

# Navegación Topográfica Subterránea para Tuneladoras

Ing. Agrim. Nicolás DI PASCUA NOBELASCO, Uruguay

**Key words:** Cartography;Education;Geoinformation/GI;Photogrammetry;Remote sensing

## SUMMARY

Since the 90's, the School of Engineering at the Universidad de la República (UdelaR), has been doing diverse continuing education activities for professionals, in particular on-site professional development courses with the objective of connect them with the new technologies not learned during their undergraduate studies. Since 2010, the Geospatial Information Technologies Group (Grupo de Tecnología de la Información Geoespacial, GTIG), integrated by professors from the Computer Department and the Surveying Department, with the support of a professor specialist in geographical data quality, from Spain, has been dictating the first online Professional Development course of the Surveying Department titled "La Herramienta SIG y la Calidad de la Información Geográfica" ("The GIS tool and the Geographical Data Quality"). This course was taken by professionals coming from diverse disciplines and from different parts of the country. This is a great success especially for a university that is mostly concentrated in Montevideo, the capital of the country. The syllabus contained the following topics: Introduction to GIS, Geographic Databases, and Geographical Data Quality. The course was developed in 7 weeks and was dictated using an online education platform called "EVA" (Entorno Virtual de Aprendizaje developed with Moodle) that has been available in the School of Engineering since mid-2010. The present document describes the history on teaching Geomatic in School of Engineering and the pedagogical proposal used in the course online. For instance, it was evident that the context in which the course is developed is very important, not only is necessary to have a good technical support team but also a good coordination from the registration of the participants to the end of the course.

# Navegación Topográfica Subterránea para Tuneladoras

Ing. Agrim. Nicolás DI PASCUA NOBELASCO, Uruguay

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta exposición, es aportar al conjunto de colegas la metodología empleada para la navegación subterránea utilizada en el guiado de tuneladoras (TBM-Tunnel Boring Machine), siendo éstas consideradas obras de gran porte.

Por supuesto aclarar que la metodología no es única. Cada metodología a la medida de cada proyecto.

La presente descripción, será enfocada en función de la experiencia adquirida en los diferentes proyectos, desde un punto de vista práctico.

Desarrollaremos en general la organización y localización de los diferentes equipos de topografía necesarios para el desarrollo de una obra de esta envergadura, y en particular, nos enfocaremos en el equipo topografía encargado de la navegación de la TBM.

Por otro lado, se hará una breve descripción de las diferentes TBMs, de las Tolerancias Vs las dificultades intrínsecas en este tipo de obra considerando por ejemplo; que la navegación subterránea se desarrolla generalmente por longitudes en el **orden de kilómetros** y el error máximo de **desvío** de la TBM planialtimétrico es de **300 mm**. A su vez, si le adicionamos la **longitud física** de las TBMs que ronda entre los **300 m y 400 m**, que la navegación se desarrolla bajo una **poligonal “abierta”** y que es literalmente a **“ciegas”**, hace de esta rama de la topografía un verdadero reto.

La metodología que describiremos, se realizó en una obra cuyo Proyecto se resume a:

- Túnel para vías de trenes (media y alta velocidad).
- Perforación en medio Urbano.
- 2 túneles pseudoparalelos de 3 km 500 m cada uno.
- Diámetro de TBM 7.00 m.
- Recubrimiento con Dovelas de 30 cm de espesor.
- 8 galerías transversales de interconexión (cercha, malla y gunita).
- Terreno heterogéneo (arcilla, limos, arenas y grava).
- Recubrimiento promedio entre 14 m y 25 m, con zonas complejas donde no superan los 5 m.
- 4 futuras estaciones de metro intermedias.

## 2. DE LAS TUNELADORAS

Los tipos de TBMs se diferencian por las características del suelo a perforar:

**TBMs Topos:** son aquellas cuyo diseño es realizado para la excavación de rocas. Son abiertas y no es necesario recubrimiento de la misma.

**TBMs de Escudos:** son aquellas cuyo diseño es realizado para la excavación de suelos comprendidos entre roca blanda y suelos arcillosos. Contienen una coraza (escudo) que hace que se pueda trabajar con suelos de alta inestabilidad.

Dentro del segundo tipo, podemos subdividir en Escudos abiertos y cerrados.

**Escudos Abiertos:** Rozadoras y Excavadoras.

**Escudos Cerrados:** Simple Escudo, Doble Escudo, Escudo de Presión de Tierras e Hidrotuneladoras.

En nuestro proyecto se utilizó una tuneladora de **Escudo Simple, Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine (EPB TBM)**, conocida como tuneladoras de presión de tierras. Su mecánica hace que el propio material excavado (convenientemente tratado), entra en presión, y es el que ejerce la función de sostener el frente del túnel recién excavado.

### Esquema básico:

- Rueda de corte (bajo la acción combinada de presión y rotación es la encargada de romper el suelo).
- Rodillo sin fin (por este medio se transporta el material de la cabeza a la cinta transportadora)
- Cinta transportadora A (está fija en la estructura de la máquina y es la que transporta el material a la cinta transportadora B)
- Cinta transportadora B (transporta el material recibido de la cinta A, y lo transporta al exterior. Ésta acompaña la dimensión del túnel y puede ser impulsada por motores intermedios - Booster)
- Cilindros o Gatos (son los encargados del empuje, en función de la diferentes combinaciones se determina la trayectoria de la máquina, entre otros elementos)
- Erector de dovelas (sistema hidráulico encargado de colocar las dovelas que formarán el anillo)
- Dovelas (prefabricado de acero y hormigón que combinadas forman el anillo, su geometría es una superficie de cónica que en función de la posición de la “clave” genera las diferentes direcciones)
- Mesa de dovelas (depósito en máquina de los anillos siguientes).

- Cabina de mando (controles de pilotaje y controles topográficos)
- Circuito topográfico (Estación total, video target, caja de comunicación, módem konverter y computador a bordo).
- Talleres u oficinas (eléctricos, soldadores, mecánicos, topógrafos, etc).
- Tanques; mortero, bentonita, agua, etc.

### **Integración del Equipo.**

En máquina o de navegación: jefe de equipo, piloto, erectorista, eléctricos, mecánicos, soldadores, agrimensores, topógrafos, maquinistas de trenes, obreros (colocando vías, pasarela, tubos de aire, cinta, etc) y especialistas directos de la firma que fabrico la máquina.

Por ser continua la producción (24 horas), y realizarse en dos turnos de 12 hs, lo precedente será multiplicado por 3. O sea, habrán 3 equipos de navegación.

En oficinas: jefe de obra y oficinas consecuentes al listado precedente con información a tiempo real de los comandos del piloto y del sistema de guiado topográfico, pero sin posibilidades de intervenir (en nuestra obra).

En el exterior: oficinas de fabricación del guiado topográfico.

### **3. DE LA OFICINA DE TOPOGRAFIA.**

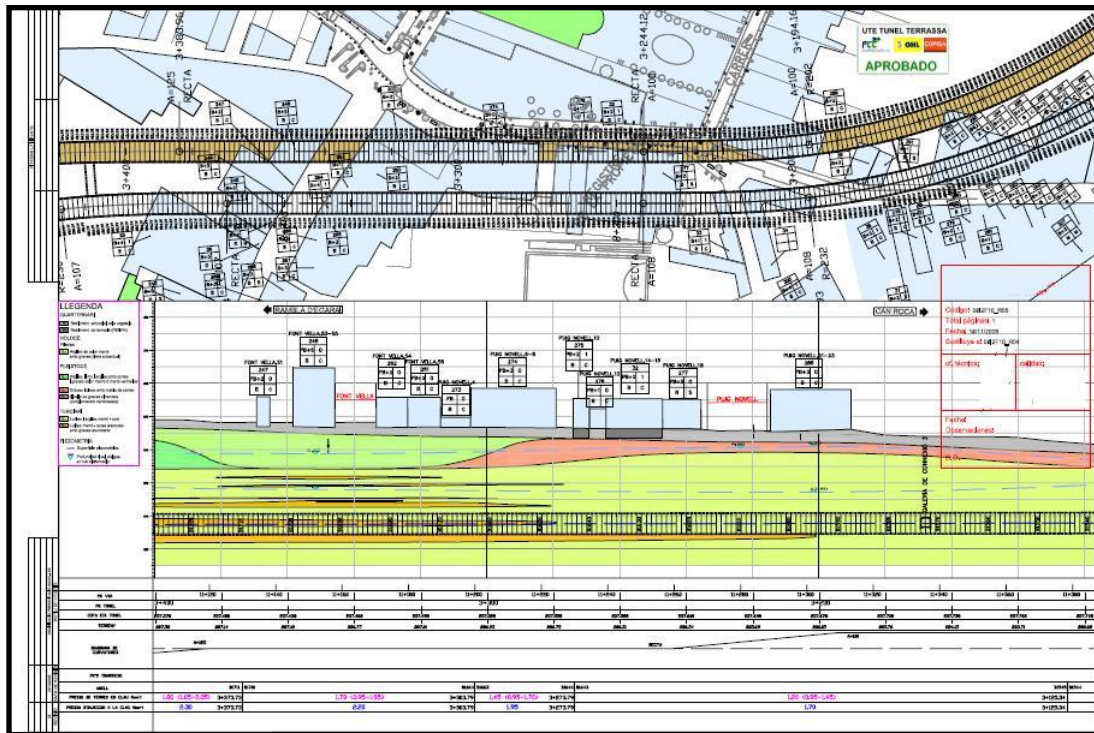
Las responsabilidades topográficas son básicamente 3:

- Topografía de Túnel, (poligonal interna, guiado de tuneladora, nivelación, etc)
- Topografía de exteriores, (poligonal externa, nivelación, estaciones subterráneas, replanteos en caso de emergencia: inyecciones, sondeos, pantallas, etc)
- Auscultaciones (determinación de movimientos de las estructuras existentes o del terreno natural, etc)

### **4. DEFINICIÓN DEL EJE DE TUNEL.**

En la definición del eje de túnel, el agrimensor tiene una actuación destacada, pues es quien será el responsable de establecer los diferentes ejes y razantes para después elegir el más adecuado para el proyecto. Se deberán considerar diferentes variables, tanto físicas como geométricas.

Teniendo como principal insumo el **perfil geológico** y definido por parte de los técnicos cual será el horizonte o tipos de suelos por el cual será conveniente realizar la excavación, se determinará el eje definitivo.



### Variables Físicas:

- Recubrimiento mínimo. (distancia permitida desde la superficie hasta la tuneladora)
- Ancho y alto de la capa o capas elegidas.

### Variables Geométricas:

- Rectas, curvas y acordamientos circulares. (tren de media y alta velocidad)
- Pendientes y acordamientos verticales.

Una vez determinado el eje, se le **impone un origen (PK)** y será éste el que se coloque en el software de guiado. Por tener 2 ejes diferentes, se colocan PK distanciados de tal forma que con solo saber el PK de avance, sabremos de cual túnel estamos hablando.

$$\text{Túnel A ---- PK}_0 = 5000.000 \text{ m} \quad / \quad \text{Túnel B ---- PK}_0 = 0000.000 \text{ m}$$

## 5. DE LAS REDES

### Planimétrica

- Red exterior de la superficie.
- Red interior del túnel.

- Poligonal (abierta) de guiado.

Estas redes, son diferentes en geometría, métodos e instrumental.

### **Altimétrica**

- Se realiza Nivelación de precisión.

### **Red Exterior (planimetría)**

Definidos los pozos de ataque y los ejes de los túneles (nuestro caso), se debe realizar por el recorrido de estos una red exterior de tal manera que se asegure la homogeneidad de los resultados en los puntos de entrada o salida de ambas bocas del túnel, cómo también de los puntos intermedios de cada una de la Estaciones subterráneas.

La red se realizó con GNSS, y se realiza independientemente si las máquinas salen de un extremo y culminan en otro, o si se encuentran en algún punto intermedio.

Por ser itinerarios de gran extensión, la técnica **GNSS** es **absolutamente ventajosa** ya que **los puntos** principales de la red **no tienen necesidad de ser intervisibles**, pero los **vértices de los puntos que se coloque en las bocas, sí**, ya que a partir de ahí y túnel adentro, la metodología se realizará con Estación Total (ET).

Es importante, definir la geometría de la red. En este caso estuvo formada por triángulos equiláteros y romboides considerando distancias entre vértices homogéneos. En la toma de datos se consideraba: mínimo 2 repeticiones, el tiempo de recepción iguales, horas de las tomas asegurando la constelación opuesta, etc, de tal manera de conseguir precisiones similares igual de instrumento de guiado.

Luego se hizo una **poligonal** desde el pozo de ataque hasta la última estación realizando **anillos entre bases GNSS**.

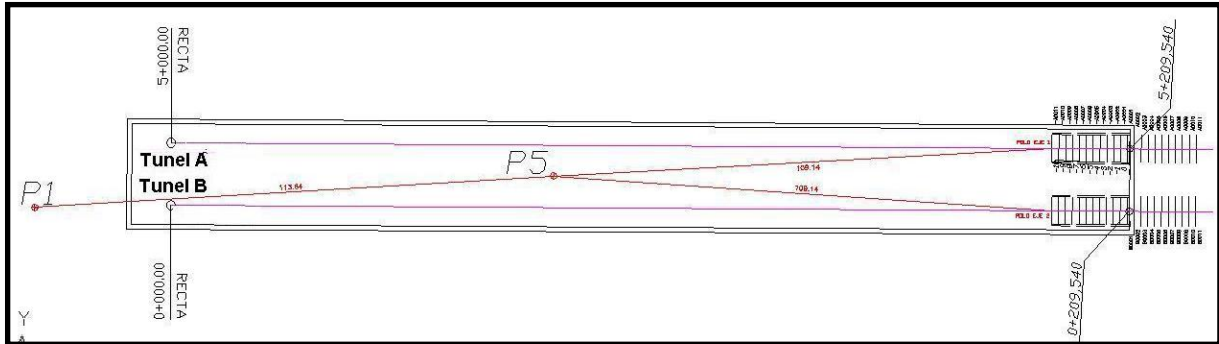
La materialización de los puntos de partida (al igual que los de toda la red), deben ser correctamente monumentados, anclados bajo la norma vigente de la construcción de la zona.

### **Características de monumentación:**

- Fácil acceso
- Centrado forzoso.

En nuestro caso se materializaron dos puntos P1 y P5, P1 adyacente a la pantalla del pozo de ataque y P5 en la mediatriz del segmento determinados por los polos del cada eje a una distancia de 109.14 m de cada uno de ellos.

**P5** fue el punto conocido con el que se **orientó la ET** y se guiaron las tuneladoras, recorriendo cada una de ellas más de 3 km, y **P1** y **P5** son los que se usaron para apoyar la **red interior**.



### Red interior (planimetría)

Los diseños de las redes interiores, la realizamos básicamente para corregir lo “ya replanteado”, visto que el guiado de la máquina se realiza por medio de una poligonal abierta. **Ajustamos** con esta poligonal, la **posición de la máquina respecto al eje teórico**.

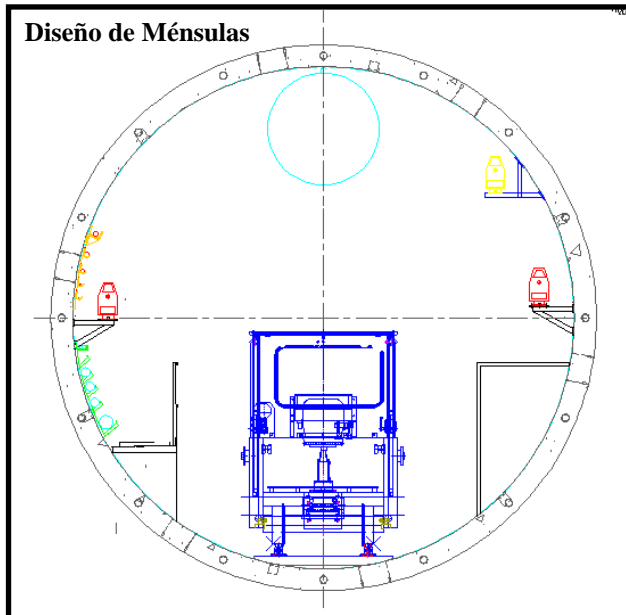
En cuanto al diseño geométrico, estamos absolutamente acotados y limitados. Estos límites se reducen a realizar **una poligonal en 6.00 m de ancho** por más de **3500 m de largo**. La **distancia promedio** establecido en el proyecto entre los **vértices** fue de **150 m**. **No hay más punto de control los puntos P1 y P5**.

Esta red de apoyo, se realiza a medida del avance de la máquina y se usa para la comprobación del avance en sí. Invierte aquí una lógica topográfica, ya que lo lógico sería “hacer la poligonal para replantear la posición de la máquina”, pero este no es el caso, aquí se “**realiza la poligonal para corregir la posición de la máquina**”.

Servirá también, de base para todos los replanteos posteriores; pisos, ductos eléctricos, drenajes, vías, etc.

La materialización de los puntos, se realiza con **ménsulas** con **centrado forzoso** que están diseñadas con anterioridad, de tal forma que se puedan realizar las operaciones topográficas independientemente del avance de la TBM. Están adosadas a las dovelas con bulones de acero.

En nuestro caso la poligonal se realizó principalmente a Izquierda y Derecha y en algunas curvas se utilizó un solo margen.



### Características para captura de datos:

- Estación Total (3", necesidad de ATR - Automatic Target Recognition)
- Prisma en base nivelante.
- Puntos en izquierda y derecha con nomenclatura universal. (para que cualquier topógrafo pueda identificar sin necesidad de plano).

A / B	D / E	Nro	Nro	Nro	Nro
Nombre Tunel	Derecha o Izquierda		Nro de anillo		

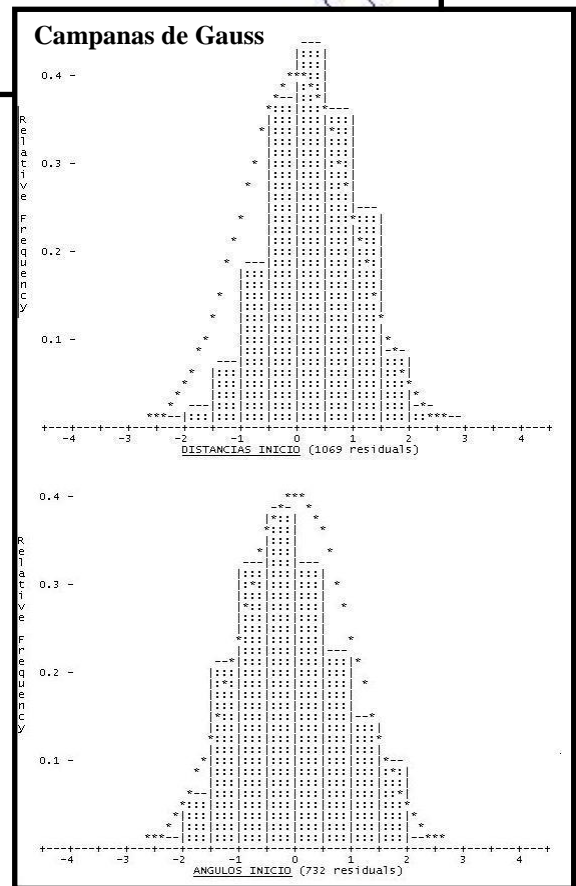
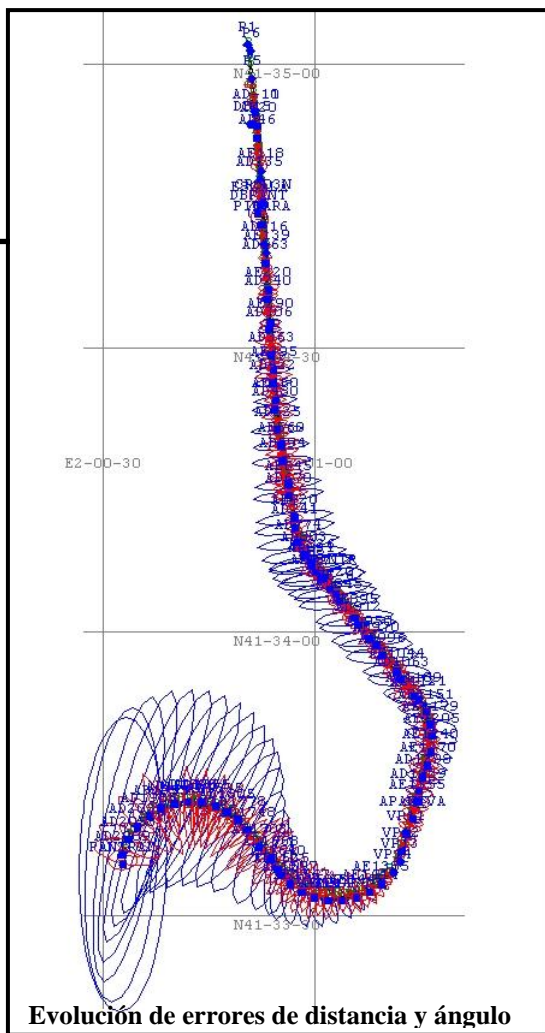
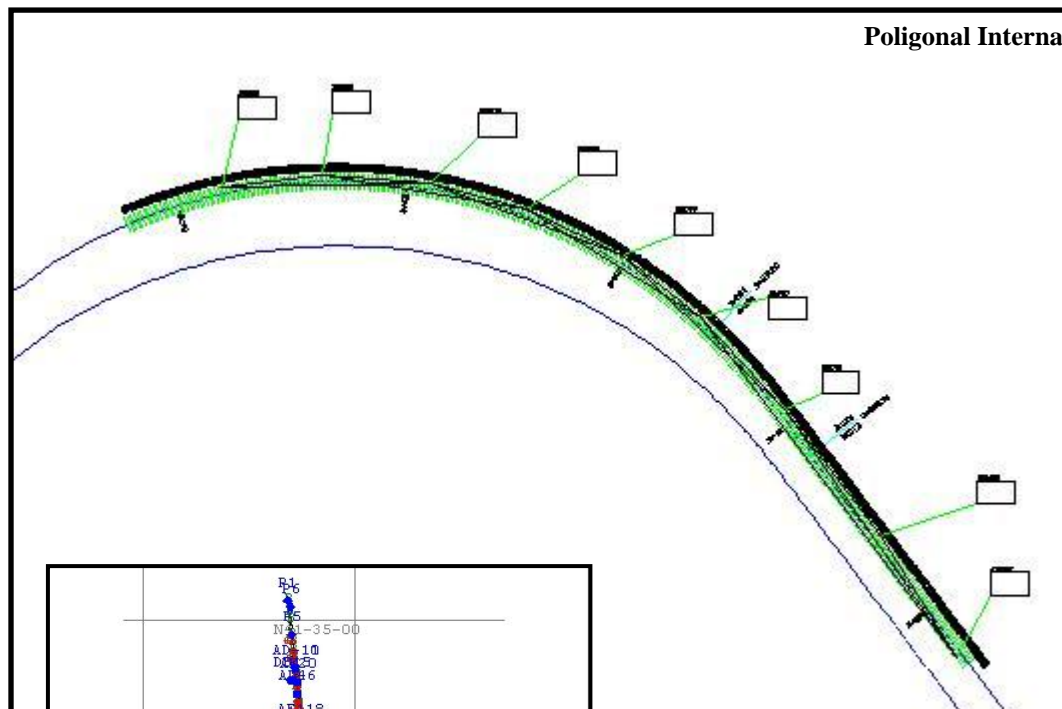
- Medición automática de series (Directo e Inverso, total: 6 datos desde una estación, al menos dos estaciones diferentes, mínimo 12 datos por punto).
- Control de **T°**, **P°**, **H°**.
- Visualización al menos dos bases atrás y dos adelante.

### Los cálculos:

- Se calculan coordenadas por mínimos cuadrados.
- La elipse de error máxima fue de 30 mm al final del túnel.



- El error se incrementa a medida que se avanza.

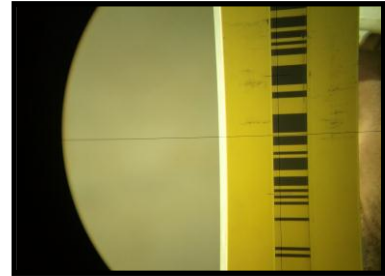


## Red Altimétrica.

La determinación de la cota, se realizó bajo una nivelación geométrica de precisión. La metodología fue la conocida como “doble y simultánea”, y la misma se realizó tanto en la red exterior como interior.

Se realizó con nivel de precisión de lectura automática y con mira invar. La mira de código de barra, hace posible disminuir el error de lectura, a su vez al estar la posibilidad de grabado los datos se eliminan equivocaciones por transcripción.

En la **red interna**, se materializaba una **barra de hierro** amurada con **taco químico**, de tal forma de lograr una mayor cimentación. Se tocaba directamente el punto de la ménsula para la determinación de la cota.



## 6. GUIADO DE TUNELADORA.

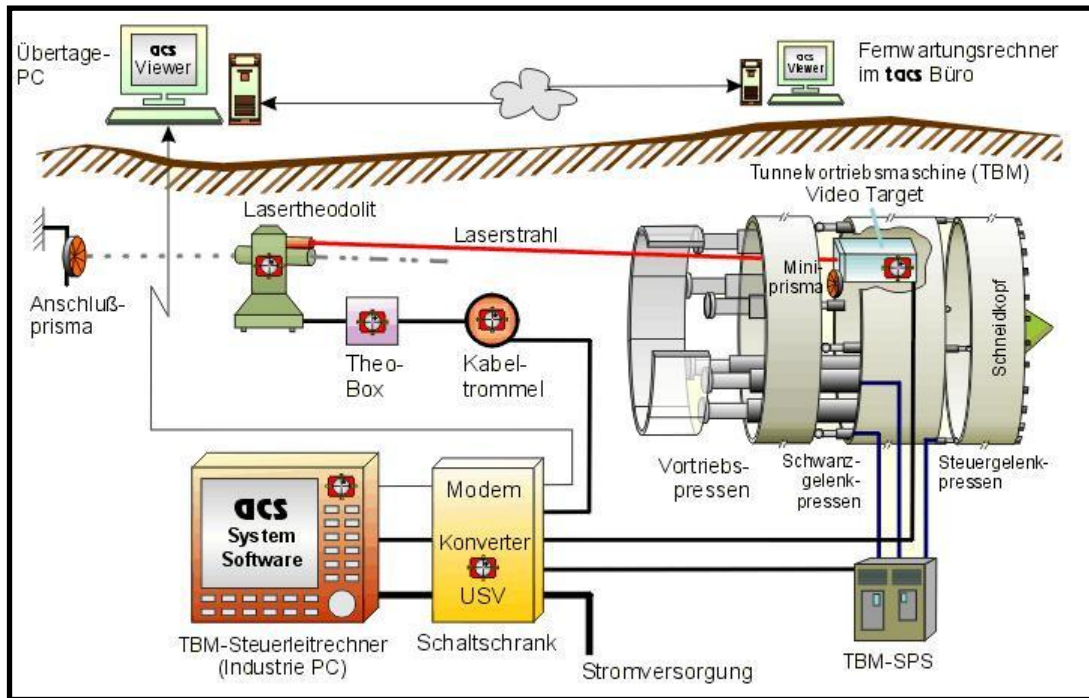
Para guiar la máquina, se utiliza un Sistema de Guía que se compone de hardware, software y elementos específicos que crean la posibilidad de la **determinación continua de la posición**.

Además de diferentes utilidades y una cantidad importante de herramientas de apoyo como la “curva perfecta”, el “mejor anillo cónico”, la “secuencia óptima”, la “visualización de la zona geológica”, etc.

Mediante un **rayo láser visible**, se determina la **posición de la cabeza y cola de la máquina**, como también la **inclinación** y demás elementos que hacen a la **orientación en el espacio**.

### Componentes del Sistema

- ET con láser externo. (laser ajustado de forma paralela al eje óptico)
- Video Target (VT, blanco del láser, que determinará la posición. Miniprisma adosado)
- Prisma de orientación en base nivelante.
- Caja de comunicación y derivación del control automático o manual, entre la ET y Computador industrial.
- Cable de datos (extensible).
- Módem Konverter (recibe: datos de ET, VT, extensión de gatos, dirección de la articulación, etc)
- Computador industrial (computador a bordo de guiado).
- Posibilidad de comunicación de datos al exterior del túnel
- Computador en superficie (oficinas)
- Computador soporte (oficina de fabricación del Sistema de guiado).



### Metodología del guiado.

El sistema está diseñado, únicamente para la orientación entre **dos puntos conocidos**. Uno atrás (colocación del prisma) y uno adelante (colocación de la ET).

Estos puntos durante la navegación son **radiados**. Por lo que el grado de certeza está directamente ligado a la prolijidad del proceso en cada “cambio” ya que estamos bajo una **poligonal abierta**.

“**Cambio**” se define, al proceso de incrementar una base la ET, cambiarla y reorientarla.

Estos cambios, se realizan en forma regular tanto en recta como en curva, variando la distancia entre de cambios en función de la geometría del trazado.

También se realizarán cambios excepcionales, dependiendo de la distancia de visualización entre los puntos, la pérdida de éstos por razones físicas (como por ejemplo un golpe a la ménsula dado por alguna parte de la tuneladora hace perder la orientación o los puntos) entre otros factores.

La **distancia óptima** fue de **60 m** (en recta) unos 40 anillos. Esto no significa que no se puedan realizar a mayor distancia sin inconveniente. Si la máquina lo permite, se pueden realizar a más de 100 m o incluso a la distancia total de la tuneladora. El problema de esto último, es que la base de orientación quedaría afuera de la máquina (en el tunel) y hay un verdadero “**cambio de medio**” (reverberación).

La **orientación**, una vez colocado el prisma y la ET en sus ménsulas, puede realizarse de forma **automática** (desde cabina) o **manual** (desde ET y cabina). En este proyecto se utilizaron las dos formas sin inconveniente.

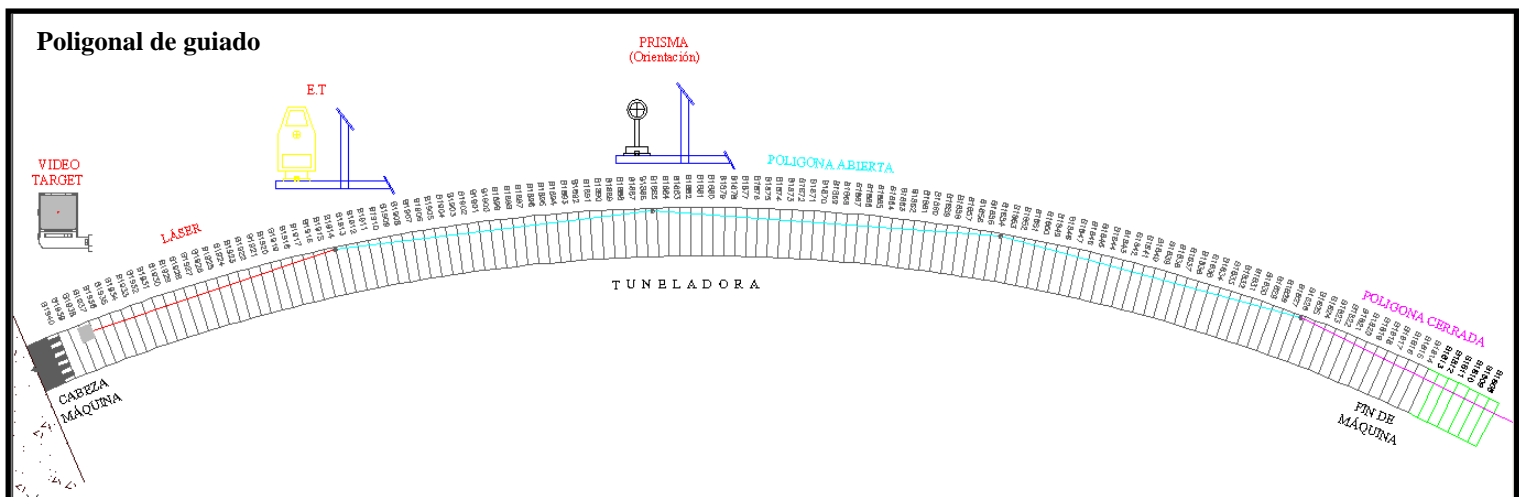
Se deberá **calibrar** regularmente en cada cambio el láser con los instrumentos de calibración, para asegurarse la posición correcta luego del aparato orientado. Esto no quita a que se realicen calibraciones en cualquier momento cuando los topógrafos entiendan pertinente.

Por ser una poligonal abierta y acumular errores intrínsecos de la operación, no hay más remedio que cerrar (planimétricamente) el punto de la ET. Altimétricamente la cota sigue siendo trigonométrica ya que no hay posibilidad de tocar el punto de la ET con el nivel.

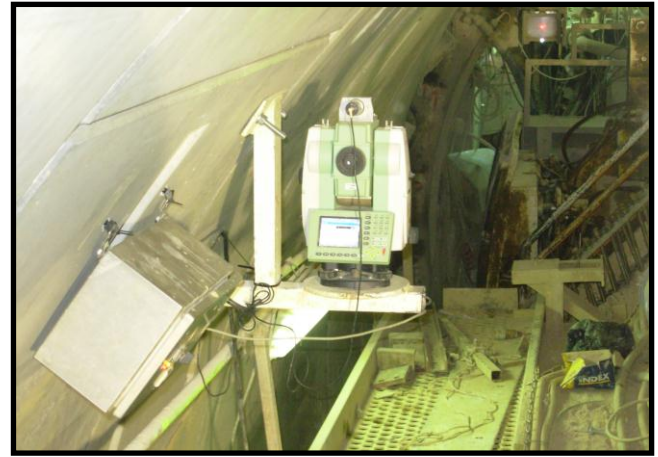
Cerrar el punto ET, se hace en función del avance realizado, o necesidad. A este procedimiento se le llama **“corrección”**, corregimos X, Y, Z. *no confundir con “cerrar” los puntos de posición de la máquina, éstos siguen siendo abiertos.*

Aquí los parámetros del posicionamiento cambian y estaríamos en la **“verdadera posición”**. Esta corrección la podemos realizar en una sola acción, o realizar correcciones parciales de tal forma de realizar una transición a la verdadera posición.

Aquí es cuando el jefe de equipo o piloto se preocupa por los cambios en la posición, pero en realidad la consigna es **“preocuparse si un equipo de topografía no realiza correcciones”**.







### Comandos de guiado y visualización de la posición de la TBM



### Principales componentes:

- Número de avance (coincide con el Nro de anillo).
- PK (metros de avance)
- Puntos de referencia (desviación H y V respecto el eje, de los puntos cabeza y cola)
- Desviación angular (desviación H y V respecto al eje)
- Visualización gráfica de la posición (flecha tridimensional que visualiza claramente: la posición de la máquina, nivel, dirección, cabeceo y balanceo), el punto verde es la desviación de cabeza de corte, la cruz es la articulación)
- Tolerancia (circulo punteado, en caso de mayor desplazamiento se genera una elipse punteada)
- Barras de avance en valor %: del túnel y del avance (perforación).

- Cilindros de propulsión (Elongación de los gatos 7, 8, 19, 20).
- Rodadura.
- Inclinación.
- Eje de diseño (círculos cyan).
- Curva de corrección (línea magenta, para evitar el daño en los anillos).
- Status de la medición automática (verde-amarillo-rojo, estado del funcionamiento automático)

Una vez finalizado el avance, se deberá realizar el **cálculo del anillo** a colocar. Este se define por **la posición de la clave**. Se realiza en una primera instancia de forma automática ya que el software determinará la mejor opción según lo navegado. Muchas veces por diferentes motivos, ese anillo **no es el que mejor se ajusta** según los criterios del jefe de equipo o erectorista, por lo que éstos con el “ábaco de claves” lo determinan. Éste anillo elegido, es el que debe ingresar manualmente en el programa y grabarlo. **Siempre deberá quedar registrada la realidad colocada. De tal forma que exista una verdadera trazabilidad.**

## Planillas de Campo

### Avance

Data inici torn	<input type="text" value=" / /"/>		Dia	<input type="text"/>	Nit	<input type="text"/>	Túnel	<input type="text"/>						
Equip	<input type="text"/>													
Avance	PK	Hz 1	Ver 1	Hz 2	Ver 2	Dh	Dv	Hz cap	Ver cap	Roll	Pitch	K tacs	K col	

### Calibración

Data inici torn	<input type="text" value=" / /"/>		Dia / Nit	<input type="text"/>	Túnel	<input type="text"/>							
<b>Dades inici i fi de calibració</b>													
Avance	PK	Hz 1	Ver 1	Hz 2	Ver 2	Roll	Pitch						
Avance	PK	Hz 1	Ver 1	Hz 2	Ver 2	Roll	Pitch						

## 7. CALADO DE LAS TUNELADORAS

El momento de calado, es el más vertiginoso para el equipo de topografía. Es el verdadero momento en el cual se comprueba si sale dentro de los márgenes de errores establecidos, o sea si la tuneladora sale correctamente.

En este proyecto se realizaron un total de **8 calados**. Todos fueron exitosos.

Para visualizar el **grado físico de desvío “real”** de la máquina, describiremos las condiciones geométricas de lugar de calado.

El calado se realiza contra pantallas verticales, las cuales están micropiloteadas en forma de “paráguas”. Estos micropilotes, tienen una **longitud de 15 m** y están perforados a **30 cm** de la salida teórica de la máquina. O sea, podemos resumir que en este proyecto están a 7.30 m respecto del eje teórico.

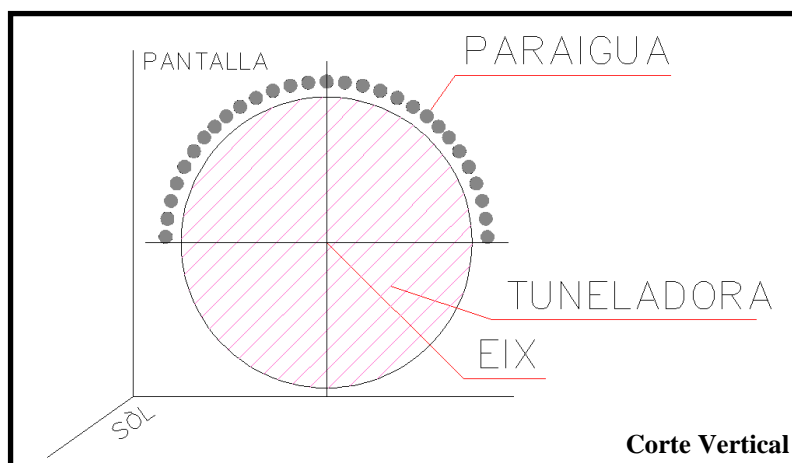
A su vez el **suelo** de la Estación o boca de calado, también está **a una distancia 30 cm**.

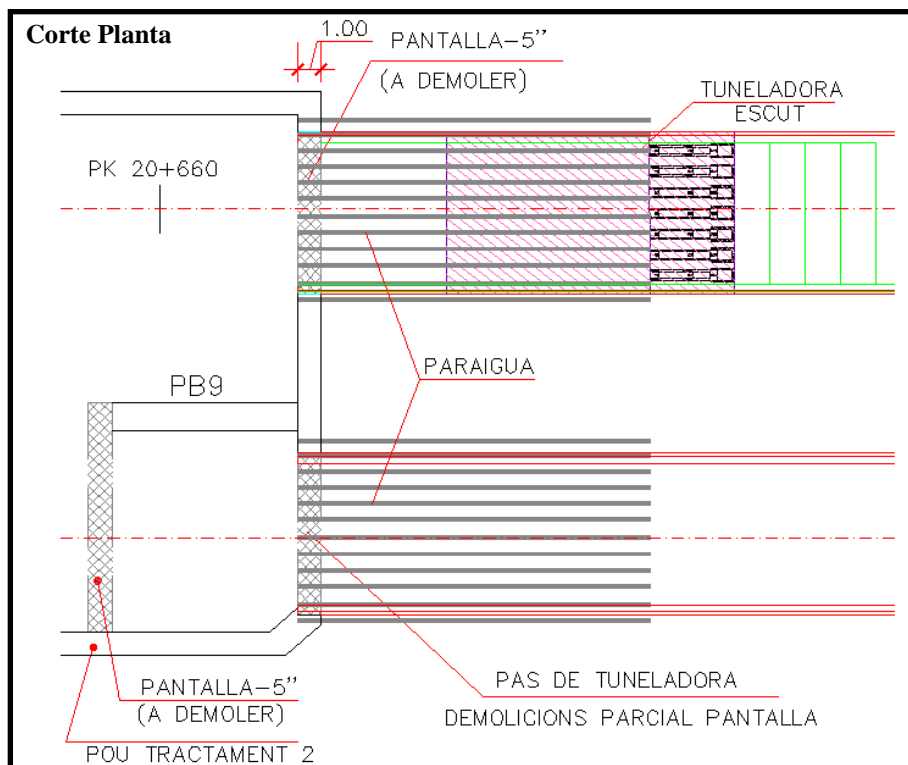
Esta figura compuesta por los límites “suelo y paragua”, la podemos considerar como la frontera física de la salida de la tuneladora.

Es aquí el reto topográfico. **El dar los elementos necesarios, seguros y fiables**, para que el piloto realmente logre este objetivo.

No es solo el perfil de la rueda la de corte debe pasar por estos límites, sino que también los más de 350 m de largo de la tuneladora. Lo que significa que **buen cale**, es aquel que llega **correctamente a destino no solo en posición, sino también en dirección**.

**Es por eso que, el solo pensar que el desvío está acotado a tan solo 300 mm en vertical y horizontal, después de navegar realmente a ciegas, sin más comprobaciones que las comprobaciones y ajustes que hagamos desde los lugares que ya transitamos, y por longitudes de kilómetros, hace todo esto un verdadero desafío topográfico.**





## CONTACTOS

Título: Navegación Topográfica Subterránea para Tuneladoras

Nombre y Apellido: Nicolás Di Pascua Nobelasco

Dirección: Tacuarembó 1361 Apto 501

Ciudad: Montevideo

PAIS: URUGUAY

Tel. +598 2409 2326 o Cel: +598 9409 6407

Email: dipascua@gmail.com