más tradicionales con el uso de inclinómetros, radares para detectar movimientos en masa del terreno.

En el caso de los extensómetros de diferentes tipos lo que se mide son convergencias, ósea el acercamiento del terreno en las paredes del túnel hacia el centro de este, buscando con la ubicación de soportes primarios buscando que el túnel empiece a tener una estabilización para poder hacer el revestimiento. En cuanto a los inclinómetros y los controles topográficos lo que se mide es movimientos diferenciales que permitan identificar que un talud puede tener algún proceso de inestabilidad y con los medidores de esfuerzo lo que se mide es el comportamiento del concreto y de las posibles fisuras que tenga este para así decidir sobre la estabilidad de esa estructura.

De acuerdo con la precisión en las mediciones obtenidas con esta instrumentación utilizada, ¿cuáles han sido los resultados?

Los instrumentos que existen hoy en día en el mercado permiten precisiones que nos dan un 99% de exactitud, dependiendo del tipo de terreno y el tipo de falla con el que nos enfrentemos en el túnel las convergencias pueden ser muy grandes o mínimas. Lo que se espera con el uso de esta instrumentación se diseñe un tratamiento para estabilizar el terreno. Por lo tanto, los resultados pueden variar dependiendo del tipo de terreno en que estemos y lo importante es que al final de la aplicación de los tratamientos los resultados se ajusten a lo previsto en los diseños.

De acuerdo con la recolección de datos obtenidos con la instrumentación ¿Que variables tienden a presentar mayores problemas en la ejecución de la obra?

Las malas calidades de los terrenos, los altos fracturamientos de la estructura, la presencia de fenómenos de licuefacción de suelos (a causa de saturación de agua y particularmente en sedimentos recientes como arena o grava, los suelos pierden su firmeza y fluyen como resultado de los esfuerzos), las altas convergencias por las bajas calidades en las zonas de falla son los principales problemas que hay que enfrentar en un túnel.

¿Aciertos y desaciertos observados?

La mayoría son aciertos, ya que sin instrumentación no es posible tomar decisiones.

¿Respecto al tiempo cuáles han sido los avances tecnológicos de esta instrumentación y qué nos falta?

El principal avance es que la electrónica cada vez permite que las medidas se puedan tomar de una forma más digital y menos analógica. Actualmente tenemos equipos ópticos de láser y computacionales, lo que falta es que haya más penetración en el mercado y las tecnologías permitan que se automatice mucho más un túnel durante el momento de su construcción.

¿En el uso de la instrumentación ha observado y determinado riesgos? ¿Y qué consecuencias pueden tener?

Siempre y cuando la medición de la instrumentación sea más humana y menos del componente tecnológico. Es decir, quienes tomen las medidas de instrumentación deben tener la mayor responsabilidad, pues dado que una lectura se pasa a un documento donde se realiza un análisis y si estas mediciones no las ejecutan de una manera correcta puede inducir en un error grave en las decisiones. Por lo

anterior es necesario que el personal esté bien capacitado y que tenga un concepto de responsabilidad muy alto a la hora de tomar las medidas y entregar un análisis.

¿Cuál es su visión a futuro, expectativas y metas respecto al uso de instrumentación?

Con el avance de la tecnología la instrumentación seguirá mejorando, nosotros tenemos que automatizar la instrumentación para tener datos en tiempo real y lo más importante es que uno pudiera tener de forma inmediata las convergencias para poder empezar a tomar decisiones desde el momento propio de la excavación y eso lo permite el avance en los sistemas y en los sensores.

ENTREVISTA 3


INGENIERO GERMAN PARDO ALBARRACIN

PRESIDENTE DE LA SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS

ESPECIALISTA EN GERENCIA DE PROYECTOS Y MSC EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

De la instrumentación geotécnica descrita, seleccione la instrumentación que ha usado en proyectos de construcción de túneles viales:

Anexo 5. Instrumentación geotécnica usada en Colombia - Entrevista 3



UNIVERSIDAD CA
de

Nombre: *Germaín Pardo*
 Profesión: *Mg. civil*
 Ocupación: *Especialista túneles*

Proyectos de túneles en los que ha trabajado:

A continuación, se presenta la instrumentación geotécnica más usada en la construcción de túneles viales, de acuerdo con su experiencia como ejecutor de algún proyecto de túneles en Colombia seleccione la instrumentación que más ha usado:

TIPO DE INSTRUMENTACIÓN	MARQUE CON UNA X	
Inspección visual directa		
Sondas para medida de nivel de agua		
Registadores de nivel de agua		
Transductores de presión eléctricos		
Aforadores		
Topografía	X	①
Diana reflectante		
Topografía (DGPS)		
Hitos de nivelación	X	③
Tiras de cortante		
Tuberías inclinométricas convencionales		
Tuberías de junta rápida		
Columnas inclino-extensométricas		
Sondas inclinométricas		
Inclinómetros fijos		
Clinómetro portátil		
Clinómetros de superficie y electroniveles		
Péndulos directos e invertidos		
Extensómetro magnético		
Extensómetro incremental		
Extensómetros fijos		
Extensómetros de varilla	X	②A
Extensómetros de terraplén		
Extensometría de cinta		
Multipunto y magnéticos	X	②
Casagrande		
Hilo vibrátil		
Células de presión de tierras		
Células de presión NATM		

Fuente 5: Propia

Proyectos de túneles en Colombia en los que ha trabajado:

El ingeniero indica que ha trabajado en los proyectos de túneles de Chingaza, Guavio, Chivor, Daza, La Sorda y La Paz, Toyo, Fuemia, La Línea, Teesalia, Crespo y Boquerón.

Entendiendo que en la construcción de obras de ingeniería se presentan múltiples problemas, desde geológicos, culturales, climáticos, etc. ¿Con esta instrumentación empleada usted qué problema ha podido identificar y resolver?

Los problemas que se han podido identificar son deformaciones, reforzamiento del soporte y ventilación.

¿Cuáles son las variables principales que se han medido con la instrumentación?

Deformaciones Vs Tiempo

De acuerdo con la precisión en las mediciones obtenidas con esta instrumentación utilizada, ¿cuáles han sido los resultados?

Análisis en el tiempo real de las deformaciones del terreno.

De acuerdo con el análisis de los datos obtenidos empleando la instrumentación. ¿Qué variables tienden a presentar mayores problemas en la ejecución de la obra?

Errores en los aparatos, mala calibración y errores de medición.

¿Aciertos y desaciertos observados con el uso de la instrumentación?

La responsabilidad de los técnicos y operarios es fundamental.

¿Respecto al tiempo cuáles han sido los avances tecnológicos de esta instrumentación y qué nos falta?

Mejoras en precisión, análisis de la información en tiempo real, modelos 3D y BM.

¿En el uso de la instrumentación ha observado y determinado riesgos? ¿Y qué consecuencias pueden tener?

Las lecturas con errores generan riesgos.

¿Cuál es su visión a futuro, expectativas y metas respecto al uso de instrumentación en Colombia?

La tecnología, el análisis en tiempo real, la precisión, la transmisión de datos y los resultados gráficos con alertas garantizan métodos constructivos seguros y controlados correctivos en relación con el soporte adicional.