



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

SISTEMAS DE AUSCULTACIÓN EN TÚNELES PARA AGUAS RESIDUALES;  
INSTRUMENTACIÓN PARA LA VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DURANTE  
LA ETAPA OPERATIVA DEL TÚNEL

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JOSE ALONSO ALANIS ROJAS

TUTOR  
DR. JOSÉ ANSELMO PÉREZ REYES  
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. DE MÉXICO, DICIEMBRE 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas

**Secretario:** M.C. Esteban Figueroa Palacios

**1er. Vocal:** Dr. José Anselmo Pérez Reyes

**2do. Vocal:** Ing. Carlos René Sáenz Fucugauchi

**3er. Vocal:** Ing. Andrés A. Moreno Y Fernández

**Lugar donde se realizó la tesis:** Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

## **TUTOR DE TESIS:**

Dr. José Anselmo Pérez Reyes

---

**FIRMA**



## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi tutor de tesis, Dr. José Anselmo Pérez Reyes por su apoyo incondicional, gracias por compartir sus conocimientos y experiencia.*

*A los sinodales integrantes del comité, Dr. Andrés A. Moreno y Fernández, M.C. Esteban Figueroa Palacios, Ing. Carlos René Sáenz Fucugauchi y M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas por sus observaciones y apoyo para la elaboración de esta tesis.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de estudiar en una de las mejores universidades del país.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.*

*A mis padres y hermanos por su apoyo a lo largo de mis estudios, gracias por ser mi motivación.*

*A mis colegas y amigos, M.I. José Luis Aguirre Martínez, Ing. Yarahi Osuna Llamas e Ing. Rafael Alejandro Marín Acosta por su apoyo durante el inicio de este camino.*



## RESUMEN

La instrumentación que se destina para los sistemas de auscultación de túneles construídos para el desalojo de aguas residuales, ha tenido grandes avances debido al desarrollo tecnológico de los últimos años, sin embargo, es común que dichos sistemas se consideren exclusivamente para el monitoreo de las etapas de diseño y construcción del túnel, dejando a un lado la verificación del comportamiento durante la etapa operativa, sobre todo, debido a las condiciones adversas a las que se enfrentarán los revestimientos e instrumentos instalados y que, en definitiva, sufren por el flujo de las aguas residuales y los gases que producen.

El presente trabajo de investigación considera las etapas descritas y sus principales características, pero enfatiza en la importancia y los objetivos particulares que considera un sistema de instrumentación automatizado diseñado para la verificación del comportamiento durante la vida operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales y construído con máquina tuneladora de tipo EPB. Por lo tanto, se pretende cubrir el vacío de información al respecto. Además de abordar las implicaciones técnicas, también se discutirán las de tipo contractual con el objetivo de promover la correcta instalación y seguimiento de estos sistemas.

Se abordará como caso estudio el sistema de auscultación para la verificación del comportamiento en la etapa operativa del Túnel Emisor Oriente (TEO), en donde se elaborará un análisis técnico de lo desarrollado al respecto y se plantearán las mejores alternativas y recomendaciones para su diseño. Cabe destacar que, a nivel mundial y de acuerdo con la bibliografía consultada, actualmente, el TEO sería el único caso en donde se implementaría un sistema de auscultación para el monitoreo de la etapa operativa de un túnel durante el desalojo de aguas residuales.

**Palabras clave:** Instrumentación, auscultación, monitoreo, túnel, diseño, construcción, operación.



## ABSTRACT

The instrumentation that is destined for the auscultation systems of tunnels constructed for the eviction of wastewater, has made great advances due to the technological development of the last years, however, it is common that these systems are considered exclusively for the monitoring of the stages of design and construction of the tunnel, leaving aside the verification of the behavior during the operational stage, above all, due to the adverse conditions faced by the linings and instruments that they have installed and, ultimately, suffer from the wastewater flow and the gases produced.

The present research paper considers the described stages and their main characteristics but emphasizes the importance and the particular objectives that an automated instrumentation system designed for the verification of the behavior during the operational life of a tunnel for the evacuation of wastewater and Built with EPB type tunnel boring machine. Therefore, it is intended to cover the information gap in this regard. In addition to addressing the technical implications, the contractual ones will also be discussed to promote the correct installation and monitoring of these systems.

As a case study, the auscultation system for the verification of behavior in the operational stage of the Emisor Oriente Tunnel (TEO) will be approached, where a technical analysis of what has been developed in this regard will be prepared and the best alternatives and recommendations for its design will be proposed. It should be noted that worldwide and according to the bibliography consulted, the TEO would be the only case where an auscultation system would be implemented to monitor the operational stage of a tunnel during the wastewater disposal.

**Keywords:** Instrumentation, auscultation, monitoring, tunnel, design, construction, operation.



## CONTENIDO

RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO PRIMERO.....</b>	<b>3</b>
Generalidades.....	3
1. Consideraciones para el diseño y construcción de túneles construídos con TBM tipo EPB....	3
1.1 Diseño de TBM.....	4
1.2 Diseño de revestimiento.....	4
1.3 Construcción de túneles con EPB.....	6
1.3.1 Principio de operación.....	6
1.3.2 Ciclo de excavación.....	7
1.3.3 Parámetros de control durante la excavación.....	9
1.4 Sistemas de auscultación en túneles.....	10
1.4.1 Filosofía.....	10
1.4.2 Plan de auscultación.....	11
1.4.3 Antecedentes en proyectos para el desalojo de aguas residuales.....	13
1.4.4 Sistema de auscultación en el Túnel Interceptor Central, Ciudad de México.....	14
<b>CAPÍTULO SEGUNDO.....</b>	<b>17</b>
Instrumentación.....	17
2. Instrumentación en túneles.....	18
2.1 Objetivos.....	18
2.1.1 Etapa de diseño.....	19
2.1.2 Etapa de construcción.....	20
2.1.3 Etapa de operación.....	21
2.2 Variables de medición.....	23
2.2.1 Régimen de aguas subterráneas.....	24
2.2.2 Deformaciones.....	25
2.2.3 Esfuerzos.....	28
2.3 Tecnologías empleadas en los sistemas de instrumentación geotécnica.....	28
2.3.1 Evolución tecnológica de los instrumentos de medición.....	29
2.3.2 Evolución de software para el monitoreo geotécnico.....	30

2.4	Tipos de sensores utilizados en los instrumentos de medición .....	32
2.4.1	Transductor eléctrico.....	33
2.4.2	Ópticos .....	34
2.4.3	Cuerda Vibrante .....	35
2.4.4	Sistemas microelectromecánicos (MEMS) .....	36
2.5	Secciones de control .....	37
2.6	Tipos de Instrumentos utilizados para la verificación de comportamiento en túneles ...	38
2.6.1	Piezómetros .....	39
2.6.2	Piezo-celdas.....	42
2.6.3	Referencias topográficas .....	43
2.6.4	Cinta extensométrica.....	43
2.6.5	Medición automatizada de convergencias.....	45
2.6.6	Distanciómetros.....	47
2.6.7	Convergencias topográficas .....	48
2.6.8	Extensómetros .....	49
2.6.9	Inclinómetros.....	51
2.6.10	Celda de presión .....	52
2.6.11	Deformímetro para acero .....	54
2.6.12	Deformímetro para concreto .....	55
	<b>CAPÍTULO TERCERO.....</b>	<b>58</b>
	Verificación del comportamiento.....	58
3.	Criterios generales .....	58
3.1	Verificación del comportamiento en la etapa operativa .....	59
3.1.1	Implicaciones Técnicas .....	59
3.1.2	Metodología para la verificación.....	60
3.1.3	Automatización de la instrumentación en túneles.....	64
3.1.4	Monitoreo satelital para la verificación del comportamiento.....	68
3.2	Evaluación del comportamiento de revestimientos .....	71
3.2.1	Revestimiento primario (Dovelas) .....	71
3.2.2	Revestimiento definitivo .....	73
3.3	Medidas preventivas y/o correctivas .....	73
3.4	Control de procesos para la verificación del comportamiento .....	75
3.5	Implicaciones contractuales.....	79
3.5.1	Manejo del riesgo en obras de infraestructura .....	79

3.5.2	Definición del riesgo en el documento contractual.....	81
3.5.3	Riesgo en obras subterráneas .....	84
3.5.4	Gestión y evaluación del riesgo en túneles .....	84
3.5.5	Consideraciones para la evaluación del riesgo.....	86
3.5.6	Riesgos en la contratación.....	88
3.5.7	Manejo del riesgo Post-construcción .....	90
3.5.8	Definición de responsabilidades.....	90
3.6	Monitoreo del riesgo.....	91
3.6.1	Relación entre el monitoreo y el manejo contractual del riesgo .....	91
3.6.2	Monitoreo en la práctica contractual.....	95
<b>CAPÍTULO CUARTO .....</b>		<b>97</b>
Instrumentación para la verificación del comportamiento. Caso estudio, Túnel Emisor Oriente .		97
4.	Antecedentes .....	97
4.1	Etapa de diseño.....	99
4.1.1	Metodología para el diseño de revestimientos TEO .....	100
4.2	Etapa constructiva.....	102
4.2.1	Verificación del comportamiento en la construcción.....	103
4.2.2	Instrumentación en el revestimiento primario.....	105
4.3	Verificación del comportamiento TEO etapa operativa. ....	108
4.3.1	Objetivo.....	108
4.4	Análisis del sistema de instrumentación propuesto para el monitoreo TEO .....	109
4.4.1	Ubicación de los instrumentos .....	110
4.4.2	Secciones instrumentadas.....	111
4.4.3	Instrumentos instalados en las secciones de control .....	112
4.4.4	Características de los instrumentos .....	118
4.5	Monitoreo .....	120
4.5.1	Automatización .....	120
4.5.2	Frecuencias de monitoreo.....	121
4.5.3	Informes de monitoreo .....	122
<b>CAPÍTULO QUINTO.....</b>		<b>125</b>
Recomendaciones para el análisis del comportamiento en la etapa operativa .....		125
5.	Implementación del sistema de auscultación.....	125
5.1	Instrumentación requerida .....	126
5.2	Evaluación de los datos recolectados .....	127

5.2.1	Umbrales de control .....	128
5.3	Análisis e interpretación de la información.....	130
5.3.1	Monitoreo de anillo instrumentado .....	131
5.4	Gráficas de comportamiento revestimiento primario .....	132
5.4.1	Deformímetros para acero .....	133
5.4.2	Deformímetros para concreto .....	134
5.4.3	Celdas de presión .....	135
5.5	Gráficos de comportamiento revestimiento secundario .....	136
5.5.1	Deformímetro para acero .....	136
5.5.2	Deformímetro para concreto .....	137
5.6	Limitaciones .....	138
5.6.1	Transmisión de datos.....	138
5.6.2	Atenuación de la señal.....	140
5.6.3	Limitaciones generales .....	141
5.7	Aportación y beneficios de la implementación del sistema .....	142
5.7.1	Verificación del comportamiento estructural largo plazo.....	142
5.8	Recomendaciones generales .....	144
<b>CAPÍTULO SEXTO .....</b>		<b>147</b>
Conclusiones .....		147
Propuesta .....		150
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>153</b>
ANEXO A. Método observacional en ingeniería geotécnica .....		159
ANEXO B. Internet de las Cosas (Internet of Things) .....		161

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Elementos que conforman un anillo de dovelas (Blom, 2002).....	5
<b>Figura 2</b> Principio de operación EPB (adaptada de: <a href="http://www.herrenknecht.com">www.herrenknecht.com</a> ) 2018).....	6
<b>Figura 3</b> Componentes principales de una EPB (Herrenknecht, 2007).....	7
<b>Figura 4</b> Relleno del espacio anular (ITA, 2014).....	8
<b>Figura 5</b> Posición de los sensores de presión (Guglielmetti, 2008).....	9
<b>Figura 6</b> Planeación de un sistema de auscultación.....	12
<b>Figura 7</b> Pérdida de pendiente por hundimiento regional (CONAGUA, 2007).....	13
<b>Figura 8</b> Construcción del Túnel Emisor Central (SACMEX, 2006).....	13
<b>Figura 9</b> Instrumentos instalados para el monitoreo en la construcción.....	20
<b>Figura 10</b> Corrosión en revestimiento, Túnel Emisor Central, México (García, s.f).....	22
<b>Figura 11</b> Principio de esfuerzos efectivos. (Suárez, 2009).....	24
<b>Figura 12</b> Deformaciones inducidas por el tuneleo (Rangel, 2012).....	26
<b>Figura 13</b> Presión de suelo ejercida sobre el revestimiento (Minh et al., 2017).....	27
<b>Figura 14</b> Distribución de esfuerzos sobre el revestimiento (Potts y Zdravkovic, 1999).....	28
<b>Figura 15</b> Componentes principales de un sistema de monitoreo.....	29
<b>Figura 16</b> Medición de convergencias, 1era. Generación de software (Siebenmann et al. 2015).....	30
<b>Figura 17</b> Monitoreo de convergencias, 2da. Generación de software (Siebenmann et al. 2015).....	31
<b>Figura 18</b> Visualización de deformaciones en Geoviewer (recuperado de: <a href="http://www.geotechpedia.com">www.geotechpedia.com</a> ).....	32
<b>Figura 19</b> Componentes de un Strain gauge (Kenkyujo, 2018).....	33
<b>Figura 20</b> Sensor piezoresistivo en piezómetro (SISGEO, 2016).....	34
<b>Figura 21</b> Tipos de sensores de fibra óptica (Inaudi, 2016).....	34
<b>Figura 22</b> Componentes de un sensor de cuerda vibrante (SISGEO, 2018).....	35
<b>Figura 23</b> Piezómetro Casagrande (SISGEO, 2019).....	40
<b>Figura 24</b> Sonda inclinométrica (SISGEO, 2016).....	40
<b>Figura 25</b> Piezómetro de cuerda vibrante (SISGEO, 2016).....	41
<b>Figura 26</b> Unidades de lectura (SISGEO, 2016).....	41
<b>Figura 27</b> Piezo-celda (RST, 2019).....	42
<b>Figura 28</b> Esquema de instalación piezo-celda (RST, 2019).....	42
<b>Figura 29</b> Equipo necesario para auscultación topográfica (LEICA, 2019).....	43
<b>Figura 30</b> Monitoreo convergencias con cinta extensométrica. (Bassett, 2012).....	44
<b>Figura 31</b> Componentes de una cinta extensométrica (SISGEO, 2016).....	44
<b>Figura 32</b> Tiltmeter o Clinómetro (SISGEO, 2019).....	45
<b>Figura 33</b> Datalogger (SISGEO, 2016).....	46
<b>Figura 34</b> Sección automatizada para la medición de convergencias (González, 2016).....	46
<b>Figura 35</b> Procesamiento de la información en software loggernet (Fierro, C. 2018).....	47
<b>Figura 36</b> Distanciómetro laser (LEICA, 2019).....	48
<b>Figura 37</b> Metodología de mediciones diametrales con distanciómetro.....	48
<b>Figura 38</b> Medición topográfica de convergencias.....	49
<b>Figura 39</b> Extensómetro magnético (SISGEO, 2019).....	50
<b>Figura 40</b> Extensómetro de barras (SISGEO, 2019).....	51
<b>Figura 41</b> Partes representativas de inclinómetro (Suárez, 2012).....	52
<b>Figura 42</b> Componentes de una celda de presión (adaptada de: GEOKON, 2016).....	53
<b>Figura 43</b> Celda de presión instalada en armado de dovela (ICA, 2012).....	53
<b>Figura 44</b> Deformímetro para acero modelo 4000 (GEOKON, 2016).....	54
<b>Figura 45</b> Deformímetro para acero (GEOKON, 2018).....	55
<b>Figura 46</b> Deformímetro para concreto (GEOKON, 2016).....	56
<b>Figura 47</b> Instalación de deformímetro (adaptada de GEOKON, 2016).....	56
<b>Figura 48</b> Proceso para la interpretación de los datos de un programa de monitoreo.....	64

<b>Figura 49</b>	Datalogger tipo inalámbrico (RST instruments, 2019).....	66
<b>Figura 50</b>	Datalogger sensor de cuerda vibrante simple (RST instruments, 2019).....	66
<b>Figura 51</b>	Equipo multiplexor (RST instruments, 2019).....	66
<b>Figura 52</b>	Interfaz de usuario Geoviewer (recuperado de: <a href="http://www.geotechpedia.com">www.geotechpedia.com</a> ) .....	67
<b>Figura 53</b>	Satélite y objetivo: medición del desplazamiento. (De Farago, 2010) .....	68
<b>Figura 54</b>	Áreas de subsidencia metro. Línea 5 Barcelona (De Farago, 2010).....	69
<b>Figura 55</b>	Implementación de medidas preventivas durante el tuneleo (Aguilar, et al. 2013).....	74
<b>Figura 56</b>	Integración de un sistema de auscultación y el control de procesos .....	75
<b>Figura 57</b>	Esquema control de procesos (Commulada y Maidl, 2009) .....	76
<b>Figura 58</b>	Instrumentación en discos de corte en una TBM (Shanahan, 2013).....	77
<b>Figura 59</b>	Etapas del manejo del riesgo (Adaptada de Szimansky, 2017) .....	83
<b>Figura 60</b>	Plan de administración de riesgos (Lombardo y Pérez, 2016).....	93
<b>Figura 61</b>	Verificación del comportamiento y el manejo del riesgo .....	94
<b>Figura 62</b>	Ubicación del proyecto TEO (CONAGUA, 2012).....	97
<b>Figura 63</b>	Metodología para el diseño de revestimientos TEO (adaptada de: León et. al. 2012).....	100
<b>Figura 64</b>	Colocación de dovelas en anillo 72 del TEO. (CONAGUA, 2012) .....	103
<b>Figura 65</b>	Revestimiento definitivo TEO (CONAGUA, 2012).....	103
<b>Figura 66</b>	Instrumentos instalados para el monitoreo en etapa constructiva.....	104
<b>Figura 67</b>	Anillo automatizado en zona de faldón (Fierro, C. 2018) .....	104
<b>Figura 68</b>	Deformaciones promedio del diámetro horizontal TEO (Rivera, et. al. 2019).....	105
<b>Figura 69</b>	Instrumentos instalados en el revestimiento primario (Fierro, C. 2018).....	105
<b>Figura 70</b>	Deformímetros para acero instalados (GEOKON, 2018) .....	106
<b>Figura 71</b>	Deformímetro para concreto (GEOKON, 2018).....	106
<b>Figura 72</b>	Presiones sobre el eje del TEO (Rivera et. al. 2019) .....	107
<b>Figura 73</b>	Sección instrumentada para el monitoreo en la etapa operativa (Rivera, et al. 2019) .....	110
<b>Figura 74</b>	Posición de los instrumentos colocados en la sección de control (Rivera et al. 2019) .....	111
<b>Figura 75</b>	Perfil geológico a lo largo del trazo del eje del TEO (CONAGUA, 2012) .....	112
<b>Figura 76</b>	Instrumentación en revestimiento sin acero de refuerzo (Fierro, 2018) .....	113
<b>Figura 77</b>	Instalación de instrumentos en revestimiento sin acero de refuerzo (González, 2016) .....	114
<b>Figura 78</b>	Instrumentación en revestimiento con acero de refuerzo (Fierro, 2018) .....	115
<b>Figura 79</b>	Instalación de instrumentos en revestimiento con acero de refuerzo (González, 2016) .....	116
<b>Figura 80</b>	Procedimiento de canalización de cables de instrumentos (González, 2016).....	117
<b>Figura 81</b>	Cubierta protectora (GEOKON, 2019).....	119
<b>Figura 82</b>	Principio básico de funcionamiento de un sistema de monitoreo automatizado .....	121
<b>Figura 83</b>	Secuencia de medición.....	122
<b>Figura 84</b>	Posición de los instrumentos colocados en la sección de control (Rivera et al. 2019) .....	132
<b>Figura 85</b>	Gráfica de comportamiento de deformímetro para acero (Rivera et al. 2019) .....	133
<b>Figura 86</b>	Gráfica de comportamiento de deformímetro para concreto (Rivera et al. 2019) .....	134
<b>Figura 87</b>	Gráfica de comportamiento de celdas de presión (Rivera et al. 2019) .....	135
<b>Figura 88</b>	Gráfica de deformímetro para acero en revestimiento secundario (Rivera et. al. 2019).....	136
<b>Figura 89</b>	Gráfica de deformímetro para concreto en revestimiento secundario (Rivera et al. 2019) ....	137
<b>Figura 90</b>	Componentes de un datalogger (RST instruments, 2019) .....	139
<b>Figura 91</b>	IoT, red de redes (Evans, 2011).....	161

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Parámetros involucrados en el diseño de revestimientos (Blom, 2002).....	6
<b>Tabla 2</b> Componentes químicos que afectan a los revestimientos (UNE 104424, 2000).....	22
<b>Tabla 3</b> Variables a monitorear en cada etapa.....	23
<b>Tabla 4</b> Tipos de sensores utilizados en el monitoreo geotécnico.....	32
<b>Tabla 5</b> Instrumentos para el monitoreo de variables.....	39
<b>Tabla 6</b> Ventajas y desventajas de los distintos tipos de recopilación de datos .....	61
<b>Tabla 7</b> Ventajas y desventajas del uso de sistemas automatizados (Adaptada de Dunnicliff J. 1993) .....	62
<b>Tabla 8</b> Ventajas y desventajas de la automatización (Dunnicliff J. 1993).....	65
<b>Tabla 9</b> Ejemplo, aplicación de tecnología LiDAR en túneles. (Fekete, Diederichs & Lato, 2009).....	70
<b>Tabla 10</b> Instrumentos requeridos para evaluar los revestimientos.....	72
<b>Tabla 11</b> División de riesgos en proyectos de construcción (Szimansky, 2017).....	80
<b>Tabla 12</b> Uso de la gestión de riesgos en distintas fases (Eskesen, 2002).....	85
<b>Tabla 13</b> Riesgos asociados a cada tipo de contratación (Lombardo y Pérez, 2016).....	88
<b>Tabla 14</b> Comparación de caudales de desalojo y déficit (CONAGUA, 2012) .....	98
<b>Tabla 15</b> Características TEO y lumbreras (CONAGUA, 2012) .....	98
<b>Tabla 16</b> Armado propuesto revestimiento primario TEO (León et. al. 2012) .....	101
<b>Tabla 17</b> Armado propuesto revestimiento primario TEO (León et. al. 2012) .....	102
<b>Tabla 18</b> Resultados del monitoreo en revestimientos (Rivera et al. 2019) .....	107
<b>Tabla 19</b> Componentes principales del deformímetro y la cubierta protectora (GEOKON., 2019) .....	120
<b>Tabla 20</b> Determinación de umbrales de control (Tébar et al. 2014) .....	130





---

## INTRODUCCIÓN

La construcción de estructuras subterráneas siempre ha estado sujeta a altos niveles de incertidumbre sobre lo que se encontrará en el sitio donde se desarrollan los procedimientos constructivos, por tanto, el estudio y desarrollo de sistemas que permitan conocer el comportamiento de los túneles ha sido motivo de mucho trabajo de investigación. Peck (1969) presentó el método de observación, utilizado por Terzaghi en la mecánica de suelos aplicada, este método a menudo permite la optimización económica sin comprometer la seguridad siempre que el diseño pueda modificarse a medida que avanza la construcción.

De acuerdo con Dunicliff (1988), la instrumentación como herramienta para la verificación del comportamiento en estructuras geotécnicas inició entre los años 1930 y 1940 con la implementación de equipos neumáticos e hidráulicos simples. El estudio de los sistemas de instrumentación en túneles ha tomado importancia en la actualidad debido a la evolución tecnológica, por ejemplo, Basset (2012) presentó conceptos fundamentales de los tipos de instrumentos involucrados en los sistemas de monitoreo, también proporcionó pautas para una correcta interpretación de los datos que arrojan los instrumentos de medición.

Eskesen *et al.* (2004) mencionan que por medio de la Asociación Internacional de Túneles y Obras Subterráneas se han desarrollado recomendaciones para la elaboración de proyectos de monitoreo y evaluación de riesgos en túneles. De acuerdo con Mikhail (2016) en el ámbito internacional, el monitoreo durante la operación ha sido empleado de forma más común en túneles para el transporte, en estos, los sistemas de instrumentación tienen la finalidad de determinar las deformaciones producidas en el revestimiento del túnel con el objetivo de evaluar su efecto en las estructuras ubicadas en superficie, generalmente se instalan instrumentos de control y medición que procesan parámetros, enviando datos a través de una red de fibra óptica a un servidor de monitoreo geotécnico ubicado en un centro de control de operaciones.

En México, la construcción de túneles para el desalojo de aguas residuales tuvo su auge durante la construcción del drenaje profundo de la Ciudad de México a finales de los años 60 e inicios de los 70; en esta obra, la instrumentación tuvo como objetivo aportar parámetros geotécnicos necesarios para el diseño y durante la construcción en la comprobación de las hipótesis de diseño. Es importante destacar que en dichos proyectos la instrumentación no fue considerada para verificar el comportamiento durante la etapa operativa.



---

El motivo de la realización de esta investigación radica en que hasta el momento, de acuerdo a la bibliografía consultada, a nivel internacional no existen proyectos de túneles para el desalajo de aguas residuales en los que se vayan a implementar sistemas de monitoreo durante la etapa operativa, lo que hace que este trabajo tenga especial relevancia dada la información que proporcionará a ingenieros geotecnistas y profesionales involucrados en obras subterráneas de este tipo.

El trabajo enfatiza en la importancia y objetivos particulares que considera la implementación de un sistema de monitoreo diseñado para la verificación del comportamiento en la etapa operativa de un túnel para el desalajo de aguas residuales construido con máquina tuneladora del tipo EPB, se plantearán las mejores alternativas para el diseño del sistema de monitoreo, con la intención de promover y detonar estas prácticas.

- ❖ En el capítulo primero, se abordan generalidades del diseño y construcción de túneles con máquina tuneladora del tipo EPB, posteriormente, se presenta la filosofía de los sistemas de auscultación y algunos antecedentes de instrumentación en túneles para el desalajo de aguas residuales en México.
- ❖ En el capítulo segundo, se realiza una descripción de los objetivos que persigue la implementación de sistemas de instrumentación en las diferentes etapas, se describen las variables involucradas y el tipo de instrumentos necesarios para el monitoreo en un túnel de este tipo.
- ❖ En el capítulo tercero, se abordan los conceptos y metodología para la verificación del comportamiento, implicaciones técnicas y contractuales, pautas para la evaluación del comportamiento, medidas preventivas y correctivas.
- ❖ En el capítulo cuarto, se analizará el sistema de auscultación propuesto para la verificación del comportamiento en la etapa operativa del Túnel Emisor Oriente (TEO), se presentarán los objetivos y metodología para la implementación de este tipo de sistemas de monitoreo.
- ❖ En el capítulo quinto, se proporcionarán recomendaciones útiles con la finalidad de promover el monitoreo en la etapa operativa y para que este trabajo sea una fuente de información para futuros proyectos que involucren obras de este tipo.
- ❖ En el capítulo sexto, son presentadas las conclusiones y propuestas en relación a este trabajo de investigación.



---

## CAPÍTULO PRIMERO

### Generalidades

#### 1. Consideraciones para el diseño y construcción de túneles construídos con TBM tipo EPB

El proceso de diseño en túneles parte de la integración de disciplinas como la geología e ingeniería geotécnica, durante esta etapa se deben considerar estudios y documentos básicos que permitan la realización del diseño de la estructura, esto con la finalidad de evaluar las condiciones del sitio en el que se desarrollarán los procedimientos constructivos. Con la finalidad de establecer pautas acerca de los requisitos necesarios para el desarrollo de diseños y procedimientos constructivos en obras subterráneas, la ITA (International Tunneling Association) proporciona como guía los puntos siguientes:

1. Determinar las características del suelo.
2. Estimar el diámetro de la geometría necesaria y determinar el método de excavación.
3. Determinar un modelo de ingeniería apropiado que otorgue seguridad. La verificación debe proporcionar una indicación clara de los parámetros de actuación, que influyen principalmente en la seguridad.
4. Determinar el principio de seguridad sobre el cual se pueden extraer riesgos del diseño y se describe en el documento contractual entre el contratista y el cliente.
5. Monitorear la construcción del túnel para verificar la seguridad.

De acuerdo con ITA (1988) los documentos básicos requeridos para el diseño de túneles deben cubrir:

- ❖ Informe geológico que presenta resultados de los levantamientos geológicos y geofísicos.
- ❖ Informe geohidrológico.
- ❖ Informe geotécnico sobre las investigaciones del sitio, incluyendo interpretación de los resultados de las pruebas de sitio y de laboratorio.
- ❖ Descripción de la excavación proyectada y tipos de soporte que probablemente se apliquen.
- ❖ Programa de monitoreo para las mediciones de campo.
- ❖ Análisis de esfuerzos y deformaciones.
- ❖ Informe de mediciones e interpretación de resultados con respecto a la respuesta del suelo y de la estructura.
- ❖ Documentación de los problemas encontrados durante la excavación y medidas a aplicar.



En el diseño del túnel la geología e investigaciones de sitio proporcionan información acerca de la orientación y trazo favorable además de la profundidad. Los sondeos y la mecánica de suelos es aplicada para el conocimiento de las características del terreno (esfuerzos, resistencia del suelo, régimen de aguas subterráneas etc.). La determinación del método de excavación se realiza de acuerdo a estimaciones preliminares con base en la experiencia y estimaciones del comportamiento del medio. Para el diseño de los elementos de soporte se deben desarrollar modelos estructurales aplicando condiciones de equilibrio y compatibilidad que permitan conocer si el diseño es seguro o no.

En la fase de diseño de un túnel construido con máquina tuneladora del tipo EPB, se realiza un análisis acerca del comportamiento del terreno y los posibles impactos que genere el desarrollo de los procedimientos constructivos, además, se deben considerar los factores que pueden afectar la durabilidad y funcionamiento del túnel, en este sentido, las mediciones de campo durante la excavación representan una fuente de información que debe ser tomada como base para la ejecución de medidas preventivas y/o correctivas a los diseños ayudando a los ingenieros encargados a cambiarlos o adaptarlos al comportamiento real del medio.

### 1.1 Diseño de TBM

Para el diseño de una máquina tuneladora (TBM, por sus siglas en inglés) es necesario considerar las cargas que se presentan sobre el escudo, de acuerdo con Maidl *et al.* (2012) las más representativas son las siguientes:

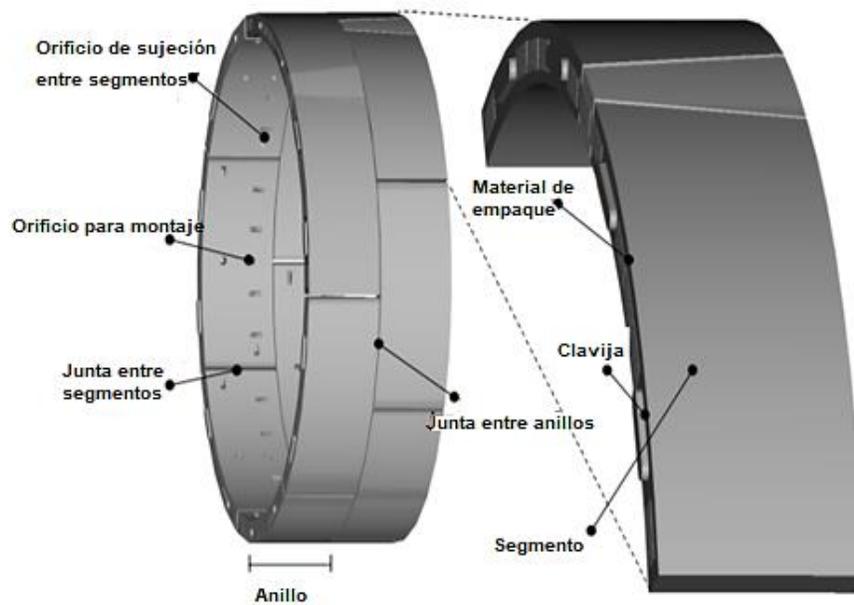
- ❖ Peso propio de la máquina tuneladora.
- ❖ Cargas radiales externas: presión de la tierra, presión de aguas, fuerzas de reacción del movimiento direccional.
- ❖ Carga externa axial: presión de soporte en la excavación, fuerzas de los cilindros de empuje.
- ❖ Cargas adicionales: fricción, fuerzas de reacción del erector de dovelas al momento de instalar los anillos, fuerzas de empuje de cilindros hidráulicos auxiliares, fuerzas de reacción del sello de cepillos, entre otras.

### 1.2 Diseño de revestimiento

En túneles construidos con máquina tuneladora del tipo EPB el soporte del terreno circundante al túnel se realiza por medio de segmentos de concreto prefabricados, los cuales al ser instalados conforman un anillo (figura 1). De acuerdo con Thelford (2004) los segmentos de dovelas prefabricados son la forma más común de revestimiento para túneles en terrenos blandos



particularmente para longitudes relativamente largas donde la economía de usar una TBM es compensada por las ventajas que proporciona su implementación.



*Figura 1* Elementos que conforman un anillo de dovelas (Blom, 2002)

Desde el punto de vista del revestimiento, el uso de segmentos prefabricados según Guglielmetti (2007) proporcionan un soporte continuo de la excavación y ayudan a minimizar asentamientos superficiales, con la estanqueidad adecuada previenen el flujo del agua hacia el túnel, desde el punto de vista de obra civil el tiempo para la finalización de los trabajos es menor, proporciona mayor seguridad y un mejor ambiente de trabajo.

Durante el diseño del revestimiento de un túnel conformado por anillo de dovelas se deben considerar diversos aspectos de importancia, por ejemplo, que la magnitud del empuje requerido para que avance la TBM depende del tipo de suelo, la carga hidrostática del agua subterránea, el diámetro de la máquina y la velocidad de avance. El diseño de un anillo no solo requiere un análisis estructural para las cargas de tierra aplicadas a los segmentos, también requiere que el diseñador considere el proceso total de fabricación, almacenamiento, entrega, manejo y montaje. Blom (2002) da una perspectiva general acerca de los parámetros principales (tabla 1) involucrados en el proceso de diseño del revestimiento y menciona que para diseñarlo es necesario conocer la geometría, cargas y condiciones a las que estarán sometidos los elementos de soporte.



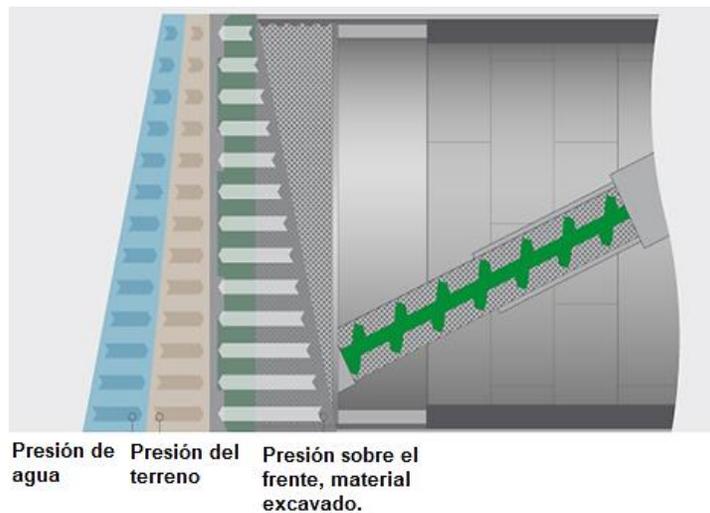
**Tabla 1** *Parámetros involucrados en el diseño de revestimientos (Blom, 2002)*

Parámetros involucrados en el diseño de revestimientos		
Geotécnicos	Soporte y carga	Montaje
- Propiedades de los suelos	- Carga y soporte de suelo	Gatos de empuje: - Posiciones. - Magnitud.
- Condiciones piezométricas	- Número de segmentos en un anillo.	Grouting - Presiones. - Grado de relleno - Comportamiento
- Estado inicial de esfuerzos	- El espesor y el ancho de los segmentos, y el módulo de Young del concreto.	Suelo - Cargas - Soporte - Mecanismos adicionales
	- El espesor del área de contacto en la junta longitudinal.	

### 1.3 Construcción de túneles con EPB

#### 1.3.1 Principio de operación.

Los escudos de presión de tierras balanceada (EPB) basan su funcionamiento en mantener la estabilidad de la excavación y el terreno circundante al túnel mediante la presión ejercida en el frente con el material que se va acumulando en la cámara al realizar el avance (figura 2).

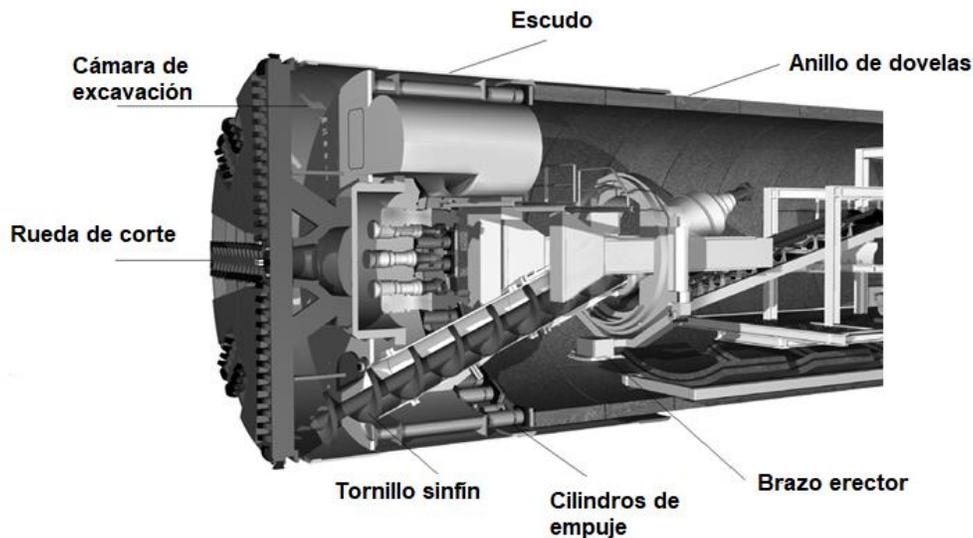


*Figura 2* Principio de operación EPB (adaptada de: [www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com))



El principio de operación de una tuneladora del tipo EPB es el siguiente:

1. El terreno circundante y la presencia de agua ejercerán presión sobre el frente de la tuneladora.
2. El soporte en el frente es proporcionado por el material producto de la excavación que se mantiene bajo presión dentro de la cámara, se debe mantener el equilibrio entre el volumen de material excavado que se introduce en la cámara y el extraído para lograr el balance de presiones.
3. Se extrae el material producto de la excavación por medio del tornillo sinfín el cual tiene la función de disipar la energía desde el inferior de la cámara hasta que sale a la superficie a presión atmosférica. Los componentes principales de una TBM de tipo EPB se presentan en la figura 3.



*Figura 3* Componentes principales de una EPB (Herrenknecht, 2007)

De acuerdo con Maidl (2007) las TBM tipo EPB son particularmente adecuadas en suelos con un contenido de grano fino ( $<0.06$  mm) de más del 30%. Las propiedades del suelo excavado se pueden mejorar mediante la adición de acondicionadores adecuados como bentonita, polímeros o espuma.

### 1.3.2 Ciclo de excavación

La excavación de túneles usando EPB se basa en el principio de soporte frontal que usa el mismo material excavado, ingresa a la cámara de excavación y se pone bajo presión, a través del equilibrio entre el material que ingresa y el que sale se logra la estabilidad del frente (Guglielmetti, 2008).

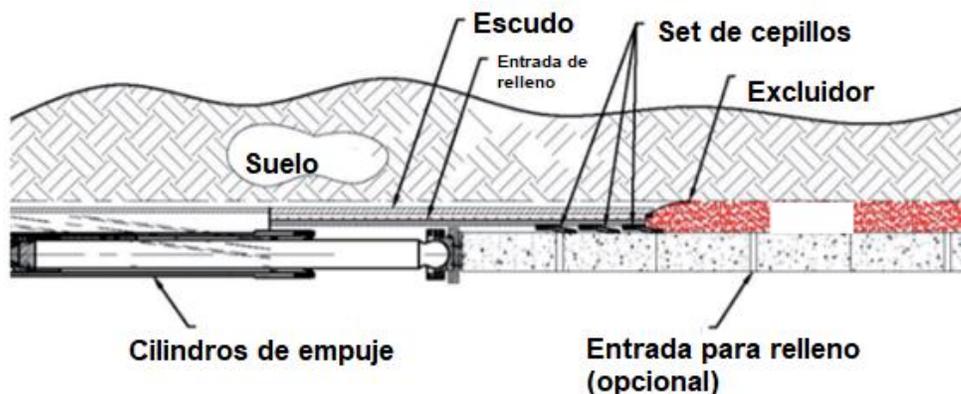


El avance del escudo se realiza por medio del empuje de los gatos hidráulicos los cuales se apoyan en el anillo de dovelas colocado anteriormente, estos ejercen presión hacia el frente de la excavación, bajo el empuje aplicado al escudo y, por lo tanto, al cabezal de corte giratorio, el terreno se corta y fluye a la cámara de excavación. Una vez equilibrada la presión en la cámara se monitorea la cantidad de material a extraer por medio del tornillo sinfín.

Según Guglielmetti (2008) durante la excavación, se tiene que extraer el volumen de material que ingresa a la cámara, es decir, el volumen teórico más cualquier aditivo inyectado en la cara o en la cámara. Es de suma importancia controlar el volumen extraído, para poder intervenir tanto en el caso de que se extraiga más material que el teórico (sobrexexcavación) y en caso de que se extraiga menos material (subexcavación). Para realizar el montaje del anillo de dovelas, el sistema de guiado de la EPB está equipado con un software que permite calcular el posicionamiento óptimo del anillo a erigir para asegurar que la coincidencia entre el eje real y teórico del túnel se encuentre dentro de las tolerancias de diseño.

Debido a que existe una diferencia en los diámetros del escudo y el anillo de dovelas se genera un espacio entre ellos que debe ser rellenado (figura 4), para esto, se inyecta lechada de cemento presurizada directamente desde una serie de tubos incorporados en la cola del escudo a través de las boquillas. El relleno del espacio anular tiene la finalidad de:

- ❖ Controlar los asentamientos de la superficie.
- ❖ Garantizar la instalación correcta de los segmentos de dovelas y permitir una transferencia uniforme de las cargas del terreno al revestimiento.
- ❖ Proporcionar mayor confinamiento al túnel y garantizar la estanqueidad.



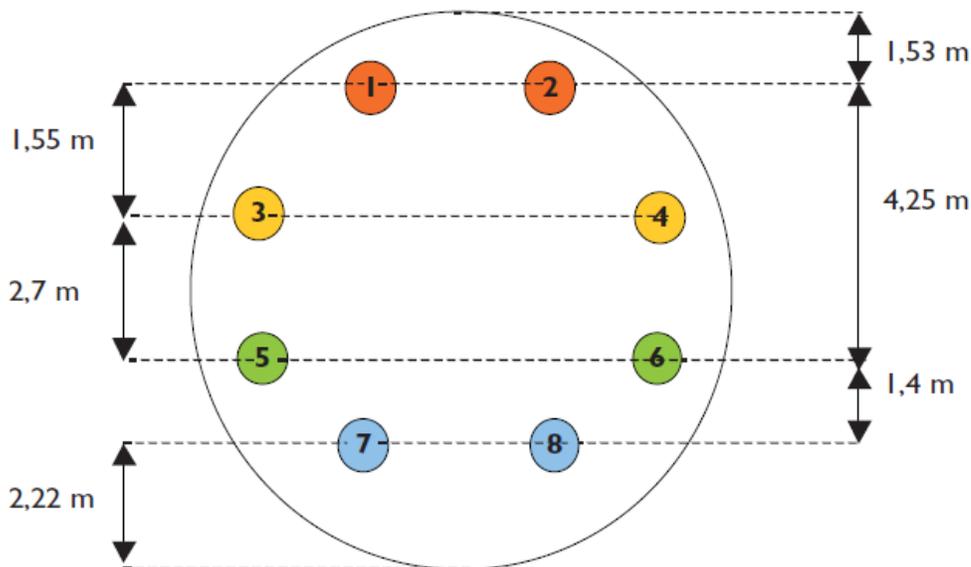
*Figura 4* Relleno del espacio anular (ITA, 2014)



### 1.3.3 Parámetros de control durante la excavación

Durante la excavación es necesario llevar un control de parámetros que permitirán definir si el proceso se está desarrollando en condiciones normales de acuerdo a los umbrales y límites establecidos o si se están presentando condiciones anormales que indiquen una tendencia hacia la desestabilización, debido a ello, la innovación tecnológica ha permitido que se incorporen modernos sistemas automatizados que proporcionan información cuantitativa y cualitativa de gran utilidad acerca del trabajo que realiza la tuneladora. De acuerdo con Guglielmetti (2008) los parámetros principales a verificar por medio de los sensores instalados en la tuneladora (figura 5) son:

- ❖ Presión de soporte en el frente.
- ❖ Densidad de lodo en la cámara de excavación.
- ❖ Presión y volumen de la lechada inyectada.
- ❖ Peso y volumen del material excavado.
- ❖ Acondicionamiento del suelo.



*Figura 5* Posición de los sensores de presión (Guglielmetti, 2008)

El control del procedimiento constructivo por medio de la instalación de sensores de medición permite verificar el comportamiento del frente de excavación, medir y controlar la presión de tierra, además de evaluar los efectos del tuneleo (asentamientos, bufamientos) en superficie.



### 1.4 Sistemas de auscultación en túneles

#### 1.4.1 Filosofía

Un sistema de auscultación involucra un conjunto de técnicas, equipo y conocimientos con la finalidad de proporcionar información cualitativa y cuantitativa del comportamiento que tiene una estructura durante las etapas de diseño, construcción y en la etapa de operación, a fin de prevenir daños u optimizar los procesos constructivos sin comprometer la seguridad.

Estos sistemas surgen debido a la necesidad de conocer la respuesta y comportamiento del medio ante la intervención ingenieril, la importancia de la auscultación en túneles radica en la incertidumbre que existe acerca de que las condiciones que se encuentran durante el desarrollo del proceso constructivo sean las mismas que las previstas en el diseño, para ello, es necesario contar con un sistema de monitoreo eficiente que permita conocer la respuesta del terreno ante las distintas solicitaciones. Entre los factores que influyen en el grado de incertidumbre en túneles están:

- ❖ Características geológicas y geotécnicas del entorno donde se construye la estructura.
- ❖ Sistema constructivo empleado.
- ❖ Calidad de los materiales.
- ❖ Experiencia del constructor y diseñador.
- ❖ Condiciones de servicio a las que será sometido durante su vida útil.

Basset (2016) menciona que la implementación de sistemas de monitoreo permite obtener información acerca de cambios físicos reales y tasas de cambio, además brinda a los diseñadores la capacidad de mejorar sus evaluaciones teóricas y dar a los contratistas la confianza de que sus procedimientos de construcción siguen siendo seguros, de igual manera, los datos generados por los instrumentos de medición pueden ser tomados como una base de información para la resolución de controversias antes, durante y después de que los procedimientos constructivos fueron finalizados.

En ocasiones la investigación del sitio donde se construirá la obra subterránea tiene muchas limitaciones o no se realiza adecuadamente, por ello, es fundamental que la implementación de un sistema de auscultación se realice de acuerdo a un estricto control de calidad desde los equipos utilizados, el procedimiento de instalación y la capacidad del personal técnico e ingenieril, para que puedan realizar un correcto análisis e interpretación de los resultados para la toma de decisiones. La aplicación del método observacional (véase anexo A) tiene potencial para optimizar la duración de la obra y los recursos económicos, al tiempo que mantiene la seguridad de forma continua.



### 1.4.2 Plan de auscultación

El plan de auscultación (figura 6) se desarrolla a través de etapas donde se establecen cada una de las responsabilidades del personal, actividades y equipos necesarios para realizar el seguimiento de la obra con la finalidad de tener un correcto análisis e interpretación de los resultados para llevar a cabo la verificación del comportamiento y la toma de decisiones. Al inicio de la planeación de un sistema de auscultación se deben identificar las magnitudes a medir, los mecanismos y fenómenos que requieren la medición así como los rangos de precisión y los umbrales que permitirán conocer cuando el fenómeno se encuentra en un nivel de alarma y pueda representar problemas a la estabilidad de la estructura.

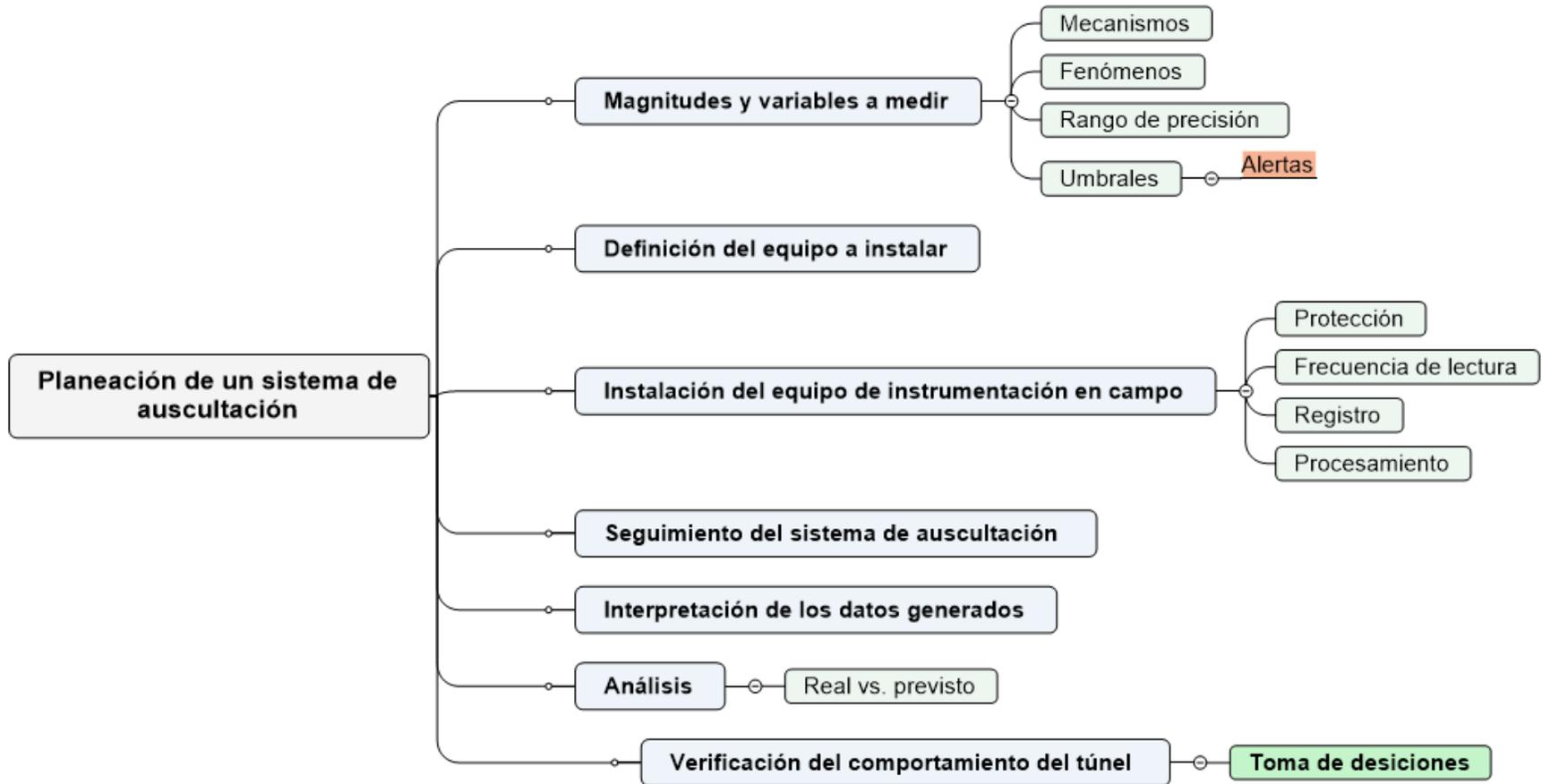
La definición del equipo a instalar estará de acuerdo al tipo de fenómeno sobre el cual se quiera tener información cualitativa y/o cuantitativa, el equipo elegido debe satisfacer las necesidades de precisión, funcionalidad y durabilidad tanto en la etapa en la que se desarrolle el procedimiento constructivo y durante la etapa de operación en caso de que sea requerido continuar con la obtención de información ya finalizada la construcción. Una vez definido el equipo necesario para el plan de auscultación se procede a su instalación, la cual debe ser realizada por personal capacitado con pleno conocimiento del funcionamiento de cada uno de ellos siguiendo las especificaciones dadas por el fabricante, en esta etapa se debe proporcionar protección a los equipos con la finalidad de que no existan factores externos que alteren las mediciones.

Las frecuencias de lectura y el procesamiento forman parte del seguimiento del programa de auscultación, en esta etapa se definen los intervalos de medición con la finalidad de comparar la evolución de los distintos fenómenos conforme avanza la construcción de la estructura. En este punto es importante hacer referencia a que cada día es más relevante la continuación del monitoreo durante la etapa operativa de las estructuras, en el caso de túneles para aguas residuales dada la experiencia es necesario establecer como una prioridad el monitoreo durante esta etapa para la evaluación del comportamiento dadas las condiciones de servicio a las que están sometidas este tipo de estructuras.

En la actualidad existen diversos programas informáticos que facilitan el registro y análisis de los parámetros arrojados por los equipos. Una vez procesada la información se realiza la interpretación de los resultados arrojados por los equipos de instrumentación este paso se realiza con la finalidad de verificar las hipótesis de diseño, es decir comparar lo real vs. lo previsto, la interpretación debe llevarse a cabo por personal con el conocimiento y experiencia suficiente que pueda dar un dictamen certero del comportamiento de la estructura y las acciones que se van a realizar para prevenir o corregir cualquier anomalía.



*PLAN DE AUSCULTACIÓN*



*Figura 6* Planeación de un sistema de auscultación

### 1.4.3 Antecedentes en proyectos para el desalajo de aguas residuales

Las condiciones geohidrológicas del Valle de México en conjunto con la sobreexplotación de los mantos acuíferos debido al exagerado crecimiento poblacional de la Zona Metropolitana generó grandes hundimientos regionales (figura 7) que afectaron el sistema de conducción por gravedad que se tenía para el desalajo de las aguas residuales hacia el gran canal del desagüe.

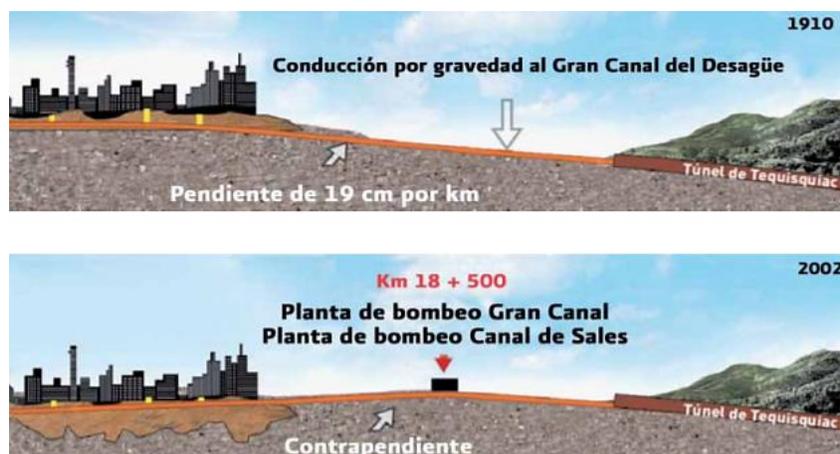


Figura 7 Pérdida de pendiente por hundimiento regional (CONAGUA, 2007)

En el año de 1967, se empezó la construcción de un sistema de drenaje profundo que no fuera afectado por los hundimientos del Valle de México, este sistema consiste en un conjunto de interceptores que conducen el agua hacia el Emisor Central para posteriormente ser desalojadas fuera de la Zona Metropolitana. El Sistema de Drenaje Profundo inició su construcción en 1967, concluyendo su primera etapa en 1975, durante la cual se construyó el Emisor Central (figura 8).



Figura 8 Construcción del Túnel Emisor Central (SACMEX, 2006)



El plan de auscultación de los túneles del Emisor Central tuvo como objetivo principal obtener información para calibrar los procedimientos constructivos que se emplearían en la construcción del soporte temporal y definitivo. Para la elección de los lugares en donde se establecerían las secciones de control se consideraron las unidades litológicas que aparecían en grandes extensiones del túnel. De acuerdo con las memorias técnicas de las obras del Drenaje Profundo de la Ciudad de México (1975) las mediciones en las estaciones se efectuaron en el periodo diciembre 1971 a enero 1973.

Rendón (1982) menciona cada uno de los parámetros e instrumentos utilizados para la medición de desplazamientos y deformaciones en los túneles del drenaje profundo. A continuación se presentan los más relevantes:

Los parámetros a medir fueron los siguientes:

- ❖ Desplazamientos del terreno normales al eje del túnel en cierto número de puntos fijos colocados en la zona de influencia de la excavación.
- ❖ Cargas soportadas entre cada tramo de los marcos de acero.
- ❖ Desplazamientos en superficie.

Los instrumentos utilizados:

- ❖ Extensómetros longitudinales instalados en el interior de los túneles.
- ❖ Celdas de carga instaladas entre los tramos de los marcos.
- ❖ Extensómetros longitudinales colocados en superficie.
- ❖ Celdas de presión colocadas en los puntos de contacto terreno-marco metálico.

#### **1.4.4 Sistema de auscultación en el Túnel Interceptor Central, Ciudad de México.**

El Túnel Interceptor Central forma parte del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México. El promedio de excavación en este túnel fue de 27 m atravesando el estrato superior de arcillas blandas en toda su longitud. Dadas las particularidades geológico-geotécnicas de esa zona, el procedimiento constructivo entre el tramo comprendido entre la lumbrera L-9 Y L-6 fue a base de escudo de frente abierto con aire comprimido, (Ayestaran y Schmitter, 1973, Schmitter y Rendón, 1980, citado por Rendón, 1982).

Con la finalidad de observar el comportamiento del túnel y las estructuras vecinas a medida que se iba desarrollando el proceso constructivo se instalaron secciones de instrumentación desde la superficie y dentro del túnel en el tramo correspondiente entre las lumbreras L9 – L6 del Interceptor Central (Rendón, 1982, p.62).



**En superficie:** se instalaron referencias de nivel superficial, semiprofundas, en zona vecina e inclinómetros. Los instrumentos fueron colocados de manera perpendicular al trazo del eje del túnel, las secciones estuvieron separadas entre 100 y 200 m. dependiendo de la distancia entre calles transversales a lo largo del trazo.

**Referencias en zona vecina (RZV):** se instalaron en guarniciones, banquetas, edificios, vecinos al eje del túnel sin guardar separación constante debido a la ubicación de las mismas. Los inclinómetros se instalaron solo en el lado (Este-Oeste) del túnel, la distancia de instalación perpendicular al eje fue de 5 y 15 m.

**Referencias de nivel superficial (RNS):** consistió en la instalación de mojoneras de concreto en superficie a poca profundidad, la toma de lecturas se realizó con un nivel convencional y a partir de un punto de referencia. De acuerdo con Rendón (1982) el periodo de lecturas fue realizado bajo el siguiente criterio:

- ❖ **Lectura semanal:** cuando el escudo se encontraba a más de 50 m, de la sección (antes o después de la misma)
- ❖ **Lectura diaria:** cuando el escudo se encontraba entre 50 m, y la sección.

**Referencias de nivel semiprofundas (RNP):** referencias semiprofundas que se instalaron entre la superficie y la clave del túnel. La profundidad de instalación fue de 18 m.

**Tubería para inclinómetro:** se instalaron tuberías para inclinómetro en las secciones de instrumentación a una profundidad promedio de 40 metros, consistieron en tramos de tubos circulares de aluminio de 3” de diámetro y 1.5 m, de longitud, con 4 ranuras longitudinales distribuidas a 90° en el perímetro.

**Al interior del túnel:** se instalaron strain gauges, distómetro con cable invar para la medición de convergencias y divergencias. (Rendón, 1982, p. 63).

**Medición de esfuerzos:** el revestimiento primario del Túnel Interceptor Central se realizó por medio de la instalación de un anillo de dovelas de concreto en los que se instrumentó con strain gauges con el objetivo de conocer los esfuerzos de trabajo. La frecuencia de lectura fue diario.

**Mediciones en el frente del túnel:** se realizaron con un dispositivo que consiste en un “trompo” de tubo de 3” de diámetro y 45 cm. de longitud, su instalación se realizó con ayuda del gato frontal central superior del escudo, un marco atornillado y barras de perforación. En este caso, las lecturas se realizaron tomando como referencia un punto colocado en un anillo con una frecuencia de dos veces por día.



**Mediciones en el cambio de geometría:** para la medición de las deformaciones y geometría en los revestimientos primario y definitivo del túnel se colocaron secciones de convergencia las cuales consistieron en un cable tipo invar y un dispositivo de medición (distómetro). Las mediciones se llevaron a cabo instalando el cable con distómetro en dos puntos sujetos a las dovelas del anillo a instrumentar, posteriormente se tensa el cable con una fuerza predeterminada y se toma la lectura cada tercer día hasta la estabilización de las mismas, posteriormente las mediciones se realizaron cada semana.

Rendón (1982) menciona que en el caso del Túnel Interceptor Central los movimientos máximos observados en las referencias de nivel profundas se presentaron al centro del eje del túnel y disminuyeron a medida que se alejaban del eje, de igual manera presenta que al igual que en las referencias de nivel superficial las RNP instaladas en el centro del túnel se empezaron a asentar cuando el escudo se encontraba a 20 metros de las mismas y se estabilizaron cuando se encontraba a más de 50 metros. Las deformaciones en el revestimiento definitivo estuvieron por el orden de los 6 mm, de divergencia después de 161 días de haberse instalado, en anillos de dovelas ubicados en las secciones de control, las deformaciones estuvieron alrededor de los 82 mm, después de 306 días de colocada la instrumentación.



---

## CAPÍTULO SEGUNDO

### Instrumentación

En ingeniería civil, la instrumentación es un proceso que involucra: equipo, conocimientos prácticos, teóricos, experiencia y habilidades de medición, que en conjunto, proveen información cualitativa y cuantitativa necesaria para llevar a cabo la verificación y medición del comportamiento en las estructuras. Su implementación en cada una de las etapas involucradas en el desarrollo de una obra de infraestructura persigue diversos objetivos, en el diseño tiene como fin ayudar al conocimiento de las condiciones iniciales del sitio, durante la construcción representa una herramienta fundamental para verificar el comportamiento de la estructura a medida que avanzan los procedimientos constructivos, durante la etapa de operación el monitoreo nos permite evaluar la calidad de los materiales y procedimientos utilizados durante la construcción, a su vez, representa una fuente de información para futuros proyectos.

El proceso ingenieril de la instrumentación inicia con la definición de los objetivos que perseguirá su implementación, donde primeramente se debe determinar cuáles serán las variables que aportarán información esencial para una correcta verificación del comportamiento, posteriormente se realiza la definición de los instrumentos requeridos para realizar las mediciones, después de haber medido y recolectado los datos, se procede a realizar el análisis e interpretación de la información para posteriormente tomar acciones preventivas y/o correctivas a favor de la optimización de los procesos constructivos y de los diseños. De acuerdo con Dunncliff (1993) las variables a medir se definen de acuerdo a las condiciones geológicas y geotécnicas del medio, en este sentido, es necesario que cada variable aporte información específica y necesaria para verificar el comportamiento de la estructura.

Para la definición de los instrumentos a utilizar se deben tener identificadas las variables a medir y la información que se espera obtener con su colocación. El análisis de los resultados debe realizarse de una manera minuciosa ya que cualquier información que no sea interpretada de forma correcta puede representar riesgos e incluso el fracaso del proyecto, por ello, es importante que el personal encargado analizar e interpretar los datos generados por los instrumentos de medición posea experiencia en el tipo de proyecto a ejecutar, además debe tener conocimientos teóricos y prácticos que le permitan tener una sensibilidad ante las situaciones que se presenten durante el proceso de instrumentación.



### 2. Instrumentación en túneles

La instrumentación tiene como objetivo principal proporcionar información cualitativa y cuantitativa que ayude a comparar los parámetros de diseño con los reales, a partir de esto, se pueden ejecutar acciones preventivas o correctivas a favor de la optimización de los diseños o procesos constructivos.

#### 2.1 Objetivos

En túneles, la instrumentación en cada una de las etapas involucradas cumple objetivos particulares que ayudan a tener una idea del comportamiento del medio desde antes de realizar el diseño, durante la ejecución de los procedimientos constructivos y cuando la estructura es puesta en servicio. Entre los objetivos secundarios de la instrumentación se encuentran:

- ❖ **Verificar:** que se cumplan las especificaciones que se establecieron desde el contrato de obra, que el lugar de trabajo cumpla con los requisitos de seguridad para el personal que labora y para la misma estructura, también tiene el objetivo de verificar que el diseño sea el adecuado para las condiciones del sitio y el proceso constructivo a emplear.
- ❖ **Controlar:** el comportamiento de la estructura en el interior y en superficie, para el caso de una obra subterránea se emiten alertas cuando existen factores que pueden representar riesgos a la estabilidad, lo anterior de acuerdo a umbrales establecidos desde el inicio del plan de instrumentación.
- ❖ **Monitorear:** el comportamiento de la estructura desde la etapa de construcción hasta la etapa de operación. La duración del monitoreo durante la operación puede variar dependiendo de la vida útil y las condiciones en las que se encuentren los instrumentos de medición.
- ❖ **Comprobar:** que los métodos de diseño y constructivos empleados sean óptimos en relación a tiempo, costo y calidad, de igual manera es útil para evaluar el desempeño de los contratistas y su apego a los términos establecidos en el documento contractual.
- ❖ **Respaldar:** la información que proporciona la instrumentación sirve como respaldo legal para clientes y contratistas ante cualquier eventualidad que comprometa la estabilidad y pueda originar controversias.



### 2.1.1 Etapa de diseño

Durante el diseño de un túnel existen fenómenos y mecanismos no previstos que pueden comprometer la seguridad y estabilidad de la estructura generando pérdidas económicas e incluso el fracaso del proyecto. En este sentido, la implementación de la instrumentación desde la etapa de diseño permite monitorear las variables que se consideran fundamentales para la verificación del comportamiento del sitio donde se desarrollarán los procedimientos constructivos.

La localización de las secciones de instrumentación durante la etapa de diseño está definida por medio de una serie de estudios donde se determinan las zonas en las que se pudieran presentar problemas que afecten la estabilidad del medio, por ejemplo, el establecimiento de secciones de control en zonas de transición entre distintas unidades geológicas.

En la etapa de diseño, la implementación de programas de instrumentación tiene por objetivo:

- ❖ Proporcionar información acerca de las condiciones iniciales en las que se encuentra el sitio donde se construirá el túnel, por ejemplo, para propósitos de diseño, es necesario conocer el régimen de aguas subterráneas así como las fluctuaciones de ésta, por lo anterior, es necesario contar con instrumentos que permitan realizar este tipo de mediciones, por ejemplo: piezómetros, los cuales permiten conocer la presión de poro en la zona donde se ubicará el túnel.
- ❖ En el diseño de revestimientos para un túnel, el monitoreo tiene por objetivo, contribuir en el conocimiento del estado de esfuerzos in situ y las condiciones de deformabilidad, las cuales son requeridas para la formulación de hipótesis y predicciones de movimientos y fenómenos que se pudieran presentar alrededor de una excavación subterránea.
- ❖ Ser una fuente de información para llevar a cabo investigaciones que permitan la optimización de futuros diseños para obras del mismo tipo, además es importante para la evaluación de distintos aspectos y áreas involucradas por ejemplo: método de diseño, procedimiento constructivo empleado, capacidad de los diseñadores, desempeño de los contratistas y operadores.



### 2.1.2 Etapa de construcción

En la etapa de construcción la implementación de instrumentos y el monitoreo tienen por objetivos:

- ❖ **Garantizar** la seguridad del personal involucrado en el desarrollo de los procedimientos constructivos.
- ❖ **Optimizar** tiempo y costos.
- ❖ **Verificar** las hipótesis con las que se realizaron los diseños y así comparar el comportamiento real vs. el previsto.
- ❖ **Conocer** la influencia de los procedimientos constructivos sobre estructuras cercanas al túnel.
- ❖ **Medir** las variables (esfuerzos, deformaciones, presiones, desplazamientos) y ser de ayuda para la ejecución de medidas preventivas y/o correctivas ante cualquier situación que pueda comprometer la estabilidad de la estructura.
- ❖ **Evaluar** el desempeño del contratista.

Los principales instrumentos requeridos para la verificación del comportamiento durante la construcción de un túnel construido con máquina tuneladora del tipo EPB se presentan en la figura 9.

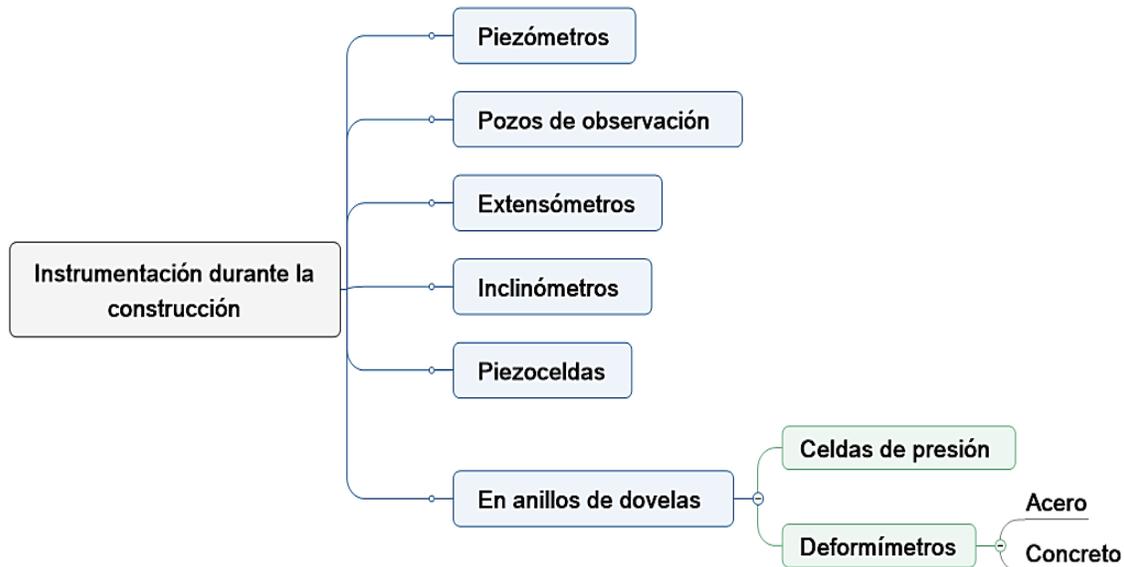


Figura 9 Instrumentos instalados para el monitoreo en la construcción



### 2.1.3 Etapa de operación

El monitoreo de un túnel para el desalojo de aguas residuales sólo se ha enfocado en las etapas de diseño y construcción, dejando de lado el monitoreo durante la operación, el cual, tiene gran relevancia dadas las condiciones y el ambiente agresivo producto del flujo de agua y los gases que generan, en este sentido, es importante contar con sistemas de monitoreo útiles que permitan verificar el comportamiento de la estructura cuando se encuentra en servicio.

A continuación, se presentan los objetivos que persigue el monitoreo durante la etapa operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales.

- ❖ **Garantizar** la seguridad y estabilidad de la estructura por un largo plazo después de haber terminado los procedimientos constructivos.
- ❖ **Evaluar** la calidad de los procedimientos constructivos y materiales empleados.
- ❖ **Respaldar** legalmente a cliente y contratista ante cualquier eventualidad que se presente en la operación del túnel.
- ❖ **Monitorear** de forma periódica el túnel mediante la instalación de instrumentos en el revestimiento.
- ❖ **Verificar** el comportamiento de ambos revestimientos (primario y secundario) durante la operación, y en su caso, tomar acciones preventivas para garantizar la seguridad y estabilidad de la estructura.
- ❖ **Proporcionar** datos que permitan elaborar reportes acerca del comportamiento del túnel y realizar las evaluaciones correspondientes de las condiciones en que se encuentra la estructura.
- ❖ **Optimizar** procedimientos y ser una base de información para futuros proyectos de monitoreo de este tipo.

El ambiente en el que operan los túneles para aguas residuales es agresivo, en la etapa de operación el arrastre de los sólidos genera desgaste en el concreto del revestimiento, las aguas residuales generan gases metano – sulfúrico que atacan químicamente al concreto generando descostramiento y corrosión en el acero de refuerzo dañando el revestimiento y provocando una elevación en el coeficiente de rugosidad y disminución de la capacidad de desalojo.

La Norma UNE 104424 (2000) presenta los factores y límites perjudiciales de cada uno de los componentes químicos que atacan a los revestimientos de este tipo de estructuras (tabla 2).



## Capítulo 2

**Tabla 2** Componentes químicos que afectan a los revestimientos (UNE 104424, 2000)

Factores	Límites perjudiciales	
	Hormigón (mg/l)	Acero (mg/l)
Sulfatos	> 200	> 300
Nitratos	> 50	> 50
Anhídrido Carbónico	Con cantidades mínimas	< 3%
Ácido Sulfúrico	>1	-
Cloros	-	> 100
Aceites y grasas	-	> 5 a 100
Oxígeno	-	> 4
Magnesio	>100	-
Fenoles	Muy perjudicial	10 kW

Una vez puesto en operación el túnel las aguas residuales generan gases que al llegar al acero provocan que empiece la corrosión, el fenómeno se manifiesta con una disminución del diámetro inicial del acero provocando una reducción de su capacidad estructural. En el concreto, la corrosión (figura 10) genera afectaciones en la adherencia del acero provocando fisuras y desprendimientos. La falta de monitoreo y mantenimiento de este tipo de estructuras generan problemas que pueden representar riesgos a la estabilidad y disminución en la funcionalidad.



**Figura 10** Corrosión en revestimiento, Túnel Emisor Central, México (García, s.f)



## 2.2 Variables de medición

Para cumplir con los objetivos, la instrumentación es una herramienta que permite registrar y analizar tres campos de datos:

1. Desplazamientos y deformaciones.
2. Cargas y esfuerzos.
3. Régimen de aguas subterráneas.

En la verificación del comportamiento de una estructura, se tienen que identificar los fenómenos y mecanismos que pudieran propiciar problemas de estabilidad durante el desarrollo de los procedimientos constructivos y cuando la estructura se encuentre en operación. La selección de variables a monitorear se debe realizar de acuerdo al grado de importancia y la información que proporcionan para el análisis del comportamiento.

Las variables involucradas en cada una de las etapas (tabla 3), aportan información que permite conocer las condiciones iniciales del sitio donde se desarrollará el proyecto, la influencia de los procedimientos constructivos sobre el medio y estructuras vecinas además de evaluar el comportamiento de la estructura cuando se encuentra en operación.

**Tabla 3** Variables a monitorear en cada etapa

<b>Etapa</b>	<b>Variables a monitorear</b>
<b>Diseño</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Régimen de aguas subterráneas (presión de poro)</li> <li>- Esfuerzos in situ</li> </ul>
<b>Construcción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asentamientos en superficie</li> <li>- Deformaciones dentro de la excavación</li> <li>- Deformación alrededor del túnel</li> <li>- Esfuerzos en revestimiento y soporte</li> </ul>
<b>Operación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformación en revestimiento primario y secundario (definitivo)</li> </ul>



### 2.2.1 Régimen de aguas subterráneas

#### Presión de poro

En general, la presión de poro consiste en la presión en el agua dentro de los poros del suelo (figura 11). El análisis de esfuerzos efectivos requiere del conocimiento de las presiones de poros en el campo, de acuerdo con Díaz (2009) la medición de la presión de poro es fundamental en el cálculo del estado de esfuerzos del suelo mediante la expresión desarrollada por Terzaghi para los esfuerzos efectivos.

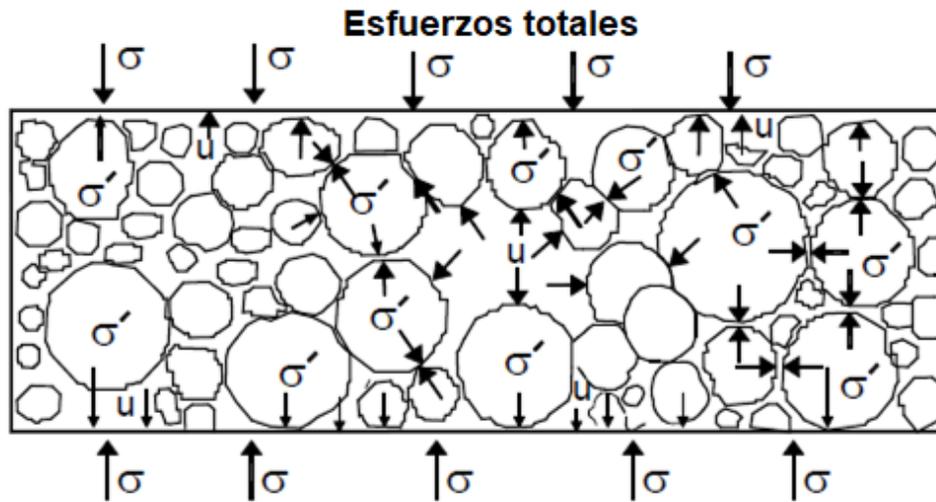


Figura 11 Principio de esfuerzos efectivos. (Suárez, 2009)

De acuerdo con Lambe (2004) el principio de esfuerzo efectivo se plantea de la siguiente forma:

1. El esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ) es igual al esfuerzo ( $\sigma$ ) total menos la presión de poro ( $\mu$ ).

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

2. El esfuerzo efectivo controla ciertos aspectos del comportamiento del suelo, principalmente la consolidación y la resistencia.

En túneles, es necesario tener conocimiento acerca del régimen de aguas subterráneas presente alrededor de la excavación, por ejemplo, los túneles debajo del nivel freático causan cambios en el estado de esfuerzos y en el régimen de presión del agua de los poros. Yoo (2007) presenta tres cuestiones importantes que deben abordarse durante las etapas de diseño y construcción, incluidas las cuestiones de procedimientos constructivos, estabilidad y medioambientales, estas son:



1. Las entradas de agua durante la construcción de túneles dificultan significativamente el desarrollo de los procedimientos constructivos, lo que resulta en un aumento global de los costos de construcción y el tiempo de ejecución.
2. El cambio en el régimen de presión del agua de los poros durante el proceso constructivo puede afectar la estabilidad del túnel a corto y largo plazo.
3. La consecuencia ambiental directa de las entradas de agua durante la construcción de túneles es la reducción del nivel de las aguas subterráneas en el acuífero circundante.

La presión de agua en los poros del suelo circundante influye en la cantidad de agua que pueda infiltrarse al túnel así como en las cargas sobre el revestimiento, los incrementos de la presión del agua de los poros en el frente del túnel pueden afectar la estabilidad del frente y la interacción del túnel con las estructuras circundantes. Además de eso, el flujo de agua tiene consecuencias especiales para el acondicionamiento de la espuma, que depende en gran medida de la cantidad de agua en la mezcla. En este sentido, es necesario un monitoreo a corto y largo plazo de la presión de poro para determinar los efectos en el comportamiento del túnel, así como el asentamiento del terreno circundante.

### 2.2.2 Deformaciones

Durante la construcción de un túnel se presentan cambios en el estado de esfuerzos que deben ser analizados para tener un control de las deformaciones y para saber si se encuentran en los rangos establecidos al inicio del proyecto.

El objetivo principal de la medición de las deformaciones es verificar la capacidad de respuesta del soporte y revestimiento, asegurarse que las presiones sobre ellos se encuentran controladas con un margen de seguridad adecuado que permita garantizar la seguridad y estabilidad de la estructura.

- ❖ Permite anticipar el comportamiento de la estructura comparando parámetros previamente arrojados en condiciones de terreno similares.
- ❖ Se pueden comparar los parámetros de diseño con los reales para tomar decisiones a favor de la optimización de los procedimientos constructivos y para la prevención de mecanismos que generen inestabilidad.
- ❖ El monitoreo de la deformación del terreno en torno al túnel proporciona alertas en caso de que se sobrepase el rango establecido y comprometa la estabilidad de la propia estructura y de edificaciones cercanas.



- ❖ La medición de las deformaciones proporciona mayor certidumbre del seguimiento y control de calidad en cada uno de los procesos involucrados en el desarrollo de la obra.

La medición de las deformaciones proporciona información sobre la dirección y velocidad de movimiento. El monitoreo de las deformaciones en túneles se realiza por medio de instrumentos colocados en superficie o al interior de la estructura. Los tipos de deformaciones inducidas por el proceso de tuneleo según Rangel (2012) se presentan en la figura 12.

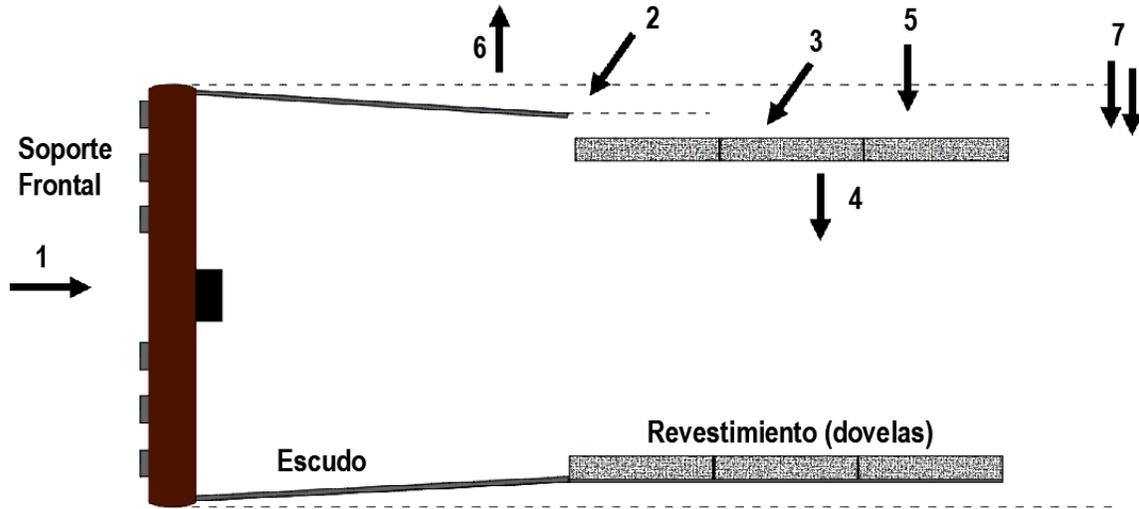


Figura 12 Deformaciones inducidas por el tuneleo (Rangel, 2012)

1. Movimientos del terreno hacia el frente de excavación de la tuneladora provocados por la relajación de esfuerzos.
2. Desplazamientos radiales provocados por el sobrecorte o deficiencia en la horizontalidad y alineamiento de la tuneladora.
3. Desplazamientos radiales del terreno al final del escudo debidos al espacio remanente entre éste y el revestimiento al no existir inyección de relleno o cuando ésta sea deficiente (presión y calidad) y/o colocada tardíamente.
4. Desplazamientos radiales en el revestimiento por su flexibilidad y capacidad estructural.
5. Desplazamiento radial generado por el cambio de esfuerzos en el suelo alrededor del túnel así como el espesor de suelo remoldeado.
6. Desplazamientos verticales hacia la superficie del soporte al salir del escudo por efecto de la sobrecompensación o recuperación del NAF.
7. Movimientos radiales provocados por efectos de consolidación.

La instalación de instrumentos en superficie tiene la ventaja de que pueden ser medidos con mayor periodicidad a través de bases fijas de referencia alejadas de la zona de influencia del procedimiento constructivo. El monitoreo al interior del túnel se realiza instalando instrumentos en el soporte o revestimiento, generalmente a medida que se avanza en la excavación. El diseño del revestimiento de un túnel se rige de acuerdo a la magnitud de las cargas ejercidas por el terreno circundante (figura 13), la evaluación de estas cargas no se pueden estimar hasta que se realice la excavación del túnel, dicho esto, la verificación del comportamiento de la estructura juega un papel importante al proporcionar información sobre los rangos de deformación en los que se encuentra el sistema de sostenimiento.

De acuerdo con Minh *et al.* (2017) en ocasiones la poca exploración geológica permite que existan cargas inesperadas que actúan en y sobre los soportes, además de filtraciones de agua que provocan incremento de cargas en los soportes provocando problemas de inestabilidad. En relación al revestimiento, si las cargas exceden los valores de diseño respecto a las presiones de tierra circundantes se pueden generar deformaciones dañando la estructura o provocando el colapso.

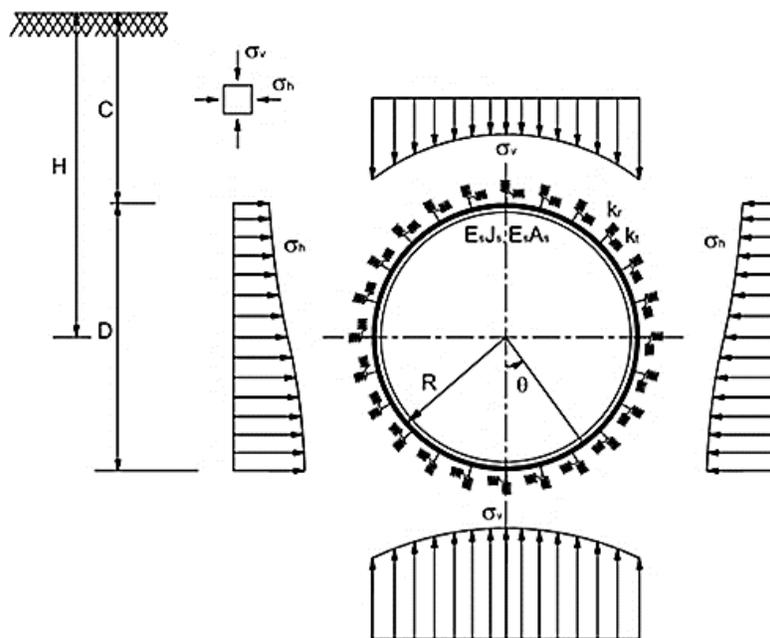


Figura 13 Presión de suelo ejercida sobre el revestimiento (Minh *et al.*, 2017)

- H**= altura del diámetro al nivel de terreno
- C**= Cobertura de la clave al nivel de terreno
- D**= Diámetro
- $\sigma_v$  = Esfuerzo vertical
- $\sigma_h$  = Esfuerzo horizontal



### 2.2.3 Esfuerzos

Son cantidades ficticias, que de acuerdo con Potts y Zdravkovic (1999) en ingeniería se usan para definir la manera en que son transmitidas las cargas en un cuerpo. Al realizarse una excavación en el terreno, existen cambios en el estado de esfuerzos que deben ser analizados para comprender el comportamiento de la estructura. Las mediciones de esfuerzos totales son necesarias para obtener esfuerzos efectivos a partir del conocimiento de la presión de poro, y así poder estimar la magnitud y dirección de los esfuerzos principales.

En túneles es necesario monitorear el comportamiento mediante el análisis de los esfuerzos totales actuando sobre el revestimiento (figura 14). El correcto uso de la información proporcionada por los instrumentos encargados de medir los esfuerzos ayudará a la optimización de los diseños y procedimientos constructivos.

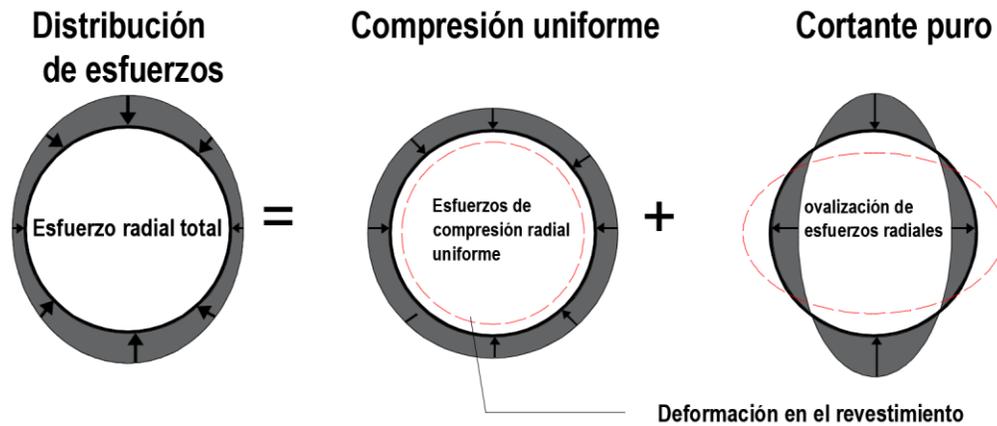


Figura 14 Distribución de esfuerzos sobre el revestimiento (Potts y Zdravkovic, 1999)

### 2.3 Tecnologías empleadas en los sistemas de instrumentación geotécnica

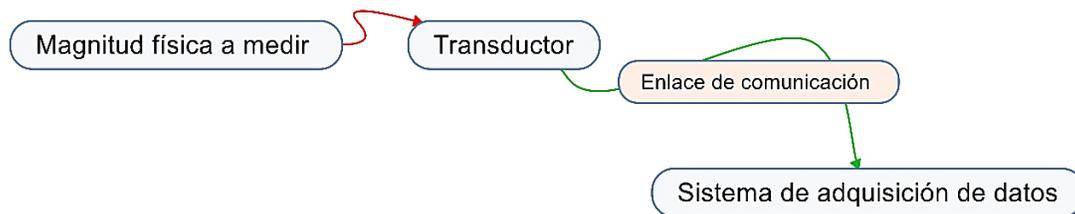
El monitoreo de las estructuras siempre ha tenido especial importancia para la verificación del comportamiento, los instrumentos empleados han ido evolucionando de lo sencillo y empírico sin mucha precisión a lo complejo y automatizado con precisión milimétrica. La innovación tecnológica ha hecho posible que se desarrollen instrumentos más precisos y funcionales con la capacidad de responder rápidamente ante las solicitudes de trabajo requeridas en el medio, ante ello, el ingeniero encargado de la elaboración del plan de instrumentación debe elegir la tecnología más adecuada de acuerdo al tipo de proyecto y variables a medir.



### 2.3.1 Evolución tecnológica de los instrumentos de medición

El nacimiento de la instrumentación geotécnica, como una herramienta para ayudar con las observaciones de campo, ocurrió entre los años 1930 y 1940. En los primeros años, predominaban los instrumentos mecánicos e hidráulicos simples, a medida que la tecnología ha avanzado y el papel de la instrumentación geotécnica se ha vuelto más importante, el uso de dispositivos más complejos como sensores eléctricos, instrumentos de cuerda vibrante, sensores de fibra óptica y sistemas microelectromecánicos (MEMS), se han usado con mayor frecuencia tanto para proyectos de pequeña o gran escala.

Dentro de la planeación de un sistema de instrumentación, es necesario definir el equipo que se empleará para obtener la información que nos ayudará a evaluar el comportamiento de una estructura, el tipo y número de instrumentos que se colocarán en la sección a analizar dependerá del diseño, grado de incertidumbre de las condiciones geológico-geotécnicas del sitio y la finalidad de la estructura. Se puede considerar que el sistema de monitoreo conecta un transductor a un sistema de adquisición de datos a través de un enlace de comunicación (figura 15).



*Figura 15* Componentes principales de un sistema de monitoreo

**Transductor:** sirve para convertir un cambio físico en el parámetro que se mide en una señal de salida correspondiente, que se puede leer de forma manual o automática. La fiabilidad del instrumento es primordial, por lo tanto, esto requiere cierta comprensión del transductor alojado dentro del instrumento y su sensibilidad al ambiente circundante.

**Sistema de adquisición de datos (SAD):** consiste en el procesamiento de un conjunto de señales físicas, para convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que puedan ser procesadas por una computadora y algún software especializado. Dados los requerimientos de los SAD es necesario innovar en los equipos y sistemas que realizan esta función, para ello, se han desarrollado sistemas de adquisición de datos automatizados que proporcionan grandes ventajas ante la forma convencional de adquirir la información, entre ellas se destacan:

- ❖ Monitoreo continuo de los procesos y fenómenos presentes en las estructuras.
- ❖ Obtención de la información en tiempo real.



- ❖ Un SAD automatizado es altamente efectivo para el empleo de sistemas de alerta temprana ante posibles eventos y fenómenos que puedan comprometer la estabilidad.
- ❖ Disminución de los errores humanos.

### 2.3.2 Evolución de software para el monitoreo geotécnico

De acuerdo con Siebenmann, Yub y Bachus (2015) a medida que los programas de instrumentación se han vuelto más grandes y complejos, con cantidades cada vez mayores de datos generados, la gestión de datos de monitoreo de instrumentación geotécnica y los sistemas de informes han evolucionado con el tiempo para cumplir con los requisitos de cada proyecto, en este sentido, ha surgido la necesidad de crear, innovar y sofisticar distintos tipos de software los cuales sirven como una herramienta eficaz para las diversas actividades involucradas en el proceso de monitoreo en túneles.

El desarrollo de distintos tipos de software se inició en los años 90's, esta primera generación (figura 16) era utilizada en proyectos de “pequeña escala” se basaba en representaciones basadas en Disk Operating System (DOS).

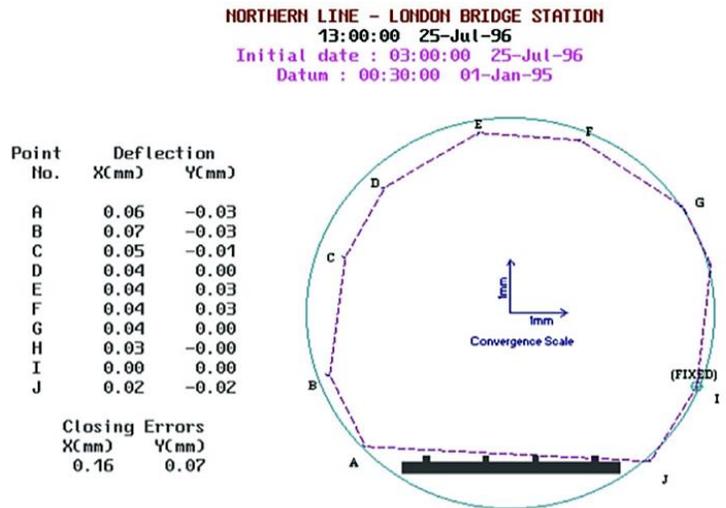


Figura 16 Medición de convergencias, 1era. Generación de software (Siebenmann *et al.* 2015)

Para proyectos de tamaño mediano, en el año 2000, se empezaron a desarrollar distintos tipos de software los cuales eran capaz de procesar la información de cientos de sensores. De acuerdo con Bachus (2015) las interfaces gráficas estaban basadas en Microsoft Windows, se desarrollaron bases de datos con notificaciones de alarmas configurables por el usuario.



Los paquetes de software de la segunda generación (figura 17) incluyen programas como: MultiMon (Indicador de pendiente), BCSWin.

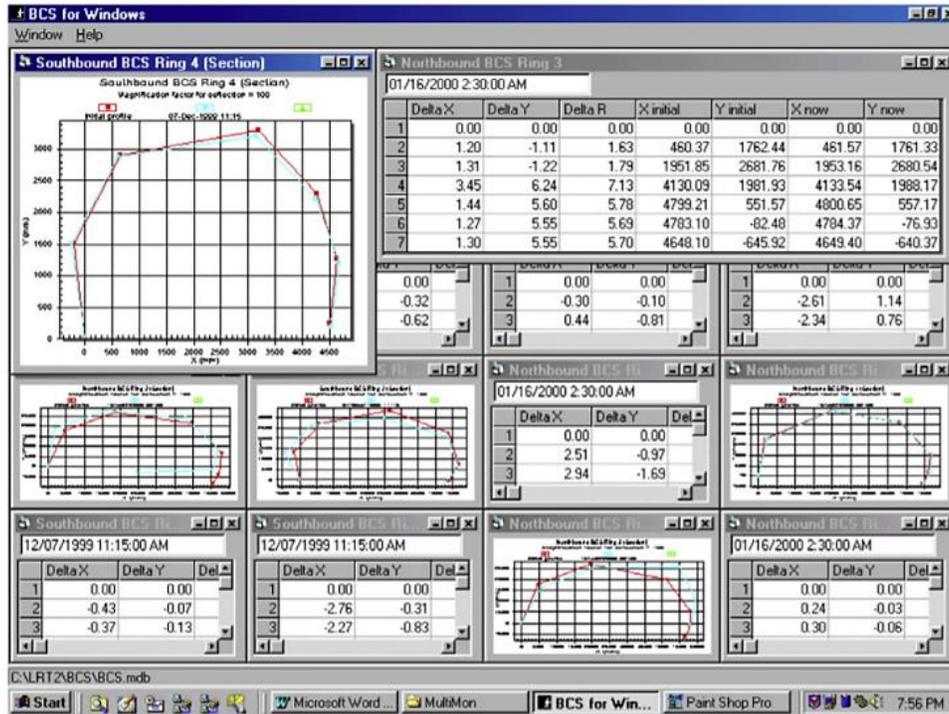


Figura 17 Monitoreo de convergencias, 2da. Generación de software (Siebenmann *et al.* 2015)

La tercera generación de software de monitoreo geotécnico y estructural se está utilizando en la actualidad en proyectos de infraestructura de gran escala que involucran miles de sensores; el software actual tiende a estar basado en plataformas de internet con visualización y procesamiento en computadoras portátiles y Smartphone. Siebenmann *et al.* (2015) mencionan que estos sistemas se desarrollaron utilizando bases de datos SQL de back-end y proporcionan una funcionalidad significativa, que incluyen:

1. Mensajes de alarma
2. Informes automáticos en PDF
3. Monitoreo en tiempo real con diferentes interfaces

ARGUS, Atlas, Slope Indicator, ISiteCentral, Geoscope, Vista Dataview y Geoviewer (figura 18) son ejemplo de esta tercera generación de software desarrollados para el monitoreo de estructuras a gran escala con miles de sensores.

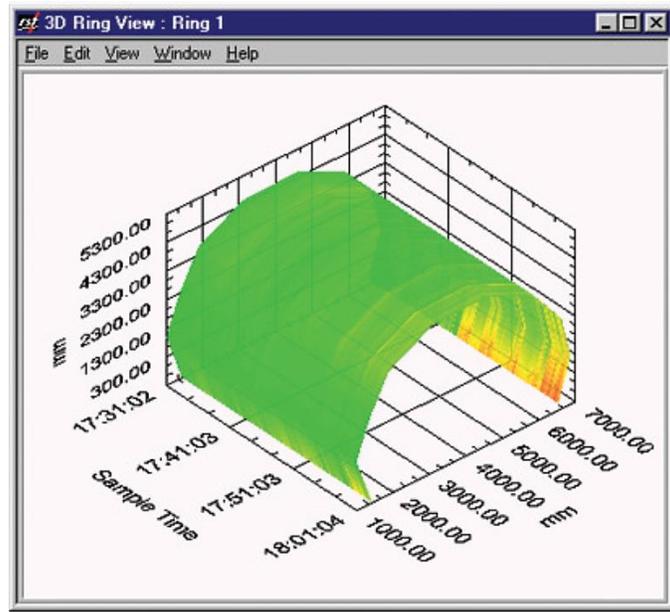


Figura 18 Visualización de deformaciones en Geoviewer (recuperado de: www.geotechpedia.com)

## 2.4 Tipos de sensores utilizados en los instrumentos de medición

Las innovaciones tecnológicas han contribuido a que se desarrollen sensores sofisticados con la capacidad de medir diversas magnitudes físicas y de este modo monitorear todo tipo de estructuras, en la tabla 4, se presenta una descripción de los tipos de sensores usados en la actualidad para el monitoreo en estructuras geotécnicas

Tabla 4 Tipos de sensores utilizados en el monitoreo geotécnico

Tipo de sensor	Principio de operación
Hidráulicos	Con mayor frecuencia se utilizan en la medición de la presión de líquidos, los más utilizados son los manómetros.
Mecánicos	Convierten el movimiento lineal de un émbolo cargado por resorte en un movimiento más grande y más visible de un puntero que gira alrededor de un cuadrante.
Neumático	Su principio de operación varía dependiendo del tipo: cerrado o abierto cuando se aplica una presión externa al transductor.

---

<b>Resistivos</b>	Contienen un diafragma delgado con resistores o también llamados (strain gauges) los cuales son los sensores de medición de deformación.
<b>Cuerda Vibrante</b>	Alambre de acero de alta resistencia fijado en ambos extremos y tensado a un diafragma que condiciona su vibración la cual se transmite a través de un transductor eléctrico.
<b>Transformador diferencial variable lineal (LVDT)</b>	Consiste en un núcleo magnético móvil que pasa a través de una bobina primaria y dos secundarias, se usan generalmente en instrumentos para medir desplazamientos.
<b>Sistema Microelectromecánico (MEMS)</b>	<p>Un MEMS es un dispositivo pequeño e integrado que combina componentes eléctricos y mecánicos en una escala submicrométrica a submilimétrica.</p> <p>Esto permite transductores pequeños, más funcionales, más ligeros, más confiables y producidos por una fracción del costo de los transductores convencionales.</p>

---

### 2.4.1 Transductor eléctrico

Los transductores eléctricos simples y los sistemas de adquisición de datos se utilizan en numerosos instrumentos geotécnicos. Los instrumentos con transductores eléctricos del tipo resistivo (figura 19) contienen un diafragma delgado con resistores o también llamados strain gauges los cuales son de los sensores de medición de deformación más utilizados.

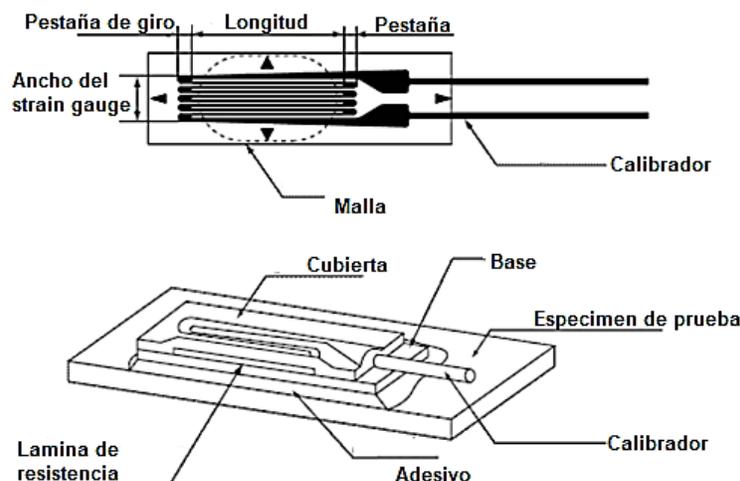


Figura 19 Componentes de un Strain gauge (Kenkyujo, 2018)



En los instrumentos para la medición de presiones, los sensores de tipo piezoresistivos (figura 20), tienen la ventaja de tener una respuesta inmediata a los cambios de presión y gran precisión aun cuando se encuentran sometidos a grandes presiones.

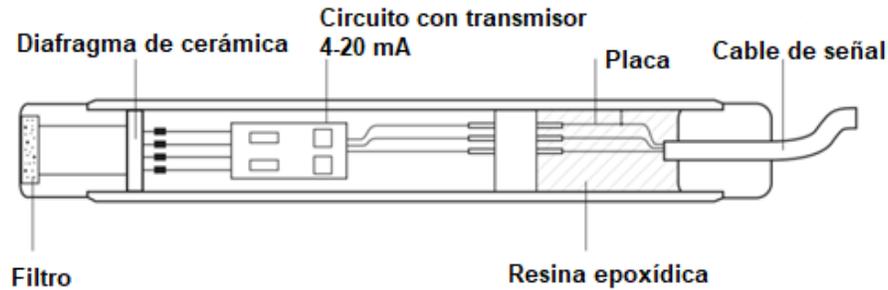


Figura 20 Sensor piezoresistivo en piezómetro (SISGEO, 2016)

Los piezómetros piezo-resistivos son transductores de presión aptos para lecturas de alta frecuencia y aplicaciones a cortos períodos. La señal de salida robusta 4-20 mA, es fácil de leer y automatizar, apta para transmisiones a largas distancias. Puede ser conectada a dataloggers sísmicos para monitorear los cambios rápidos en la presión de poro de agua así como las producidas por los terremotos (SISGEO, 2016).

### 2.4.2 Ópticos

Los sensores de fibra óptica (figura 21) son adecuados para el monitoreo de la estructuras de ingeniería debido a la resistencia a las interferencias electromagnéticas, son robustos para soportar ambientes adversos y se pueden desarrollar varios sistemas de monitoreo ya que tienen la funcionalidad de multiplexar e integrar a grandes distancias (Bremer, 2016).

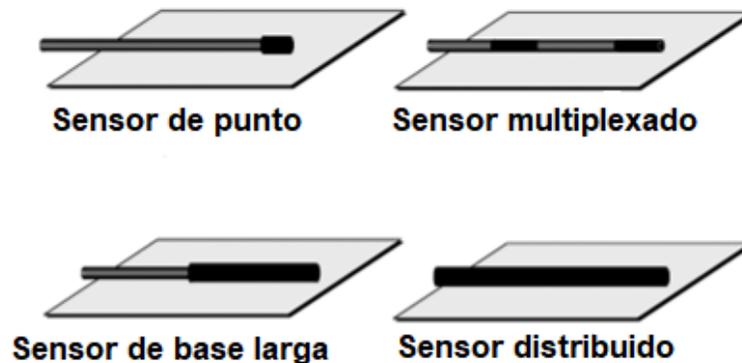


Figura 21 Tipos de sensores de fibra óptica (Inaudi, 2016)



De acuerdo con Inaudi (2016) existen una gran variedad de sensores de fibra óptica para el monitoreo estructural y geotécnico. Los cuatro tipos principales de sensores de fibra óptica son:

- ❖ **Sensores de punto:** tienen un solo punto de medición al final del cable de conexión de fibra óptica, al igual que la mayoría de los sensores eléctricos.
- ❖ **Sensores multiplexados:** permiten la medición en múltiples puntos a lo largo de la instalación de una sola línea.
- ❖ **Sensores de base larga:** integran la medición en una base de medición larga, generalmente son conocidos como sensores de calibre largo.
- ❖ **Sensores distribuidos:** tienen la capacidad de realizar el monitoreo en cualquier punto a lo largo de la instalación de una línea de fibra, esto puede ser en distancias muy largas.

### 2.4.3 Cuerda Vibrante

Los sensores de cuerda vibrante (figura 22) basan su funcionamiento en la teoría de cuerdas, la cual dice: que todas las diversas partículas fundamentales del modelo estándar son en realidad solo manifestaciones diferentes de un objeto básico: una cuerda. Los componentes principales de este tipo de sensores se presentan a continuación:

- ❖ Un cable o cuerda tensada sujeta en ambos extremos por abrazaderas colocadas en la estructura que se va a monitorear.
- ❖ Bobina electromagnética encargada de excitar la cuerda vibrante a una frecuencia determinada.
- ❖ Cable transmisor de señal conectado a un contador de frecuencia.

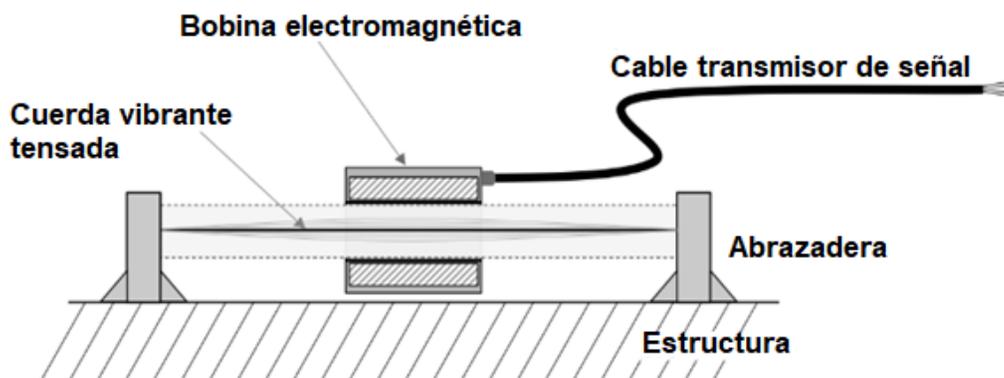


Figura 22 Componentes de un sensor de cuerda vibrante (SISGEO, 2018)



El principio de operación de un sensor de cuerda vibrante consiste en:

1. Cambio de la tensión del cable o cuerda por medio de la aplicación de una fuerza externa, que se expresa mediante una excitación de tipo eléctrica a través de un datalogger.
2. Debido a la aplicación de la fuerza se cambia la frecuencia de vibración.
3. Se mide la frecuencia y se indica la cantidad de fuerza en el sensor por medio de un sistema electrónico integrado que activa la cuerda vibrante y lee la frecuencia.

De acuerdo con Dunnicliff (1993) hay dos métodos para realizar las lecturas de los sensores de cuerda vibrante, el método de arrancar y leer y el método de excitación continua (o auto-resonante), este último permite la medición de tensiones dinámicas de baja frecuencia.

- ❖ El método de arrancar y leer implica la aplicación de uno o más pulsos de voltaje a la bobina, creando así una atracción magnética que causa que la cuerda vibre.
- ❖ El método de excitación continua o auto-resonante implica un procedimiento similar para iniciar la vibración, pero se utiliza una segunda bobina para detectar la frecuencia.

Actualmente, se han desarrollado equipos que ayudan al procesamiento de la información generada por los instrumentos que funcionan con el principio de cuerda vibrante, este tipo de datalogger es diseñado para trabajar como un componente más de un sistema de adquisición de datos, tiene la ventaja de leer y guardar datos de hasta 3 sensores de cuerda vibrante y comunicaciones con red inalámbrica.

### 2.4.4 Sistemas microelectromecánicos (MEMS)

Los sensores microelectromecánicos son pequeños dispositivos que se componen de elementos microfabricados, estos tienen la función de procesar datos, percibir condiciones del entorno y comunicar. De acuerdo con Maluf y Williams (2004) un MEMS es simultáneamente una caja de herramientas, un producto físico y una metodología, todo en uno:

- ❖ Es un conjunto de técnicas y procesos para diseñar y crear sistemas en miniatura.
- ❖ Es un producto físico a menudo especializado y único para una aplicación final.

Las funciones que realizan los componentes de un MEMS son las siguientes:

- ❖ **Sensor:** ingresa información en el sistema;



- ❖ **Circuito electrónico:** condiciona la señal del sensor;
- ❖ **Actuador:** es un dispositivo que convierte una señal eléctrica en una acción. Puede crear fuerza para manipularse a sí mismo, a otros dispositivos mecánicos o al entorno que los rodea para realizar alguna función útil.

Todos los sensores MEMS deben ser estrictamente diseñados para satisfacer los requisitos y aplicaciones específicos de cada dispositivo con el fin de proporcionar un excelente rendimiento óptico, eléctrico y mecánico. En los sistemas de instrumentación geotécnica, los sensores con tecnología MEMS reúnen la información del medio a través de la medición de los fenómenos mecánicos, químicos y magnéticos para que después el componente electrónico procese la información proporcionada por los sensores. Para su utilización en sistemas de auscultación proporcionan grandes ventajas entre las que destacan:

- ❖ La sensibilidad de los componentes para captar los fenómenos físicos y mecánicos que se requieran medir.
- ❖ Tienen un tamaño y peso ideal para la utilización en los elementos estructurales dado que están fabricados con materiales que les permiten ser más fuertes y ligeros. Pueden ser empleados en diversas condiciones de servicio.

En el campo de la instrumentación geotécnica, los sensores con tecnología MEMS son utilizados comúnmente en clinómetros, inclinómetros fijos y electroniveles.

## 2.5 Secciones de control

Para monitorear el comportamiento de un túnel es necesario implementar un sistema de instrumentación que nos ayude a obtener la información del medio, por ello, es necesario establecer secciones a lo largo del trazo del túnel que proporcionen datos que permitan evaluar el comportamiento. De acuerdo con Dunicliff (1993) la definición del lugar donde se establecerán las secciones de control debe ayudar a comprobar el comportamiento que se prevé tenga la estructura, esto depende de varios factores entre los que destacan:

1. Zonas donde se esperan existan condiciones extraordinarias o particulares, por ejemplo: grandes cargas o presiones elevadas de agua.
2. Variaciones en las condiciones geológico geotécnicas que existen a lo largo del trazo del túnel, si se prevé que puedan existir problemas, es necesario colocar instrumentación en alguna zona específica donde se encuentren las condiciones más desfavorables.
3. Es necesario establecer zonas que sirvan de comparación para los sistemas colocados en zonas con condiciones desfavorables.



La cantidad de secciones en el proyecto se definirá de acuerdo a las características geotécnicas del medio, los mecanismos que puedan propiciar inestabilidad y la experiencia del proyectista. Los instrumentos con los que se equipará la sección de control deben estar seleccionados de acuerdo a la variable sobre la que se quiera obtener información y sea de utilidad para la verificación del comportamiento. El equipo utilizado siempre está sujeto a ambientes hostiles, por ello, su ubicación debe definirse adecuadamente para evitar que existan pérdidas o daños que afecten su funcionamiento y por lo tanto el fracaso de la sección de control instrumentada. Cording *et. al.* (1975) presenta una serie de factores a los que están expuestos los instrumentos:

- ❖ Grandes deformaciones.
- ❖ Altas presiones.
- ❖ Ambientes corrosivos.
- ❖ Diferencias de temperatura.
- ❖ Voladuras, actividades de construcción, manejo brusco.
- ❖ Vandalismo.
- ❖ Polvo, suciedad.
- ❖ Fuentes de alimentación erráticas (instrumentos eléctricos).
- ❖ Pérdida de accesibilidad a los instrumentos cuando están cubiertos.

Existen diversos factores que condicionan la selección de los instrumentos de medición, a continuación se describen los más representativos:

1. El tipo de variable que se requiere medir.
2. Tipo de ambiente al que se encuentre expuesto el equipo. En este punto, si el proyecto lo requiere se puede optar por sistemas automatizados de adquisición de datos.
3. Tiempo que se desee invertir en la toma de datos y procesamiento.
4. Economía y consideración de los costos de mantenimiento, operación, calibración y reparaciones.
5. Capacitación y habilidades del personal encargados de realizar las actividades de monitoreo.

### **2.6 Tipos de Instrumentos utilizados para la verificación de comportamiento en túneles**

Durante la selección de un instrumento de medición se debe considerar la experiencia que se ha tenido con el mismo en proyectos anteriores, así como realizar una valoración de los objetivos alcanzados y las deficiencias.



En la tabla 6 se presentan algunos de los instrumentos más comunes instalados en secciones de control para túneles construídos con máquina tuneladora del tipo EPB.

**Tabla 5** Instrumentos para el monitoreo de variables

<b>Variables a monitorear</b>	<b>Instrumento</b>
- Régimen de aguas subterráneas (presión de poro)	- Piezómetros
- Esfuerzos in situ	- Piezoceldas
- Asentamientos en superficie	- Topográficos
- Deformaciones dentro de la excavación	- Medición de convergencias (cinta extensométrica, clinómetros, Distanciómetros, topografía)
- Deformación alrededor del túnel	- Extensómetros, inclinómetros
- Esfuerzos en revestimiento y soporte	- Celdas de presión - Deformímetros
- Deformación en revestimiento primario y secundario (definitivo)	- Celdas de presión - Deformímetros para acero - Deformímetros para concreto

### 2.6.1 Piezómetros

Son instrumentos utilizados para el monitoreo de la presión de poro, dependiendo del funcionamiento y características se pueden clasificar en abiertos, cerrados, neumáticos o de cuerda vibrante, los tipos más comunes se describen a continuación:

**Abiertos:** Tienen la función de monitorear el nivel freático en terrenos altamente permeables. Consiste en una cámara piezométrica (figura 23) no sellada con bentonita o con tubos ranurados cubiertos con un filtro geotextil con el objetivo de filtrar el agua entrante.

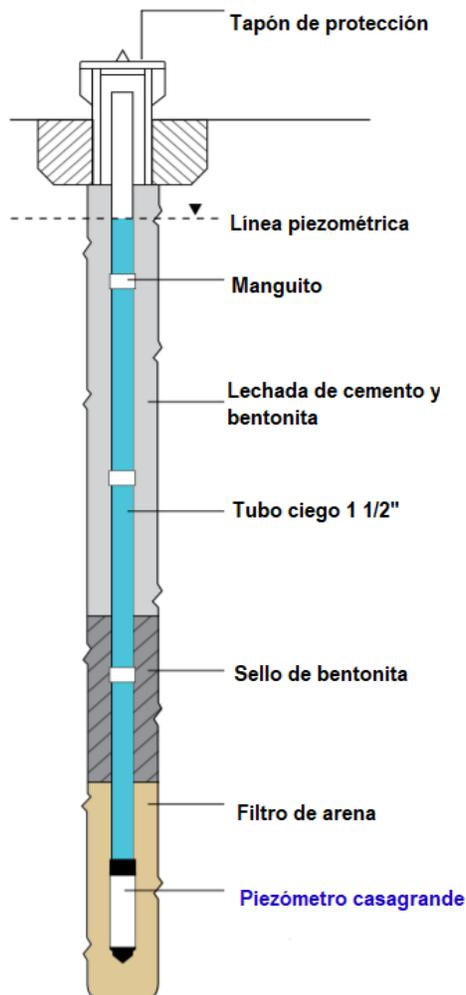


Figura 23 Piezómetro Casagrande (SISGEO, 2019)

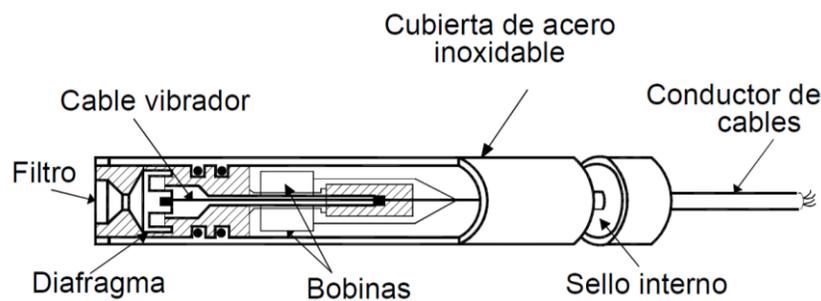
Las mediciones son tomadas con una sonda de nivel (Figura 24) la cual consiste en un cable graduado que cuando entra en contacto con el agua enciende una lámpara montada en el carrete de cable y genera una alarma para que el personal encargado de la medición registre los datos obtenidos.



Figura 24 Sonda inclinométrica (SISGEO, 2016)

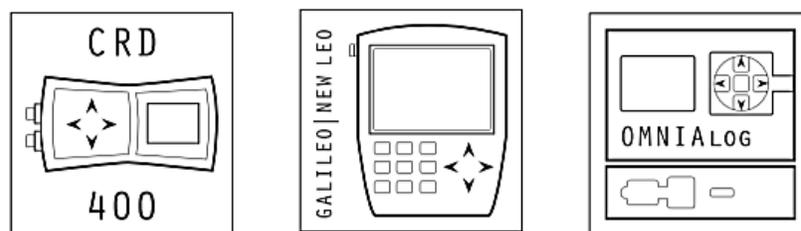
**Piezómetro de cuerda vibrante:** tienen por objetivo contribuir en la medición de la presión de poro durante un largo periodo de tiempo (figura 25), están compuestos de un diafragma de acero inoxidable con un sensor conectado a un alambre de acero o también llamado cable vibrador, de acuerdo con SISGEO (2016) el principio de funcionamiento es el siguiente:

1. Cuando la presión aumenta, la tensión del alambre decrece, y vice versa.
2. La tensión en el alambre es medible colocándolo a vibración con una serie de pulsos electromagnéticos desde una bobina.
3. El alambre posteriormente vibra primariamente a su frecuencia de resonancia natural.
4. Cuando la excitación termina, el alambre continúa a vibrar y una señal sinusoidal, a la frecuencia de resonancia, es inducida en la bobina y transmitida a la unidad de lectura (figura 26).



*Figura 25* Piezómetro de cuerda vibrante (SISGEO, 2016)

Cuentan con un filtro que permite la entrada de agua pero restringe la entrada de partículas de terreno. La utilidad de este tipo de instrumentos para la medición de la presión de poro se justifica en la vida útil y el grado de confiabilidad además de la estabilidad que puede presentarse en largos periodos de tiempo, se consideran funcionales dada la protección que tienen contra sobrevoltajes además del sellado hermético.



*Figura 26* Unidades de lectura (SISGEO, 2016)



### 2.6.2 Piezo-celdas

La piezo-celda o también llamada celda de pala (figura 27), está compuesta por dos sensores uno encargado de registrar la presión total del suelo y otro con la función de medir la presión de poro. Es utilizada como herramienta confiable para determinar el conocimiento de las condiciones in situ tales como, el estado de esfuerzos tanto en vertical como horizontal dependiendo de su instalación. De acuerdo con SISGEO (2013) son comúnmente instaladas en suelos cohesivos de grano fino, que incluyen arcillas muy suaves a rígidas.



Figura 27 Piezo-celda (RST, 2019)

El principio de operación de los sensores instalados en la piezo-celda es el de cuerda vibrante, para su instalación se realiza una perforación (figura 28) con una profundidad por debajo del nivel de instalación, si se requiere se instala una carcasa en la perforación, posteriormente se verifica la orientación de la celda antes de empujarla a su elevación final, una vez colocada se retira la carcasa y se canalizan los cables del sensor hacia la unidad de registro de datos.

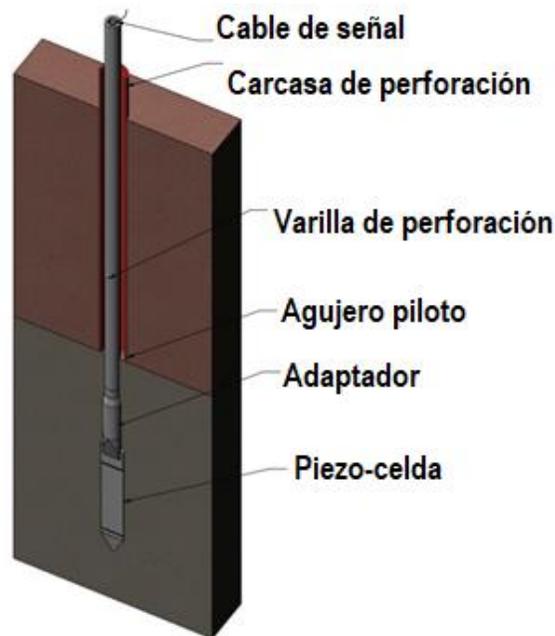


Figura 28 Esquema de instalación piezo-celda (RST, 2019)



### 2.6.3 Referencias topográficas

En túneles, la instrumentación topográfica consiste en la combinación de actividades de medición de ángulos y distancias. Se realiza mediante la utilización de equipo de precisión, estación total, dianas, prismas, miras (figura 29) colocados en las secciones de control para la obtención de información cualitativa y cuantitativa. Es utilizada para el monitoreo de la magnitud y velocidad de las deformaciones horizontales y verticales, es fundamental para tener un control geométrico a medida que avanza el procedimiento constructivo y es precisa para comprobar la sección del túnel y compararla con la sección realizada durante el diseño.



*Figura 29* Equipo necesario para auscultación topográfica (LEICA, 2019)

La metodología a seguir para la verificación del comportamiento a través de la instrumentación topográfica es la siguiente:

- ❖ Medición de ángulos en las visuales a los puntos desde la base, si hay obstrucciones a la vista se puede optar por establecer otros puntos fijos para realizar las mediciones.
- ❖ Una vez completado el ciclo de medición se verifican los resultados obtenidos y se analizan para interpretar de acuerdo al comportamiento histórico de las magnitudes obtenidas durante mediciones previas.
- ❖ Se toman las acciones preventivas y/o correctivas a favor de la estabilidad del medio.

### 2.6.4 Cinta extensométrica

Las mediciones de convergencia se obtienen por medio de la medición de los movimientos relativos entre dos puntos fijos previamente definidos sobre el soporte o revestimiento. En túneles construidos con TBM se realiza el monitoreo de convergencias en anillos conformados por dovelas, donde se colocan las cintas extensométricas o de convergencias (figura 30) las cuales son un equipo de precisión para medir diferencias longitudinales en desplazamientos y deformaciones entre dos puntos del anillo instrumentado.

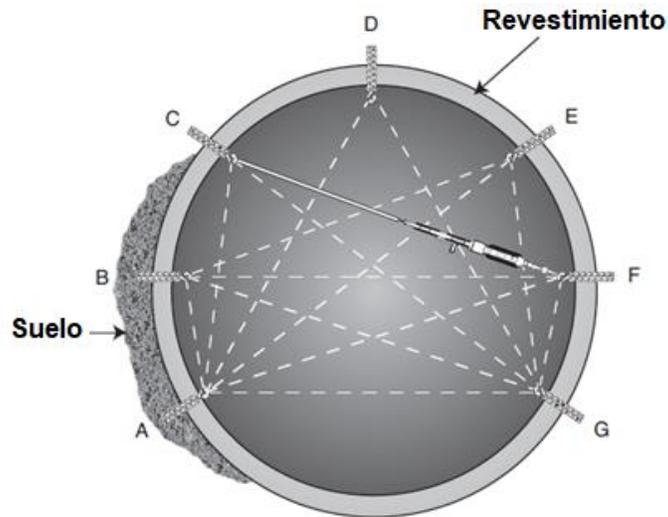


Figura 30 Monitoreo convergencias con cinta extensométrica. (Bassett, 2012)

La cinta de medición de convergencias (figura 31) se compone de:

1. Cinta milimetrada en acero inoxidable provista de hoyos cada 25mm.
2. Marco en aluminio que incorpora la cinta.
3. Calibro centesimal adaptado para el objetivo.
4. Ventana que indica el punto de medición exacto.
5. Barra para el tensionamiento de la cinta.
6. Enchufe para el bloqueo de la cinta en los hoyos.
7. Clip para parar la cinta.
8. 2 terminales roscadas o gancho para conectarse a los puntos de medición. Una integral con el instrumento, el otro fijado a la parte libre de la cinta.
9. Manivela para rebobinar la cinta.

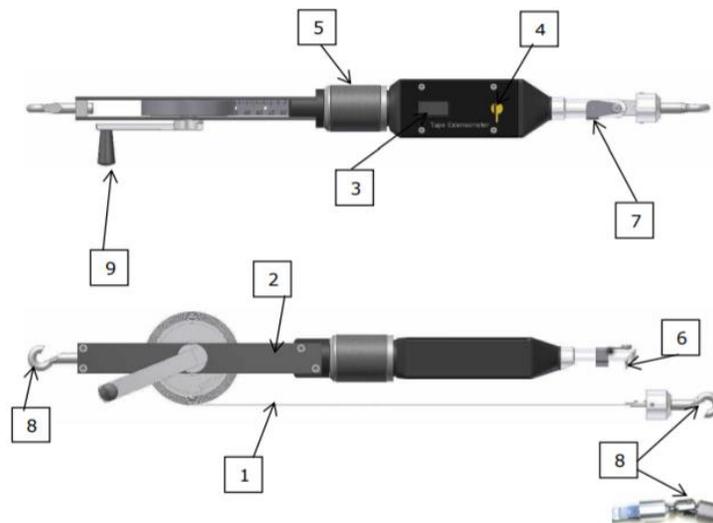


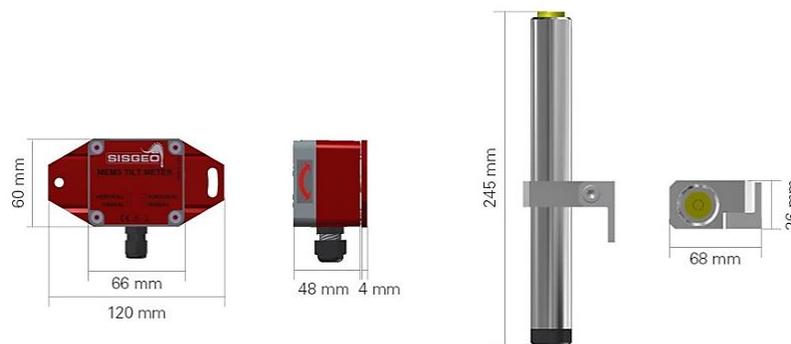
Figura 31 Componentes de una cinta extensométrica (SIGGEO, 2016)

Para realizar las mediciones se colocan pernos o ganchos con rosca sobre el revestimiento en el anillo a instrumentar, el punto de medición debe ser protegido con la finalidad de evitar que se llene de polvo o algún otro material, generalmente en la sección de control se coloca un punto de convergencia en la clave del túnel y dos en los hastiales.

La colocación de las cintas extensométricas para la medición de las convergencias debe realizarse inmediatamente después del avance de excavación para aproximar lo más posible la medida de la deformación. Los intervalos de medición deben realizarse diariamente hasta que la excavación alcance su estabilización posteriormente se realizan mediciones de comprobación para asegurar que el medio se mantenga estable. Este sistema de medición al ser económico puede replicarse en varias secciones de control a lo largo del trazo.

### 2.6.5 Medición automatizada de convergencias

Con el objetivo de verificar el comportamiento de un anillo de dovelas instalado en la zona del faldón de la tuneladora, es de gran utilidad la instalación de un sistema automatizado en la que no es necesaria la intervención de personal durante la fase de toma de datos, este sistema está compuesto por una serie de instrumentos llamados tiltmeters o clinómetros (figura 32) los cuales son un tipo de microsensory eléctrico-mecánico encadenados o en serie que se utilizan para medir los cambios de pendiente de las estructuras donde se instalan, pueden ser mono o bi-axiales, el sensor biaxial mide la inclinación en 2 planos perpendiculares.



*Figura 32* Tiltmeter o Clinómetro (SISGEO, 2019)

Una vez preparada la sección de control a instrumentar se colocan los Clinómetros en las dovelas de acuerdo a la ubicación establecida en los planos de instrumentación, posteriormente se conectan a un datalogger (figura 33) que tiene la función de registrar y almacenar los datos proporcionados por los sensores instalados en las secciones de control (figura 34).



Figura 33 Datalogger (SISGEO, 2016)

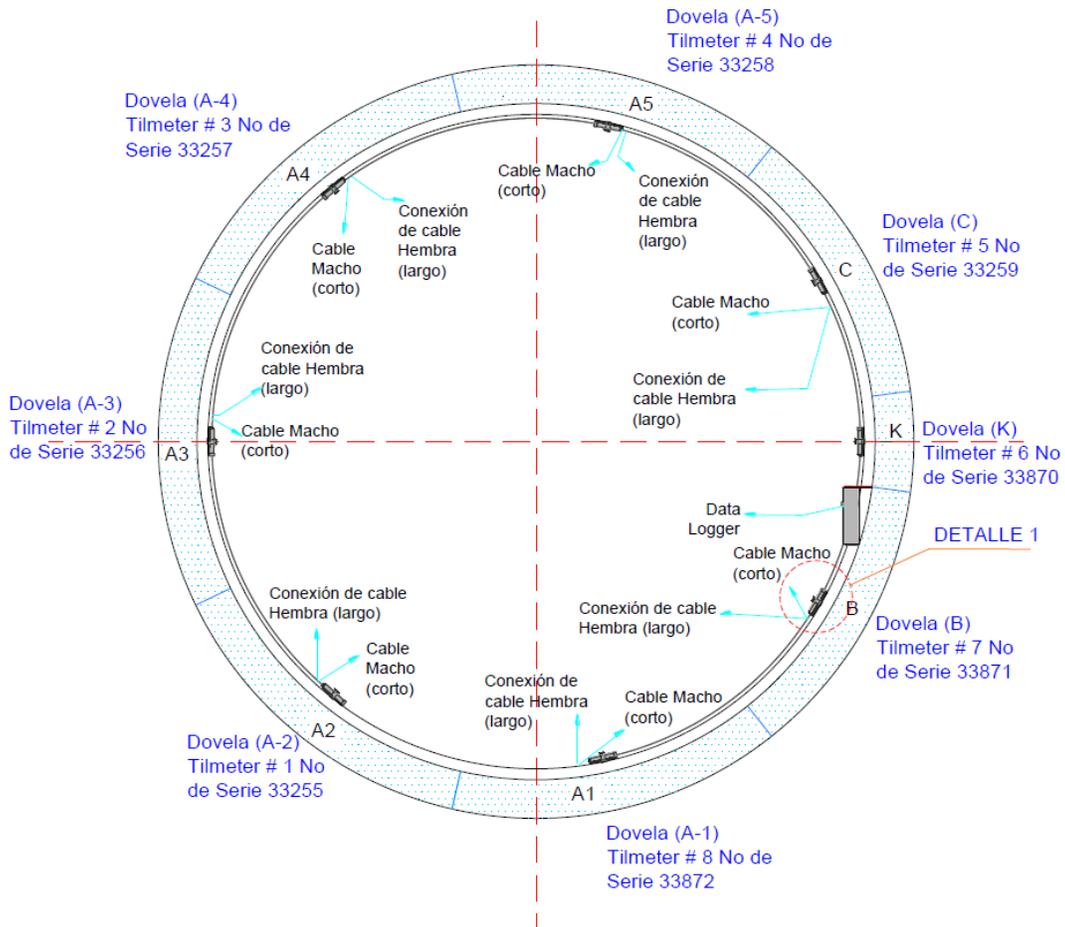


Figura 34 Sección automatizada para la medición de convergencias (González, 2016)

El procesamiento se realiza en una PC con algún software comercial y se procede a realizar el análisis para evaluar el comportamiento del anillo de dovelas instrumentado con un sistema de convergencias automatizado. La metodología a seguir para la implementación de un sistema automatizado de medición de convergencias se presenta a continuación:

- ❖ Se inicia con la identificación de la sección de control seleccionada de acuerdo a las condiciones de inestabilidad presentadas o previstas, posteriormente, se realiza la definición de los instrumentos a colocar en función de las variables que se quieran medir.
- ❖ Previo a la instalación, se verifican que los instrumentos cumplen con las especificaciones y que son adecuados para las condiciones de trabajo a la que serán sometidos y se fijan los sensores a las dovelas.
- ❖ Una vez orientados los sensores se conectan por medio de cables que a su vez están interconectados con el datalogger para el almacenamiento de la información.
- ❖ Después que la información es almacenada en el datalogger se realiza el procesamiento y análisis de la información por medio de software (figura 35) para tomar decisiones a favor de la optimización de los procesos.

La periodicidad de las actividades de medición dependerá de las condiciones de estabilidad que manifieste la estructura, el criterio general es verificar la estabilización.

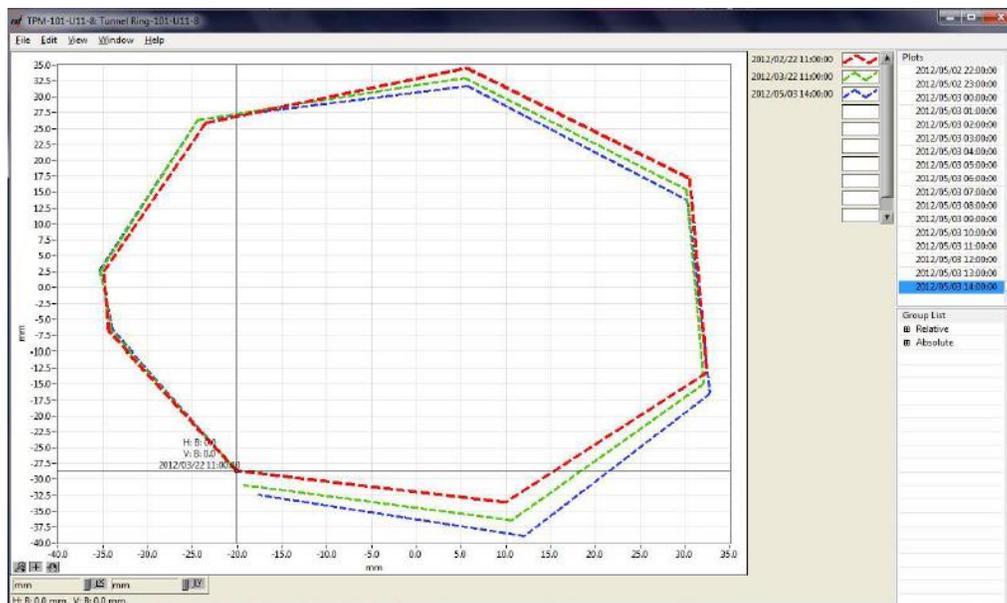


Figura 35 Procesamiento de la información en software loggernet (Fierro, C. 2018)

## 2.6.6 Distanciómetros

Una forma de monitorear las deformaciones al interior del túnel de forma sencilla es mediante un equipo llamado distanciómetro (figura 36) el cual cuenta con un láser y permite medir la longitud del diámetro del túnel y verificar si existen variaciones que indiquen una deformación de la estructura.



Figura 36 Distanciómetro láser (LEICA, 2019)

La metodología para efectuar las mediciones, del distanciómetro es el siguiente:

1. Primeramente se deben ubicar en el revestimiento las zonas o secciones de anillo de dovelas en donde se requiere conocer la longitud del diámetro, generalmente esto se decide de acuerdo a condiciones de inestabilidad que se puedan presentar a lo largo del trazo del túnel.
2. Una vez definidos los anillos de dovelas a monitorear se realiza una marcación sobre los segmentos de dovelas alineados al diámetro horizontal del túnel.
3. Posteriormente se coloca el distanciómetro en el punto y de forma perpendicular a la dovela (figura 37) se toma la medida hacia el otro extremo donde se encuentra el punto de referencia para el láser.
4. Para finalizar, se toma la lectura y se verifica el comportamiento del diámetro horizontal del túnel en el anillo seleccionado.

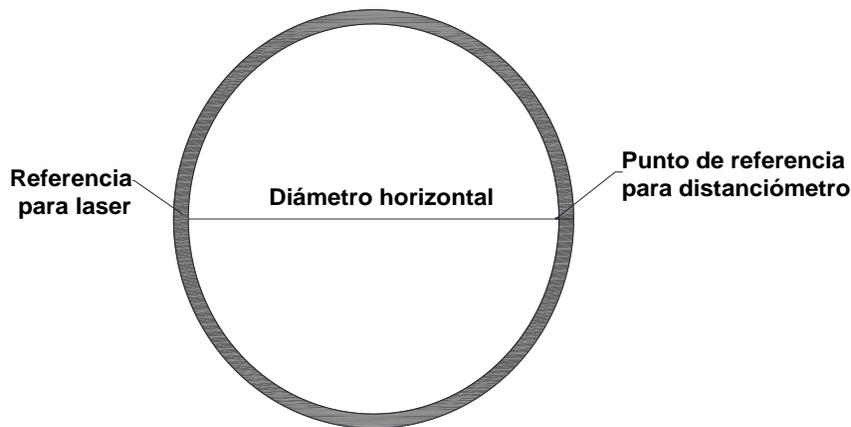


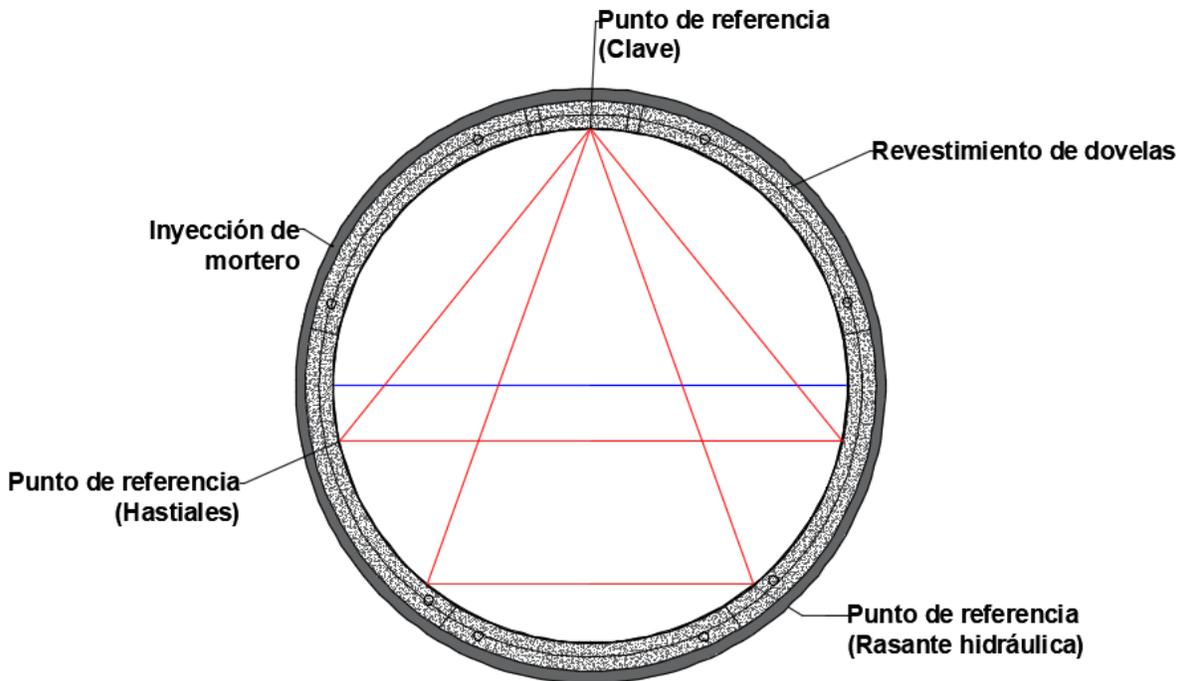
Figura 37 Metodología de mediciones diametrales con distanciómetro

### 2.6.7 Convergencias topográficas

La medición de convergencias por medio de métodos topográficos representa una herramienta sencilla para monitorear el comportamiento del túnel durante la construcción, (Figura 38), son útiles para comprobar las hipótesis de diseño y verificar que las



deformaciones se encuentran dentro de los umbrales preestablecidos y no representa riesgos a la estabilidad.



*Figura 38* Medición topográfica de convergencias

La metodología de medición es la siguiente:

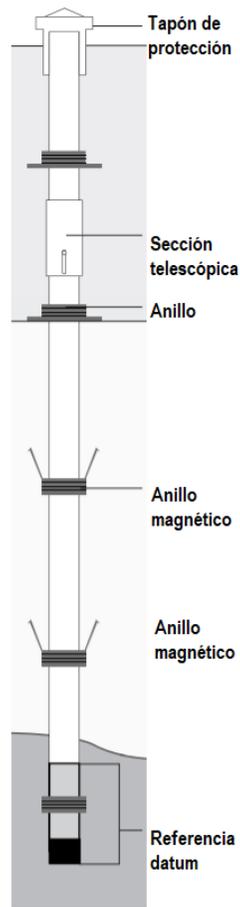
1. Se establecen las secciones de control a monitorear, estas se definen de acuerdo a las condiciones que presenten o puedan presentar problemas de inestabilidad durante el desarrollo de los procedimientos constructivos.
2. Se colocan mini prismas en hastiales, clave y bóveda en el revestimiento ya sea primario (segmentos de dovelas) o secundario.
3. Con estación total se realiza la medición de la distancia entre cada punto y se procesa para definir la deformación existente en el túnel y así, tomar acciones preventivas y/o correctivas a favor de la estabilidad.

### 2.6.8 Extensómetros

Son instrumentos empleados para la medición de movimientos a distintas profundidades y en distintos puntos, en túneles tienen como finalidad medir las deformaciones que se puedan presentar alrededor de la estructura.

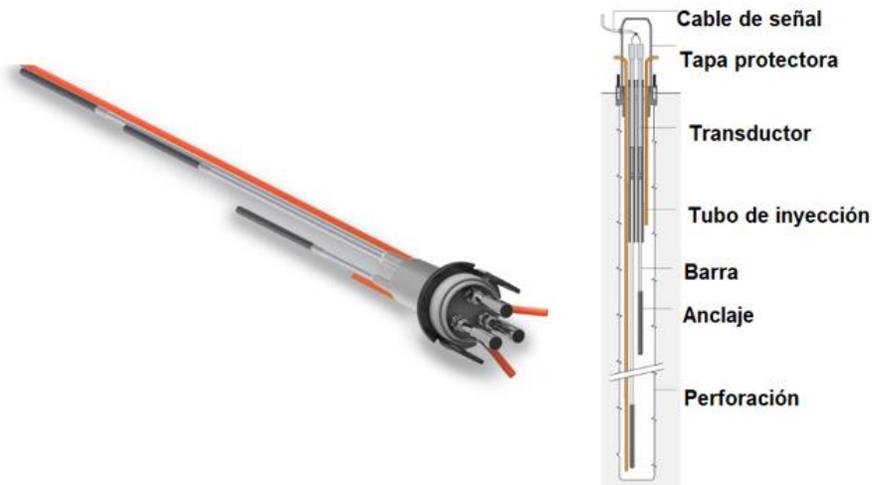


**Extensómetro magnético:** constan de un tubo corrugado externo, anillos magnéticos fijados externamente a un tubo de acceso en el suelo donde se prevé pueda existir alguna deformación. El principio de operación es el siguiente: el tubo de acceso se inserta en la perforación junto con los anillos magnéticos los cuales se mueven junto con el suelo circundante a lo largo del eje del tubo, una vez instalados en la perforación se acoplan con el suelo circundante mediante una lechada en el anillo entre el tubo y la pared de la perforación (figura 39), la obtención de lecturas se realiza mediante una sonda que baja a la parte inferior del tubo de acceso, esta sonda localiza los anillos magnéticos emitiendo una señal y luz en el carrete al exterior.



*Figura 39* Extensómetro magnético (SISGEO, 2019)

**Extensómetro de barra:** La utilización de extensómetros de barras (figura 40), permiten evaluar la extensión de la zona de influencia alrededor de un túnel o las deformaciones que se pudieran presentar en cimientos y estructuras vecinas por el desarrollo de los procedimientos constructivos, el extensómetro consta de barras de acero inoxidable protegidas con tubería PVC.



*Figura 40* Extensómetro de barras (SISGEO, 2019)

De acuerdo con SISGEO (2019) el extensómetro se inserta en la perforación realizada previamente para después realizar la inyección de la lechada y fijar los anclajes al suelo permitiendo el libre movimiento de cada barra. Los movimientos relativos entre los anclajes y la cabeza de referencia se pueden medir manualmente o por medio de monitoreo remoto.

### 2.6.9 Inclinómetros

Son instrumentos que miden la inclinación mediante la instalación de una tubería o carcasa instalada en una perforación, en túneles, es utilizado para la medición de la deflexión en el suelo por encima de la clave y en caso de existir, también permite la medición por debajo de los cimientos de los edificios cercanos a la zona de influencia del túnel.

La metodología de medición es el siguiente:

1. Se realiza la definición y preparación del sitio donde se tomarán las lecturas con el instrumento.
2. Una vez realizada la perforación se coloca tubería ABS y se construye el registro para un correcto cuidado y ubicación del sitio donde se tomarán las mediciones.
3. Por medio de la tubería preinstalada en la perforación se desliza la sonda inclinométrica a través de las ranuras longitudinales de la cara interna (figura 41).

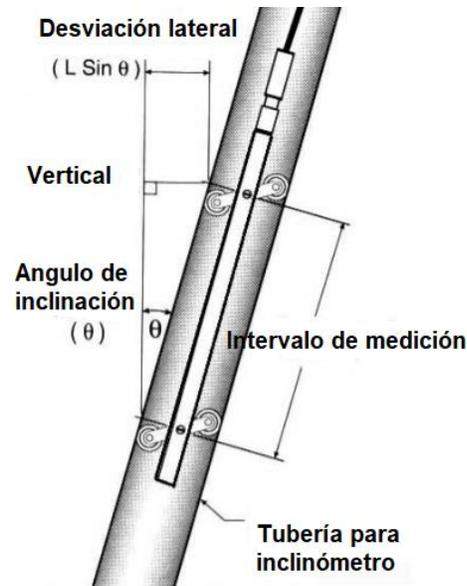


Figura 41 Partes representativas de inclinómetro (Suárez, 2012)

4. Las mediciones se realizan a lo largo de una orientación específica de la carcasa desde la parte inferior hasta arriba, una vez realizada la medición en una dirección se puede volver a medir en una forma perpendicular a la tubería y así tener la medición en dos direcciones perpendiculares.
5. El procesamiento y visualización de los datos obtenidos por la sonda inclinométrica se realiza por medio de tecnología MEMS y con ayuda de software que permite la evaluación de los desplazamientos.

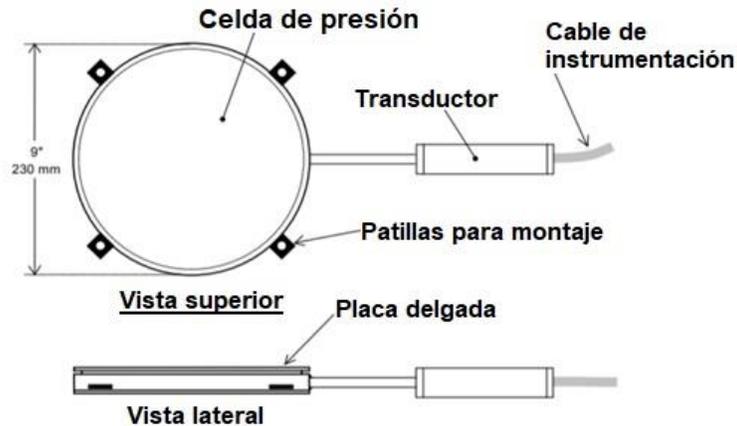
### 2.6.10 Celda de presión

La celda de presión tiene la finalidad de medir esfuerzos en roca, suelos, o en el contacto suelo–concreto, en túneles construidos con dovelas proporciona información sobre cualquier aumento de carga en el revestimiento. Está compuesta por dos placas (figura 42) una es gruesa y está diseñada para soportar la superficie externa de la estructura de manera que se evite la flexión de la celda, la otra placa es delgada y reacciona a la presión del suelo. La instalación se realiza antes del colado de las dovelas la ubicación y el número de instrumentos a colocar dependerá del plan de monitoreo diseñado para la sección de control a analizar.

Previamente a la colocación del equipo se realizan una serie de actividades entre las que destacan:



- ❖ Identificar que el área de acero donde se fijará la celda esté libre de grasa, corrosión o algún otro material, también se debe identificar que el acero de refuerzo esté bien colocado.
- ❖ Se deben de realizar pruebas de verificación del instrumento para garantizar que esté en óptimas condiciones de funcionamiento.



*Figura 42* Componentes de una celda de presión (adaptada de: GEOKON, 2016)

#### Para la instalación:

1. Se fija el transductor con alambre en el acero de refuerzo (figura 43).
2. Una vez que se ha colocado de manera correcta la celda, se procede a cubrir con cinta de aislar la cara sensible del instrumento, con la finalidad de evitar daños en el colado.
3. Posteriormente se canalizan los cables hacia la caja galvanizada procurando que no vaya a interferir o ser dañada por la cimbra.



*Figura 43* Celda de presión instalada en armado de dovola (ICA, 2012)



### 2.6.11 Deformímetro para acero

Es un instrumento de medición de deformaciones en elementos estructurales, revestimiento, soportes etc. a largo o corto plazo, se fijan por medio de soldadura y las deformaciones se miden usando el principio de cuerda vibrante (figura 44).

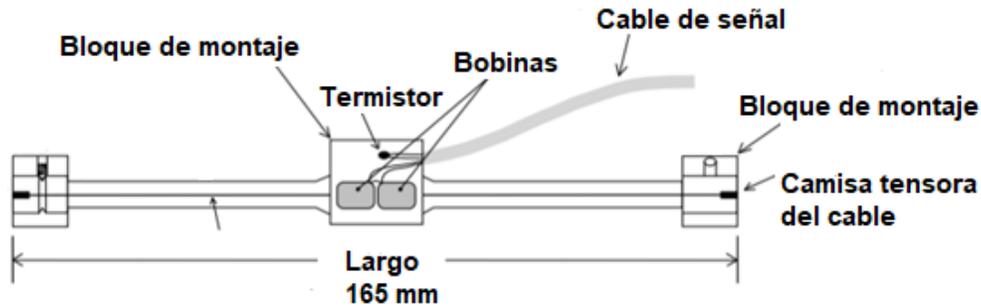


Figura 44 Deformímetro para acero modelo 4000 (GEOKON, 2016)

La instalación de los deformímetros para acero (figura 45) en el caso del revestimiento para túneles se coloca en las dovelas antes de que estas entren en el proceso de colado, dependiendo del plan de instrumentación se decidirá la cantidad de deformímetros a instalar.

El proceso para su colocación se detalla a continuación:

1. Definir por medio del plano estructural la ubicación de los deformímetros en el armado de la dovela.
2. Limpiar la zona y mantenerla libre de polvo grasa o cualquier otro material que pueda afectar las mediciones.
3. Se realizan pruebas preliminares de verificación del instrumento
4. Realizar el desbaste de la zona del acero de refuerzo donde se colocará el instrumento para posteriormente colocar las fichas de montaje del deformímetro.
5. Se fijan los bloques de montaje del deformímetro por medio de arco soldado
6. Una vez instalado el deformímetro se procede a la canalización de los cables transmisores de información.

Es preferible instalar los deformímetros en piezas de acero, que se encuentren todavía en una condición de sin carga, es decir, antes de su montaje en la estructura. De esta manera las lecturas iniciales corresponden a una carga cero, de otra manera, si la pieza se encuentra bajo carga las lecturas iniciales corresponderán a algún nivel de carga desconocido. Existen factores que pueden afectar el deformímetro y el correcto funcionamiento, para impedir el daño es necesario que el instrumento quede protegido contra (corrosión, luz solar, cambios de temperatura, daño mecánico, rayos).



De acuerdo con el manual GEOKON (2018) las formas de protección son las siguientes:

- ❖ **La protección contra la luz solar directa y cambios rápidos en la temperatura ambiente:** se logra cubriendo los deformímetros con una capa de material aislante. Esto puede ser importante debido a que el deformímetro se puede calentar o enfriar mucho más rápido que el acero subyacente y esto puede dar bastantes lecturas falsas. También, se debe evitar el manejo excesivo del deformímetro antes de tomar las lecturas cero.
- ❖ **La protección contra el daño mecánico:** es importante y se puede realizar con cubiertas protectoras especiales están fabricadas de chapa de acero en la forma de un canal.
- ❖ **Protección de cables y conectores:** El cable debe estar protegido de daño accidental al mover el equipo o por fragmentos de rocas, esto se logra mejor poniendo el cable en tubos protectores flexibles y colocando el tubo protector en un lugar lo más seguro posible. Los tubos protectores se pueden conectar por medio de conectores de unión a las cubiertas protectoras.



Figura 45 Deformímetro para acero (GEOKON, 2018)

### 2.6.12 Deformímetro para concreto

Son instrumentos que funcionan por medio del principio de cuerda vibrante y están diseñados para su empotramiento directo y medir las deformaciones causadas por las variaciones de los esfuerzos en el concreto, (figura 46) están compuestos de transductores ubicados en un tubo de pvc con bordes de acero en cada extremo. Los bordes conectados a los transductores tienen la función de convertir el desplazamiento axial del instrumento en una señal eléctrica, la deformación dentro del concreto hará que los dos bloques finales se muevan uno con respecto al otro, la tensión en el cable entre los bloques cambiará en consecuencia, lo que alterará la frecuencia de resonancia del cable.

Estos instrumentos deben ser colocados en el armado de las dovelas antes del colado, la ubicación y el número de éstos dependerá del plan de auscultación diseñado para la sección de control donde serán instalados.

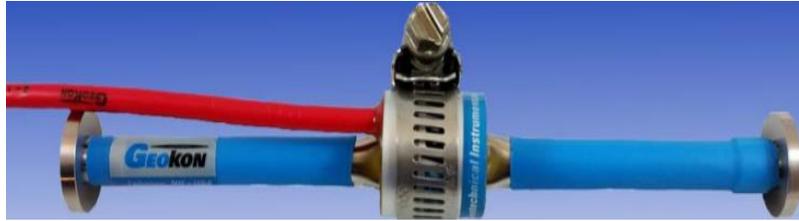


Figura 46 Deformímetro para concreto (GEOKON, 2016)

El procedimiento de instalación se detalla a continuación:

1. Previamente a la instalación del deformímetro se ubica la zona del armado de la dovela donde se colocará, además de verificar que se encuentre libre de grasa, suciedad o algún resto de material.
2. Se realizan pruebas de verificación del instrumento.
3. Para la instalación, se empalma la bobina al tubo protector y se sujeta con alambre recocado para que quede unida al acero de refuerzo (figura 47).
4. Posteriormente se procede a realizar la protección del instrumento para evitar que el concreto pueda dañarle.
5. Se realiza la canalización de los cables transmisores de datos hacia la caja receptora

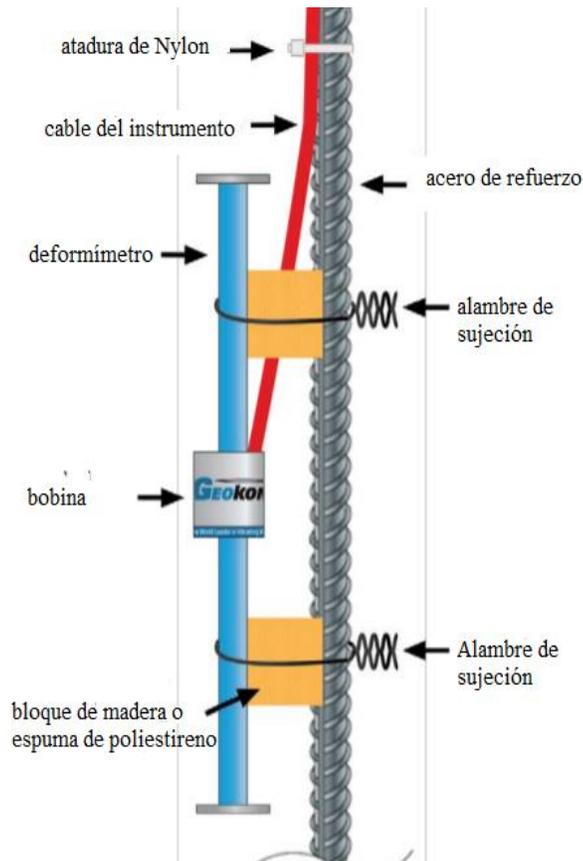


Figura 47 Instalación de deformímetro (adaptada de GEOKON, 2016)





---

## CAPÍTULO TERCERO

### Verificación del comportamiento

#### 3. Criterios generales

De acuerdo con la Real Academia de la Lengua Española (RAE), verificar es: comprobar o examinar la verdad de algo, en túneles, la verificación del comportamiento tiene como objetivo:

- ❖ Evaluar de una manera eficiente las condiciones a las que se encuentra sujeta la estructura.
- ❖ Observar las tendencias de estabilidad a medida que avanza la construcción.
- ❖ Comprobar las hipótesis con las que se realizaron los diseños y compararlas con el comportamiento real del túnel.
- ❖ Proporcionar información que ayude a la optimización de los procesos constructivos.

La verificación del comportamiento se realiza por medio de un proceso, el cual se describe a continuación:

1. Primero se realiza la recopilación de información obtenida por los instrumentos de medición colocados en las secciones de control.
2. Una vez realizada la recopilación de datos se procesa la información.
3. Se realiza el análisis e interpretación con la finalidad de tener una idea de las tendencias de comportamiento.
4. Se toman decisiones y ejecutan medidas que ayuden a garantizar la seguridad de la estructura y la optimización de los procesos constructivos.

Una vez instalados los instrumentos, se elaboran los informes de seguimiento por medio de gráficos y reportes donde se presenta la evolución de las variables medidas con la finalidad evaluar la estabilidad del túnel y la respuesta del medio, en esta etapa se pueden detectar rápidamente situaciones que requieran acciones correctivas urgentes.

Posteriormente a la evaluación preliminar del comportamiento, se comparan los valores recopilados por los instrumentos con los previstos en el diseño, esto con la finalidad de verificar en qué rango de los umbrales de control se encuentran las mediciones y qué acción procede según sea el caso. Las actividades de recopilación de información, procesamiento, interpretación y presentación de resultados para la toma de decisiones constituyen la parte medular de un programa de monitoreo.



### 3.1 Verificación del comportamiento en la etapa operativa

En ocasiones, como consecuencia de una exploración geológica deficiente se presentan cargas inesperadas que actúan sobre el revestimiento, además de filtraciones de agua que generan un incremento de cargas provocando problemas de inestabilidad. En relación al revestimiento, si las cargas exceden los valores de diseño se pueden generar deformaciones dañando la estructura, provocando el colapso o disminuyendo su funcionalidad y por consiguiente, su vida útil, en este sentido, de acuerdo a los criterios de diseño empleados se hace necesario el monitoreo de ambos revestimientos (primario y secundario) del túnel cuando se encuentra en servicio.

La verificación del comportamiento en la etapa operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales tiene como objetivo: evaluar la calidad de los procedimientos constructivos y materiales involucrados en el desarrollo de la obra, además representa una herramienta de respaldo legal tanto para clientes como para contratistas ante cualquier eventualidad que se pueda presentar cuando el túnel se encuentre en operación.

#### 3.1.1 Implicaciones Técnicas

El monitoreo de la estructura una vez que han finalizado los procedimientos constructivos representa una herramienta útil que aporta diversos beneficios técnicos, dada la precisión e importancia de la información que proporciona permite identificar el comportamiento y las tendencias presentadas a largo plazo durante la vida útil. A continuación, se presentan algunas de las implicaciones técnicas más importantes que tiene la implementación de un sistema de monitoreo para la verificación del comportamiento durante la etapa operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales construido con máquina tuneladora del tipo EPB.

- ❖ La instrumentación durante la etapa operativa tiene como fin conocer el comportamiento del túnel durante un periodo de la vida útil y detectar oportunamente cualquier anomalía que se presente una vez finalizados los trabajos de construcción.
- ❖ La medición de las deformaciones durante la etapa operativa permite verificar la capacidad de respuesta de los revestimientos (primario y secundario) y asegurarse que las presiones sobre ellos se encuentran estables con un margen de seguridad adecuado que garantice el correcto funcionamiento.
- ❖ Permite anticipar el comportamiento de la estructura en un periodo de mediciones a largo plazo.



- ❖ Se pueden comparar los parámetros de diseño con los reales y analizar la influencia de las condiciones agresivas producto del flujo de aguas residuales y los gases que generan.
- ❖ El monitoreo de las deformaciones del terreno en torno al túnel proporciona alertas en caso de que se sobrepasen los umbrales de control establecidos y se comprometa la estabilidad del túnel, por ello, es útil para la implementación de acciones preventivas y/o correctivas con la finalidad de mitigar cualquier situación que pueda representar un riesgo.
- ❖ La medición de las deformaciones proporciona mayor certidumbre a las partes involucradas en el diseño y construcción del túnel.

### 3.1.2 Metodología para la verificación

#### Recopilación

La recopilación de la información proporcionada por los instrumentos de medición puede desarrollarse en forma manual o automatizada y siempre debe llevarse a cabo por ingenieros especialistas capacitados para las tareas de recolección de datos, el personal encargado de realizar esas tareas debe tener habilidades como: el trabajo en equipo, habilidad computacional, debe ser una persona crítica y observadora.

**Manual:** Cuando los datos se recopilan manualmente es necesario contar con registros de campo donde se graban las lecturas nuevas y las realizadas previamente. Como apoyo para el registro de la información se deben elaborar para cada proyecto e instrumento formatos de registro que deben incluir:

- ❖ Nombre del proyecto.
- ❖ Tipo de instrumento.
- ❖ Fecha, hora, personal encargado de la medición, unidad de lectura.
- ❖ Comentarios, observaciones por ejemplo (clima, temperatura, avance del proceso constructivo).

La realización de las lecturas iniciales en los instrumentos sigue 4 pasos fundamentales:

1. Pruebas de aceptación.
2. lecturas diarias (hasta que se logre la estabilidad).
3. Lecturas iniciales formales.
4. Lecturas diarias para verificar la estabilidad.



Es recomendable que el contratista y el propietario realicen en conjunto las lecturas iniciales y se establezcan los valores apropiados para evitar disputas.

**Automatizada:** En el caso de que los datos se recopilen de forma automatizada, se debe seleccionar adecuadamente el equipo de adquisición de datos (datalogger), este se usa para registrar y almacenar los datos de salida de uno o más sensores interpretando las señales eléctricas enviadas y convirtiéndolas a unidades para almacenarlos en alguna memoria flash moderna o transmitirlos por medio de telemetría. En la tabla 6 se presentan algunas ventajas y desventajas en la recopilación de datos de forma manual o automatizada.

**Tabla 6** *Ventajas y desventajas de los distintos tipos de recopilación de datos*

<b>Método de recolección de datos</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Manual</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generalmente simple de realizar y no requiere un alto nivel de experiencia</li> <li>- El personal ya está en el sitio para observaciones visuales regulares.</li> <li>- La calidad de los datos puede ser evaluada a medida que se recopilan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabajo intensivo para la recopilación y reducción de datos.</li> <li>- No es práctico recoger datos frecuentes.</li> <li>- Puede ser impráctico para sitios remotos donde el personal no está frecuentemente en el sitio</li> </ul>
<b>Recopilación automatizada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recopilación de datos frecuente y basada en eventos.</li> <li>- Recopilación de datos consistente y manejo electrónico de datos.</li> <li>- Visualización en tiempo real y notificaciones (24/7).</li> <li>- Permite una evaluación rápida de los resultados del monitoreo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere un mayor nivel de experiencia para instalar.</li> <li>- Mayor costo de instalación y mantenimiento periódico.</li> <li>- Se pueden pasar por alto o menospreciarse las inspecciones de rutina en campo.</li> </ul>



### Procesamiento

El principal objetivo del procesamiento es proporcionar herramientas que permitan hacer una evaluación acerca de los fenómenos y mecanismos que puedan comprometer la estabilidad de los túneles y de esta manera ejecutar acciones que proporcionen mayor seguridad durante el avance del proceso constructivo, una vez que estos son finalizados y cuando la estructura se encuentre en operación. El procesamiento también tiene como objetivo realizar un resumen de los datos y tendencias del comportamiento para compararlo con lo previsto, debe estar a cargo de personal con experiencia en el área de instrumentación geotécnica y túneles, además es necesario que posea habilidades computacionales y de manejo de software especializado del área.

El procesamiento se ha beneficiado de los avances tecnológicos, hoy en día las TIC han propiciado el desarrollo de sistemas automáticos que permiten el procesamiento de mayor cantidad de datos en el menor tiempo posible, cabe recalcar que el juicio ingenieril debe estar presente para una correcta interpretación de los resultados que arroje el procesamiento automático de cualquier tipo de información. Dunicliff (1993) presentó algunas ventajas y desventajas que ofrecen los sistemas automatizados de procesamiento (tabla 7).

**Tabla 7** *Ventajas y desventajas del uso de sistemas automatizados (Adaptada de Dunicliff J. 1993)*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Las computadoras proporcionan un procesamiento rápido y preciso de datos.</li><li>• Fácil acceso a los datos almacenados.</li><li>• Se pueden representar los resultados de forma gráfica y en tablas con mayor rapidez.</li><li>• No se requiere personal especializado para tareas rutinarias de procesamiento de datos informáticos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• En ocasiones se suele reemplazar el juicio de un ingeniero por un programa informático.</li><li>• Al ser un procesamiento automático las correlaciones no se realizan tomando en cuenta las observaciones visuales del lugar donde se ha instrumentado.</li><li>• Los programas informáticos deben pasar por un grado estricto de comprobación.</li></ul>



## Interpretación

El propósito de un programa de monitoreo en túneles es la interpretación del comportamiento de las estructuras y detectar los cambios en el medio para tomar decisiones inmediatamente, la interpretación debe correlacionar las lecturas de los instrumentos de medición con todos los factores que intervienen en el ambiente donde se desarrollan las lecturas. El ingeniero especialista en geotecnia debe ser el encargado de elaborar los borradores, tablas, resúmenes y gráficas que presentarán la información obtenida por los instrumentos de medición durante el proceso de manejo de datos.

Para que se realice la interpretación de la información, el personal encargado de la recopilación de los datos debe proporcionar una serie de información al personal de ingeniería encargados del procesamiento e interpretación, entre las más comunes destacan:

- ❖ Lecturas iniciales.
- ❖ Registros de datos de campo.
- ❖ Información sobre los factores que pueden influir en los datos medidos.
- ❖ Observaciones visuales del comportamiento.

El proceso de interpretación de los datos generados por la implementación de un sistema de monitoreo debe ser efectuado por personal capacitado, con experiencia, sensibilidad y una amplia capacidad de análisis, en general, el proceso se inicia con la elaboración de un borrador en el cual se establecen los criterios a considerar para la interpretación de los datos obtenidos previamente durante la etapa de recopilación, en este sentido, es necesario establecer periodos de análisis.

Dadas las condiciones de incertidumbre que se tienen en el desarrollo de procedimientos constructivos y aún en la etapa operativa de las estructuras subterráneas es necesario realizar interpretaciones provisionales que permitan conocer el comportamiento inmediato ante cualquier eventualidad, esta interpretación deberá ser complementada o modificada hasta la obtención de nuevos datos u observaciones que ayuden a tener un análisis más preciso.

La información se presenta por medio de gráficos, tablas, modelos, que ayuden a comprender la situación de la estructura y su comportamiento real vs previsto, una vez realizado esto, se comunican los resultados de la interpretación de una manera entendible tanto como para ingenieros involucrados en labores de monitoreo, contratistas o gerentes administrativos del proyecto. En la figura 48 se presenta el proceso necesario para llevar a cabo una correcta interpretación de los datos obtenidos por medio de un programa de instrumentación.

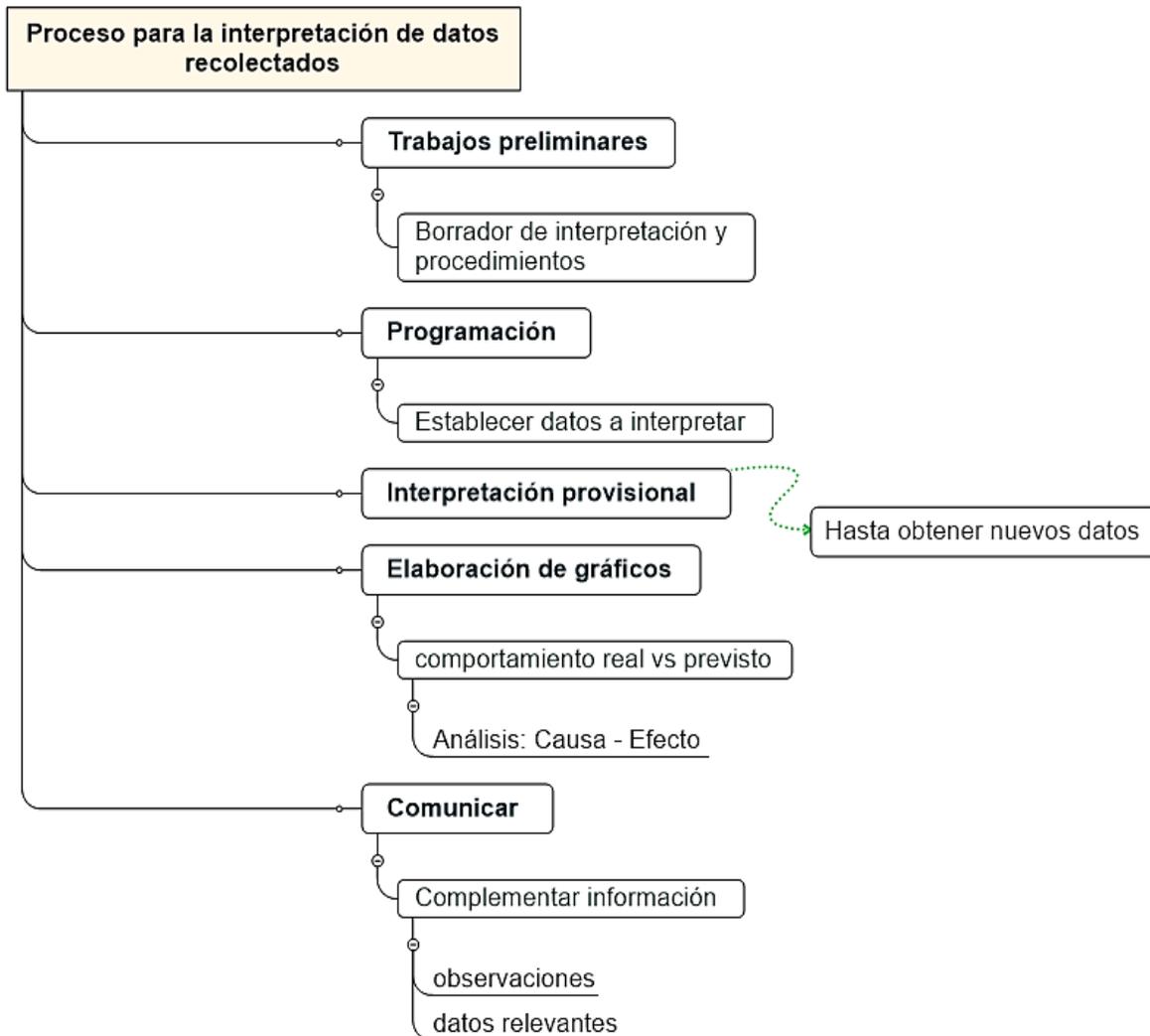


Figura 48 Proceso para la interpretación de los datos de un programa de monitoreo

### 3.1.3 Automatización de la instrumentación en túneles

Con el avance de la tecnología se han desarrollado sistemas de adquisición de datos automatizados, los cuales han contribuido a facilitar la recolección de información que generan los instrumentos colocados en las secciones de control. El monitoreo continuo en túneles tiene especial importancia cuando se requiere conocer el comportamiento de la estructura durante la etapa de explotación u operativa, en este sentido, representan la mejor opción para la verificación del comportamiento y el alertamiento de condiciones que puedan comprometer la seguridad y funcionalidad del proyecto.



Los sistemas automatizados proporcionan información inmediata y relevante a proyectistas, constructores, contratistas y usuarios con acceso permitido vía web quienes de forma simultánea pueden verificar en tiempo real el comportamiento al estar al tanto de lo que ocurre al interior del túnel, Dunnicliff (1993) presenta algunas de las ventajas y limitaciones que proporcionan la implementación de sistemas automatizados en el monitoreo geotécnico (tabla 8).

**Tabla 8** *Ventajas y desventajas de la automatización (Dunnicliff J. 1993)*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lecturas más frecuentes.</li> <li>• Recuperación de datos desde lugares remotos o inaccesibles.</li> <li>• Transmisión instantánea de datos a larga distancia, mediante telemetría.</li> <li>• Mayor sensibilidad y precisión en la lectura.</li> <li>• Mayor flexibilidad en la selección de los datos requeridos.</li> <li>• Medición de fluctuaciones rápidas, pulsaciones y vibraciones.</li> <li>• El almacenamiento electrónico de datos está en un formato adecuado para el análisis y la impresión por computadora directos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustitución de un observador experto por un elemento de hardware.</li> <li>• Posibilidad de generar un exceso de datos y aceptación ciega de datos.</li> <li>• Alto costo inicial y a menudo alto costo de mantenimiento.</li> <li>• Actualmente, a menudo se requieren algunos componentes personalizados diseñados que no están probados.</li> <li>• Mantenimiento por personal especializado.</li> <li>• Necesidad de una fuente de energía confiable y continua.</li> <li>• Susceptibilidad a los daños causados por las condiciones climáticas y la actividad de construcción.</li> </ul>

Los sistemas de instrumentación automatizados están compuestos por una serie de elementos de adquisición de datos y almacenamiento que en conjunto permiten procesar y visualizar el comportamiento de las estructuras geotécnicas. A continuación se presentan los componentes más relevantes de un sistema automatizado para túneles:



## Datalogger

Es un equipo que permite la adquisición de datos, funciona con batería, están diseñados para un monitoreo confiable, actualmente existen diversos tipos, por ejemplo, los del tipo inalámbrico (figura 49) que contribuyen a una recolección rápida de los datos proporcionados por los sensores de medición, por otro lado, existen los datalogger de canal simple los cuales pueden ser utilizados en ubicaciones aisladas o para instrumentos con registro de datos frecuentes. Los datalogger de cuerda vibrante (figura 50), se conectan a cualquier sensor que utilice este principio de operación (piezómetros, deformímetros, medidores de juntas).



Figura 49 Datalogger tipo inalámbrico (RST instruments, 2019)



Figura 50 Datalogger sensor de cuerda vibrante simple (RST instruments, 2019)

## Multiplexor

Son equipos compuestos por circuitos con diversas entradas y salida única (figura 51), en conjunto con el datalogger monitorea numerosos sensores para la evaluación del comportamiento.



Figura 51 Equipo multiplexor (RST instruments, 2019)



## Software de visualización

Actualmente existen diversos paquetes de software que permiten realizar el procesamiento y visualizar la información recopilada por los sensores a través de todo el sistema automatizado instalado en el túnel. Un ejemplo de este tipo de programa informático es Geoviewer el cual es un visor de datos que proporciona una interfaz de visualización flexible (figura 52) de una gran cantidad de datos adquiridos por los sistemas automáticos, el programa se ejecuta en Windows y opera en una plataforma LABVIEW™ con diversas utilidades como la visualización de eventos en línea y acceso por medio de dispositivos móviles.

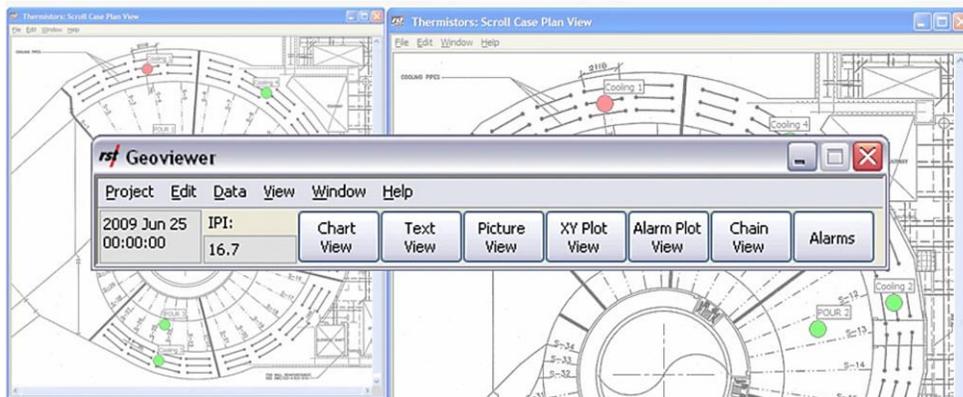


Figura 52 Interfaz de usuario Geoviewer (recuperado de: [www.geotechpedia.com](http://www.geotechpedia.com))

De acuerdo con RST (2019) los datos de Geoviewer tienen su origen en los sistemas de adquisición de datos los cuales se transmiten mediante medios específicos hasta archivos que se encuentran en el servidor del programa, otra función es el alertamiento de inestabilidad mediante niveles de alarma.

El proceso general para la implementación de un sistema automatizado consiste en lo siguiente:

- ❖ Se define e instala el sensor de acuerdo al plan de instrumentación.
- ❖ El sensor es conectado al multiplexor el cual tiene la función aumentar el número de sensores a monitorear.
- ❖ Una vez conectados el sensor y el multiplexor, se lleva la señal a un convertidor para posteriormente ingresarla al datalogger el cual tiene la función de almacenar la información.
- ❖ Por medio de dispositivos de telemetría se transmiten los datos a una computadora para que con la ayuda de un software especializado se puedan visualizar e interpretar los datos del monitoreo.



### 3.1.4 Monitoreo satelital para la verificación del comportamiento

Con la innovación tecnológica de los últimos años, el monitoreo satelital ha sido una herramienta eficaz para el analizar con precisión milimétrica desplazamientos en la superficie de la tierra. Para la verificación del comportamiento durante la etapa operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales, la utilización de sistemas satelitales para el monitoreo representan una solución innovadora para medir el comportamiento del túnel desde el espacio.

El principio de funcionamiento del monitoreo satelital se basa en el análisis y utilización de una gran cantidad de imágenes de satélite útiles para generar información acerca de la deformación en la superficie producida por los efectos propios del tuneleo, la generación de mapas de deformación se realiza mediante las diferencias existentes en las ondas de radar que regresan al satélite.

#### ❖ Tecnología INSAR

La tecnología INSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) corresponde a un sistema radar de satélite útil para el monitoreo en túneles, representa una herramienta innovadora y eficiente debido a su precisión milimétrica para medir y detectar deformaciones en túneles durante y después de la construcción. De acuerdo con De Farago (2010) el principio de operación de esta tecnología se basa en la superimposición de ondas radar para detectar diferencias a lo largo del tiempo (figura 53), los satélites adquieren las imágenes y se registra la distancia recorrida por la onda que emite el satélite, posteriormente, estas distancias son comparadas y su diferencia indica el movimiento del terreno.

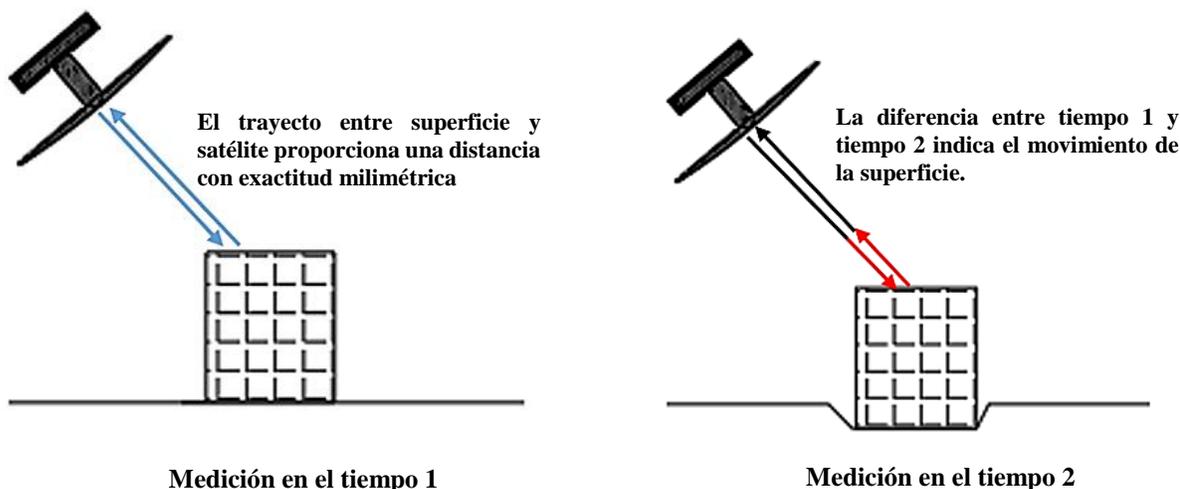


Figura 53 Satélite y objetivo: medición del desplazamiento. (De Farago, 2010)



En túneles, la aplicación de la tecnología INSAR permite el monitoreo del comportamiento de la estructura durante todas las etapas involucradas (diseño, construcción, operación y mantenimiento). El uso del sistema en entornos urbanos proporciona una herramienta eficaz debido a las particularidades de este tipo de construcciones y sus limitaciones, en este sentido, este tipo de monitoreo puede complementar las observaciones in situ dando mayor certidumbre al plan de monitoreo implementado.

Entre los beneficios que proporciona el monitoreo satelital destacan:

- **Precisión milimétrica:** hasta 1 mm / año y precisión de 2-3 mm en puntos de medición únicos.
- **Alta frecuencia de medición:** 3, 6 o 12 días entre adquisiciones dependiendo de los satélites.
- **Cobertura de grandes áreas:** monitoreo de áreas remotas y muy extensas (miles de kilómetros cuadrados).
- **Estudios retrospectivos:** análisis del movimiento del suelo en el pasado.
- **Sistema no invasivo:** solución remota sin intervención en el sitio y sin mantenimiento
- **Monitoreo bajo demanda:** frecuencia de actualización ajustada a la magnitud del movimiento y las necesidades del proyecto.
- **Plataforma web:** interfaz de usuario para una interpretación rápida y sencilla de millones de puntos de medición.

De Farago (2010) menciona que el monitoreo de túneles superficiales por medio de tecnología INSAR inicia a partir de la realización de un estudio histórico (figura 54) que permite identificar el comportamiento del medio antes de iniciar los procedimientos constructivos. Posteriormente, se analizan los movimientos esperados y se define el satélite a utilizar para el seguimiento.

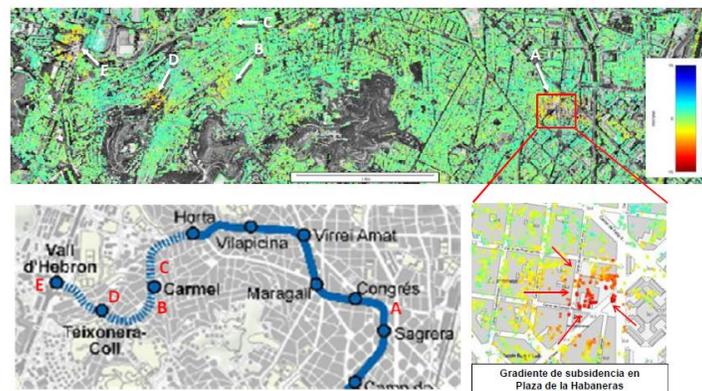


Figura 54 Áreas de subsidencia metro. Línea 5 Barcelona (De Farago, 2010)



❖ **Tecnología LiDAR**

La tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging) es una herramienta tecnológica útil para el monitoreo geotécnico y detección de cambios durante el desarrollo de los procedimientos constructivos y durante la etapa de operación de una estructura. Fekete, Diederichs & Lato (2009) mencionan que el principio de operación del LiDAR se basa en la emisión de un láser y en la medición del tiempo transcurrido, con esto, se realiza la adquisición y recopilación de datos de nubes de puntos tridimensionales, el escáner recopila datos en 3D (x, y, z) y retorno de intensidad (i).

Para el caso de túneles en entornos urbanos, es necesario contar con un monitoreo de alta precisión que permita identificar las deformaciones que pudieran causar daños a la estructura del túnel y a las ubicadas en superficie, el monitoreo por este tipo de tecnología permite comparar múltiples escaneos LiDAR tomados en diferentes momentos e identificar el cambio o las tendencias de comportamiento.

La información proporcionada por el monitoreo es de utilidad para analizar el comportamiento de la estructura y la realización de diseños que cumplan con las distintas solicitaciones del medio. El monitoreo de las deformaciones en túneles por medio de la tecnología LiDAR tiene un alto grado de precisión, lo anterior, debido a la capacidad de medir deformaciones milimétricas por la alta densidad de puntos y la resolución espacial que se puede adquirir en una cantidad mínima de tiempo. Actualmente, el uso de los datos que se obtienen por medio de este tipo de herramientas tecnológicas proporciona información confiable con distintas aplicaciones geotécnicas y contractuales, tabla 9.

**Tabla 9** Ejemplo, aplicación de tecnología LiDAR en túneles. (Fekete, Diederichs & Lato, 2009)

Interesado:	Contratista / Ingeniero de Túneles	Ingeniero geólogo
<b>Ejemplo de aplicación LiDAR:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelización del túnel construido.</li> <li>• Espesor del revestimiento de concreto.</li> <li>• Espaciado de pernos o elementos según construcción.</li> <li>• Mapeo de filtraciones / fugas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometría de discontinuidad estructural.</li> <li>• Análisis de sobrecarga estructural.</li> <li>• Caracterización de superficies.</li> </ul>



## 3.2 Evaluación del comportamiento de revestimientos

### 3.2.1 Revestimiento primario (Dovelas)

Las dovelas como revestimiento primario del túnel necesitan tener una evaluación del comportamiento durante la construcción y verificar su estabilidad en la etapa de operación, esto con la finalidad de garantizar la correcta ejecución de los procedimientos constructivos y la verificación de las hipótesis de diseño. Los segmentos de dovelas están reforzados, en su mayoría con varillas de acero o en la actualidad se hace más común el empleo de fibras metálicas o sintéticas.

De acuerdo con Blom (2002) el refuerzo en los segmentos de dovelas tiene la finalidad de mejorar la resistencia contra la flexión. La flexión puede ocurrir debido a las fuerzas durante el manejo (fabricación, transporte, montaje del segmento), durante y justo después del ensamblaje (carga de inyección de lechada, carga de TBM, carga de suelo) y en la etapa de servicio (carga de suelo, temperatura). Durante el desarrollo del procedimiento constructivo la tuneladora ejerce fuerzas de empuje sobre los anillos con la finalidad de lograr el avance por medio de los gatos hidráulicos, en este sentido, el refuerzo es útil para mejorar la resistencia frente a la introducción de las fuerzas que ejerce de la tuneladora.

Para un correcto desempeño durante la etapa operativa del revestimiento primario es necesario tener en cuenta la influencia que tiene el montaje de las dovelas, el cual en conjunto no debe causar adiciones negativas cuando el túnel se encuentre en servicio. Blom (2002) menciona la necesidad de verificar que no existan deformaciones que influyan en la funcionalidad o comportamiento del revestimiento cuando se encuentre sometido a las condiciones para las que fue diseñado. En México, el diseño estructural se apega a las Normas Técnicas Complementarias para el concreto reforzado del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF).

De acuerdo con León, Aguilar, Martínez y Pereira (2012) para la realización de diseños estructurales en revestimientos para túneles construídos con TBM se debe verificar lo siguiente:

1. Que las deformaciones de la estructura quedarán limitadas a valores tales que el funcionamiento en condiciones de servicio sea satisfactorio y que se respeten los criterios de deformación máxima establecidos en los Términos de Referencia.



## Capítulo 3

---

2. Verificar los estados que pueden producir que la estructura sea puesta fuera de servicio, por colapso o rotura de la misma o de una parte de ella.

En la metodología empleada por León *et al.* (2012) para el diseño de los revestimientos en un túnel para el desalojo de aguas residuales construido con TBM, los estados límites para los que se verifica la sección de dovela corresponden a:

- ❖ Flexocompresión.
- ❖ Refuerzo por temperatura.
- ❖ Cortante.
- ❖ Acero por tensión en la zona de contacto y de empuje entre dovelas.
- ❖ Aplastamiento en juntas.
- ❖ Acoplamiento del machihembrado.
- ❖ Verificación del orificio del erector por aplastamiento.

La evaluación del comportamiento y verificación de las hipótesis de diseño en anillos conformados por segmentos de dovelas se realiza mediante la instalación de instrumentos que ayudan a obtener información acerca de las deformaciones que se presentan en cada una de las secciones de control (tabla 10).

Los deformímetros para acero instalados en el refuerzo tienen la finalidad de comprobar que las deformaciones están dentro de los umbrales establecidos en el diseño y verificar el porcentaje de deformación en relación al valor de fluencia del acero  $f'_y$ . Los deformímetros para concreto instalados en los revestimientos son de utilidad para verificar que los esfuerzos a compresión en el concreto se encuentren dentro de los umbrales establecidos en el diseño y que el porcentaje en relación al valor de la resistencia a la compresión del concreto  $f'_c$  no representa riesgos a la estabilidad de la estructura cuando esta se encuentre en operación.

**Tabla 10** Instrumentos requeridos para evaluar los revestimientos

<b>Instrumentos para la evaluación de revestimientos</b>	
Presión de suelo sobre el revestimiento	- Celdas de presión
Esfuerzos y deformaciones en acero y concreto	- Deformímetros para acero - Deformímetros para concreto



### 3.2.2 Revestimiento definitivo

Para la evaluación del comportamiento del revestimiento definitivo en túneles construídos en suelos blandos, se deben tomar en cuenta diversos criterios a favor de la estabilidad en las distintas etapas de un proyecto. Rodríguez y Auvinet (2012) mencionan: “En el proceso de elaboración del revestimiento definitivo para un túnel es necesario establecer condiciones de análisis a largo plazo. Dichas condiciones deben ser consideradas tanto en las propiedades de los revestimientos como en las de los suelos” (p. 20-28). En este sentido, es necesario considerar los procesos a los que se encuentran sujetos los revestimientos de los túneles.

De acuerdo a lo anterior, los túneles construídos en zona lacustre en la Ciudad de México se encuentran sujetos a un doble proceso de consolidación:

1. Debido al cambio de esfuerzos efectivos generados por la propia excavación y construcción del túnel.
2. Se debe al abatimiento de las presiones intersticiales debido al bombeo de agua de los estratos profundos.

De los procesos mencionados anteriormente, en el revestimiento primario (segmentos de dovelas) afecta el primero, ya que el exceso de presión de poro se disipa poco después de la excavación, mientras que el segundo actúa a largo plazo sobre ambos revestimientos durante la etapa operativa (Rodríguez y Auvinet, 2012).

Para monitorear el comportamiento del revestimiento definitivo es necesario instalar deformímetros para acero y concreto, estos nos permiten conocer la magnitud de las deformaciones y con ello tomar medidas preventivas o correctivas, de igual manera, los datos proporcionados por los instrumentos proporcionan información acerca de la calidad de los procedimientos y materiales empleados en la etapa constructiva.

### 3.3 Medidas preventivas y/o correctivas

La evaluación de los datos generados por los sistemas de monitoreo para verificar el comportamiento permiten identificar situaciones que puedan representar riesgos a la estabilidad de la estructura, la información que proporcionan los instrumentos es útil para identificar tendencias que sean desfavorables y tomar acciones preventivas o en caso de requerirse, corregir cualquier anomalía.



Con la finalidad de identificar el comportamiento deformacional de los segmentos de dovelas que conformarán el revestimiento primario de un túnel construido en suelo blando Aguilar *et al.* (2013) desarrollaron un criterio gráfico (figura 55) con cinco zonas en las que se establecen curvas de aumento de diámetro horizontal vs tiempo y las medidas preventivas y/o correctivas a emplear en cada caso. A continuación, se describe el comportamiento deformacional de cada una de las zonas y las medidas preventivas a emplear durante el proceso constructivo.

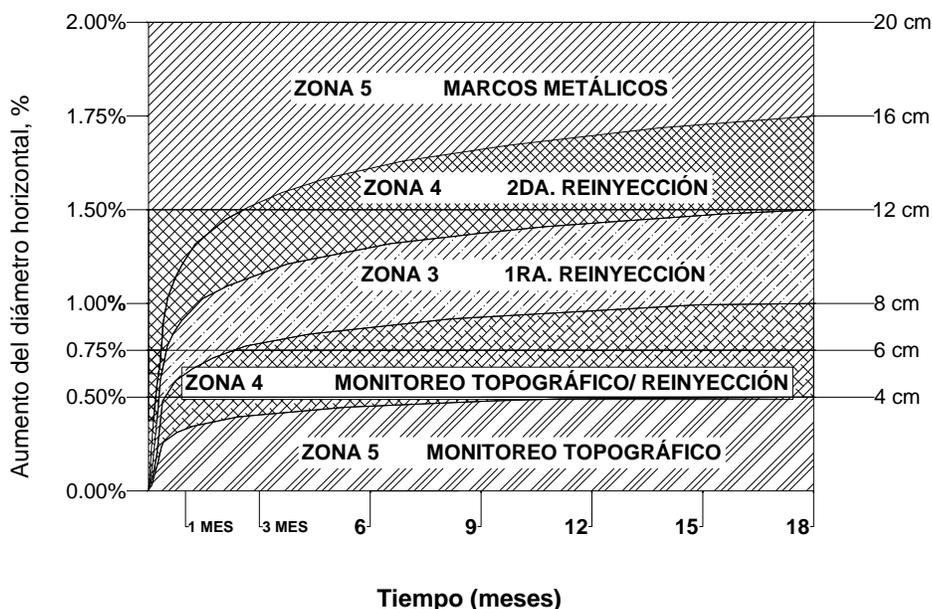


Figura 55 Implementación de medidas preventivas durante el tuneleo (Aguilar, *et al.* 2013)

**Zona 1:** El comportamiento deformacional es óptimo con una tendencia hacia la estabilidad, la deformación del diámetro horizontal del túnel se encuentra entre 0 – 0.5%. Como una medida preventiva, se puede realizar un monitoreo topográfico de comprobación.

**Zona 2:** La estructura presenta un comportamiento menos óptimo que en la zona uno, el diámetro horizontal puede presentar deformación <1%. Como verificación del comportamiento se requiere la toma de mediciones topográficas y de acuerdo con Aguilar *et al.* (2013) en caso de no existir una tendencia a la estabilidad es necesario realizar campañas de reinyección como una medida correctiva.

**Zona 3:** Las deformaciones presentadas en esta zona son <1.5% lo que representa un comportamiento no óptimo, para este caso, se debe evaluar la tendencia de estabilidad monitoreando topográficamente y realizando una primera reinyección del anillo.



**Zona 4:** Con los datos generados por el monitoreo topográfico y observaciones en campo se comprueba un comportamiento no óptimo con deformaciones  $<2\%$ , para este caso es necesario realizar una segunda reinyección y continuar con el monitoreo.

**Zona 5:** En esta zona el comportamiento es crítico con una tendencia marcada hacia la inestabilidad, las deformaciones están por arriba del  $2\%$ . Para este caso se hace necesario reforzar el soporte inicial mediante la instalación de marcos metálicos.

### 3.4 Control de procesos para la verificación del comportamiento

La integración del sistema de auscultación y el control de procesos (figura 56) para verificar el comportamiento del túnel permite conocer e identificar situaciones que de no ser atendidas pudieran representar problemas a la estabilidad del medio. Durante la construcción del túnel el control de procesos en conjunto con el sistema de auscultación son de utilidad para realizar la comparación en tiempo real de cada una de las variables e hipótesis previstas en el diseño con las encontradas en tiempo real.

De acuerdo con Pérez (2015) la integración de la instrumentación y la medida de los parámetros operaciones por medio del control de procesos facilita el análisis del comportamiento y los efectos generados por el desarrollo de los procedimientos constructivos. La relación que existe entre el control de procesos y la instrumentación del túnel durante la construcción permite evaluar de forma inmediata el comportamiento de la obra y el medio que la rodea.

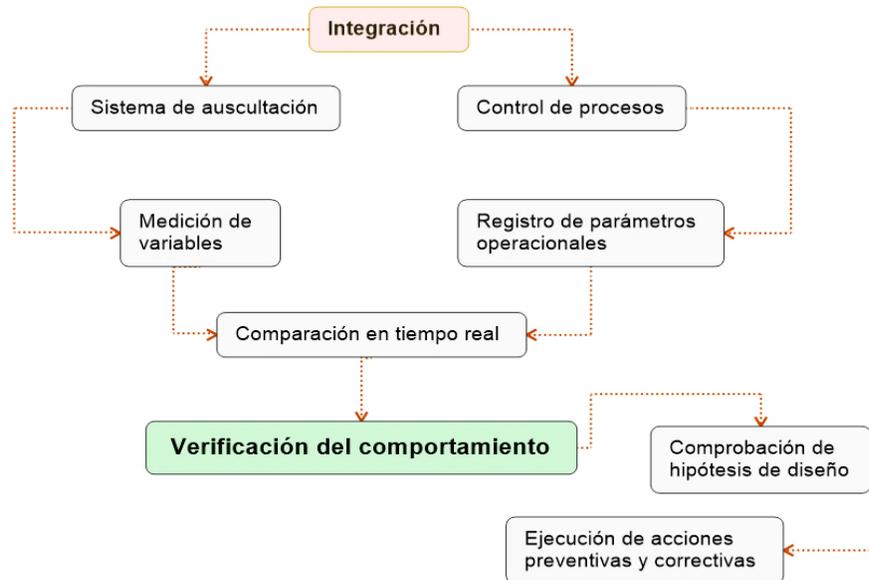


Figura 56 Integración de un sistema de auscultación y el control de procesos



El control de procesos debe ser completo e incluir un plan de monitoreo diseñado para medir y verificar que los parámetros se encuentren dentro de los umbrales establecidos, la medición de cada una de las variables permite identificar tendencias y anomalías. Además de la utilidad que tiene para establecer medidas preventivas o correctivas para la mitigación de factores de riesgo en la estructura, la obtención de datos en tiempo real representa una herramienta eficiente para el análisis realizado con los datos y parámetros generados por los instrumentos y el control de procesos.

El análisis del control de los procesos involucrados en la construcción de un túnel (figura 57) tiene como objetivo ser una herramienta para la evaluación y el éxito del procedimiento constructivo utilizado. Comulada y Maidl (2009) mencionan que los factores que determinan el éxito en la excavación de túneles son la seguridad, calidad de la obra, rendimiento y costos, en este sentido, es necesario conocer cada uno de los procesos y verificar que se cumplan adecuadamente con la finalidad de garantizar el éxito durante la construcción y una correcta operación del túnel cuando se encuentre bajo las condiciones de servicio para las que fue diseñado.

La instrumentación en el control de procesos tiene por objetivo evaluar los efectos inducidos por el tuneleo y la comparación de los parámetros reales medidos durante la construcción con los previstos en la etapa de diseño, por esto, el monitoreo es de utilidad para la toma de decisiones a favor de la optimización de los procedimientos constructivos. La instalación de instrumentos y sensores de medición para el monitoreo en la TBM permite realizar de manera eficiente la excavación así como tener un control de todos los procesos que intervienen en la construcción mecanizada de un túnel.

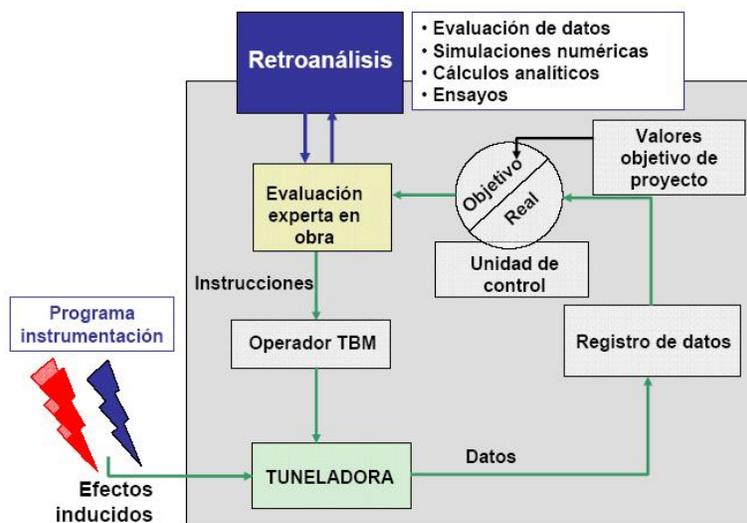


Figura 57 Esquema control de procesos (Commulada y Maidl, 2009)

De acuerdo con Shanahan (2013) los datos obtenidos se pueden vincular al sistema de control propio de la tuneladora con la finalidad de establecer condiciones en la operación de la máquina, estas condiciones modificarán los parámetros operativos si se reciben ciertos datos o se encuentran cercanos a los umbrales establecidos para la verificación de cualquier condición de inestabilidad.

En el caso de una máquina tuneladora, los sistemas de instrumentación compuestos por sensores, adquirentes de datos e interfaz de visualización (figura 58) permiten al operador ver y analizar en tiempo real como el ajuste y los cambios en los parámetros operativos impactan en el entorno de corte. Para el caso de la excavación con discos de corte, el análisis de los datos de vibración, revoluciones por minuto (rpm) y la temperatura del cortador, son útiles para conocer las condiciones del medio donde se está excavando, además de proporcionar al operador una indicación del desgaste del cortador sin entrar en la cabeza de corte para inspeccionar los elementos.

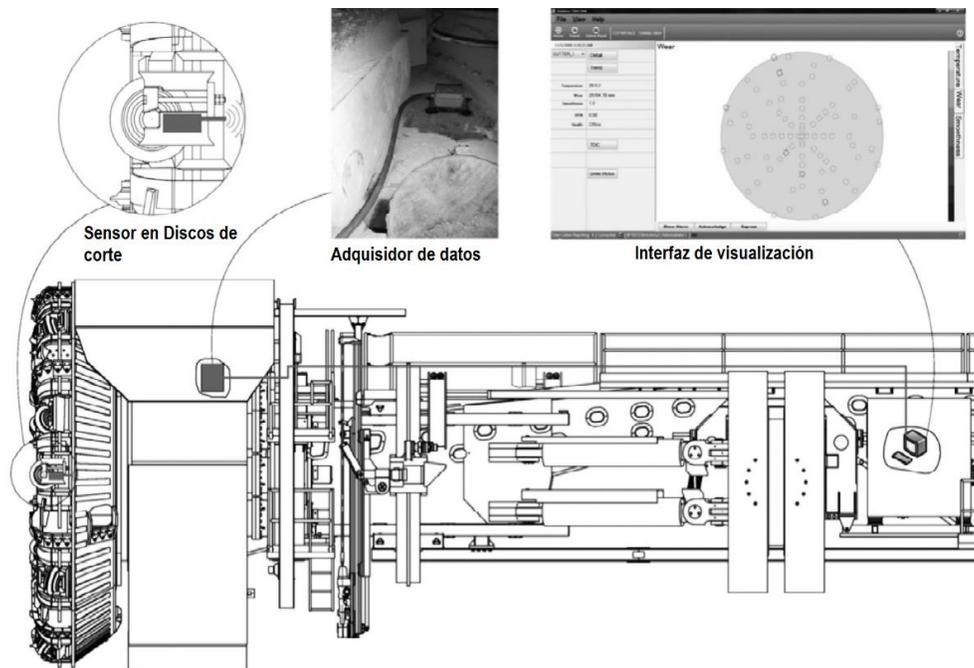


Figura 58 Instrumentación en discos de corte en una TBM (Shanahan, 2013)

Durante la construcción de un túnel se llevan a cabo diversos procesos que deben ser estrictamente cuidados para evitar condiciones de inestabilidad, la calidad de los procedimientos y materiales empleados en la etapa constructiva deben ser analizados, en este sentido, para evaluar la calidad y cumplimiento de cada una de las especificaciones se debe considerar que cada uno de estos procesos interviene directamente en el



comportamiento que tendrá el túnel durante la etapa operativa, por ello, es de vital importancia analizar cada uno de ellos y relacionar la influencia de su correcta ejecución y las consecuencias que tendrán para la estructura si estos no son cuidados y realizados de forma adecuada, a continuación se presentan los más relevantes:

### **Inyección de mortero en el espacio anular:**

La excavación con máquina tuneladora y el revestimiento con segmentos de dovelas dejan un espacio entre el suelo excavado y el revestimiento llamado espacio anular. De acuerdo con Guglielmetti (2012) este espacio se genera principalmente por las siguientes razones:

- ❖ El estrechamiento del escudo necesario para un avance más fácil (representado por la diferencia de diámetro entre la parte delantera y la parte trasera del escudo).
- ❖ La diferencia de diámetro entre el escudo y el revestimiento prefabricado (dovelas) instalado en su interior (incluido el grosor del escudo y el espacio requerido para el sistema de sellado)
- ❖ El recorte necesario para conducir la máquina a través de tramos curvos.

El espacio generado debe rellenarse con un material adecuado con la finalidad de minimizar los asentamientos en superficie y en el terreno circundante, también tiene la finalidad de proporcionar confinamiento, estanqueidad y garantizar la transferencia uniforme de la presión que ejerce el suelo sobre el revestimiento. Guglielmetti (2012) presenta una serie de pautas a verificar antes, durante y después del relleno del espacio anular:

### **Antes de comenzar la excavación son necesarios los siguientes controles:**

- ❖ Calibrar los medidores de volumen y medidores de presión para una mayor precisión y confiabilidad en las lecturas.

### **Después de que la excavación haya comenzado, se deben implementar los siguientes controles:**

- ❖ Controlar que la operación de relleno se lleve a cabo simultáneamente con la excavación y de acuerdo con los procedimientos previstos (en particular, la tasa de progreso debe ajustarse al relleno que se produce simultáneamente, de modo que el relleno se lleve a cabo según las presiones prescritas).
- ❖ Controlar que los volúmenes finales de lechada inyectada correspondan con el rango de diseño.
- ❖ Ejecutar pruebas para verificar la efectividad del llenado.



- ❖ Realizar pruebas en el sitio en la lechada de relleno para evaluar su consistencia y deformabilidad.
- ❖ Verificar el engrase adecuado de los cepillos de la cola del escudo para evitar la entrada de lechada durante las operaciones de relleno.

### **Determinación de umbrales de control**

La determinación de los umbrales de control para la verificación del comportamiento se realiza de acuerdo a las variables a monitorear y al nivel de incertidumbre sobre lo que se encontrará durante el desarrollo de cada uno de los procedimientos. Los valores definidos en los umbrales se acotan de acuerdo a los estudios geológicos y geotécnicos realizados previamente en la etapa de diseño.

### **3.5 Implicaciones contractuales**

En la elaboración del documento contractual se deben definir y asignar cada una de las responsabilidades de los involucrados en la ejecución de una obra de infraestructura, es indispensable que la asignación considere los distintos tipos de riesgo asociados a cada una de las etapas y el nivel de relevancia, en este sentido, la verificación del comportamiento juega un papel importante. La definición del riesgo en la construcción debe considerar la rectificación de ambigüedades o las discrepancias que puedan presentarse durante la ejecución de los procedimientos constructivos.

La evaluación de riesgos durante la ejecución de la obra debe ser realizada por cada uno de los involucrados, por ejemplo, el contratista debe evaluar la oferta de acuerdo a las inspecciones y mediciones realizadas en el sitio de construcción y en los sitios cercanos a la zona, es necesario que se consideren y definan las situaciones que no estén previstas en el documento contractual con la finalidad de deslindar responsabilidades o ajustar la oferta para disminuir la cantidad de disputas que se pudieran presentar generando retrasos en la construcción o afectando los recursos económicos del proyecto.

#### **3.5.1 Manejo del riesgo en obras de infraestructura**

En toda construcción de obra de infraestructura están presente el riesgo e incertidumbre de lo que ocurrirá en el desarrollo de los procedimientos constructivos y la interacción con el medio circundante, los materiales encontrados en la naturaleza son complejos y requieren del desarrollo de estudios e investigación que proporcionen a todos los involucrados en las distintas etapas información suficiente que permita identificar las condiciones iniciales del



## Capítulo 3

---

sitio, formular hipótesis de diseño que más tarde deberán de ser comprobadas con los datos recolectados durante el desarrollo de los procedimientos constructivos y en la etapa operativa.

El riesgo puede ser entendido como “la posibilidad de que un proceso o situación cambia a un escenario peor y es inherente a cualquier diseño y construcción de infraestructura subterránea” (Schubert 2006, p.706-715). Generalmente se presenta en condiciones inesperadas o no consideradas, en ocasiones los involucrados en cada uno de los procesos de la construcción de obras de infraestructura no tienen la capacidad de identificar y prever los distintos tipos de riesgo, esto representa un problema para la definición de estas situaciones en los documentos contractuales, lo que repercute en controversias donde se tienen que deslindar responsabilidades. El análisis de riesgos permitirá determinar e identificar qué tipo de riesgo puede afectar al proyecto y contribuir a la toma de decisiones.

Existen distintos tipos de riesgos, de acuerdo con Szimansky (2017) se clasifican en términos de ocurrencia y alcance del impacto que puedan ocasionar. En la construcción de obras de infraestructura, la división de riesgos (tabla 11) se referirá a cinco grupos principales que van desde el diseño preliminar hasta el financiamiento de la inversión.

**Tabla 11** *División de riesgos en proyectos de construcción (Szimansky, 2017)*

<b>Etapa del riesgo</b>	<b>Ejemplos</b>
<b>Diseño preliminar</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Riesgo de sobreestimar los costos del proyecto (demasiado caro para el inversor).</li><li>• Inexperiencia de la empresa para ejecutar el proyecto.</li><li>• Riesgo de capacidades no reconocidas.</li></ul>
<b>Licitación</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Corrupción</li><li>• Cancelación de la oferta</li><li>• Rentabilidad</li><li>• Fiabilidad del cliente</li></ul>
<b>Diseño detallado</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Selección inadecuada del equipo de diseño</li><li>• Sobreestimación de costos</li><li>• Selección de tecnología y materiales a emplear</li></ul>
<b>Construcción</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ambientales</li><li>• Sociales</li><li>• Geotécnicos</li><li>• Estructurales</li><li>• Capacitación</li><li>• Materiales</li><li>• Calidad</li></ul>



---

<b>Financiamiento de la inversión</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inestabilidad política y económica del país</li><li>• Riesgo de inflación</li><li>• Plan de costos incorrecto</li><li>• Recesión en la industria</li><li>• Riesgo de credibilidad del cliente.</li></ul>
---------------------------------------	--

---

### 3.5.2 Definición del riesgo en el documento contractual

En la definición del riesgo es necesario considerar las demoras que pudieran presentarse y si estas influyen en los costos del proyecto, Arrigoni (2007) presenta tres categorías para el establecimiento de dicha relación:

1. **Compensable:** aquellos de los cuales el cliente o dueño del proyecto es responsable, esto se debe establecer en el documento contractual, por ejemplo: condiciones imprevistas, suspensiones, variaciones, etc. El propietario debe evaluar y otorgar la extensión del tiempo del contrato (y según las disposiciones de las cláusulas individuales también evalúa los costos adicionales).
2. **No compensable:** aquellos de los cuales el Contratista es el único responsable, debido a incumplimientos de su parte, por ejemplo, avance menor a lo estimado o debido al bajo rendimiento de TBM, etc. El Contratista tiene la obligación bajo el contrato de llevar a cabo los pasos necesarios para recuperar el retraso, ya que no se debe extender el tiempo del contrato.
3. **Neutral:** aquellos de los cuales ni el empleador ni el contratista son responsables, por ejemplo la suspensión de actividades por huelgas. La extensión del tiempo debe ser otorgada por el Empleador, pero el Contratista debe asumir los costos adicionales debido al paro.

Durante el desarrollo de una obra de infraestructura existen situaciones que no fueron previstas en el documento contractual, en este sentido se generan riesgos asociados a la falta de precisión en el contrato, por ejemplo: cambio de objetivos, alcances y responsabilidades no definidas, entre otros. El manejo del riesgo inicia con su identificación y clasificación, posteriormente, el análisis de las repercusiones que puede tener durante cada una de las etapas (diseño, construcción y operación), una vez realizado el análisis de las implicaciones técnicas es recomendable establecer acciones y un plan de mitigación de riesgos con la finalidad de contribuir a la toma de decisiones a favor de la optimización de tiempo y recursos.



El éxito o el fracaso de cualquier proyecto dependen de la forma en que las partes gestionen el riesgo y establezcan acciones para su mitigación. Szimansky (2017) menciona diferentes formas de responder ante los distintos tipos de riesgos y las acciones que se deben emprender para cada uno de ellos, las acciones a tomar se pueden basar en la neutralización de los impactos negativos o en la reducción de la influencia. Las reacciones ante el riesgo se dividen en cuatro grupos y se presentan a continuación:

- **Aceptación de riesgo:** Una parte involucrada acepta el riesgo del proyecto a un nivel específico, en esta reacción se aceptan todas las consecuencias derivadas de cualquier situación que comprometa la correcta ejecución de proyecto, también se hace responsable de los recursos financieros y el tiempo que conlleve las acciones a tomar para aminorar el riesgo en caso de que este se presente.
- **Transferencia del riesgo:** Consiste en transferir el riesgo a otra parte o entidad involucrada con la experiencia para trabajar con el riesgo y neutralizarlo.
- **Mitigación de riesgos:** Son una serie de acciones que ayudan a reducir el impacto de los efectos del riesgo en la estructura, la mitigación se debe enfocar en reducir el riesgo en cada una de las etapas de la construcción de una obra desde el periodo de diseño hasta la operación.
- **Evitar el riesgo:** Implica prevenir o eliminar la ocurrencia del riesgo durante todo el proceso.

Es importante definir clara y precisamente en cada uno de los documentos contractuales la acción a ejecutar en caso de que se presente un riesgo, se recomienda esto para el deslinde de responsabilidades y para evitar o disminuir las disputas.

El manejo del riesgo inicia con su identificación, en esta etapa se determinan cada una de las causas que pueden originarlo, se definen las consecuencias que tendrá para el proyecto en caso de su ocurrencia y es importante identificar a cada uno de los afectados por el riesgo con la finalidad de establecer los niveles de responsabilidad de cada uno de los involucrados. Una vez identificado el riesgo es necesario realizar un análisis que ayude a determinar las consecuencias del evento y la probabilidad de que este ocurra, en esta etapa se deben considerar todos los factores que permitan analizar en forma cualitativa y cuantitativa la respuesta del medio ante la ocurrencia del riesgo.



Posteriormente al análisis, es indispensable establecer la respuesta ante las acciones y mecanismos que se puedan generar con la ocurrencia del riesgo. El manejo y medición de riesgos (figura 59) es una actividad que va de la mano con la innovación tecnológica, a lo largo de los años se han desarrollado herramientas y métodos para su identificación y medición, en este sentido, el monitoreo y control juegan un papel importante ya que proporcionan herramientas para la verificación de las

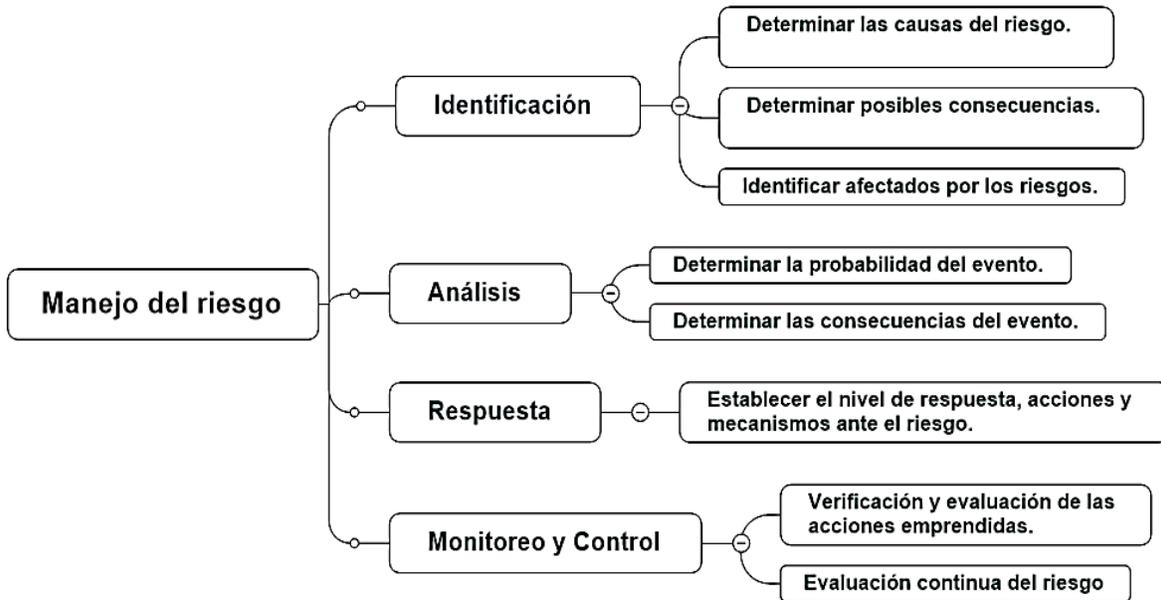


Figura 59 Etapas del manejo del riesgo (Adaptada de Szimansky, 2017)

Aún con todas las innovaciones tecnológicas en los equipos y métodos de construcción de infraestructura subterránea, el tuneleo sigue siendo un negocio con altos niveles de riesgo, las fallas o mecanismos no previstos representan en ocasiones el fracaso de muchos proyectos. Hoek (1982) menciona que el contrato es una herramienta que busca establecer clara y precisamente los requisitos y condiciones de un proyecto de infraestructura subterránea, tiene como funciones principales: asignar la responsabilidad de la ejecución de cada una de las etapas desde el diseño hasta la finalización de los procedimientos constructivos, costos, definición de riesgos y su mitigación.

Para que un contrato se convierta en una herramienta útil que pueda ayudar en la resolución de posibles disputas que se puedan presentar ante la ocurrencia de riesgos debe ser preciso y fungir como un acuerdo entre las partes para lograr un objetivo en común. El manejo del riesgo en el documento contractual es una parte que debe ser espacialmente analizada para la protección legal de cada una de las partes involucradas, generalmente, la inclusión de cláusulas en este tipo de documentos puede contribuir a la resolución de controversias, es importante que los participantes tengan la capacidad para negociar y resolver los problemas que se presentan con la ocurrencia de una situación de riesgo.



### 3.5.3 Riesgo en obras subterráneas

En el caso de obras de infraestructura subterránea como los túneles, la gestión y evaluación del riesgo forma parte de un sistema que permite asegurar la calidad en el desarrollo de cada una de las etapas involucradas desde el diseño hasta la operación. Por la complejidad de los materiales y del medio donde se desarrollan este tipo de obras de infraestructura es necesario que los riesgos sean plenamente identificados y analizados para tomar las acciones necesarias para no comprometer la seguridad y el éxito del proyecto.

En obras subterráneas cada uno de los participantes está sujeto a situaciones que pueden representar riesgos a la estabilidad del proyecto, a la seguridad y a la inversión. El nivel de incertidumbre respecto a los riesgos que se puedan encontrar durante el desarrollo de los procedimientos constructivos y durante la operación de la estructura es en ocasiones muy elevado, lo anterior se puede atribuir al desconocimiento del medio por la limitada investigación o falta de experiencia en este tipo de obras. Las variables involucradas en la gestión, diseño, construcción y operación de obras subterráneas son complejas e interrelacionadas, además de las implicaciones técnicas, propias de este tipo de proyectos, se presentan una serie de factores que los afectan o influyen significativamente, entre estos se encuentran:

- ❖ Aspectos sociales.
- ❖ Los requisitos políticos para la asignación de contratos.
- ❖ Limitadas fuentes de financiamiento.
- ❖ Requisitos ambientales y la regulación de las afectaciones al entorno.
- ❖ La percepción que se tiene acerca de ellos al considerarlos como duraderos, costosos, difíciles de administrar y controlar.

### 3.5.4 Gestión y evaluación del riesgo en túneles

La falta de información adecuada sobre la cual diseñar los documentos contractuales se ven reflejadas en sobrecostos, largos tiempos de construcción, procedimientos constructivos deficientes y en ocasiones el fracaso del proyecto, en este sentido, es necesario que desde el inicio del proyecto se tengan contemplados los riesgos que pueden presentarse desde la elaboración de los diseños hasta que la estructura se encuentre en su fase operativa, para ello, es fundamental que se establezcan bases y términos claros con la finalidad de evitar o disminuir factores que afecten la inversión.



Lombardo y Pérez (2016) mencionan que en la construcción de infraestructura subterránea se pueden presentar los siguientes tipos de riesgos:

- **Riesgos asociados a la geología:** Su aparición se debe principalmente a condiciones presentes en el medio donde se desarrollará el proyecto, no previstas inicialmente en las etapas de diseño. La poca cantidad de estudios realizados y por lo tanto un análisis deficiente constituyen la parte fundamental de este tipo de riesgos.
- **Riesgos asociados al diseño:** En este tipo de riesgos existen diversos factores involucrados que van desde el nivel de experiencia de los encargados de diseñar la estructura, las condiciones reales encontradas al momento de realizar los procedimientos constructivos y las condiciones establecidas en los documentos contractuales.
- **Riesgos asociados a la construcción:** Una inadecuada selección del procedimiento constructivo, el cual puede no ser capaz de enfrentar los fenómenos y mecanismos que se presentan al construir la estructura, lo anterior, hace que se presenten afectaciones y situaciones de inestabilidad una vez finalizada la construcción lo que repercutirá en disminución de la funcionalidad y vida útil del proyecto.

Durante la construcción es necesario contar con un plan de gestión del riesgo el cual se deberá adaptar de acuerdo a las condiciones encontradas durante el desarrollo de los procedimientos constructivos, la verificación del comportamiento real del medio juega un papel importante para identificar desviaciones o fenómenos inesperados y realizar modificaciones al diseño u optimizar. Eskesen (2002) menciona que es esencial el uso de la gestión de riesgos desde las primeras etapas de un proyecto (tabla 12), donde decisiones como la elección del trazo y la selección de métodos de construcción pueden influenciar en el éxito de cada una de las etapas.

**Tabla 12** *Uso de la gestión de riesgos en distintas fases (Eskesen, 2002)*

Gestión de riesgos en diferentes fases		
Fase 1 (Diseño)	Fase 2 (Contractual)	Fase 3 (Construcción)
- Establecer política de riesgos.	- Evaluación de licitaciones.	- Gestión de riesgos del contratista
- Criterios de aceptación del riesgo	- Cláusulas de riesgos.	- Gestión de riesgos del propietario.



- 
- |                                      |                                 |   |
|--------------------------------------|---------------------------------|---|
| - Evaluación cualitativa del riesgo. | - Requisitos en los documentos. | - Gestión conjunta de actores involucrados. |
| - Análisis de áreas de interés.      |                                 |   |
- 

Para la llevar a cabo una gestión de riesgos es necesario incluir y definir las responsabilidades a cumplir por parte de cada uno de los involucrados (consultores, contratistas, clientes, diseñadores), es necesario tener claro el tipo de actividades que se realizarán para la mitigación y disminución de los riesgos en cada una de las etapas, se pueden elaborar esquemas que ayuden a realizar el seguimiento de los resultados obtenidos para la gestión del riesgo y los peligros identificados, esto con la finalidad de llevar un registro e informar a todas las partes. La evaluación de riesgos representa una herramienta fundamental para conocer y delimitar las responsabilidades de los encargados de la construcción, diseños y operación de una estructura.

### **3.5.5 Consideraciones para la evaluación del riesgo**

La evaluación del riesgo en obras de infraestructura subterránea tiene la finalidad de proporcionar información que permita tomar decisiones y aplicar medidas para mitigarlos o reducir su impacto en la estabilidad de la estructura. El nivel de reacción ante el riesgo debe de ser considerado para el desarrollo de técnicas que permitan que los procedimientos constructivos se desarrollen sin contratiempos. El método observacional es una herramienta que permite comparar el comportamiento real del túnel con el esperado en las hipótesis de diseño, mediante su aplicación se pueden identificar situaciones inesperadas, fenómenos o mecanismos que pueden representar riesgos al proyecto.

Los proyectos de infraestructura subterránea se encuentran en medios con condiciones geotécnicas variables que deben ser analizadas y medidas para disminuir el nivel de incertidumbre y tener las herramientas necesarias para tomar decisiones a favor del éxito del proyecto cuando se presente una situación de riesgo, durante la etapa constructiva de túneles se deben analizar los posibles escenarios que pudieran representar fallas en el proyecto, por ejemplo:

- ❖ Posibles fallas en el soporte del túnel.
- ❖ Inestabilidad en el medio circundante.
- ❖ Problemas con el agua subterránea.
- ❖ Deformaciones y asentamientos excesivos.



El nivel de riesgo se debe evaluar en conjunto entre los distintos especialistas involucrados en el proyecto, se recomienda que sean analizados todos los escenarios posibles para establecer acciones a tomar en caso de que se presente alguna situación que comprometa la estabilidad del medio. La finalidad de realizar una evaluación de los riesgos encontrados permite conocer la influencia de los mismos en la seguridad, afectaciones en las propiedades cercanas al lugar de la obra, también permite identificar los riesgos para cada uno de los involucrados, por ejemplo, para el propietario, proporciona información de los plazos de finalización y posibles retrasos que puedan ocasionar incrementos en los costos inicialmente previstos.

De acuerdo con Eskesen *et. al* (2002) en las primeras fases de diseño, licitación y negociación de contratos existen ciertos riesgos que pueden ser transferidos de un actor a otro, ya sea por medio de algún seguro o por contrato, algunos riesgos pueden ser eliminados. En la etapa de construcción es necesario reducir la incertidumbre a través de la planificación de acciones preventivas o correctivas que permitan la mitigación del riesgo. Es responsabilidad del contratista el cumplimiento de la política de riesgos del propietario, para esto, es necesario que durante la etapa de construcción se realice la identificación, análisis y medición de los fenómenos encontrados.

La identificación, clasificación y medición de situaciones que representen un riesgo a la estructura deben ser entendidas por cada uno de los involucrados y el contratista debe tener la capacidad de implementar acciones preventivas y correctivas a favor de la mitigación de los riesgos. Para lograr lo anterior, es fundamental que se realicen acciones que permitan conocer el comportamiento cualitativo y cuantitativo de los diversos fenómenos que pueden representar un riesgo. El monitoreo de la estructura permite conocer el comportamiento de la misma y proporcionar información que permita identificar el nivel de riesgo y el deslinde de responsabilidades en caso de que dicho riesgo no haya sido identificado y registrado en el documento contractual.

En el caso del propietario, la evaluación del riesgo representa una herramienta esencial para establecer las responsabilidades tanto de los encargados en el diseño como en la construcción de la estructura, también es de utilidad para trabajar en los riesgos que no son responsabilidad de los diseñadores y contratistas, en este sentido, es necesario que el propietario conozca las medidas de mitigación, los planes de medición y monitoreo de las situaciones que puedan generar riesgos y por lo tanto, retrasos y pérdidas económicas.



### 3.5.6 Riesgos en la contratación

El contrato es un acuerdo logrado entre dos partes o más involucradas para lograr un objetivo en común, en la industria de la construcción el contrato representa una herramienta jurídica indispensable para establecer las obligaciones del contratista y contratante, sirve para delimitar alcances y acordar cláusulas que permitan hacer frente a las distintas situaciones que se presenten durante la realización de una obra de infraestructura y con ello evitar problemas que ocasionen inestabilidad a la estructura o el fracaso del proyecto.

Existen deficiencias en los documentos de licitación y contratación que representan un riesgo en el desarrollo de una obra, por ejemplo, no definir claramente las responsabilidades y derechos de los involucrados en cada uno de los procesos generan a menudo disputas que repercuten en tiempo de ejecución y en los costos totales del proyecto. Para mitigar los riesgos en la contratación, es necesario establecer un objetivo en común entre todos los actores involucrados, además es importante establecer un documento equitativo, racional y justo con cláusulas adecuadas que ayuden a establecer mecanismos de solución ante la aparición de disputas en cada parte del proceso y una vez que se ha concluido el proyecto y la estructura se encuentra en servicio.

Los contratos de infraestructura subterránea enfrentan diversos desafíos de acuerdo a la forma de contratación donde cada una de ellas tiene riesgos que deben ser evaluados y analizados para la mitigación de situaciones que puedan generar disputas. Lombardo y Pérez (2016) presentan una serie de riesgos (tabla 13) que se derivan de la forma de contratación en obras de infraestructura subterránea.

**Tabla 13** Riesgos asociados a cada tipo de contratación (Lombardo y Pérez, 2016)

Tipo de contrato	Características	Riesgos
Precios unitarios	- Pago se realiza por concepto terminado.	- La cuantificación de trabajo se traslada al cliente.
		- El costo de materiales y eficiencia se adjudica al contratista.
		- El contratista asume todo el riesgo por el diseño.



---

<b>Precio alzado</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- El contratista cubre el riesgo hasta la entrega del proyecto.</li><li>- El pago se realiza una vez que se terminan los trabajos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Puede llevar a sobrecostos en la ejecución.</li><li>- El contratista asume el riesgo de la cuantificación.</li></ul>
<b>Mixto</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Una parte se ejecuta bajo el esquema de precios unitarios y otra en precio alzado.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Suma de los riesgos de los contratos a precios unitarios y alzados en función de los volúmenes de obra.</li></ul>
<b>Llave en mano</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Supone un precio fijo por la obra terminada.</li><li>- El contratista incluye la totalidad de los servicios hasta la aceptación del contratante, de acuerdo a lo estipulado en el contrato.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- La responsabilidad cae en solo un involucrado en la concepción y ejecución de la obra.</li><li>- El contratista asume la obligación de entregar al contratante una obra equipada y en funcionamiento.</li></ul>

---

Los proyectos de infraestructura subterránea son sensibles a todo tipo de fallas en los documentos contractuales debido a la incertidumbre asociada con la exploración y realización de investigación del sitio donde se construirá y las posibles pérdidas financieras en caso de que no se establezcan de forma adecuada los alcances y responsabilidades de cada uno de los involucrados ante las distintas situaciones de riesgo.

Entre los distintos riesgos que afectan a los contratos de construcción destacan los del tipo político los cuales juegan un papel importante en la adjudicación de un contrato. Para analizar el riesgo político en la construcción de una obra subterránea es necesario evaluar las condiciones, por ejemplo, la política como un factor de riesgo al contrato influye en la duración de los proyectos ya que en la mayoría de los casos el objetivo del político es inaugurar la obra antes de culminar un mandato, lo anterior, debe de ser considerado por el contratante y contratista al momento de establecer los plazos con la finalidad de evitar que los procedimientos constructivos y alcances sean afectados.



### **3.5.7 Manejo del riesgo Post-construcción**

Una vez finalizados los procedimientos constructivos es recomendable realizar una evaluación de los diseños, métodos y materiales de construcción empleados, esto con la finalidad de identificar los riesgos que se puedan presentar durante la operación de la estructura. La comprobación de las hipótesis con las que se diseñó el túnel es útil para evaluar las condiciones establecidas en el documento contractual y deslindar responsabilidades en caso de que se presenten problemas que afecten la estabilidad y funcionalidad de la obra en operación.

Para la evaluación del riesgo en la etapa de post construcción es necesario realizar una serie de auditorías basadas en el registro de toda la información generada durante el proceso de construcción y compararla con los datos de la investigación del sitio, los cuales deben proporcionar datos acerca de las condiciones iniciales, cambios en los diseños o evidencias que indiquen variaciones respecto a lo establecido en el documento contractual.

La evaluación del riesgo por medio de los datos que nos proporcionan la instalación de instrumentos de medición en las secciones de control representan una herramienta fundamental para el deslinde de responsabilidades y resolución de disputas legales cuando en el documento contractual existan imprecisiones acerca de los niveles de aceptación del riesgo y reacciones ante la ocurrencia de un fenómeno no previsto una vez finalizada la construcción. Por otro lado, además de ayudar en la evaluación del riesgo, la instalación de sistemas de monitoreo permitirá identificar situaciones que permitan optimizar futuros diseños en obras del mismo tipo y ser una fuente de información que ayude al diseño y mejora de los documentos contractuales.

### **3.5.8 Definición de responsabilidades**

Cuando la estructura se encuentra en operación en ocasiones surgen situaciones que no fueron previstas desde el establecimiento de las hipótesis de diseño, por lo cual, es necesario realizar un análisis acerca de los factores o fenómenos que pueden ocasionar afectaciones en la funcionalidad, en este sentido, la verificación del comportamiento además de ser una herramienta para el análisis de las variables monitoreadas por los instrumentos instalados en las secciones de control, proporciona diversos beneficios e implicaciones en términos de manejo contractual, que son útiles para deslindar responsabilidades que contribuyan a la solución de controversias una vez que los procedimientos constructivos son finalizados.



La definición de los riesgos y la responsabilidad de los involucrados en obras subterráneas son críticos, lo indispensable es que estos sean asignados en el documento contractual para evitar disputas ya que en la mayoría de los casos son asignados de parte del propietario al contratista generado así pérdidas, controversias o litigios que afectan la ejecución del proyecto o la funcionalidad de la estructura cuando esta se encuentra en operación. De acuerdo con Reilly (2000) los problemas que comúnmente representan un riesgo y deben de ser considerados en la documentación contractual se basan en los que involucran tiempo y recursos disponibles, por ejemplo:

- La cantidad de inversión y el tiempo que se destine a la realización de estudios, pruebas e investigación del sitio para la determinación de las condiciones subterráneas y el establecimiento de las hipótesis de diseño.
- Tiempo dedicado para que los participantes en las licitaciones evalúen los diseños, las condiciones geotécnicas y procedimientos constructivos adecuados para el éxito del proyecto.

Con el paso del tiempo y de acuerdo a las experiencias de cada uno de los que a nivel mundial participan en este tipo de obras se han desarrollado procesos que proporcionan una metodología para el manejo contractual del riesgo, resolución de disputas, sistemas de gestión de calidad, entre otros, sin embargo en el ámbito de las obras subterráneas estos procesos son minimizados por parte de propietarios, ingenieros y contratistas, en este sentido, para lograr el éxito de este tipo de proyectos es necesario que cada uno de los involucrados comprenda su importancia.

### **3.6 Monitoreo del riesgo**

En el proceso de gestión de riesgos es necesario evaluar y analizar las decisiones que se toman para la reducción y mitigación de situaciones que pudieran generar riesgos, en este sentido, el monitoreo de cada una de las variables presentes en las etapas de construcción y operación de una obra subterránea tienen un papel importante.

#### **3.6.1 Relación entre el monitoreo y el manejo contractual del riesgo**

La instrumentación es una herramienta fundamental para la medición cualitativa y cuantitativa de los fenómenos y mecanismos que pueden ocasionar riesgos cuando estos no son previstos desde antes de realizar los diseños. La información que aportan los sistemas de monitoreo en la etapa operativa, representan una fuente confiable para la medición de las variables que de acuerdo a un análisis de las tendencias pudieran representar riesgos. Definir



## Capítulo 3

---

desde la parte contractual el papel del monitoreo en la etapa operativa es de especial importancia ya que ayuda a garantizar la calidad de los trabajos realizados durante la ejecución de los procedimientos constructivos y minimizar de esta manera los efectos negativos que pudieran surgir durante la operación del túnel.

Desde el punto de vista contractual, la implementación de sistemas de monitoreo en la etapa operativa permiten evaluar el cumplimiento de las especificaciones establecidas en el contrato por parte del contratista que ejecutó el proyecto. La verificación del comportamiento de la estructura durante la operación tiene una relación importante con el manejo contractual ya que permite la medición de cada uno de los fenómenos que se identificaron como riesgo en la etapa inicial del proyecto y que deben estar representados en los documentos contractuales para la definición de responsabilidades ante cualquier eventualidad que se presente durante la operación.

El análisis de la información proporcionará herramientas que permitan conocer la efectividad de cada uno de los procesos constructivos realizados. Por razones legales, es necesario establecer desde el documento contractual el monitoreo durante la operación ya que en caso de existir alguna afectación al túnel y en alguna estructura vecina después de terminada la obra será necesario definir si existe o no una relación entre la construcción y el daño a la propiedad.

Para beneficio de los actores involucrados en este tipo de proyectos es necesario contar con instrumentos que ayuden a la resolución de controversias y reclamaciones, por ejemplo, cuando existieron condiciones cambiantes del subsuelo, la información que arroja un sistema de monitoreo puede considerarse prueba contundente y suficiente en el caso de una disputa; tal es el caso de información que pudiera ocupar un Dispute Resolution Board (DRB).

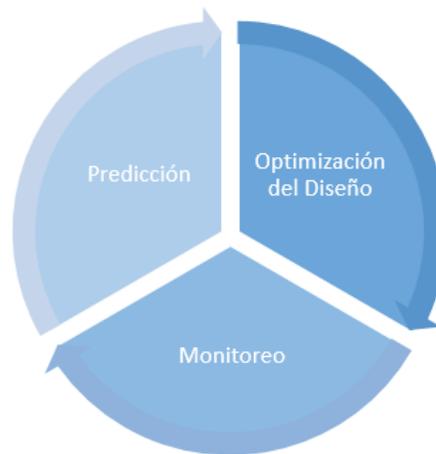
Para determinar las acciones a tomar para la mitigación de riesgos es necesario realizar una evaluación que permita conocer los efectos y consecuencias sobre la misma estructura, de acuerdo con Lombardo y Pérez (2016) dicha evaluación es importante para establecer comparaciones entre diferentes procedimientos constructivos e identificar diversos factores que influyen en la productividad. Eskesen (2004) involucra en la estrategia de gestión de riesgos el monitoreo como una parte fundamental para el seguimiento de lo supuesto en fases iniciales con lo encontrado en la fase operativa, en caso de existir desviaciones no previstas al inicio del proyecto, la implementación de un sistema de monitoreo es de mucha importancia para la definición de las responsabilidades de las diversas partes involucradas (propietarios, diseñadores, contratistas, encargados de la operación, entre otros).



El conocimiento de los valores y tendencias que proporcionan los instrumentos de medición son útiles para la identificación de peligros además que ayudan a conocer su naturaleza y la importancia que estos tienen para la estabilidad del proyecto durante la construcción y una vez que los procedimientos constructivos son finalizados. Para identificar tendencias y situaciones que representen riesgos a la estructura con el procesamiento de los datos recolectados por los instrumentos de medición se pueden obtener diagramas, gráficas o interfaces de visualización 3D los cuales ayudarán a la toma de decisiones ante la ocurrencia de cualquier fenómeno.

Lombardo y Pérez (2016) mencionan que con la información disponible previa a la construcción y otros factores como el procedimiento de excavación seleccionado y la optimización del diseño se pueden sentar las bases para la distribución del riesgo financiero de la obra, el documento donde se establecen esas bases es denominado “Baseline Report”, el propósito principal es definir claramente las responsabilidades sobre los riesgos encontrados entre las partes contratantes, este documento no solo asigna el riesgo correspondiente a cada involucrado, sino que sirve como base para la preparación de ofertas y se usa ampliamente para la resolución de disputas durante la construcción.

El papel del monitoreo en el plan de administración de riesgos (figura 60) es de vital importancia dada la información técnica que proporciona y los análisis que se pueden realizar con datos precisos y confiables, dicha información ayuda a orientar a todos los involucrados en la administración de los términos establecidos en el documento contractual.



*Figura 60* Plan de administración de riesgos (Lombardo y Pérez, 2016)



Considerar en los documentos contractuales la instrumentación durante la etapa operativa de un túnel y la información que aporta su implementación para la resolución de controversias es de utilidad para la administración de diferentes cláusulas, por ejemplo, las que especifican que en el sitio de construcción existieron condiciones diferentes a las previstas en el documento contractual.

En obras subterráneas la verificación del comportamiento permite por medio del monitoreo geotécnico identificar la variabilidad de las condiciones del subsuelo (figura 61), es decir, los cambios que no estuvieron considerados para la elaboración de las hipótesis con las que se diseñaron los elementos estructurales y los procedimientos constructivos, a partir de lo anterior, es necesario conocer los costos asociados a la variabilidad de las condiciones del subsuelo para posteriormente establecer criterios de referencia en los documentos contractuales que permitan establecer responsabilidades mediante el manejo y evaluación del riesgo.



*Figura 61* Verificación del comportamiento y el manejo del riesgo



La inclusión en el documento contractual de la verificación del comportamiento en la etapa operativa tiene la finalidad de proporcionar herramientas que permitan evaluar los diseños y la calidad de los procedimientos constructivos una vez que la estructura ha entrado en funciones. En la práctica actual del tuneleo, la evaluación del riesgo inicia desde etapas tempranas (diseño) y en el desarrollo de la obra (construcción), pero es poco frecuente que en los documentos contractuales se incluyan herramientas como la implementación de sistemas de monitoreo en la etapa operativa, en este sentido, es necesario que se considere como una herramienta eficaz para la evaluación del trabajo realizado, resolución de las controversias y optimización de diseños que involucren obras de este tipo.

El monitoreo durante la etapa operativa de un túnel debe ser eficiente, por tanto, es necesario que exista una planificación de las actividades y definición de las responsabilidades desde el documento contractual, así mismo es indispensable que se establezcan las medidas de acción y mitigación en caso de identificar anomalías que puedan comprometer la funcionalidad de la estructura.

La gestión del riesgo durante la operación del túnel debe considerar todas las actividades que permitan evaluar las condiciones de la estructura, por ejemplo, la recopilación periódica de los datos que recolectan los instrumentos de medición instalados en las distintas secciones de control, para lograr lo anterior, es necesario que se defina desde el contrato la entidad o personal encargado de realizar la recolección, procesamiento y análisis de la información.

### **3.6.2 Monitoreo en la práctica contractual**

El monitoreo de infraestructura subterránea proporciona diversos beneficios técnicos en cada una de las etapas, sin embargo, el incluir en documentos contractuales el monitoreo e instalación de sistemas de instrumentación durante la etapa operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales trae beneficios significativos que hasta la fecha son minimizados. La toma de decisiones debe estar basada en información confiable que permita identificar los riesgos y responsabilidades de cada uno de los involucrados en la ejecución de una obra de gran magnitud como lo es un túnel, en este sentido, es necesario que en la práctica y desarrollo contractual se analice e incluya la instalación de sistemas de monitoreo que proporcionen datos confiables acerca del comportamiento de la estructura y el medio una vez finalizada la construcción.



## Capítulo 3

---

## CAPÍTULO CUARTO

### Instrumentación para la verificación del comportamiento. Caso estudio, Túnel Emisor Oriente

#### 4. Antecedentes

El Túnel Emisor Oriente forma parte del sistema de drenaje profundo (figura 62), es un proyecto que tiene la finalidad de incrementar la capacidad de desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle de México, y disminuir los riesgos de inundación a la población asentada en la zona.



Figura 62 Ubicación del proyecto TEO (CONAGUA, 2012)



El TEO es una obra hidráulica subterránea que contribuirá a disminuir el déficit (tabla 14) en el desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle de México, se construyó a profundidades que van desde 60 a 180 metros bajo la superficie. Recibirá las aguas residuales y pluviales provenientes de los Túneles Interceptor Oriente y Río de los Remedios, cuyos caudales confluirán en la lumbrera L-2 del Túnel Río de los Remedios. A partir de ahí el agua se conducirá por gravedad por el Emisor Oriente hasta el Salto en el estado de Hidalgo.

**Tabla 14** Comparación de caudales de desalojo y déficit (CONAGUA, 2012)

Año	1975	2008
	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	
Gran Canal	80	15
obras de emergencia		30
Emisor Poniente	30	30
Emisor Central	170	120
<b>Total</b>	<b>280</b>	<b>195</b>
• <b>Capacidad requerida</b>		<b>315 m<sup>3</sup>/s</b>
• <b>Déficit</b>		<b>120 m<sup>3</sup>/s</b>
Millones de habitantes	10	20

Se estima que el caudal (tabla 15) que conducirá el túnel estando completamente en servicio será de 180 m<sup>3</sup>/s, tendrá un diámetro de 7 m.

**Tabla 15** Características TEO y lumbreras (CONAGUA, 2012)

<b>Características del Túnel Emisor Oriente y sus lumbreras</b>	
Longitud	62 km
Diámetro del túnel	7.0m
<b>Capacidad máxima</b>	<b>180 m<sup>3</sup>/s</b>
Número de lumbreras	24
Diámetro de las lumbreras	12m y 6 de gran sección (18m)
Profundidad de las lumbreras	40m a 180m

Debido a las condiciones geológico-geotécnicas del subsuelo de la cuenca del Valle de México, la excavación del Túnel Emisor Oriente se realizó por medio de máquinas tuneladoras del tipo EPB de 8.70 m de diámetro exterior, las cuales tienen como principio de operación el lograr el soporte del frente de excavación mediante el balance de presiones con el material producto de la excavación y en algunos casos algún aditivo que ayude a acondicionar el material para proporcionar estabilidad y ser rezagado.



El revestimiento del TEO se realizó en dos partes, el inicial o primario conformado por 6 segmentos de dovelas más una dovela de cierre o “k” y el revestimiento secundario o definitivo conformado por concreto con acero de refuerzo.

#### 4.1 Etapa de diseño

De acuerdo con León *et. al.* (2016) para el diseño de los revestimientos del Túnel Emisor Oriente se establecieron secciones geotécnicas determinantes en el futuro comportamiento del túnel durante las etapas de construcción y operación, para esto, se consideraron diversas variables que proporcionaron información específica para la elaboración de las hipótesis de diseño, entre las más relevantes se encuentran:

- ❖ Presión de tierras que actuará sobre el revestimiento.
- ❖ Presión de agua.
- ❖ Peso específico del suelo que actuará sobre el revestimiento.
- ❖ Presión horizontal de tierras.
- ❖ Reacción del terreno circundante al túnel.

Dada la experiencia de los hundimientos regionales, en el diseño de los revestimientos se consideraron aspectos que intervienen en este fenómeno:

- ❖ Cambios en el estado de esfuerzos efectivos dentro de la masa de suelo por el abatimiento de los niveles piezométricos, lo que traerá como consecuencia un incremento de los primeros y con ello que se genere un proceso de consolidación.
- ❖ Los segmentos de túnel que se encuentren en suelos blandos o de transición se verán afectados por este fenómeno de consolidación, ya que se generarán fuerzas de arrastre sobre las paredes del túnel, que hay que tomar en cuenta tanto en el revestimiento primario como en el secundario (definitivo).
- ❖ En los tramos de transición se presentarán asentamientos de tipo diferencial, en distancias cortas. Para los tramos 3 a 6 no se consideraron los efectos de consolidación regional pues no aplica para los suelos a la profundidad del túnel en estos tramos.

La instalación de sistemas de monitoreo en la etapa de diseño del túnel contribuyó al conocimiento del estado de esfuerzos *in situ*, condiciones de deformabilidad y régimen de aguas subterráneas necesarios para la formulación de hipótesis, predicciones de movimientos y fenómenos que se pudieran presentar durante y después de la construcción.



### 4.1.1 Metodología para el diseño de revestimientos TEO

León *et al.* (2016) mencionan que con el objetivo de determinar las presiones sobre el túnel durante el desarrollo del procedimiento constructivo a corto plazo, se emplearon los programas plaxis y SAP2000. La metodología seguida para el diseño de los revestimientos del TEO inició con la determinación de los esfuerzos a partir del modelo geotécnico y siguió con las distintas modelizaciones de cada uno de los procesos involucrados (figura 63).

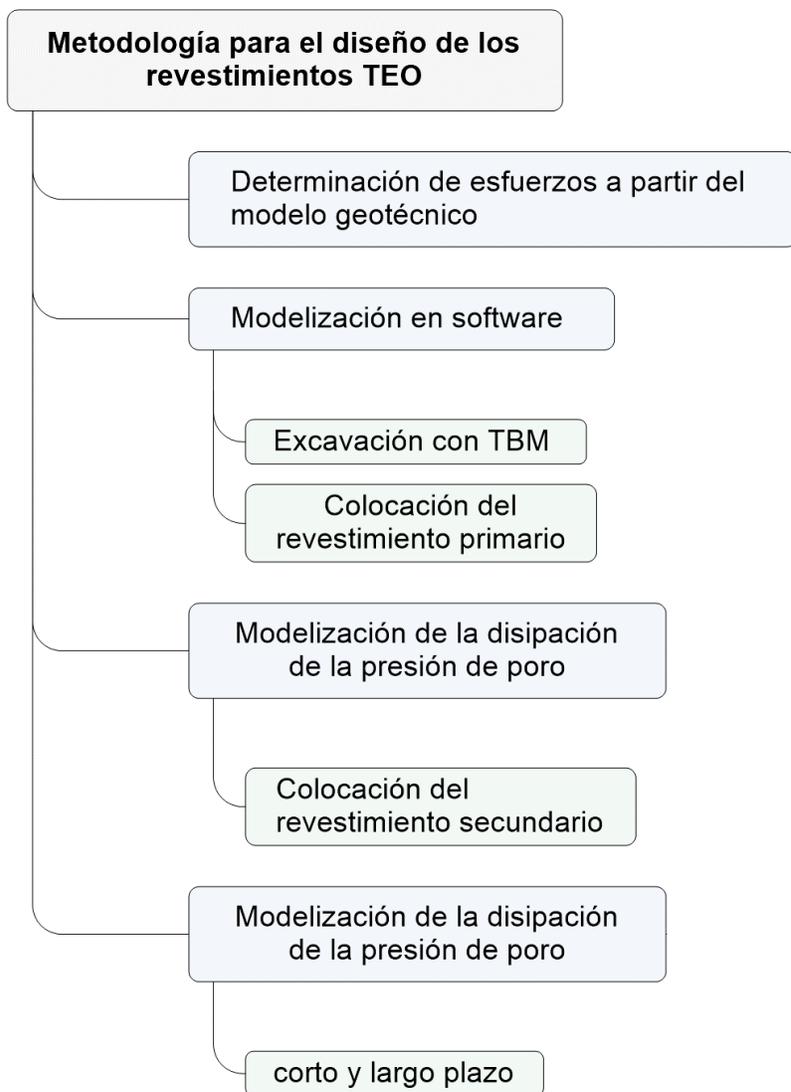


Figura 63 Metodología para el diseño de revestimientos TEO (adaptada de: León *et al.* 2012)

En relación al armado del revestimiento primario del TEO, León *et al.* (2012) presentan un resumen de los armados propuestos para el revestimiento primario para cada uno de los tramos (tabla 15), y recordando que los tramos I, y II tienen un espesor de endovelado de 35 cm y del III al VI el diseño contempló un espesor de 40 cm.

**Tabla 16** Armado propuesto revestimiento primario TEO (León *et. al.* 2012)

Concepto	1	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2
Espesor de la sección T (cm)	35	35	35	40	35	35
<b>Resistencia a la compresión f'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>350</b>
Flexocompresión Sección compuesta	#6@12.5 cm	#6@12.5 cm	#5@14 cm	#5@12.5 cm	#5@14 cm	#4@14 cm
Refuerzo por flexocompresion en hastiales	1B#6@12.5 cm	1B#6@12.5 cm	1B#5@14 cm	1B#4@12.5 cm	NO	NO
Refuerzo longitudinal	#4@30cm	#4@30cm	#4@30cm	#4@30cm	#4@30cm	#4@30cm
Cortante	G#3	G#3	G#3 solo hastiales	NO	NO	NO
Concepto	4	5.1	5.2	6.1	6.2	7
Espesor de la sección T (cm)	40	40	40	40	40	40
<b>Resistencia a la compresión f'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>350</b>
Flexocompresión Sección compuesta	#6@12.5 cm	#6@12.5 cm	2#6@12.5 cm	#5@12.5 cm	#6@12.5 cm	#5@11 cm
Refuerzo por flexocompresion en hastiales	1B#4@12.5 cm	1B#6@12.5 cm	1B#6@12.5 cm	1B#4@12.5 cm	NO	NO
Refuerzo longitudinal	#4@30cm	#4@30cm	#4@30cm	#4@30cm	#4@30cm	#4@30cm
Cortante	NO	G#3	G#3	NO	NO	NO

Nota: B=bastón de refuerzo. Sección compuesta: Trabajo conjunto de clave o cubeta + endovelado G= Grapa por cortante

De acuerdo a la propuesta de diseño de los revestimientos realizada por León *et. al.* (2012) se considera que a diferencia del revestimiento por dovelas, el diseño únicamente se revisó a flexocompresion y cortante la sección transversal, y que por el efecto de ovalización a largo plazo, tanto la clave como la rasante hidráulica en algún momento trabajaran de forma conjunta con el revestimiento (lo que incrementa el espesor de la sección) y en el caso de los hastiales, por el mismo efecto mencionado, se separan necesariamente ambos revestimientos, teniendo el definitivo que soportar las acciones a largo plazo, el resumen de armado y espesores en el revestimiento definitivo se presenta en la tabla 17.



## Capítulo 4

**Tabla 17** Armado propuesto revestimiento primario TEO (León et. al. 2012)

Concepto	I	IB y II	III	IV y V	VI	Origen de carga
	F'c 350 kg/cm <sup>2</sup>	F'c 350kg/cm <sup>2</sup>	F'c 500kg/cm <sup>2</sup>	F'c 550kg/cm <sup>2</sup>	F'c 500kg/cm <sup>2</sup>	
<b>Flexocompresión</b>	<b>26.25</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	Estado de esfuerzos del suelo
<b>Cortante</b>	E #3@15cm	No requiere	No requiere	No requiere	E #3@16cm	
<b>Acero por tensión</b>	6 E#3	11 E#4	13 E#4	15 E#4	13 E#4	Empuje del escudo
<b>Contacto entre dovela (estribos)</b>						
<b>Acero por tensión zona de empuje (estribos)</b>	7 E#3	5 E#3	6 E#3	6 E#3	8 E#3	
<b>Aplastamiento, relación de esfuerzos JT</b>	0.93	0.79	0.44	0.41	0.44	
<b>Aplastamiento, relación de esfuerzos JL</b>	0.47	0.86	0.87	0.94	1	Estado de esfuerzos del suelo
<b>Verificación del orificio del erector aplastamiento</b>	0.87	0.87	0.55	0.55	0.55	Actividad desarrollada por el escudo en la colocación de dovelas

Nota: JT= Junta transversal. JL= Junta longitudinal

### 4.2 Etapa constructiva

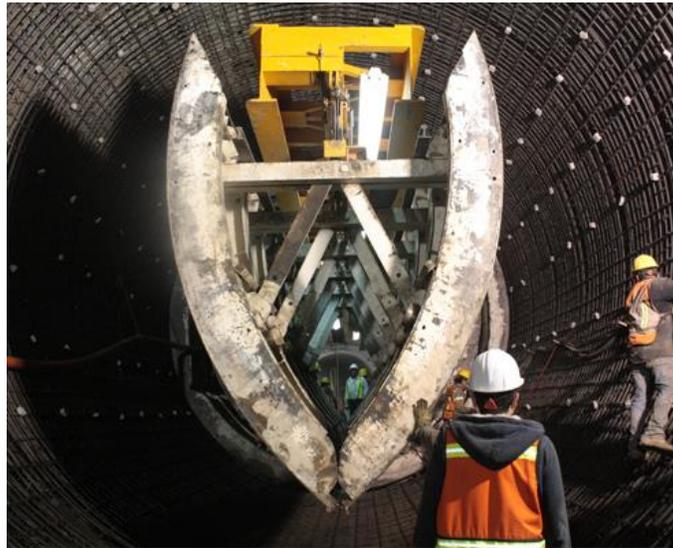
Una vez construidas las lumbreras, se arma la máquina tuneladora, en el caso de que se requiera realizar el montaje en el interior se construyen galerías, después de armada la máquina tuneladora se procede a la excavación del túnel, el procedimiento depende de la condición geológica y geotécnica de la zona. Para la zona de suelo blando formado por arcillas y limos arcillosos se utiliza un escudo de presión de tierra balanceada, cuyo procedimiento es excavar con una cabeza cortadora, mantener el equilibrio de presiones con el material excavado y posteriormente extraerlo por medio del tornillo sinfín.

El revestimiento primario está formado por dovelas prefabricadas de 35 o 40 cm de espesor y 1.5 m de ancho a base de concreto reforzado tipo CPO (Cemento Portland Ordinario), con resistencias que van desde 350 y hasta 550 kg/cm<sup>2</sup>. Su objetivo es soportar las paredes y la bóveda del túnel como revestimiento primario (figura 64) de concreto reforzado diseñado para soportar la presión del terreno sobre el túnel.



*Figura 64* Colocación de dovelas en anillo 72 del TEO. (CONAGUA, 2012)

Posteriormente después del revestimiento primario se realiza el revestimiento secundario o también llamado definitivo (figura 65) el cual consiste en la colocación de un espesor de concreto reforzado con un espesor mínimo de 35 cm; elaborado con cemento CPO RS (Cemento Portland Ordinario Resistente a Sulfatos) con una relación agua-cemento de 0.45 y resistencia a la compresión simple de  $f'c$  350 kg/cm<sup>2</sup>.



*Figura 65* Revestimiento definitivo TEO (CONAGUA, 2012)

#### **4.2.1 Verificación del comportamiento en la construcción**

Durante el desarrollo del procedimiento constructivo la instalación de instrumentos de medición en el túnel permite verificar el comportamiento a medida que avanza el procedimiento constructivo y permite comprobar las hipótesis de diseño y en su caso realizar modificaciones para lograr la optimización de los procesos sin comprometer la estabilidad.

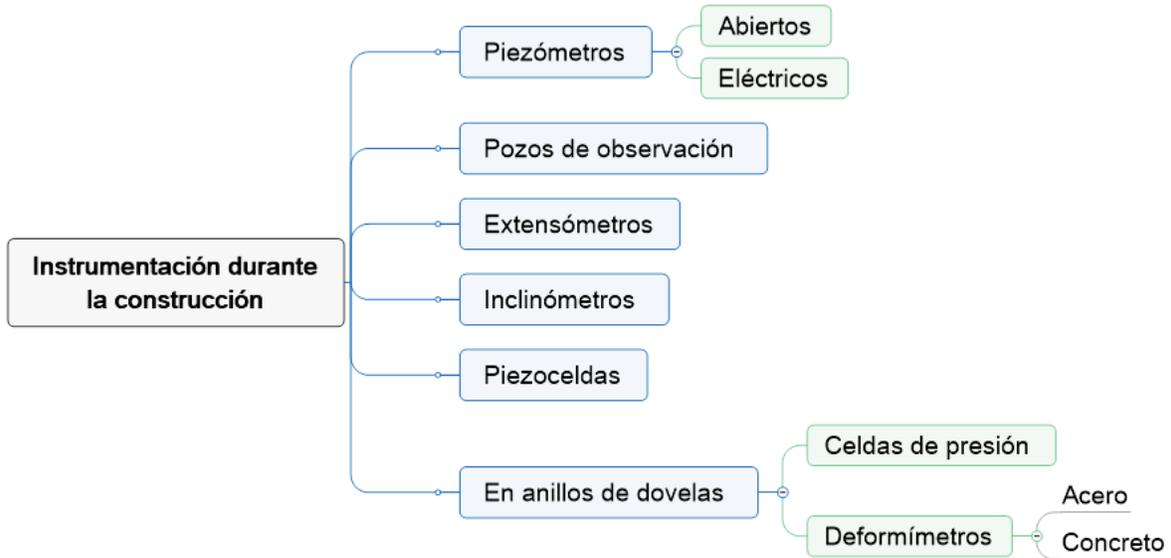


Figura 66 Instrumentos instalados para el monitoreo en etapa constructiva

Además de los instrumentos mostrados en la figura 66, la medición de convergencias diametrales en los anillos de dovelas es importante para la obtención de datos que ayuden en la verificación del comportamiento durante la etapa de construcción del túnel, para esto, se aplicó el siguiente criterio para la toma de mediciones diametrales:

1. **lectura inicial:** se tomó a la salida del anillo del faldón ya que se había realizado el relleno del espacio anular.
2. **Lectura final:** antes de la colocación del revestimiento definitivo.

La medición de convergencias diametrales se realiza implementando un sistema automatizado, el cual consiste en sensores llamados tiltmeters instalados en el anillo una vez que es ensamblado en la zona del faldón (figura 67). De acuerdo con Fierro (2018) la medición automatizada en el Túnel Emisor Oriente permitió conocer las deformaciones diametrales en los anillos al ser instalado y durante su estancia en la zona de gantries de la TBM.

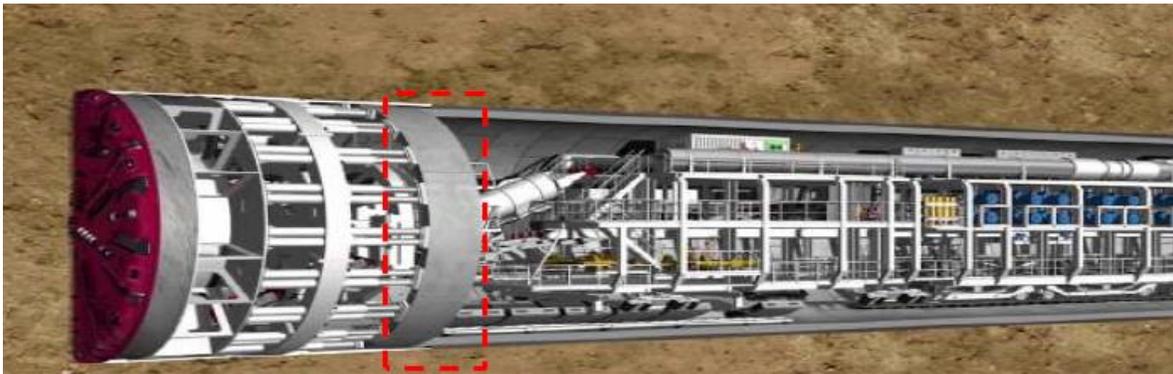
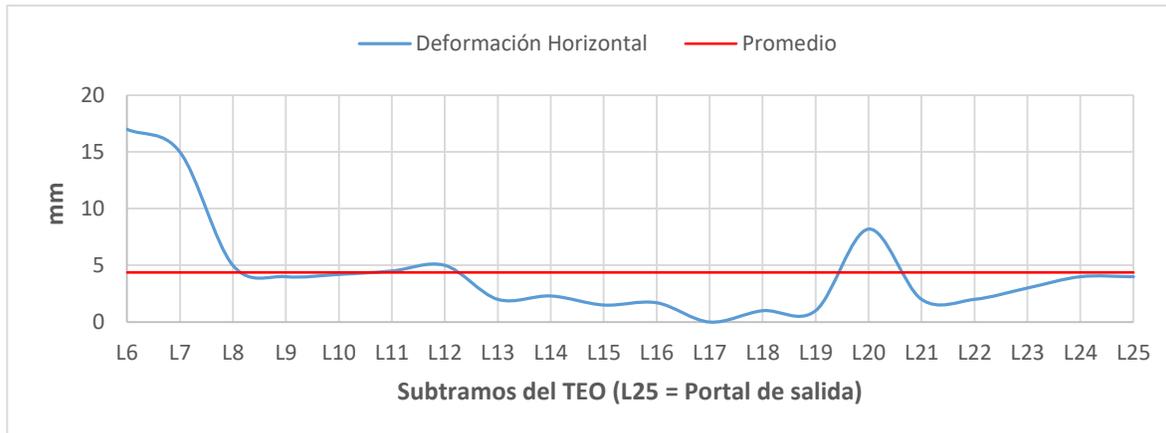


Figura 67 Anillo automatizado en zona de faldón (Fierro, C. 2018)



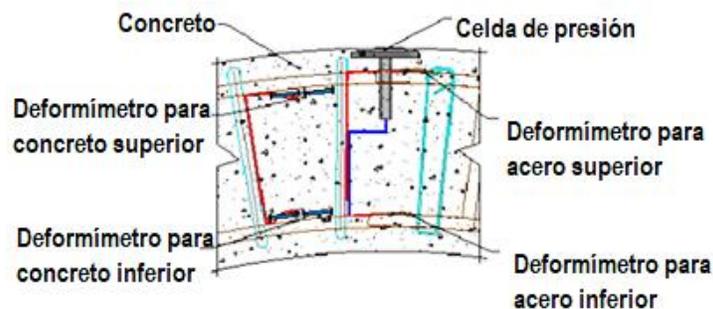
*Figura 68* Deformaciones promedio del diámetro horizontal TEO (Rivera, *et. al.* 2019)

Rivera, López, Sánchez y Cedillo (2019) mencionan que las deformaciones promedio del diámetro horizontal del TEO desde la lumbrera 6 al portal de salida estuvieron por el orden de los 4.5 mm (figura 68), en algunas zonas se excedió el límite de 39 mm establecido en el proyecto, alrededor de 53 y 56 mm entre la lumbrera 6 y 8, 91 mm entre las lumbreras 20 y 21.

#### 4.2.2 Instrumentación en el revestimiento primario

En el revestimiento primario (figura 69) se instalaron:

- ❖ **Celdas de presión:** para medir la presión ejercida por el suelo sobre el revestimiento primario.
- ❖ **deformímetros para acero:** para la medición de las deformaciones en el acero de refuerzo (figura 70).
- ❖ **Deformímetros para concreto:** para la medición de esfuerzos de compresión a los que está sometida la dovela (figura 71).



*Figura 69* Instrumentos instalados en el revestimiento primario (Fierro, C. 2018)

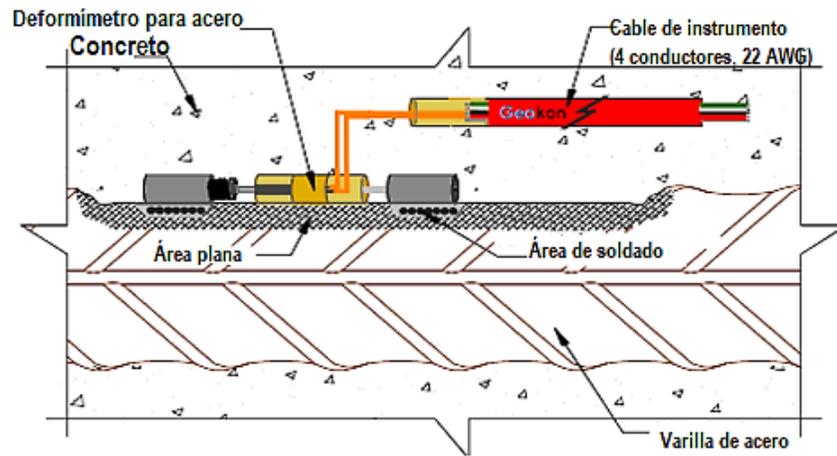


Figura 70 Deformímetros para acero instalados (GEOKON, 2018)

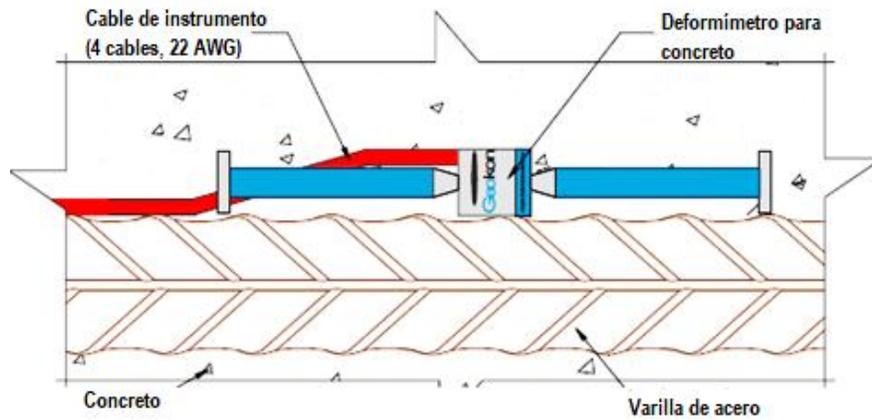


Figura 71 Deformímetro para concreto (GEOKON, 2018)

Para verificar el comportamiento del medio que rodea al túnel y su influencia sobre el revestimiento se realiza la medición de las presiones sobre el eje del túnel instalando celdas de presión en un total de 124 anillos de dovelas, las secciones de control instrumentadas se encuentran desde la lumbrera 6 hasta el portal de salida en la lumbrera 25.

En la figura 72 se presentan el registro de presiones sobre el eje del túnel, en los tramos correspondientes entre la lumbrera L-6 y L-11 las lecturas iniciales y finales estuvieron por el orden de los 100kpa y en las secciones instrumentadas entre las lumbreras L-25 las lecturas estuvieron entre los 200 y 500kpa.

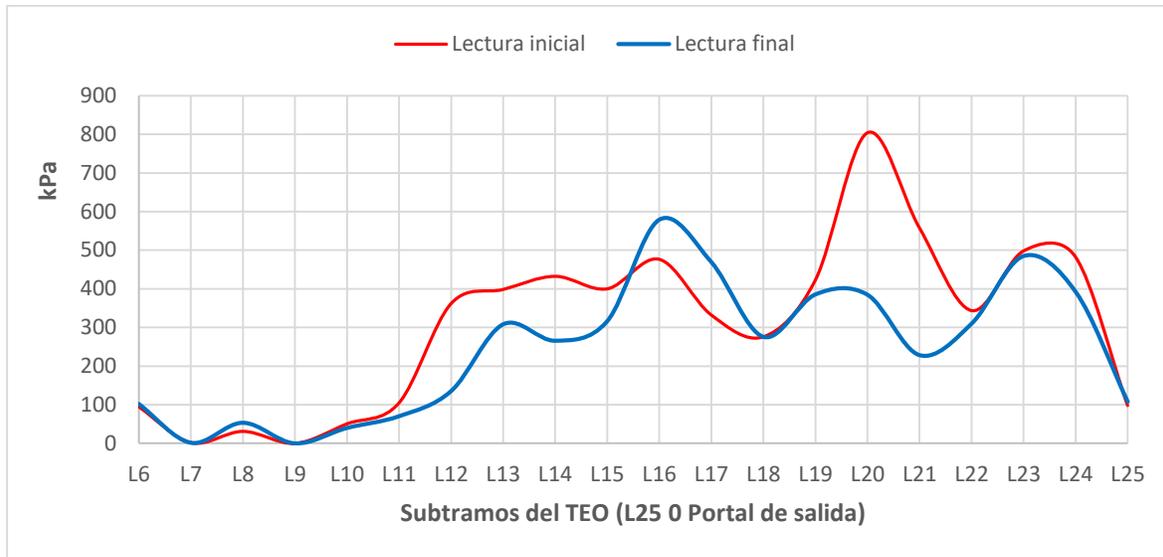


Figura 72 Presiones sobre el eje del TEO (Rivera *et. al.* 2019)

En la tabla 18 se presentan los resultados del monitoreo de deformímetros para acero y concreto instalados en los revestimientos primario y secundario, la instalación de los instrumentos permitió comprobar que los porcentajes de trabajo del acero y concreto se encuentran dentro de los límites establecidos en el proyecto.

Tabla 18 Resultados del monitoreo en revestimientos (Rivera *et al.* 2019)

Tramo	Revestimiento Primario			Revestimiento secundario	
	Presión (t/m <sup>2</sup> )	Esfuerzo en concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo en acero (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo en concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo en acero (kg/cm <sup>2</sup> )
Tramo 2	14	69	546	25	136
Tramo 3	37	119	567	11	72
Tramo 4	33	88	452	14	83
Tramo 5	20	85	442		
Tramo 6	45	89	768	49	271
Promedio general	30	90	555	25	141
Resistencia especificada		450	4200	350	4200
Porcentaje de trabajo		20%	13%	7%	3%



### **4.3 Verificación del comportamiento TEO etapa operativa.**

Dadas las condiciones geológico-geotécnicas de la cuenca del Valle de México, el fenómeno de consolidación regional y los criterios empleados en las fases de diseño de los revestimientos primario y secundario del Túnel Emisor Oriente, hace necesaria la implementación de un sistema de monitoreo automatizado que permita verificar el comportamiento del túnel en la etapa operativa durante un largo periodo. La preocupación por verificar el comportamiento de la estructura una vez que los procedimientos constructivos son terminados ha hecho que tanto dependencias como contratistas involucrados en la construcción del Túnel Emisor Oriente desarrollen una propuesta de un sistema de auscultación diseñado para el monitoreo durante la etapa operativa.

Para este trabajo de investigación se analizará la propuesta desarrollada por Rivera *et al.* (2019) con la finalidad de promover y detonar este tipo de prácticas de monitoreo, además dada la relevancia que representa un sistema de monitoreo de este tipo, será una fuente de información para futuros proyectos.

A conocimiento del autor de este trabajo de investigación, el sistema diseñado para la verificación del comportamiento en la etapa operativa del TEO no será implementado. De acuerdo a lo analizado, para verificar el comportamiento de túneles de este tipo, el sistema representaba una excelente oportunidad para innovar en el monitoreo de estructuras subterráneas sometidas a condiciones adversas durante su operación. Por la cantidad de información que el sistema aportaría se consideraba como una herramienta importante para la realización análisis que permitieran conocer el comportamiento a largo plazo y con ello optimizar diseños y procedimientos constructivos para futuros proyectos que involucren obras de este tipo.

En virtud de lo anterior, en este apartado del trabajo de investigación se presentará la metodología y características principales de un sistema de auscultación como el propuesto, esto con la finalidad de que lo contenido en esta tesis sea una fuente de información para la implementación de sistemas para el monitoreo durante la etapa operativa de túneles para el desalojo de aguas residuales.

#### **4.3.1 Objetivo**

El monitoreo representa una herramienta útil para verificar las hipótesis de diseño con las condiciones reales observadas y analizadas durante el desarrollo de los procedimientos constructivos y en la operación de una estructura. La verificación del comportamiento en



túneles para el desalojo de aguas residuales durante la etapa operativa cumple diversos objetivos que ayudan a generar mayor certidumbre ante los procesos involucrados y el medio en el que se desarrollan este tipo de obras subterráneas, por esto, es necesario conocer las ventajas del monitoreo durante un periodo de tiempo en el que la estructura ya está sometida a las condiciones de servicio para las que fue diseñada.

Entre los objetivos principales de la implementación de un sistema de monitoreo en la etapa operativa del Túnel Emisor Oriente destacan:

- ❖ Monitorear de forma periódica el túnel mediante la instalación de instrumentos en los revestimientos (primario y secundario).
- ❖ Verificar el comportamiento de ambos revestimientos durante la operación, y en su caso, ejecutar acciones preventivas para garantizar la seguridad, estabilidad y funcionalidad del túnel.
- ❖ Evaluar los efectos del fenómeno de consolidación sobre el revestimiento secundario.
- ❖ Proporcionar datos que permitan elaborar reportes acerca del comportamiento del túnel y realizar las evaluaciones correspondientes de las condiciones en que se encuentra la estructura durante el funcionamiento.
- ❖ Optimizar los procedimientos y ser una base de información para futuros proyectos de monitoreo de este tipo.

#### **4.4 Análisis del sistema de instrumentación propuesto para el monitoreo TEO**

De acuerdo a los criterios y metodología empleada en el diseño de los revestimiento es necesario monitorear la interacción de ambos (primario y secundario) y el comportamiento del túnel durante la etapa operativa, en este sentido, es sumamente necesario automatizar el sistema de monitoreo, para lograr este objetivo, se definen al interior del túnel secciones en anillos de dovelas donde en cada uno de los revestimientos se instalarán los instrumentos que serán interconectados por medio de un sistema de cableado y canalizados hacia la superficie a una caseta de instrumentación (figura 73) con el equipo adecuado para la recolección de datos y procesamiento de la información.

Los instrumentos instalados en la sección de control a monitorear deben cumplir con condiciones y materiales que garanticen su durabilidad y correcto funcionamiento dados las condiciones agresivas a las que estarán sujetos durante su vida útil, es importante destacar que al ser un sistema novedoso se requiere una colaboración estrecha con los fabricantes de los equipos, esto con la finalidad de satisfacer todos los requisitos de calidad y precisión.

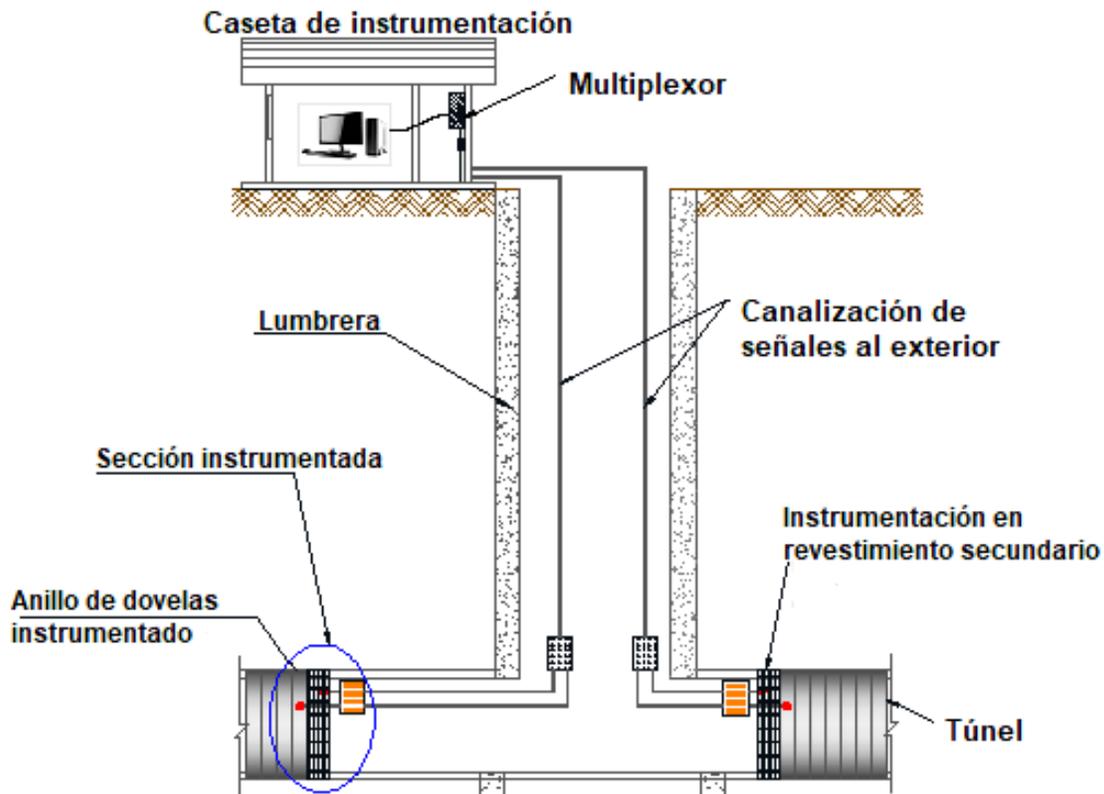


Figura 73 Sección instrumentada para el monitoreo en la etapa operativa (Rivera, *et al.* 2019)

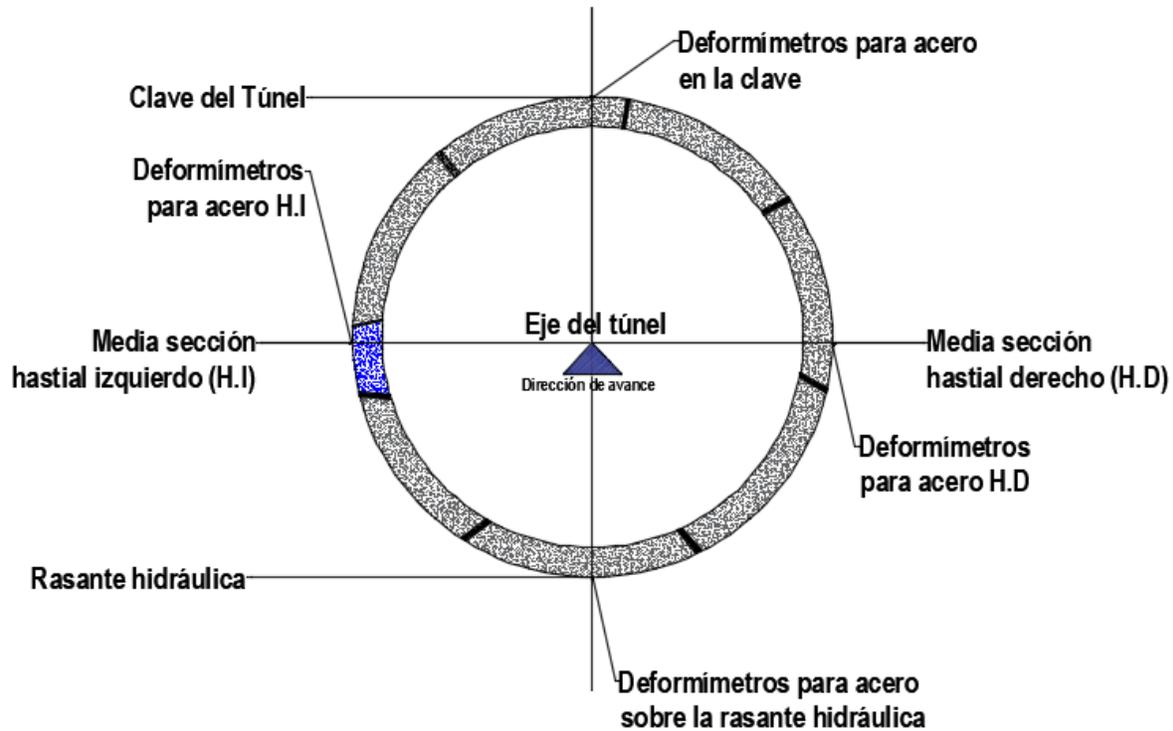
#### 4.4.1 Ubicación de los instrumentos

Una vez definida la sección de control, la ubicación e instalación de los instrumentos se realiza de acuerdo a lo definido en el plan de auscultación, en el caso del TEO, los instrumentos se instalaron en cada uno de los revestimientos (figura 74), primario (anillos de dovelas de concreto reforzado) y secundario (concreto reforzado), cada uno se ubicó en cuatro puntos:

- ❖ Clave del túnel (CL)
- ❖ Hastial derecho (HD)
- ❖ Hastial izquierdo (HI)
- ❖ Rasante hidráulica o cubeta (CU)



### UBICACIÓN DE INSTRUMENTOS EN ANILLO



*Figura 74* Posición de los instrumentos colocados en la sección de control (Rivera *et al.* 2019)

#### 4.4.2 Secciones instrumentadas

A lo largo del trazo del Túnel Emisor Oriente se localizan diferentes zonificaciones geotécnicas y unidades geológicas (figura 75), por la experiencia adquirida en el tuneleo se considera que la mayor problemática durante la etapa de excavación se presenta en las zonas donde existe transición de una unidad a otra, esto sucede por las diferencias de propiedades geomecánicas, permeabilidad, flujos de agua, etc.

En este sentido, para verificar el comportamiento del túnel durante la etapa constructiva, verificar las hipótesis de diseño y evaluar la calidad de los procedimientos empleados cuando el túnel se encuentre en operación es necesario establecer secciones de monitoreo en las zonas que pueden presentar problemas de inestabilidad, para de este modo, tomar acciones preventivas y/o correctivas a favor de la optimización de los procedimientos y recursos.

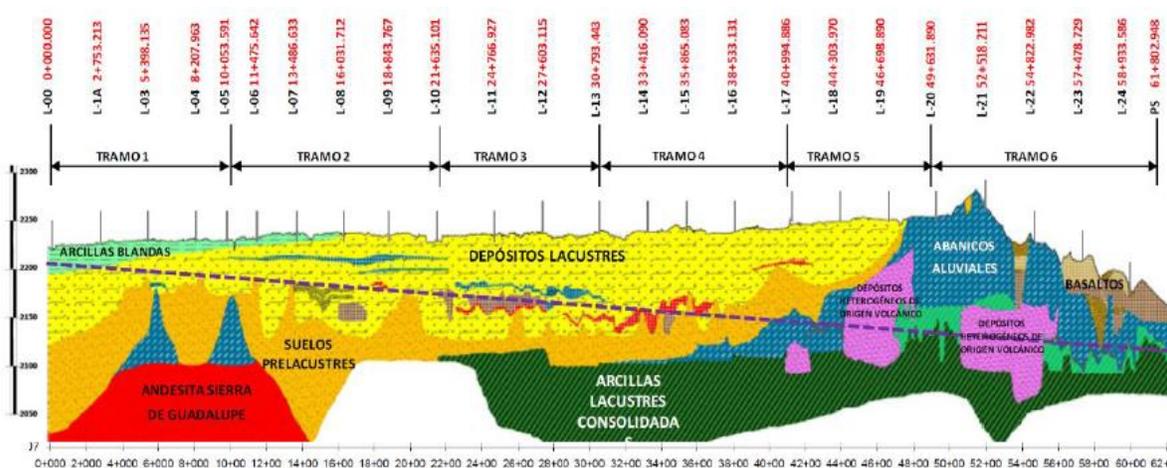


Figura 75 Perfil geológico a lo largo del trazo del eje del TEO (CONAGUA, 2012)

### 4.4.3 Instrumentos instalados en las secciones de control

La instalación de los instrumentos de medición debe ser realizada por personal con la suficiente experiencia que le permita analizar y prever cualquier situación que pueda comprometer la confiabilidad de las mediciones, este proceso se debe realizar siguiendo rigurosamente todas las especificaciones establecidas desde el plan de instrumentación. De manera general, la instalación de los instrumentos se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Suministro de instrumentos y equipo de instalación a la sección de control.
2. Verificaciones finales de instrumento a instalar.
3. Preparación del sitio donde se instalarán los instrumentos.
4. Elaboración de ficha de instalación.
5. Monitoreo de prueba.

Las fichas de instalación tienen la finalidad de documentar el proceso y comprobar que éste se realizó siguiendo todas las especificaciones establecidas en el programa de instrumentación, en la ficha se deben colocar las cotas de la zona instrumentada, fecha de instalación, lecturas iniciales, verificaciones al instrumento, fotografías y observaciones que permitan corroborar la correcta instalación en caso de existir anomalías. Es importante destacar que los equipos instalados deben cumplir con las características de durabilidad y funcionalidad necesarias para que se obtenga información confiable y precisa durante el periodo de monitoreo.

El equipo de instrumentación instalado en las secciones de control para el monitoreo y la automatización de las mediciones se divide en dos partes: al interior y al exterior del túnel.

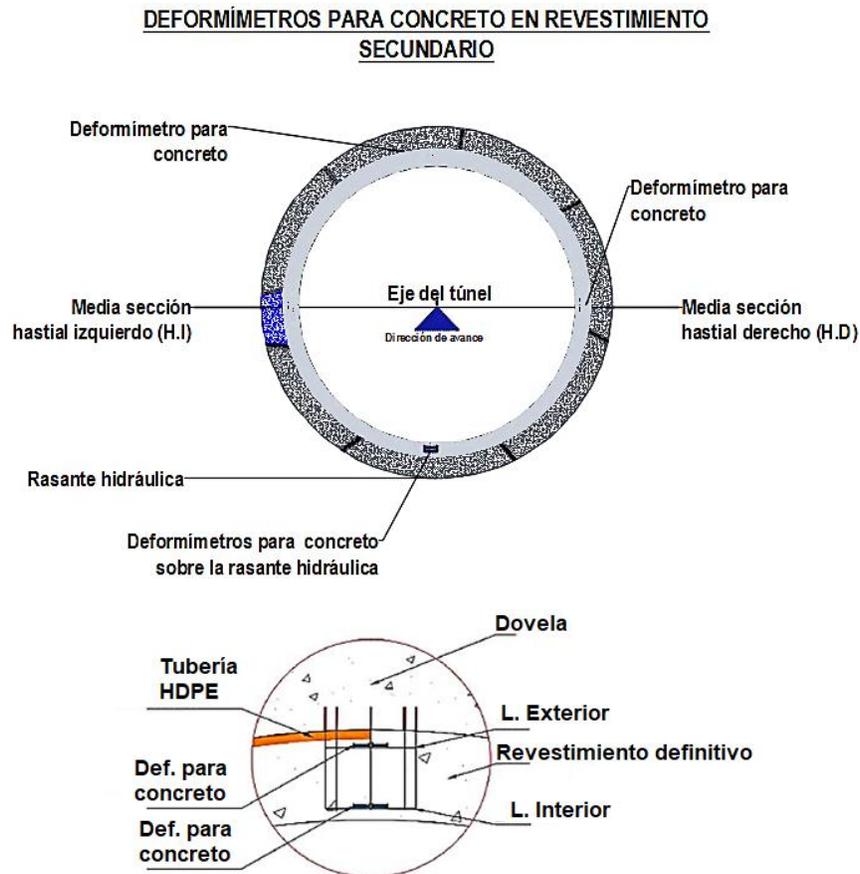


### En el interior del túnel:

- ❖ Celdas de presión.
- ❖ Deformímetros para acero.
- ❖ Deformímetros para concreto (ambos de cuerda vibrante).

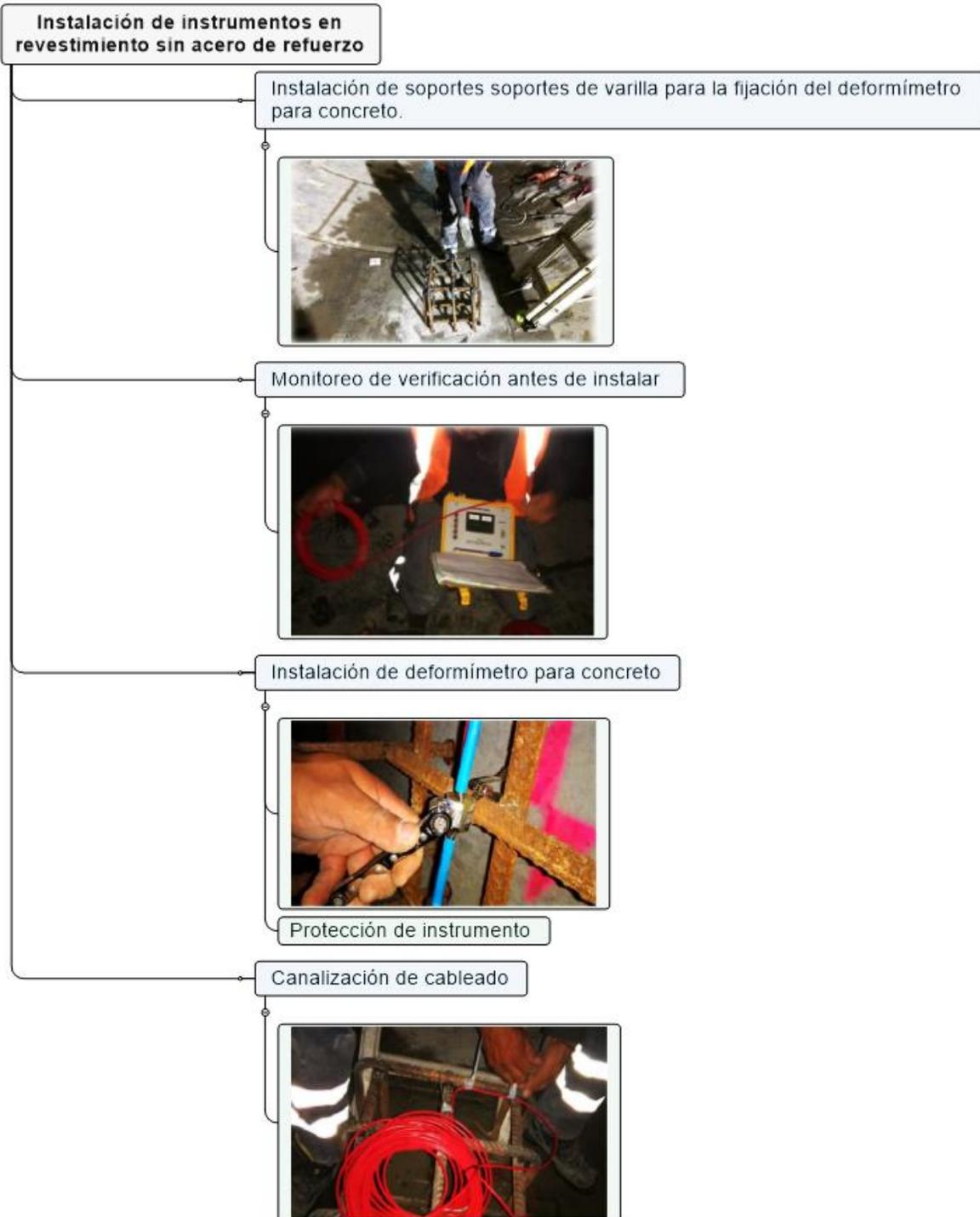
Para el caso de los revestimientos del Túnel Emisor Oriente, las secciones de control se presentan en dos casos:

### CASO 1 sin acero de refuerzo en revestimiento secundario (figura 76)



La tubería empleada para la canalización de los cables de señal al exterior es del tipo HDPE (polietileno de alta densidad), su implementación en este tipo de proyectos de monitoreo presenta ventajas entre ellas su fácil manejo e instalación, buena resistencia al ataque químico (oxidación o corrosión por acción electrolítica) producto de las aguas residuales.

A continuación, en la figura 77 se presenta la metodología para la instrumentación de la sección en donde no se colocó acero de refuerzo en el revestimiento secundario.



*Figura 77* Instalación de instrumentos en revestimiento sin acero de refuerzo (González, 2016)



CASO 2 con acero de refuerzo en revestimiento secundario (figura 78).

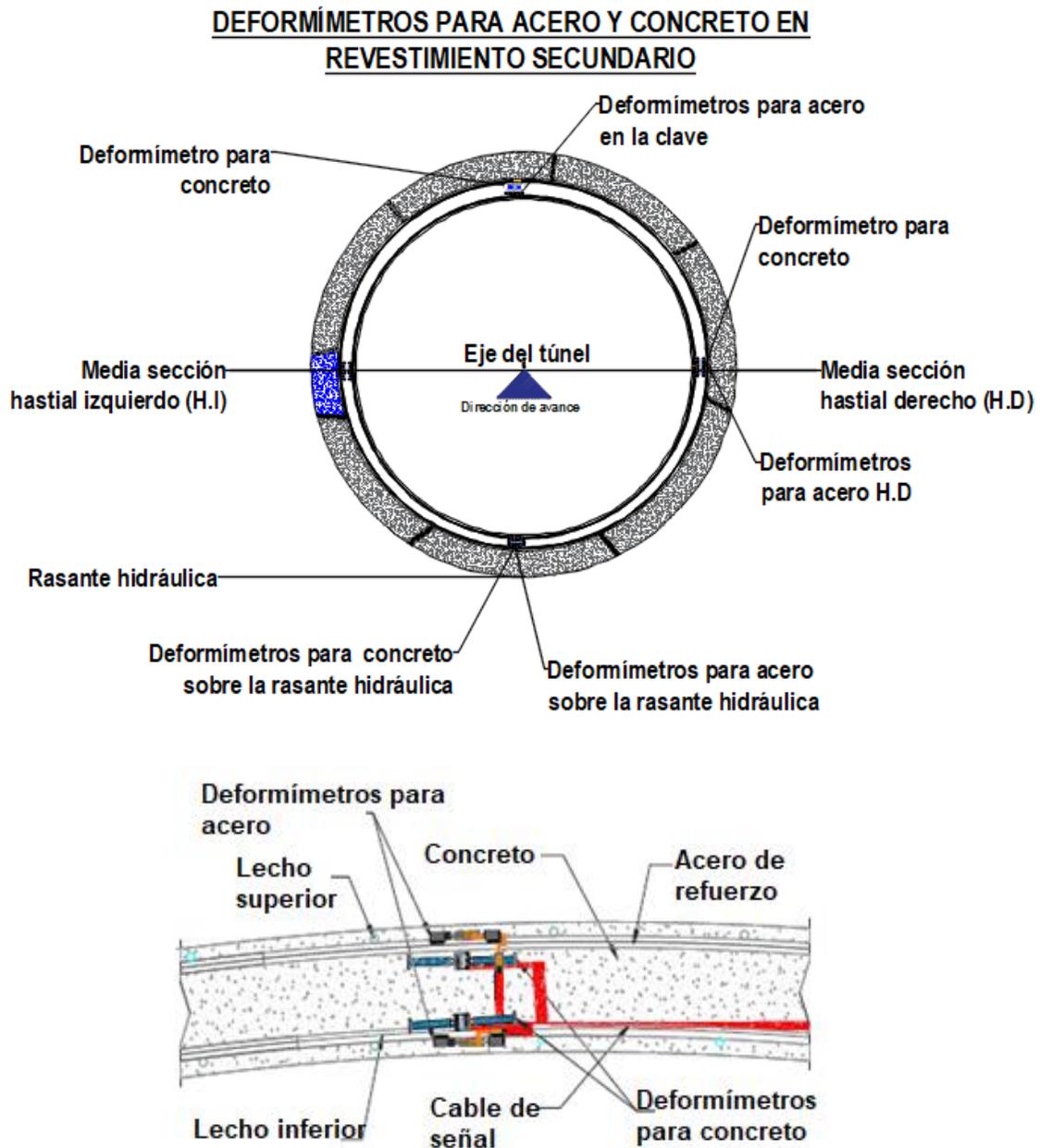
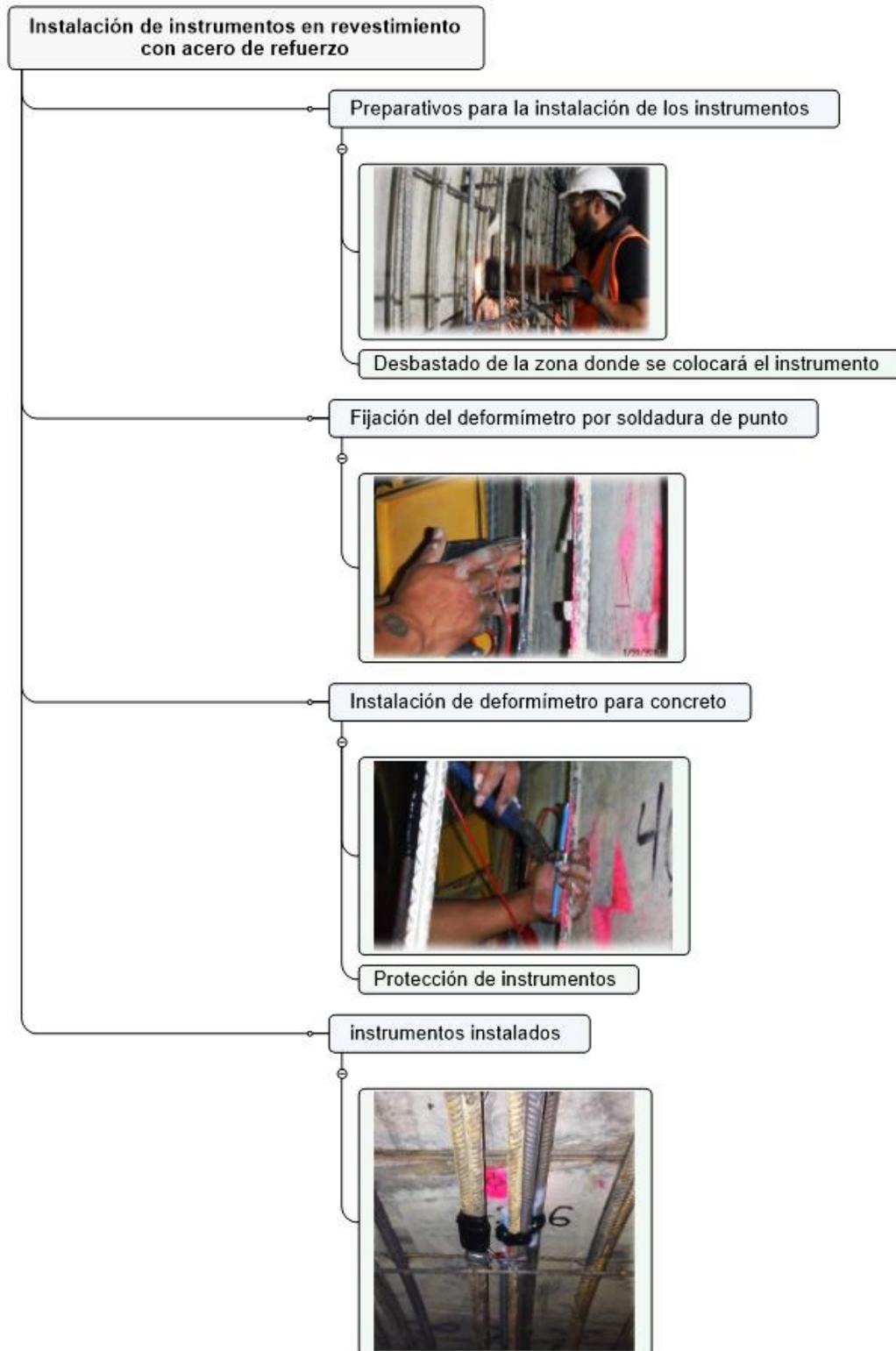


Figura 78 Instrumentación en revestimiento con acero de refuerzo (Fierro, 2018)



## Capítulo 4

A continuación se presenta la metodología para la instrumentación de la sección en donde sí se colocó acero de refuerzo (figura 79) en el revestimiento secundario.



*Figura 79* Instalación de instrumentos en revestimiento con acero de refuerzo (González, 2016)



El procedimiento para la canalización de los cables de señal de cada instrumento colocado en el revestimiento hacia la estación de monitoreo se presenta en la figura 80.



*Figura 80* Procedimiento de canalización de cables de instrumentos (González, 2016)



**Al exterior del túnel:** se colocarán casetas de monitoreo en cada una de las lumbreras desde la L6 hasta el portal de salida, en total, serán 20 estaciones de instrumentación, cada una de ellas cuenta con equipos para el registro y almacenamiento (multiplexores y dataloggers) de los datos recopilados por los instrumentos de medición.

La metodología de recopilación y procesamiento se resume en lo siguiente:

1. Canalización de los cables de señal del instrumento hacia el exterior (casetas de monitoreo).
2. Conexión de los cables de señal al multiplexor.
3. El equipo multiplexor es conectado al sistema de almacenamiento de datos (datalogger).
4. De acuerdo a las frecuencias de monitoreo establecidas, se realizará la recolección de datos por medio de una PC.
5. Con ayuda de software especializado se procesará la información para evaluar las tendencias y visualizar el comportamiento de los revestimientos del túnel en la etapa operativa.

#### **4.4.4 Características de los instrumentos**

La selección de los instrumentos empleados en el monitoreo debe realizarse de acuerdo a los objetivos establecidos en el plan de instrumentación y las variables que deberán medirse para evaluar el comportamiento durante la etapa operativa, para esto, es necesario utilizar instrumentos que proporcionen información confiable de acuerdo a la variable que medirán, también, es necesario que se tenga la seguridad de su buen funcionamiento y que el personal encargado de su manipulación esté capacitado para que exista un menor nivel de incertidumbre por los errores que se pudieran presentar.

En el proceso de selección deben considerarse aspectos fundamentales como: el suministro de los equipos, los costos de instalación, vida útil, confiabilidad y la experiencia previa que tenga el personal encargado de instalar los instrumentos, recolectar y procesar la información generada, es importante que los instrumentos seleccionados para este tipo de estructuras cumplan las siguientes características:

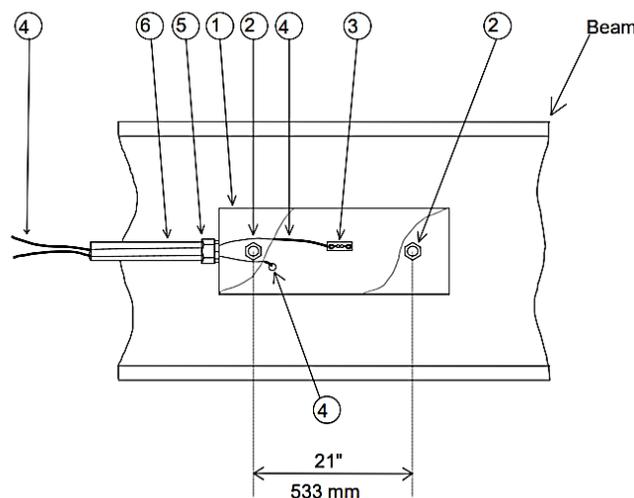
- ❖ Funcionamiento sencillo, es decir, que no sea difícil la capacitación para el personal que va a estar a cargo de la instalación y posteriormente la recolección e interpretación de los datos.



- ❖ Durabilidad, por el ambiente agresivo al que se encontrarán sometidos los instrumentos en un túnel para el desalojo de aguas residuales.
- ❖ Protección de los instrumentos, la cual se diseña en función del tipo, instalación y condiciones de operación. En el caso de la instrumentación para un túnel de aguas residuales las protecciones deben ser muy robustas y normalmente diseñadas para casos particulares.
- ❖ Facilidad para la toma de lecturas, calibración, instalación y verificación de su funcionamiento.

Los instrumentos instalados en las secciones de control de un túnel para el desalojo de aguas residuales deben satisfacer las condiciones de durabilidad para un óptimo funcionamiento durante la etapa operativa, en este sentido, son de vital importancia las características y propiedades de los equipos debido a las condiciones adversas a las que se enfrentarán por el flujo de las aguas residuales y los gases que estas generan.

Actualmente, uno de los motivos principales de la nula implementación de sistemas de monitoreo en la etapa operativa es la inexistencia de equipo que pueda tener un desempeño eficaz ante las condiciones del medio en el que serán instalados. Para prevenir el daño mecánico y químico que puedan sufrir los instrumentos estos deben ser protegidos con recubrimientos, de acuerdo con el fabricante GEOKON, instrumentos como los deformímetros pueden ser protegidos por medio de placas de cubierta especiales hechas de lámina de acero (figura 81). Para evitar la corrosión en los instrumentos de medición se debe de prevenir mediante la aplicación de un anticorrosivo, con la finalidad de dar una mayor vida útil y permitir el correcto funcionamiento.



*Figura 81* Cubierta protectora (GEOKON, 2019)



## Capítulo 4

Los componentes principales del deformímetro y la cubierta que brinda protección a deformímetros son presentados en la tabla 19.

**Tabla 19** Componentes principales del deformímetro y la cubierta protectora (GEOKON., 2019)

Clave	Descripción	Fabricante	No. de Parte
	<b>Deformímetro VK-4100 (debajo de la bobina)</b>	Geokon	4100-2
1	Cubierta de acero en U (LxWxH) 21x4x1 ½” .533x 101 x 31mm	Geokon	4100-7
2	Perno ½ - 13x3”		
3	Bobina de excitación del deformímetro	Geokon	4100-3
4	Cables, 4 conductores blindados, con forro de PVC	Geokon	2-187V3
5	Conector de conductores	T&B	5231
6	Conductor flexible	SealTite	3/8”

### 4.5 Monitoreo

El monitoreo del túnel durante la etapa operativa debe realizarse siguiendo las especificaciones establecidas en el plan de instrumentación, se debe verificar que los resultados obtenidos durante esta actividad sean seguros y confiables, es decir, representen de forma clara el comportamiento real de la estructura.

#### 4.5.1 Automatización

La automatización de un sistema de adquisición de datos (figura 82) en un túnel durante su etapa operativa cumple diversos objetivos que contribuyen a un correcto monitoreo (SISGEO, 2016), entre ellos destacan:

- ❖ La obtención de lecturas en tiempo real
- ❖ Conocimiento acerca de los umbrales de alarma presentados en cada instrumento
- ❖ Lectura y almacenamiento de grandes cantidades de datos obtenidos por medio de un gran número de instrumentos instalados en las secciones de control.
- ❖ Transmisión de información a un centro de control para la verificación del comportamiento a largo plazo.

En el caso de los túneles para el desalojo de aguas residuales, la automatización del sistema de instrumentación representa una alternativa eficiente para la recolección de datos y procesamiento, esto debido a la agresividad de las aguas residuales y los gases que estas generan, en este sentido, es necesario recurrir al uso de sistemas automatizados que desde forma remota permitan verificar y comprobar el correcto funcionamiento de la estructura y tomar decisiones a favor de la estabilidad.



El principio básico de funcionamiento del monitoreo automatizado es el siguiente:



*Figura 82 Principio básico de funcionamiento de un sistema de monitoreo automatizado*

1. El datalogger emite un pulso eléctrico que activa el multiplexor.
2. Los multiplexores reciben los pulsos eléctricos y se inicia el monitoreo automático de la sección instrumentada.
3. Se monitorea el revestimiento primario (celdas de presión, deformímetros) y el revestimiento secundario.
4. El monitoreo se inicia de aguas arriba hacia la sección instrumentada ubicada aguas abajo.

#### 4.5.2 Frecuencias de monitoreo

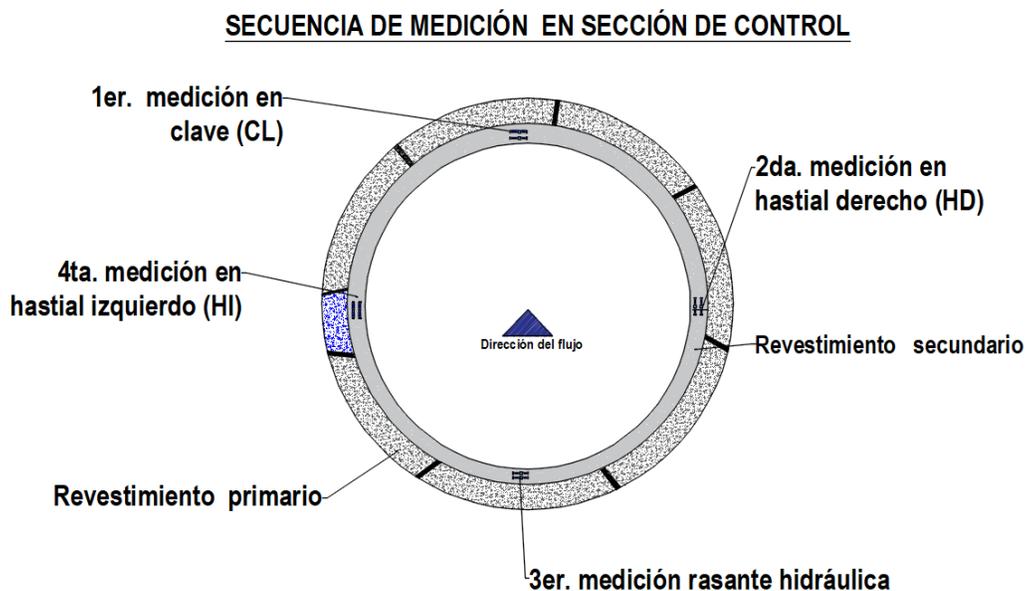
Una de las interrogantes en el uso de sistemas de instrumentación es: ¿Cada cuánto hay que monitorear la estructura? Para establecer la frecuencia de monitoreo durante la etapa operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales necesario considerar lo siguiente:

- ❖ Variables a medir y su evolución a largo plazo.
- ❖ Vida útil de la estructura y situaciones que enfrentará durante la etapa operativa.
- ❖ Durabilidad de los instrumentos de medición.
- ❖ Nivel de incertidumbre ante situaciones que se puedan comprometer la estabilidad en la operación.

Para el caso del TEO, de acuerdo con las características geológico geotécnicas e influencia del fenómeno de consolidación y hundimientos regionales que se presentan en el valle de México, es necesario que se realice un monitoreo durante un largo periodo ya que es cuando la estructura estará sometida a diversos factores que pudieran afectar su estabilidad. El plazo de monitoreo dependerá de la vida útil de los instrumentos (deformímetros, celdas de presión), la capacidad de los equipos de recolección y almacenamiento (multiplexores y dataloggers).



El monitoreo del Túnel Emisor Oriente durante la etapa operativa sería de forma automática, los instrumentos estarían realizando alrededor de 4 lecturas diarias iniciando en el revestimiento primario (figura 83).



*Figura 83* Secuencia de medición

### 4.5.3 Informes de monitoreo

Una vez recolectada y procesada la información, es necesario emitir informes de monitoreo el cual tiene por objetivo evaluar el comportamiento de cada una de las variables medidas durante la etapa operativa y su comparación respecto a los valores previstos en las hipótesis de diseño, la frecuencia dependerá de lo establecido en el plan de auscultación y el comportamiento real. El análisis y procesamiento de cada una de las variables permitirá a los encargados de realizar la interpretación de los datos recolectados identificar las tendencias de comportamiento del túnel y tomar decisiones a favor de la estabilidad y funcionalidad de la estructura durante la operación.

Con la finalidad de realizar la recolección de los datos almacenados en el datalogger, en el caso del TEO, la dependencia encargada de la operación tendrá la responsabilidad de organizar brigadas geotécnicas que periódicamente realicen el levantamiento de las lecturas, en este sentido, el ingeniero especialista encargado de la recolección, procesamiento y análisis debe emitir un informe en donde se identifiquen las tendencias y se detalle el comportamiento de cada una de las variables medidas por los instrumentos.



Para realizar la recolección de los datos generados por los instrumentos de medición es necesario hacer uso de software que ayude al análisis y permita la visualización de la información de forma gráfica y equipo de cómputo eficiente para optimizar el tiempo de procesamiento.

El procedimiento de recolección se detalla a continuación:

1. Se hace uso de una interfaz de salida de datos a una unidad de almacenamiento portátil.
2. Los datos se almacenan en una PC con los siguientes requerimientos:

**RAM 8GB**

**HDD 2TB**

**SOFTWARE WINDOWS 10**

**PROGRAMA DE VISUALIZACIÓN “GEOVIEWER”**

3. Una vez almacenados los datos en la PC se realiza el procesamiento de la información con ayuda de un software de monitoreo geotécnico que sea útil en la evaluación del comportamiento de este tipo de estructuras.
4. Después de realizar el procesamiento, se visualizan por medio de gráficos, tablas, e imágenes la situación de cada una de las variables analizadas.

La elaboración del informe de monitoreo debe ser explícito en cada uno de los datos que presente, este debe incluir:

- ❖ Reporte detallado de los valores de cada una de las variables medidas por los equipos de monitoreo.
- ❖ Evaluación de aquellas variables que presenten anomalías y valores fuera de los establecidos en los umbrales previstos en el diseño y en los documentos contractuales.
- ❖ Análisis de la información con su respectiva interpretación comparando con mediciones previas y emitiendo conclusiones acerca de la seguridad y comportamiento de la estructura.
- ❖ En caso de existir alguna anomalía, se deben establecer y programar actividades preventivas y/o correctivas a favor de la estabilización del túnel.
- ❖ Por último, se deben realizar observaciones acerca de cualquier situación que pueda proporcionar información para la evaluación del comportamiento.



## Capítulo 4

---



---

## CAPÍTULO QUINTO

### **Recomendaciones para el análisis del comportamiento en la etapa operativa**

Este capítulo tiene como fin realizar recomendaciones y propuestas para considerar la implementación de un sistema de auscultación como el presentado en este trabajo de investigación, el cual se realizó para cubrir el vacío de información existente y detonar este tipo de prácticas de monitoreo durante la etapa operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales construido con máquina tuneladora del tipo EPB.

#### **5. Implementación del sistema de auscultación**

La implementación de un sistema de auscultación automatizado durante la etapa operativa de un túnel para el desalojo de aguas residuales proporciona información útil acerca del comportamiento de la estructura una vez finalizados los procedimientos constructivos, persigue diversos objetivos que benefician a diseñadores, contratistas, clientes y dependencias. Es recomendable que se consideren este tipo de sistemas de monitoreo para zonas en las que el acceso a la recolección de datos sea difícil o se ponga en riesgo la seguridad y salud del personal responsable, también es indispensable su implementación en estructuras donde se requiera verificar la calidad de los procedimientos constructivos y materiales empleados una vez que la estructura se encuentra en operación.

Desde el punto de vista contractual, es recomendable implementar sistemas de este tipo por la información certera que proporcionan para la resolución de controversias y deslinde de responsabilidades en caso de que se presenten situaciones que han comprometido la seguridad y calidad del proyecto ejecutado.

El monitoreo de un túnel para el desalojo de aguas residuales durante la etapa operativa es un proceso novedoso, que hasta el momento de realizar este trabajo de investigación, no ha sido implementado en ninguna parte del mundo. La complejidad del monitoreo cuando el túnel se encuentra en servicio radica en diversos aspectos que van desde la falta de instrumentos resistentes a los ambientes agresivos, inexistencia de normativa o manuales de procedimientos que proporcionen recomendaciones para el diseño de este tipo de sistemas de auscultación y por lo tanto, el desconocimiento de los beneficios para la estructura y para todos los involucrados desde las etapas de diseño, construcción y operación.



### 5.1 Instrumentación requerida

Se recomienda que los instrumentos empleados para el monitoreo en la etapa operativa sean capaces de satisfacer las condiciones de durabilidad para que el medio agresivo sobre el que estarán instalados no afecte su precisión y confiabilidad, actualmente, debido a la nula implementación de este tipo de sistemas de auscultación en túneles para el desalojo de aguas residuales, en el mercado son limitados los equipos que puedan hacer frente a este tipo de situaciones, lo que ha dificultado en gran manera la implementación del monitoreo en la etapa operativa, por lo que, es indispensable que los proveedores y fabricantes de instrumentos vean en este tipo de sistemas de monitoreo un área de oportunidad para la innovación.

La selección de los instrumentos más adecuados para el monitoreo debe realizarse teniendo en cuenta diversos factores, tales como: experiencia del personal encargado de su instalación, monitoreo y procesamiento de la información generada, además de la fiabilidad que se requiere para la medición de cada una de las variables de interés, en este sentido, es importante que la selección de los equipos se apege de forma estricta a lo establecido en el plan de auscultación. Respecto a los requerimientos de instalación de los instrumentos es recomendable que la colocación se realice por personal con experiencia en la manipulación de este tipo de equipo dada la sensibilidad de los componentes, es ideal que exista un estricto control de calidad para evitar cualquier situación que afecte la precisión y confiabilidad.

El principio de funcionamiento de los sensores influye en la selección del equipo que será instalado en la sección de control, por ello, es recomendable que el personal encargado de elaborar el plan de instrumentación tenga los conocimientos y la experiencia necesaria para seleccionar cada uno de los instrumentos que medirán las variables de importancia para asegurar la estabilidad de la obra a corto y largo plazo, además de disminuir las incertidumbres que pueda generar el desarrollo de los procedimientos constructivos y la propia operación de la estructura. Los dispositivos de cuerda vibrante son particularmente adecuados para lecturas en ubicaciones únicas, como extensómetros, piezómetros, inclinómetros entre otros.

Para la verificación del comportamiento es recomendable y necesario automatizar el sistema de auscultación, debido a la dificultad que representa el ingresar a la estructura y tomar las lecturas cuando se encuentre en operación. La automatización tiene la finalidad de recolectar y procesar los datos generados por los instrumentos instalados en cada una de las secciones de control para que posteriormente sean analizados por el personal designado para medir cada una de las variables involucradas en la evaluación del comportamiento del túnel.



## 5.2 Evaluación de los datos recolectados

Analizar la información generada por los instrumentos de medición constituye una parte fundamental para la evaluación del comportamiento durante la etapa operativa. El análisis de los esfuerzos y deformaciones son útiles para detectar cualquier situación de inestabilidad que pueda presentar el túnel una vez finalizados los procedimientos constructivos. Es importante realizar el análisis del comportamiento inmediatamente después de que los datos son recolectados, la información generada por los instrumentos de medición debe ser analizada por ingenieros especializados que conozcan los objetivos de la implementación de la instrumentación y que posean conocimientos teóricos y prácticos en sistemas de auscultación de este tipo.

La evaluación y análisis de los datos generados por el sistema de monitoreo deben proporcionar información segura y confiable sobre el comportamiento de la estructura, para esto, es necesario implementar una metodología que permita identificar situaciones que estén fuera de los límites previstos en la etapa de diseño del túnel.

A continuación, se presenta la metodología necesaria para el análisis y evaluación de la información obtenida de los instrumentos de medición instalados en la sección de control.

- ❖ El procedimiento para la obtención de los datos debe ser realizado de forma cuidadosa y detallada con la finalidad de que la información obtenida sea la que representa el comportamiento real de la estructura.
- ❖ Una vez recolectada la información se realiza el procesamiento, en esta etapa es primordial que el personal encargado conozca las limitaciones y características de cada instrumento, así como los umbrales y valores límite de cada variable establecidos desde un inicio en el plan de instrumentación.
- ❖ Para realizar el análisis es necesario que se comparen los valores de las variables medidas con los instrumentos, los cuales representan el comportamiento real del túnel contra el previsto en las hipótesis de diseño.
- ❖ Después de haber comparado las variables es necesario verificar en qué parte de los umbrales establecidos en la etapa de diseño se encuentran y analizar si estas desviaciones podrían derivar en alguna situación de inestabilidad que pueda comprometer el funcionamiento de la estructura.
- ❖ Es importante identificar si existe una tendencia de desestabilización y analizar los posibles fenómenos que estén provocando anomalías o condiciones de inestabilidad.



En el caso de existir una variación considerable entre los valores medidos y los previstos en la etapa de diseño, se debe elaborar un informe donde se detalle el motivo de dicha variación, eventos posibles que pudieron originarla así como las repercusiones en el funcionamiento del túnel y las acciones preventivas o correctivas que se recomiendan tomar para garantizar la estabilidad.

- ❖ Se debe tener un control documental que funcione como una fuente de información que permita optimizar diseños, procedimientos y materiales en futuros proyectos de monitoreo que involucren obras de este tipo.

### 5.2.1 Umbrales de control

Una vez realizado el análisis de la información recolectada por los instrumentos de monitoreo, es recomendable verificar en qué punto de los umbrales de control establecidos previamente en el plan de auscultación y documentos contractuales se encuentran cada una de las variables de interés, es importante que esta verificación se realice durante todas las etapas del proceso constructivo del túnel, desde los diseños hasta la operación. Tébar J. *et al.* (2014) menciona que en la definición de cada uno de los parámetros a monitorear dentro de los umbrales de control deben escogerse los más significativos que indiquen y proporcionen una idea del comportamiento real de la estructura.

A continuación se presentan las siguientes recomendaciones en relación a la determinación de los umbrales de control.

- ❖ Se deben comparar los resultados que proporcionan los instrumentos de medición instalados en las secciones de control con los previstos en las hipótesis de diseño y en los términos de referencia o documentos contractuales, esto con la finalidad de verificar si existen indicios de desestabilización.
- ❖ Es recomendable establecer un plan de acción y toma de decisiones en caso de que los valores de alguna variable rebasen algún umbral.
- ❖ Cada una de las situaciones que puedan presentar un riesgo a la estructura deben estar documentadas y con frecuencias de medición claramente establecidas, esto con la finalidad de llevar un seguimiento y control de cualquier eventualidad que pudiera presentarse.



La determinación de los umbrales de control dependerá de diversos factores, entre ellos, el nivel de incertidumbre, cantidad de estudios realizados para el conocimiento del medio sobre el cual se desarrollarán los procedimientos constructivos y la experiencia de los involucrados en las distintas etapas. Tébar *et al.* (2014) proponen tres criterios distintos para la determinación de umbrales de control (tabla 20) en función del parámetro que se desee tomar como referencia:

En función de un **Valor Máximo Admisible (VMA)**:

- ❖ Si el umbral se fija en función de un VMA: propone el paso del estado ámbar al estado verde en el 50% de dicho valor. Esto equivale a un coeficiente de seguridad (C.S.)= 2.
- ❖ El coeficiente de seguridad igual a la unidad equivale a la rotura o colapso, por lo que se considera que el paso del nivel ámbar al rojo debe fijarse con el suficiente margen de maniobra, entendiéndose que el 75% del VMA. Equivalente a un C.S. =1.33

En función de un **Valor Esperado (VE)**:

- ❖ El valor esperado puede ser tomado en cuenta en la medida que se conoce el medio sobre el que se realizan los procedimientos constructivos, en este caso se puede tomar como valor de referencia un valor esperado en lugar de un valor último.
- ❖ Los umbrales fijados bajo este criterio, se realizan empleando cálculos estadísticos (campana de Gauss) con la finalidad de estimar la probabilidad que aparezca determinado valor.

En función de la **Evolución de movimientos**:

La medición de movimientos por medio de convergencias arroja información de importancia para la verificación del comportamiento del túnel.

- ❖ Para el control de estos parámetros Tébar *et al.* (2014) proponen como valor general los límites de  $\pm 10$  mm y  $\pm 15$  mm para los umbrales ámbar y rojo respectivamente, aunque en el caso de afecciones a estructuras colindantes, el valor umbral deberá ser determinado de forma individual para cada estructura en función de sus características y estado de conservación.



Tabla 20 Determinación de umbrales de control (Tébar et al. 2014)

	Estado Verde	Estado ámbar	Estado Rojo
Valor máximo admisible	< 50%	50%-75%	>75%
Valor esperado	<75%	75%-125%	>125%
Evolución de movimientos	< $\pm$ 10mm	Entre $\pm$ 10mm-15mm	> $\pm$ 15mm

Es recomendable que se establezcan medidas de acción que ayuden a evitar situaciones que puedan propiciar condiciones de inestabilidad al pasar de los umbrales establecidos, para el caso del monitoreo en zona segura (verde) se recomienda que el monitoreo se realice de forma normal con la frecuencia establecida en el plan de instrumentación, en el caso de la zona de decisión (ámbar) es necesario incrementar el número de lecturas y evaluar la tendencia, valor de las mediciones y la velocidad de las variaciones.

Cuando los valores del monitoreo se encuentren en los umbrales de la zona de decisión, es necesario que el personal experto tenga la capacidad de evaluar rápidamente la situación que está generando la tendencia, además se deben tomar decisiones y tener listo el plan de acción en caso de que los fenómenos que están propiciando la desestabilización evolucionen a la zona de actuación (rojo), una vez que la estructura se encuentra en la última fase se deben incrementar los controles y realizar un seguimiento minucioso, también, se implementarán las medidas correctivas establecidas en el plan de acción con la finalidad de lograr la estabilidad del túnel.

### 5.3 Análisis e interpretación de la información.

Para realizar una correcta verificación del comportamiento de la estructura, es necesario que la interpretación de los datos generados por el sistema de monitoreo instalado en el túnel sea realizada por personal capacitado con experiencia y los conocimientos teóricos y prácticos. Es recomendable que las grandes cantidades de información generadas sean debidamente procesadas y analizadas para posteriormente emitir conclusiones que repercutirán en el éxito o fracaso del plan de monitoreo. En virtud de lo anterior, es necesario considerar las siguientes recomendaciones:



- ❖ Se deben establecer claramente los objetivos de cada uno de los instrumentos instalados, esto es con la finalidad de que la respuesta que se obtenga al realizar la interpretación sea la que ayude a identificar situaciones o tendencias que puedan propiciar la inestabilidad de la estructura.
- ❖ Se recomienda que el personal encargado del análisis e interpretación de la información tenga los conocimientos teóricos y prácticos en este tipo de sistemas de monitoreo, además es necesario que posea la capacidad de realizar un análisis crítico ante situaciones que requieran soluciones inmediatas.
- ❖ Es importante tratar de forma correcta las grandes cantidades de información que se genera al recolectar los datos provenientes de los instrumentos instalados en las secciones de control. En ocasiones puede ser perjudicial el exceso de información sino se clasifica y analiza de acuerdo a un objetivo en específico.

### **5.3.1 Monitoreo de anillo instrumentado**

Para realizar la verificación del comportamiento durante la etapa operativa es necesario colocar a lo largo del túnel secciones de control, se recomienda establecerlas en áreas de transición entre distintas unidades geológicas, esto debido a que son las zonas en las que se presentan mayores complicaciones o tendencias a la inestabilidad por la complejidad de los materiales existentes, por ello, es indispensable que desde la elaboración del plan de auscultación se identifiquen y analicen las zonas que deberán ser monitoreadas para llevar un control del comportamiento del túnel durante el desarrollo de los procedimientos constructivos y una vez que estos son terminados.

Con la finalidad de realizar recomendaciones para el análisis del comportamiento durante la etapa operativa del Túnel Emisor Oriente se tomará como referencia la sección monitoreada del anillo 1540 ubicado entre la lumbrera 16 y 17. En las secciones de control instrumentadas (figura 84) para el caso del revestimiento primario del TEO, fueron colocados instrumentos para medir la magnitud de las deformaciones en la clave, rasante hidráulica y hastiales, esto con la finalidad de comparar los valores previstos en las hipótesis diseño con los reales a corto y largo plazo.



Figura 84 Posición de los instrumentos colocados en la sección de control (Rivera et al. 2019)

De acuerdo con Rivera *et. al* (2019) durante la construcción del TEO se instalaron celdas de presión, deformímetros para acero y concreto en 124 anillos de dovelas a lo largo de los 62 kilómetros. La instalación del sistema de instrumentación se realizó con la finalidad de verificar el comportamiento e interacción entre los revestimientos, medir presiones de tierra, esfuerzos en acero y concreto que se presentan por la realización de los procesos constructivos y los efectos que se pudieran presentar a largo plazo durante la operación del túnel.

#### 5.4 Gráficas de comportamiento revestimiento primario

El objetivo del revestimiento primario es garantizar la estabilidad del túnel, proporcionar apoyo temporal o definitivo ante las distintas sollicitaciones durante el desarrollo de los procedimientos constructivos y en la etapa de operación. Sobre el revestimiento primario se ejercen presiones que se generan por efectos propios del desarrollo de los procedimientos constructivos, por ejemplo: la excavación, extracción de agua, inyección de mortero en el espacio anular, entre otros. Por lo anterior, es necesario que se verifique el comportamiento del túnel, se evalúen las tendencias de cada una de las variables medidas con los instrumentos colocados en el revestimiento.



La presentación de los datos generados por los instrumentos de medición se realiza por medio de tablas y gráficos, estos tienen la finalidad de proporcionar información que sirva para verificar la evolución de cada una de las variables y evaluar el comportamiento de la estructura. El uso de gráficos permite identificar tendencias y detectar oportunamente situaciones que representen indicios de inestabilidad, en este sentido, es necesario que el personal encargado del procesamiento de la información tenga el conocimiento y experiencia para identificar los fenómenos con la capacidad de tomar decisiones preventivas o correctivas a favor de la estabilización.

En los siguientes apartados se presentan las gráficas obtenidas a partir del monitoreo en los revestimientos primario y secundario en el anillo 1540 (L-17 a L-16) del Túnel Emisor Oriente.

### 5.4.1 Deformímetros para acero

En la figura 85 se presenta la gráfica de comportamiento de deformímetros para acero colocados en el revestimiento primario en el anillo 1540, los datos presentados son de las mediciones efectuadas entre el 14 de diciembre del 2013 y el 02 de mayo del 2018.

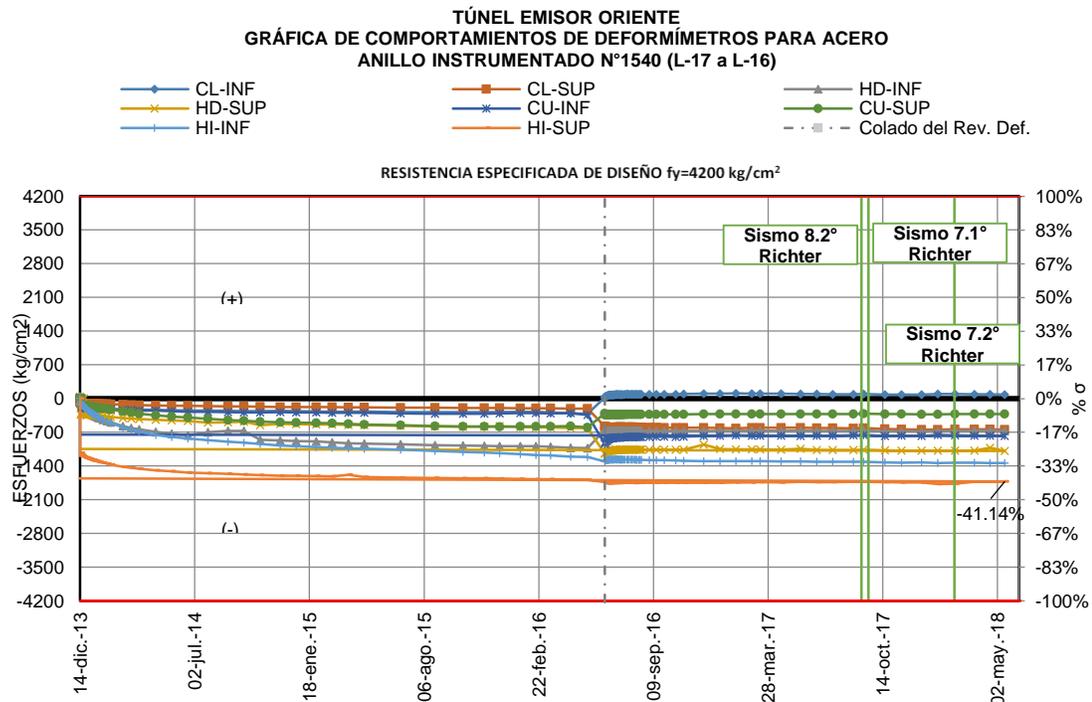


Figura 85 Gráfica de comportamiento de deformímetro para acero (Rivera *et al.* 2019)



## Capítulo 5

En la gráfica anterior se puede identificar el porcentaje de trabajo del acero en relación a la resistencia especificada de diseño ( $4200 \text{ kg/cm}^2$ ), la información presentada en las gráficas de comportamiento de cada anillo instrumentado son importantes para comprobar las hipótesis con las que fueron diseñados los revestimientos, de igual manera, representan una fuente de información para la optimización de acero durante la construcción y en los futuros diseños de obras de este tipo.

### 5.4.2 Deformímetros para concreto

En la figura 86 se presenta la gráfica de comportamiento de deformímetros para concreto colocados en el revestimiento primario en el anillo 1540, los datos presentados son de las mediciones efectuadas entre el 14 de diciembre del 2013 y el 02 de mayo del 2018

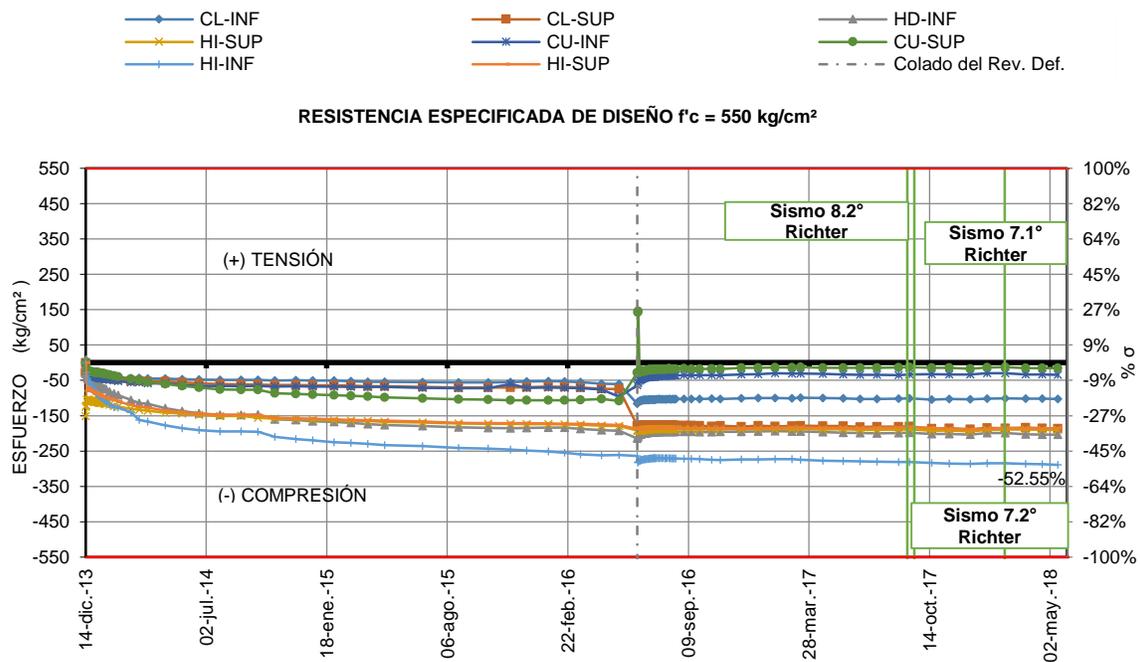


Figura 86 Gráfica de comportamiento de deformímetro para concreto (Rivera *et al.* 2019)

La gráfica anterior presenta la magnitud de los esfuerzos en el concreto en relación a la resistencia especificada de diseño ( $550 \text{ kg/cm}^2$ ).



### 5.4.3 Celdas de presión

La instalación de celdas de presión en el revestimiento primario tiene por objetivo medir magnitud y distribución de los esfuerzos sobre los anillos de dovelas instrumentados, para de este modo, verificar el confinamiento y la estabilidad del túnel durante y después del desarrollo de los procedimientos constructivos. En la figura 87 se presenta la gráfica de comportamiento de celdas de presión colocadas en el revestimiento primario en el anillo 1540, las mediciones se correspondientes al gráfico se realizaron en el periodo comprendido entre 1 de diciembre del 2013 a mayo del 2018.

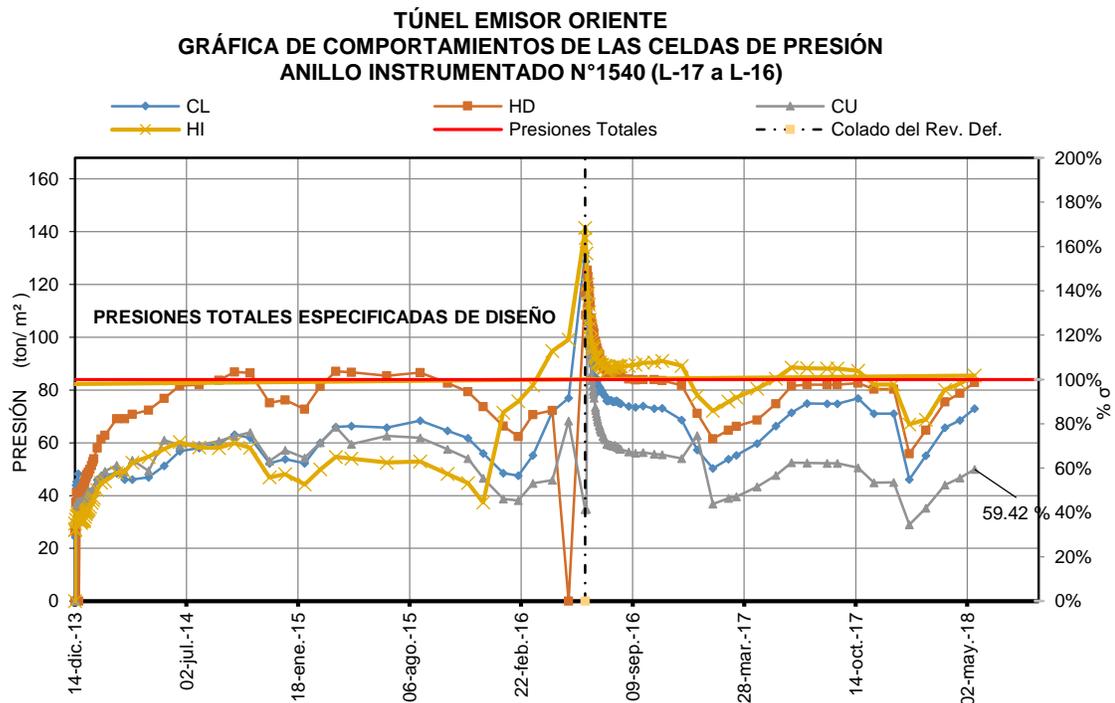


Figura 87 Gráfica de comportamiento de celdas de presión (Rivera *et al.* 2019)

Las gráficas de comportamiento de las celdas de presión colocadas en las diferentes posiciones del anillo de dovelas indican que la presión total sobre el revestimiento estuvo por el orden de las 80 ton/m<sup>2</sup>. Es recomendable que en la fase de interpretación de los gráficos se analicen y tomen en cuenta situaciones que puedan alterar las mediciones por ejemplo, el colado del revestimiento, el cual generó variaciones en todas las celdas de presión.



### 5.5 Gráficos de comportamiento revestimiento secundario

En túneles construídos en suelos blandos, es común que estén compuestos por un revestimiento secundario de concreto reforzado colado in situ, el cual tiene la finalidad de contribuir a la estabilidad a largo plazo, la colocación se realiza tiempo después de la instalación del revestimiento primario, su diseño es recomendable para soportar las cargas producidas por fenómenos que pueden ocurrir a largo plazo, por ejemplo la consolidación. Por tanto, es recomendable verificar la interacción y el comportamiento entre ambos revestimientos.

Para el caso del TEO, con la finalidad de verificar el comportamiento del túnel y evaluar la interacción entre los revestimientos una vez finalizados los procedimientos constructivos se realizó la instrumentación del revestimiento secundario, se instalaron deformímetros para acero y concreto en el cadenamiento 38+658.051. Las fechas de medición presentadas en los gráficos siguientes abarcan el periodo comprendido entre el 16 de Junio del 2016 al 7 de mayo del 2018.

#### 5.5.1 Deformímetro para acero

En la figura 88 se presenta la gráfica correspondiente a los valores arrojados por el deformímetro para acero instalado en el revestimiento secundario, se observa que el valor del esfuerzo es de  $0\text{kg/cm}^2$  lo que indica que durante ese periodo aún no se presentan cargas que el instrumento pueda registrar, por lo tanto, el porcentaje de esfuerzo en relación a la resistencia especificada de diseño ( $f_y = 4200\text{kg/cm}^2$ ) es 0%.

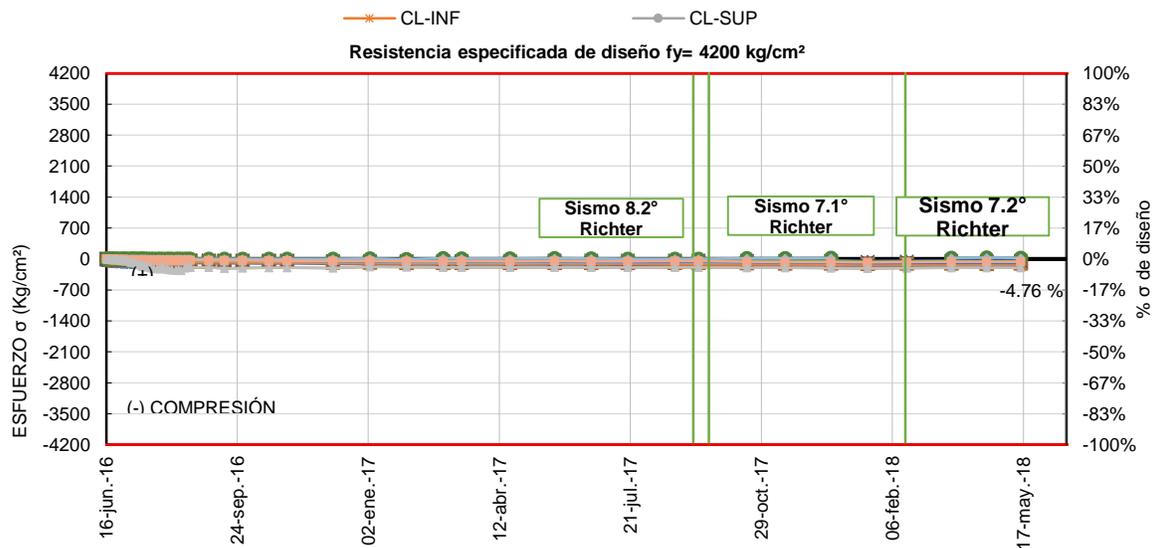


Figura 88 Gráfica de deformímetro para acero en revestimiento secundario (Rivera et. al. 2019)



### 5.5.2 Deformímetro para concreto

El monitoreo de las deformaciones en ambos revestimientos se realiza con la instalación de deformímetros de cuerda vibrante para concreto, los cuales son útiles para determinar las deformaciones en el lecho superior e inferior del anillo conformado por las dovelas y revestimiento de concreto reforzado o también llamado definitivo.

En la figura 89 se presenta el gráfico generado por los deformímetros para concreto instalados en los distintos puntos del revestimiento secundario en el cadenamiento 38+658.051, se observa que durante el periodo comprendido entre el 16 de junio del 2016 y el 17 de mayo del 2018, los instrumentos instalados en la cubeta inferior presentaron esfuerzos de compresión por el orden del 7.33% en relación a la resistencia especificada de diseño (350 kg/cm<sup>2</sup>)

El monitoreo en el revestimiento secundario del cadenamiento Cad. 38+658.051 se realizó únicamente en deformímetros para concreto.

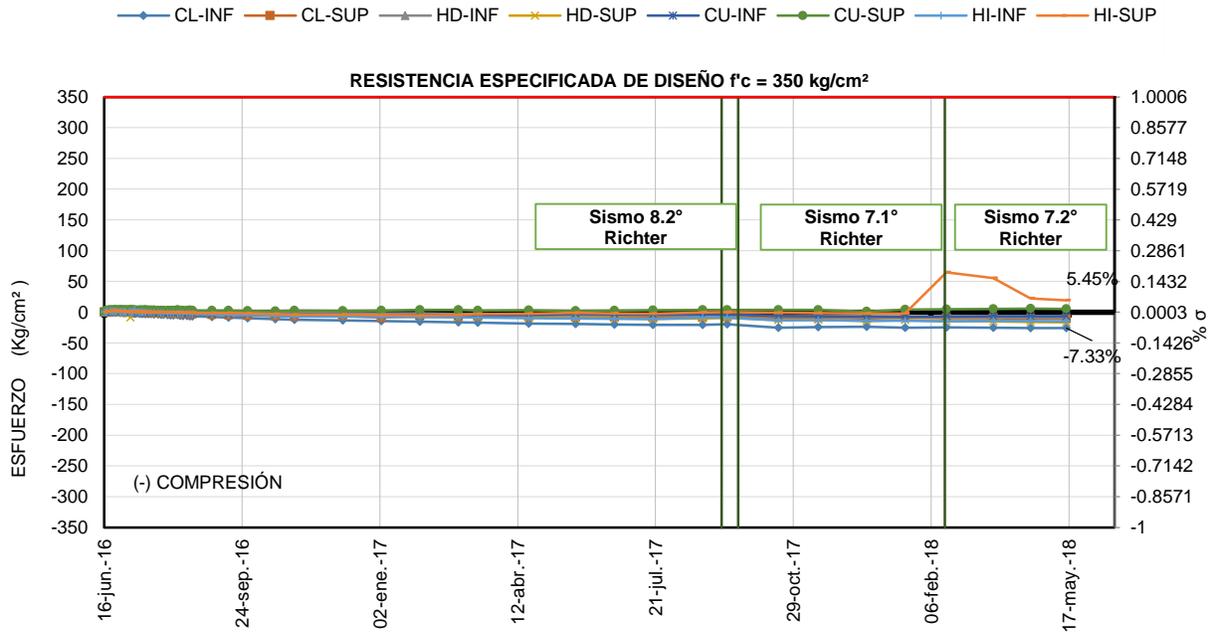


Figura 89 Gráfica de deformímetro para concreto en revestimiento secundario (Rivera et al. 2019)



### 5.6 Limitaciones

La implementación de un sistema de monitoreo novedoso como el analizado en este trabajo de investigación presenta diversas ventajas y beneficios, pero se encuentra frente a diversas limitaciones que representan un reto para todos los involucrados en la verificación y análisis del comportamiento de túneles.

En este apartado se dan a conocer las limitaciones de este tipo de sistemas, se explica que las más importantes que existen al momento de realizar este trabajo de investigación son: el desconocimiento de las ventajas que representa el monitoreo del túnel una vez finalizados los procedimientos constructivos, otra limitación es la falta de instrumentos que resistan las condiciones de agresividad, producto de las aguas residuales y los gases que estas generan, lo anterior, representa una oportunidad para que los fabricantes de equipos de monitoreo vean en esta área una oportunidad para innovar y con esto, detonar este tipo de prácticas.

#### 5.6.1 Transmisión de datos

La transmisión de los datos generados por los sensores de medición instalados en la sección de control del túnel hasta la PC donde el ingeniero encargado analiza e interpreta el comportamiento del túnel, se realiza por medio de un proceso sistémico donde el datalogger, multiplexor, módulo de comunicación y cables transmisores de señal intervienen para recolectar y transmitir automáticamente los datos de cada una de las variables medidas por medio de los instrumentos instalados en la estructura.

Para el caso de la implementación de un sistema de monitoreo de este tipo, es necesario que la transmisión de datos sea confiable y precisa ya que una vez puesto en servicio el túnel se hace complicada la corrección de cualquier anomalía presentada en los cables de señal encargados de la transmisión de los sensores hasta el dispositivo encargado de recolectar la información, en este sentido, es necesario que la selección, instalación y calibración de cada uno de los componentes del sistema sean realizados por personal especializado con capacidad de análisis para poder identificar cualquier situación que pueda representar problemas para el funcionamiento del plan de auscultación.

Los adquirentes de datos representan una herramienta fundamental en los sistemas de instrumentación automatizados, como parte de su composición, el datalogger (figura 90) cuenta con un procesador digital capaz de interpretar la señal que llegue y una memoria interna incorporada para el almacenamiento de datos, cualquier alteración en el proceso de



recolección y transmisión de la señal representará una limitación para el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo, un ejemplo de lo anterior es la distancia de la señal y la influencia de la atenuación.

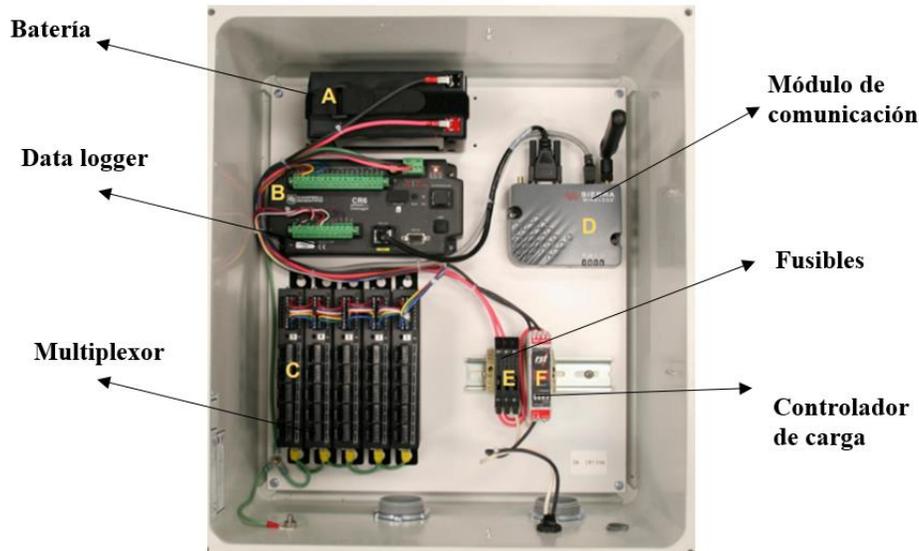


Figura 90 Componentes de un datalogger (RST instruments, 2019)

De acuerdo con RST instruments (2019), la mayoría de los adquirentes de datos utilizan una celda única de litio tipo ‘C’ o ‘D’ y proporciona hasta 10 años de alimentación. El principio básico de funcionamiento de un datalogger es el siguiente:

1. Los sensores instalados en las secciones de control instrumentadas se conectarán al datalogger por medio de cables de señal, con la finalidad de transmitir el voltaje desde el sensor hasta el procesador encargado del registro de los datos.
2. El núcleo o también llamado procesador digital del datalogger lee la frecuencia e interpreta la señal que viaja a través por cables de señal desde los sensores hasta la unidad de procesamiento.
3. Una vez que la señal ha sido interpretada por el datalogger, se procesa y almacena para su posterior recolección.

En el mercado, existen otros tipos de adquirentes de datos que se pueden utilizar para el monitoreo, lo conveniente es realizar un estudio acerca de las características del medio y las situaciones a las que se enfrentarán cada uno de los equipos.



### 5.6.2 Atenuación de la señal

En relación con las longitudes máximas de transmisión de datos, es importante considerar que el datalogger lee frecuencias, no voltaje, en este sentido, es necesario que la señal que llegue tenga la potencia adecuada para que pueda ser interpretada y registrada. De acuerdo con la Real Academia de Ingeniería (2019) la atenuación eléctrica ( $\alpha$ ) se define como la pérdida de potencia sufrida por la señal al circular por el medio de conducción, es igual a la diferencia de entre dos potencias (P1) introducida al inicio del circuito y (P2) obtenida al final del circuito.

$$\alpha = 10 \times \log \frac{P1}{P2}$$

Las mediciones recolectadas por los instrumentos de medición son transmitidas en cables de cobre como impulsos eléctricos al datalogger, el cual está equipado con un núcleo de procesamiento donde la frecuencia es leída y la señal es interpretada para posteriormente ser almacenada, entre mayor sea la distancia que recorre la señal hasta llegar al datalogger menor será la intensidad necesaria para ser leída, provocando que existan estrictas limitaciones en cuanto a la distancia desde la sección de control hasta el datalogger. La mayoría de las entradas del sistema de adquisición de datos pueden medir voltajes solo dentro de un rango de 5 a 10V, los voltajes superiores a este deben ser atenuados. El componente clave además de los instrumentos individuales y el datalogger es el sistema de cableado para:

- ❖ Fuente de alimentación del instrumento.
- ❖ La transmisión de señales analógicas o datos digitales al registrador de datos.
- ❖ Cualquier interfaz (como una caja de terminales) entre los instrumentos y el registrador.

Como guía general, RST instruments recomienda que las longitudes máximas de cable para cada tipo de instrumento deben estar dentro de los siguientes rangos:

- ❖ Lecturas de instrumentación analógica, por ejemplo, electronivel o potenciómetro, distancias menores a 250m.
- ❖ Lecturas de instrumentos de cuerda vibrante de hasta 5 km.
- ❖ Datos digitales: depende del formato utilizado, por ejemplo: RS-232, 485, hasta 5 km.

La tecnología de los sensores de cuerda vibrante ofrece la ventaja única de que la señal de salida de frecuencia prácticamente no es afectada por la impedancia de línea o la resistencia de contacto. Se pueden usar hasta 1,5 km de longitud de cable sin deterioro de la señal.



### 5.6.3 Limitaciones generales

Entre otras limitaciones y desafíos para la implementación de sistemas de monitoreo automatizados para la verificación del comportamiento en la etapa operativa se encuentran:

- ❖ Falta de experiencia por parte de contratistas para la instalación, mantenimiento y monitoreo de este tipo de sistemas automatizados.
- ❖ Inexistencia de instrumentos y equipo que cumpla con las condiciones de durabilidad necesarias para el monitoreo ante condiciones agresivas producto de los gases que genera el desalojo de aguas residuales.
- ❖ Desconocimiento de las ventajas técnicas que proporciona la implementación de sistemas de instrumentación en la etapa operativa en túneles para el desalojo de aguas residuales.
- ❖ Existe poca información acerca de cómo manejar e incluir este tipo de proyectos de monitoreo en documentos contractuales y las ventajas que éstos tienen para la resolución de controversias.
- ❖ Actualmente, este tipo de sistemas de instrumentación no ha sido incluido en ningún tipo de normativa, lo que ha dificultado su consideración para ser implementado en proyectos que requieran monitoreo una vez finalizados los procedimientos constructivos.
- ❖ En relación a los proyectos de obra pública en México, existen diversos factores que limitan los recursos (tiempo, costos, mano de obra) para la realización del monitoreo una vez finalizados los procedimientos constructivos.

La mayoría de las limitaciones que han frenado la implementación de estos sistemas de monitoreo pueden ser resueltas si se concientiza e informa acerca de los beneficios que proporcionan estos sistemas, es recomendable que la verificación del comportamiento en la etapa operativa se adopte como una actividad de vital importancia, indispensable para la comprobación de las hipótesis con las que se diseñan este tipo de obras subterráneas y su utilidad para la resolución de controversias por la información que aporta.



### **5.7 Aportación y beneficios de la implementación del sistema**

La automatización del sistema de auscultación para la verificación del comportamiento durante la etapa operativa, proporciona diversos beneficios a favor de la seguridad, optimización de los procesos y resolución de controversias. El monitoreo continuo de la estructura y en tiempo real, es un avance tecnológico importante en el ámbito de la ingeniería geotécnica, el fácil seguimiento de los fenómenos y mecanismos que puedan propiciar situaciones de inestabilidad en ubicaciones donde no es posible ingresar a tomar mediciones es uno de los principales beneficios de la implementación de este tipo de sistemas.

Contar con un sistema automatizado de monitoreo permite aminorar los errores propios de una lectura manual, proporciona una mayor confiabilidad en el procesamiento y facilita el análisis de la información para una toma de decisiones efectiva. La optimización de los procesos constructivos se realiza por medio de un análisis de los parámetros reales de la estructura, la tendencia de cada una de las variables y las hipótesis de diseño, además se puede definir en qué parte del proceso se puede optimizar sin comprometer la seguridad del proyecto a corto o largo plazo.

El sistema de auscultación nunca antes implementado, analizado en este trabajo de investigación representa un aporte importante para todos los que de un modo u otro están involucrados en la ingeniería de túneles y obras subterráneas. El aporte radica en mostrar la importancia del monitoreo durante la operación, donde hasta el momento de esta investigación no se le ha dado la importancia que requiere, además de explicar la relevancia de instrumentar el túnel para verificar el comportamiento se pretende dar a conocer los beneficios que proporciona tanto para clientes, contratistas y diseñadores.

#### **5.7.1 Verificación del comportamiento estructural largo plazo.**

La implementación de un sistema para el monitoreo de un túnel para el desalojo de aguas residuales en la etapa operativa permite verificar el comportamiento estructural a largo plazo, esto proporciona diversos beneficios y representa una fuente de información útil para la optimización de procesos en futuros proyectos de este tipo.

Con el paso del tiempo, debido a las condiciones geológicas y geotécnicas del medio donde se desarrollaron los procedimientos constructivos, ocurren fenómenos que representan problemas a la estabilidad y funcionalidad de la estructura. En este sentido, es necesario que se verifique el comportamiento estructural a largo plazo con la finalidad de disminuir la



incertidumbre y corroborar que los procedimientos, materiales y diseño fueron los adecuados para el tipo de obra construido. Para que el comportamiento estructural del túnel a largo plazo sea adecuado es necesario que se monitoreen y analicen cada una de las variables que proporcionen información específica de las tendencias de estabilización o desestabilización.

En el diseño y construcción de túneles se deben verificar y analizar condiciones a largo plazo con la finalidad de prever cualquier comportamiento que pueda representar problemas a la estabilidad del medio cuando la estructura se encuentre en operación. Un diseño del revestimiento eficaz y funcional debe garantizar que la estructura no presentará condiciones de inestabilidad durante su vida útil, en este sentido, es necesario verificar una serie de factores que ayudan a interpretar el comportamiento de la estructura en un largo plazo, entre ellos destacan:

- ❖ **Verificación de la estanqueidad del túnel:** de acuerdo con Peña, Galván y Meli (2012) se debe verificar que las juntas entre dovelas y anillos garanticen la estanqueidad del túnel a largo plazo.
- ❖ **Consideración del proceso de consolidación regional para el diseño de revestimientos:** debido a las características geológicas y geotécnicas de la zona lacustre donde se construyó el TEO, es necesario considerar los procesos de consolidación en el diseño de los revestimientos y monitorear la influencia de este fenómeno en el comportamiento deformacional del túnel una vez que esté en operación, la instalación de celdas de presión, deformímetros para acero y concreto en los revestimientos primario y secundario proporcionará información que ayude a comprender uno los fenómenos (consolidación) que ha sido objeto de mucho estudio en México a través de los años.
- ❖ **Condiciones de diseño del revestimiento definitivo:** para la verificación del comportamiento estructural del TEO a largo plazo, es necesario analizar las condiciones con las que fue diseñado el revestimiento definitivo y medir las variables que proporcionen información para comprobar las hipótesis de diseño. León *et al.* (2012) mencionan que el análisis a largo plazo se realizó considerando dos etapas: primero, simulando la excavación, colocación del revestimiento primario y después la colocación del secundario, la transmisión de cargas del primario al definitivo se dio de manera gradual conforme van cambiando las condiciones del suelo hasta generar un incremento de carga que actuó sobre ambos revestimientos.



- ❖ **Efectos del trabajo de los revestimientos:** el diseño estructural del revestimiento definitivo del Túnel Emisor Oriente se consideraron los efectos que va a demandar el trabajo del revestimiento definitivo, entre ellos destaca: el abatimiento de la piezometría y las deformaciones debidas al flujo plástico del concreto.

El monitoreo a largo plazo permite comprobar las hipótesis con las que se diseñaron estructuralmente los revestimientos del túnel, para el caso del TEO la evaluación de los estados límites de servicio y falla se realizó conforme a las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. En la realización de los diseños de cada uno de los revestimientos se verificó que las deformaciones de la estructura estén limitadas a valores que permitan el correcto funcionamiento de la estructura en condiciones de servicio, respetando los criterios de deformación establecidos en los términos de referencia.

El monitoreo de las deformaciones y otras variables a largo plazo, permite verificar si se cumplió lo establecido en el documento contractual y/o términos de referencia, esto con la finalidad de comprobar la calidad con la que se efectuaron los diseños y procedimientos constructivos, por tanto, de ser necesario, la información generada por el sistema de monitoreo propuesto podrá ser tomado como una fuente de información confiable para la resolución de controversias y deslinde de responsabilidades.

### 5.8 Recomendaciones generales

- ❖ Antes de elaborar el plan de auscultación, es necesario que se identifiquen cada una de las variables que puedan aportar información significativa para verificar el comportamiento de la estructura, una vez que estas son identificadas se deben fijar los objetivos que perseguirán y los instrumentos requeridos para su medición. En este punto, es recomendable que se establezcan previamente en los diseños los umbrales de control permitidos para llevar un control de los valores máximos, mínimos y niveles de alerta, esto con la finalidad de prever situaciones que pongan en riesgo la seguridad y estabilidad del túnel.
- ❖ Es recomendable que el software utilizado para el procesamiento de la información tenga la capacidad de procesar cada una de las lecturas generadas por los instrumentos instalados en las secciones de control, es ideal que en la interfaz del programa se



puedan utilizar fotos, planos o esquemas para analizar de forma eficaz el comportamiento del túnel durante la etapa operativa.

- ❖ Las frecuencias de monitoreo se deben establecer en función de lo previsto en las hipótesis de diseño geotécnico y estructural, por ello, es recomendable que se considere el tiempo que tomará al túnel llegar al nivel máximo de trabajo.
- ❖ Se recomienda que la dependencia encargada de la operación de túnel establezca brigadas de monitoreo y que cada uno de los involucrados sean capacitados con la finalidad de obtener análisis confiables que permitan verificar el comportamiento y en su caso, detectar anomalías que requieran tomar acciones correctivas.
- ❖ El procesamiento de la información requiere que se utilice un equipo de cómputo eficiente que permita la realización de los análisis y la emisión de los informes de monitoreo, en el caso del sistema propuesto para el TEO, se recomienda que la PC utilizada tenga una memoria RAM de 8GB disco duro de 2TB de capacidad y que el software sea con base en Windows 10.
- ❖ Una vez, recopilada y analizada la información generada por los instrumentos de monitoreo instalados en las diferentes secciones de control, es recomendable generar una base de datos que permita comparar resultados y ser una fuente de información para la optimización de los diseños en futuras obras de este tipo.
- ❖ Se recomienda establecer en el documento contractual la importancia del monitoreo en la etapa operativa y las ventajas que tiene para cada uno de los involucrados desde la realización de los diseños hasta la operación.
- ❖ Es indispensable que la información que se obtiene por medio de este tipo de sistemas de monitoreo sean considerados por los Dispute Resolution Boards (DRB) para la solución de problemas y deslinde de responsabilidades en caso de que existan anomalías o problemas de estabilidad una vez finalizados los procedimientos constructivos.
- ❖ Al ser un sistema de monitoreo novedoso, es recomendable que las compañías encargadas de fabricar los instrumentos conozcan las ventajas de la implementación y vean un área de oportunidad para la innovación tecnológica.



## Capítulo 5

---



---

## CAPÍTULO SEXTO

### Conclusiones

El sistema de auscultación propuesto para el monitoreo en la etapa operativa es muy novedoso y ha implicado una serie retos y medidas que, hasta el conocimiento del autor no han sido implementadas en ninguna parte del mundo. Esta tesis sugiere métodos que deberán verificarse y constatarse con el paso del tiempo debido a que la innovación tecnológica está presente en todas las áreas de la ingeniería y en este caso, la instrumentación no es la excepción, el desarrollo e implementación de este tipo de sistemas puede redituarse en análisis más complejos y exitosos para el monitoreo de un túnel para aguas residuales.

Con base en el análisis del sistema de auscultación para la verificación de comportamiento en la etapa operativa presentado en este trabajo de investigación es posible realizar las siguientes conclusiones:

- ❖ La implementación de un sistema de auscultación en la etapa operativa permite obtener información del comportamiento de la estructura una vez finalizados los procedimientos constructivos, proporciona datos que ayudan a identificar cambios en la estructura y tendencias que pueden ocasionar la desestabilización del medio o una disminución de la funcionalidad del túnel en servicio. Los datos generados por los instrumentos instalados en las secciones de control representan una fuente de información confiable para que los involucrados en el diseño realicen evaluaciones a favor de la optimización en futuros proyectos de este tipo.
- ❖ Debido a la confiabilidad de la información que se obtiene por medio de la realización de los análisis para verificar el comportamiento en la etapa operativa, los contratistas y clientes pueden evaluar cada uno de los procedimientos que han realizado durante las etapas de diseño y construcción, en virtud de lo anterior, pueden tener la certeza de que el trabajo que han realizado cumple con lo establecido en el documento contractual además de que estará garantizando que la estructura será funcional y segura durante su vida útil.
- ❖ El monitoreo en la etapa operativa representa una fuente de información que puede ser requerida para la resolución de controversias, por ejemplo, los análisis realizados que arrojen situaciones o tendencias de inestabilidad pueden ser utilizados por un



comité de resolución de disputas para que de acuerdo a lo establecido en el documento contractual y en los términos de referencia, se deslinden responsabilidades. En este sentido, un sistema como el propuesto representa una herramienta de mucha utilidad para todos los involucrados desde el diseño hasta la operación y mantenimiento de un túnel para aguas residuales.

- ❖ La información del sistema de monitoreo debe ser analizada de forma crítica y deductiva con la finalidad de interpretar de forma cualitativa y cuantitativa los datos de cada una de las variables que miden los instrumentos instalados en las secciones de control.
- Es necesario definir en el documento contractual la responsabilidad de la implementación de un sistema de monitoreo para la verificación del comportamiento, por ejemplo, si el propietario es el responsable, debe establecer sistemas y procedimientos de monitoreo antes de la construcción mediante los cuales el ingeniero contratista pueda ser alertado de las condiciones cambiantes que podrían afectar negativamente el proyecto, por otro lado, será una herramienta que permita evaluar cláusulas y el desempeño del contratista.
- ❖ Durante la etapa de operación los sistemas de auscultación permiten desarrollar acciones de mantenimiento preventivo y correctivo eficientes. Por la experiencia de la construcción de túneles para aguas residuales en México y de acuerdo a los problemas que han generado la falta de mantenimiento y monitoreo de este tipo de túneles durante la operación, es necesario que se desarrollen e implementen sistemas automatizados como el analizado en este trabajo de investigación para verificar el comportamiento e identificar problemas que si no son atendidos pueden generar grandes afectaciones a largo plazo.
- ❖ Al ser el TEO el primer túnel para el desalojo de aguas residuales que se instrumentaría durante la etapa operativa representará un precedente y fuente de información para futuros proyectos de monitoreo de este tipo, por ejemplo, en este caso en particular, la implementación de sistemas automatizados proporcionará información de gran utilidad para la medición de deformaciones tempranas en zonas de difícil acceso.



- ❖ La instrumentación en la etapa operativa representa una herramienta imprescindible para evaluar el comportamiento y gestionar los riesgos en obras subterráneas una vez que los procedimientos constructivos han sido finalizados.
  
- ❖ En estos momentos nos encontramos ante avances tecnológicos importantes en el área de la ingeniería civil, por ello, es necesario que día con día cada uno de los involucrados en los túneles y obras subterráneas promuevan la innovación en los instrumentos de medición.
  
- ❖ Con este trabajo de investigación se pretende que los diseñadores, contratistas y clientes comprendan la importancia del monitoreo en la etapa operativa y que los fabricantes de instrumentos de medición vean en este tipo de proyectos de monitoreo una oportunidad para innovar y proveer al mercado con equipos capaces de enfrentar las condiciones agresivas a las que están sujetos los túneles de éste tipo.
  
- ❖ Es necesario que exista un mayor esfuerzo entre todos los involucrados en el desarrollo de este tipo de obras de infraestructura para comprender la importancia de la implementación de un sistema como el aquí analizado, con ese esfuerzo y objetivo en común se tendrán herramientas para minimizar y resolver las disputas de una manera efectiva, lo anterior, se puede lograr con una adecuada gestión y manejo contractual del riesgo durante la ejecución y operación de la obra.



### Propuesta

De acuerdo a lo analizado en este trabajo de investigación, un sistema de auscultación como el analizado es perfectible, en este sentido, es necesario que con ayuda de la innovación tecnológica se puedan complementar este tipo de sistemas con la finalidad de que sean de ayuda para la elaboración de análisis más complejos que permitan verificar el comportamiento de la estructura a largo plazo.

En este apartado se presenta la propuesta para futuros proyectos de investigación que contribuyan al desarrollo, mejoramiento de equipos y sistemas de monitoreo, por ejemplo: la fabricación de instrumentos durables con las características necesarias para enfrentarse a las condiciones adversas del medio al que están sujetos los túneles, por otro lado, se debe considerar la implementación de sistemas inalámbricos que permitan corregir situaciones como la atenuación de la señal en los cables que van desde los instrumentos hacia el adquirente de datos en superficie.

La implementación de tecnologías como el monitoreo por satélite, INSAR, LiDAR, entre otros, puede dar buenos resultados para la verificación del comportamiento en túneles para el desalojo de aguas residuales construidos en entornos urbanos o superficiales, por lo anterior, se propone que se desarrollen líneas de investigación para cubrir el vacío de información existente.

En el área de la automatización, es necesario que se considere la implementación de tecnologías como el Internet de las Cosas, el cual sería de gran utilidad para este tipo de proyectos de monitoreo debido a la capacidad que tiene para crear una identidad virtual e interconectarse digitalmente con otros dispositivos (véase anexo B). El IoT (Internet of Things) representa un área de oportunidad para desarrollar e implementar sistemas automatizados para la verificación del comportamiento de todo tipo de estructuras, en especial los túneles.

Es necesario que se desarrolle investigación a favor de la creación de normativa que involucre la implementación del monitoreo geotécnico en túneles para el desalojo de aguas residuales una vez que los procedimientos constructivos son terminados y la estructura se encuentra en operación, además se propone que se incluya en los documentos contractuales la verificación del comportamiento de la estructura en funcionamiento y que se generen mecanismos para la resolución de controversias utilizando la información que generan sistemas de monitoreo a largo plazo como el analizado en este trabajo de investigación.



*En la construcción subterránea, donde el ingeniero trata con materiales que tienen propiedades que varían no solo en el espacio sino también en el tiempo, los detalles de la construcción a menudo tienen una influencia significativa o incluso abrumadora en el comportamiento de la estructura y del suelo circundante. Para comprender el comportamiento, **estos detalles deben ser observados y registrados.***

**Ralph B. Peck (1972)**



## Capítulo 6

---



---

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, M. A., Valencia, J. D., Schmitter, J. J., Auvinet, G., Rangel, J. L. (2013).** Diametric deformations in the concrete segment lining of a tunnel excavated in soft soils. Criteria for their evaluation and mitigation actions for their control. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris.
- Arrigoni, G. A. (2007).** Contract and construction aspects. “*Mechanized Tunneling in Urban Areas (Anexo A1.)*”. London, UK: Taylor & Francis.
- Bassett, R. (2012).** *A guide to field instrumentation in geotechnics*. Florida: Taylor & Francis Group.
- Blom, C. (2002).** *Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils* (Tesis de Doctorado), Universidad Tecnológica de Delft, Delft, Holanda.
- Bremer, K., Wollweber, M., Weigand, F., Rahlves M., Kuhne, R. & Helbig, R. (2016).** Fibre optic sensors for the structural health monitoring of building structures. *Procedia Technology*. vol. 26 p. 524 – 529.
- CFE, (1983).** *Instrumentación en suelos*. Manual de Diseño de Obras Civiles, Geotecnia, B.2.5., Comisión Federal de Electricidad: México.
- Choquet, P. (2018).** *Automatización y manejo de la información de la instrumentación en grandes proyectos de ingeniería*. 5to. Simposio de túneles y lumbreras en suelos y en rocas. México: SMIG. AMITOS.
- CONAGUA, (2012).** *Construcción del Túnel Emisor Oriente*. Libro blanco CONAGUA-05. México: Comisión Nacional del Agua.
- Cording, E. J., Hendron, A. J., Hansmire, W. H., Mahar, J. W. & MacPherson, H. H. (1975).** *Methods for geotechnical observations and instrumentation in tunneling*. Illinois University, U.S.A: National Science foundation.
- De Farago, M. (2010)** La tecnología INSAR de satélite y su aplicación para Monitorización de túneles y excavaciones. *Jornada Técnica: Instrumentación de Túneles y excavaciones*. p. 129–148



## Bibliografía

---

**Diccionario Español de Ingeniería (1.0 edición).** *Real Academia de Ingeniería de España.*  
Consultado el 03 de Noviembre del 2019.

**Dunnicliff, J. (1993).** *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.* New York:  
J. Wiley and Sons Inc.

**Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J. & Veicherts, T. (2004).** Guidelines for tunnelling risk  
management. *Tunnelling and Underground Space Technology.* Vol. 19, p. 217-237.

**Evans, D. (2011).** *Internet de las cosas “Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo”*,  
Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG). Recuperado de:  
<http://www.cisco.com/web/LA/soluciones/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf>

**Fekete, S., Diederichs M. & Lato M. (2009).** Geotechnical applications of LiDAR scanning in  
tunnelling. *Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium*, Toronto.

**Fierro, C. (2018).** *Instrumentación de los tramos 3 y 4 del Túnel Emisor Oriente.* 5to. Simposio de  
Túneles en Suelos y Rocas, Asociación Mexicana de Túneles y Obras Subterráneas, Ciudad  
de México.

**García, F. (s.f).** *Reparación en el concreto del drenaje profundo.* [Diapositivas de PowerPoint].  
Recuperado de: [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/cu/cu\\_12/te\\_02/ar\\_02.pdf](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/cu/cu_12/te_02/ar_02.pdf)

**González, J. L. (2019).** *Procedimiento de instalación y monitoreo de anillo instrumentado y sistema  
de convergencias automatizado en el Túnel Emisor oriente.* (Tesis de licenciatura).  
Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.

**Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. & Shulin, X. (2007).** *Mechanized tunnelling in urban  
areas: design methodology and Construction control.* Netherlands: Taylor &  
Francis/Balkema

**ICA, (2013).** *Geotecnia y aspectos constructivos del túnel de la línea 12 del metro en México D.F.*  
[Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: [http://www.iingen.unam.mx/es-  
mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/AspectpsConstructivos/AspectosConstructiv  
osdelTunel%20delalinea12metro.pdf](http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/AspectpsConstructivos/AspectosConstructivosdelTunel%20delalinea12metro.pdf)

**ICA, (2012).** *ICA: ingeniería y construcción en su 65 aniversario.* México: ICA.

**Inaudi, D. & Glisic, B. (2007).** *Overview of Fiber Optic Sensing Technologies for Geotechnical  
Instrumentation and Monitoring.* Geotechnical news. September. 2007.



- ITAttech, (2014).** *ITAttech Guidelines on Best Practices For Segment Backfilling*. Lausanne: ITA/AITES.
- Kenkyujo, T. (2018).** Strain gauges. Recuperado de <http://www.tml.jp/e>
- León, I., Aguilar, M., Martínez, A. y Pereira, J. (2012)** *Análisis geotécnico – estructural y diseño del revestimiento primario y definitivo del Túnel Emisor Oriente*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Acapulco, México.
- Lombardo, A. y Pérez, J. A. (2016).** *Manejo Contractual del riesgo*. 4to. Simposio sobre Túneles y Lumberas en suelos y rocas. Ciudad de México, México.
- Maluf, N. & Williams, K. (2004).** *Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. Boston: Artech House.
- Mikhail, L. (2016).** Automated systems as a part of geotechnical monitoring in construction and operation of transport tunnels. *Procedia Engineering*, 165, 448 – 454.
- Minh. V., Broere. W. & Bosch, J. (2017).** Structural Analysis for Shallow Tunnels in Soft Soils. *International Journal of Geomechanics*. Vol. 17 Issue 8 - August 2017.
- Peck, R. (1969).** Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geot.*, 19, No. I, p. 171-187.
- Peña, F., Galván, A. y Meli, R. (2012).** Comportamiento estructural de juntas entre dovelas de concreto prefabricado para túneles. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*. Vol. 3. Núm. 2, p. 02-16.
- Pérez, J. A. (2015).** Innovar en excavación con TBM es unificar la auscultación y el control de procesos. *IC, Ingeniería Civil*. Núm. 555, p. 10-14.
- Potts, D. & Zdravkovic, L. (1999).** *Finite element analysis in geotechnical engineering*. London Reston, VA: Telford Distributed by ASCE Press.
- Rangel, J. L. (2016).** *Análisis del Tuneleo en suelos blandos*. XXVI reunión nacional de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica. Sociedad Mexicana de Ingeniería geotécnica: Cancún, México.



## Bibliografía

---

- Rendón, R. (1982).** *Instrumentación de túneles en suelos blandos bajo aire comprimido*. Túneles en suelos blandos y firmes p. 61-91. Tlalpan, D.F: Sociedad mexicana de mecánica de suelos A.C.
- Rodríguez, J. F., Auvinet, G. (2012)** Criterios para el diseño del revestimiento definitivo de túneles en suelos blandos. *Revista geotecnia*. Vol. 225. p. 20-28.
- Reilly, J. J. (2000).** Management, policy, contracting and risk mitigation for complex, urban, underground projects - an overview. México D.F. Fundación ICA y AMITOS.
- Rivera, L. M., López, R., Sánchez, N. y Cedillo, N. (2019)** Instrumentación y monitoreo del Túnel Emisor Oriente durante la etapa operativa. *Obras Subterráneas*. Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas. Ciudad de México: México.
- SACMEX, (2006).** *El sistema de drenaje profundo de la ciudad de México*. [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/foro4/21%20marzo/Floodsdrought/Drenaje.pdf>
- Schubert, R. (2006).** Analyzing and managing risks – on the importance of gender differences in risk attitudes. *Managerial Finance*, 32(9), 706-715.
- Shanahan, A. (2013)** *Cutter Instrumentation System for Tunnel Boring*, The Robbins Company., Kent, Washington.
- Siebenmann, R., Yub, H. & Bachus, R. (2015).** *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Vol. 7. p. 207-212.
- SMIG, (1975).** *Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Spross, J. (2017).** When is the observational method in geotechnical engineering favourable? *Structural safety* vol. 66 p. 18-27.
- Szymański, P. (2017).** Risk management in construction projects. *Procedia Engineering*, 208, p. 174-182.
- Tebar, J., Oteo, J., Armijo, G. Arcos, J. L., Mallada, V., Blanco, A. y Martínez, D. (2014).** *Guía técnica: Instrumentación y auscultación en el proyecto y construcción de túneles urbanos*. Grupo de trabajo 11, problemas urbanos, soluciones subterráneas. España: AETOS.



---

**Yoo, C. (2007).** *Interaction between tunnelling and groundwater - Its impact on tunnel behavior and ground settlement.* Dept. Of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan University, Suwon Korea: p. 440-746.

### Manuales:

**EN 1997-1:2004 Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules.** Brussels: European Committee for Standardisation; 2004.

**GEOKON. (2018).** Manual de instrucciones: *Deformímetro de cuerda vibrante.* Modelo 4000.

**GEOKON. (2018).** Instruction Manual. *Earth Pressure cells Model 4800.*

**GEOSENSE. (2018).** Productos. *Inclinómetro con tecnología MEMS* recuperado de: <https://www.geosense.co.uk/products/details/mems-inclinometer-portable>.

**LEICA. (2018).** Productos. *Estación total.* Recuperado de: <https://leica-geosystems.com/es-ES/products/total-stations>.

**RST INSTRUMENTS. (2018).** Innovación en instrumentación geotécnica. *Piezómetro neumático.* Canadá. Recuperado de: <https://www.rstinstruments.com/es/Brochures-Spanish/Piez%C3%B3metros-neum%C3%A1ticos-PPB0006B.pdf>

**SISGEO. (2016).** *Monitoreo geotécnico y estructural de túneles.* Seminario de túneles y obras subterráneas. Bogota. Recuperado de: [http://www.latinamerica.sisgeo.com/archivoDescargas/T%C3%BAneles\\_%20TOLI\\_%20ESP\\_%20Sisgeo\\_LA%20.pdf](http://www.latinamerica.sisgeo.com/archivoDescargas/T%C3%BAneles_%20TOLI_%20ESP_%20Sisgeo_LA%20.pdf)

**SISGEO. (2018).** *Piezómetro de cuerda vibrante.* Manual de instalación. Recuperado de: <https://www.sisgeo.com/es/productos/piez3zometros/item/Piezometros-de-cuerda-vibrante.html>



## Bibliografía

---



## **ANEXO A. Método observacional en ingeniería geotécnica**

De acuerdo con las Normas Europeas EN 1997-1:2004 y EN 1997-1:1999 la aplicación del método observacional en ingeniería geotécnica es apropiada en situaciones donde es complicado prever el comportamiento del medio, tiene por objetivo disminuir el nivel de incertidumbre ante condiciones adversas que se puedan presentar durante el desarrollo de los procedimientos constructivos y en la operación de las estructuras.

Peck R. (1996) Menciona que para utilizar el método observacional en ingeniería de geotécnica, se deben cumplir dos requisitos fundamentales:

- ❖ Primero, la presencia y las características generales de las zonas débiles o compresibles deben ser reveladas por los resultados de la exploración del subsuelo antes de la construcción.
- ❖ En segundo lugar, se deben tomar disposiciones especiales para asegurar la información cuantitativa sobre las características indeseables de estas zonas durante la construcción antes de que sea demasiado tarde para modificar el diseño de acuerdo con los hallazgos.

Para proyectos de varios tipos, los datos requeridos para practicar el procedimiento de observación se obtienen midiendo las presiones de poro y los niveles piezométricos; cargas y tensiones; desplazamientos horizontales, verticales y angulares; y cantidad de filtración.

El Eurocódigo 7 presenta una serie de requisitos que deben ser cumplidos antes de la construcción para la implementación del método observacional, estos son:

- ❖ Establecer límites admisibles de comportamiento, esto con la finalidad de detectar condiciones que presenten tendencias de desestabilización.
- ❖ Evaluar rangos de posibles comportamientos y demostrar que existe la probabilidad de que el comportamiento real del medio se encuentre dentro de los límites o umbrales aceptables.
- ❖ Implementar un programa de instrumentación que permita verificar que el comportamiento real se encuentra dentro de los límites aceptables, es necesario que se implemente en fase temprana con unos intervalos cortos que permitan adoptar con éxito las medidas de contingencias necesarias para revertir tendencias de inestabilidad.



- 
- ❖ El tiempo de respuesta de los instrumentos y los procedimientos de análisis de los resultados deben ser lo suficientemente rápidos en relación con la posible evolución del sistema
  - ❖ Se debe establecer un plan de acciones de contingencia para el caso en que la instrumentación demuestre que el comportamiento se encuentra fuera de los límites aceptables.

En relación al programa de instrumentación durante la construcción es necesario que se implemente del modo planeado, cuidando cada detalle con la finalidad de que la información proporcionada para la evaluación del comportamiento sea lo más confiable posible. Spross (2017) menciona que el beneficio de aplicar el método de observación en lugar del enfoque de diseño convencional es su potencial para ahorrar tiempo y dinero, al tiempo que mantiene la seguridad de forma continua.

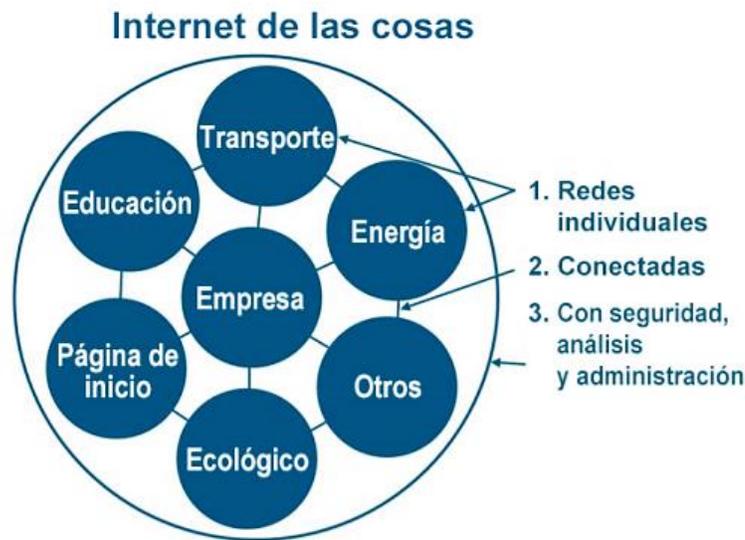
De acuerdo con Peck R. (1969) el método observacional no está exento de dificultades y limitaciones, entre las principales se encuentran las siguientes:

1. No debe usarse a menos que el diseñador tenga en mente un plan de acción para cada situación desfavorable que las observaciones y el monitoreo puedan revelar.
2. Las observaciones deben ser confiables, deben revelar los fenómenos significativos y deben informarse de manera que estimulen una acción rápida.
3. La posibilidad de una falla progresiva puede introducir un elemento serio de incertidumbre.

Para la disminución de errores en la aplicación del método observacional es necesario que el ingeniero tenga claramente definidas las soluciones a todos los problemas que puedan surgir en las condiciones menos favorables las cuales serán identificadas hasta la realización de las observaciones en el lugar donde se desarrollarán los procedimientos constructivos.

## ANEXO B. Internet de las Cosas (Internet of Things)

Evans (2011) menciona que el internet de las cosas es la red de redes debido a que está compuesta por una colección de redes diferentes con distintos objetivos (figura 91). La aplicación del IoT (Internet de las cosas) radica en la creación de ambientes e identidades virtuales en la que cada objeto o dispositivo tiene la capacidad de interconectarse digitalmente. La generación de identidades virtuales permite que los objetos sean manejados de manera más eficiente por las personas o por otros dispositivos, su importancia en la automatización de los procesos permite que se realicen de forma eficiente las distintas actividades generando optimización, precisión y confiabilidad en todo tipo de actividades, además permite acercar el mundo físico al digital.



*Figura 91* IoT, red de redes (Evans, 2011)

El funcionamiento del internet de las cosas se basa en la interconexión de objetos por medio de la red con la capacidad de transmitir e intercambiar información para realizar diversas tareas que faciliten procesos, análisis e interpretaciones.

En el área de la ingeniería civil la aplicación de este tipo de innovación tecnológica puede ser aplicado a sistemas de monitoreo de todo tipo de estructuras, debido a que la automatización que se puede lograr con su implementación permite que se obtenga información importante en todo tiempo sin importar la distancia, solo es necesario que sensores estén conectados a la red y que exista un sistema de control útil para el procesamiento de la información y la retroalimentación para la generación de análisis.

