

Capítulo 2: Determinación de la deformación del túnel "in situ"

2.1 Introducción

Como se verá más adelante, uno de los parámetros más influyentes en la generación de asientos, es la pérdida de terreno en la excavación (V_L). Esta pérdida de terreno es debida al hecho que la excavación que se realiza no tiene el mismo diámetro (en el caso de excavación circular) que el propio túnel. Además, el propio revestimiento del túnel no se comporta como una estructura totalmente rígida, es decir, se deforma y se contrae.

En consecuencia, la finalidad de este capítulo es determinar esa deformación y contracción que experimenta el revestimiento del túnel una vez sale del amparo del escudo. Además de constatar como y cuando se producen estas deformaciones.

Para llevar a cabo esta misión se realizaron medidas de convergencia y de medidas topográficas en el interior del túnel, a fin de entender el proceso.

2.2 Determinación de la deformada mediante medidas de convergencia

Las medidas de convergencia únicamente miden la variación de la longitud que hay entre dos puntos. En consecuencia, los desplazamientos que se pueden determinar entre estos dos puntos son desplazamientos relativos.

Este hecho limita mucho la información que se puede extraer de las convergencias, así que, normalmente, su aplicación básica es para tener una idea de la magnitud de los desplazamientos globales (o deformaciones globales) que se producen en el interior de los túneles, normalmente aquellos construidos con procedimientos tradicionales, como el Nuevo Método Austriaco.

Por consiguiente, en este estudio se ha combinado la técnica de la convergencia con la posibilidad que ofrece la técnica topográfica para determinar coordenadas espaciales (x, y, z) de un punto y así poder determinar los desplazamientos que experimentan los diferentes puntos (de forma absoluta y no relativa entre otros puntos).

2.2.1 Campaña de medidas de convergencia

Este apartado ha sido uno de los más importantes, ya que la mayoría del proyecto depende de la calidad de los datos que se han extraído de las medidas de convergencia. Así que en esta fase el tiempo invertido, para realizar una buena campaña de medidas, ha sido prolongado, en parte por el gran tiempo que se ha invertido en la planificación, ya que las medidas se han realizado únicamente en dos jornadas intensivas de unas 12 horas cada una.

A continuación se enumeran las distintas fases de la campaña de medidas de convergencia:

- Realización de visuales.
- Familiarización y práctica con la cinta de convergencia.
- Decisión de posicionamiento, en la superficie de las dovelas, de los anclajes para enganchar la cinta de convergencia y el tipo de anclajes a utilizar.

- Determinación de cuantos puntos de medidas son necesarios para poder definir la deformada del túnel. Además de la determinación de cuales serán los puntos en los que se determinarán sus coordenadas con las técnicas topográficas y que serán utilizados para transformar las medidas relativas en absolutas.

- Realización de las medidas de convergencia.

2.2.1.1 Fase 1: Realización de visuales

En esta fase de la campaña se ha tratado de ver qué medidas eran posibles de realizar en la práctica, ya que en la zona donde interesaba realizar las medidas, dentro del escudo de la máquina e inmediatamente después, hay infinidad de cosas que obstaculizan llevar a cabo estas medidas.

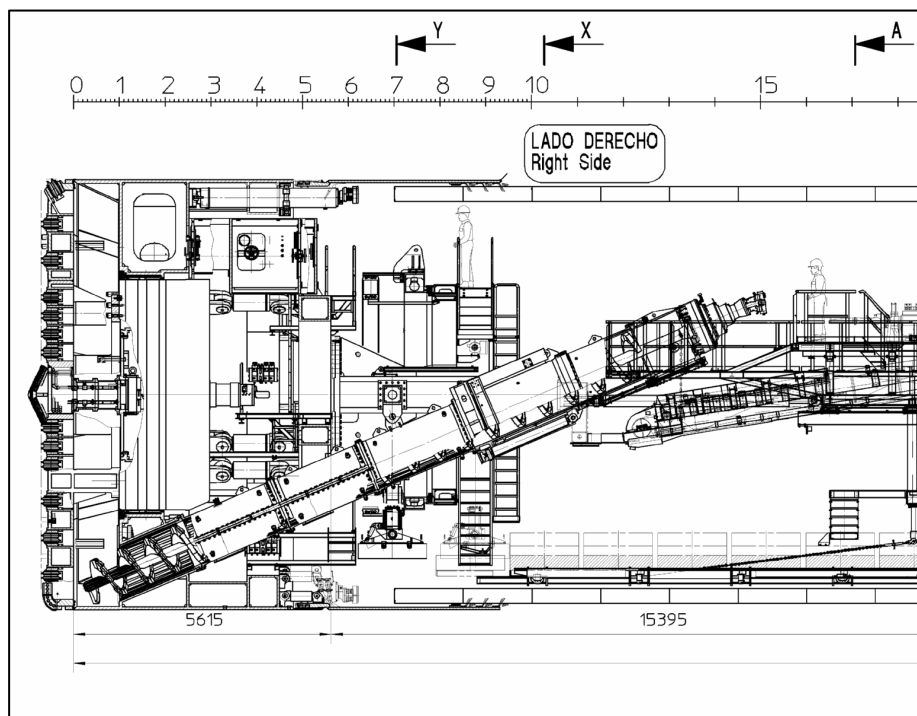


Figura 11. Esquema longitudinal de la zona de la EPB donde se realizan las medidas de convergencia (Herrenknecht).

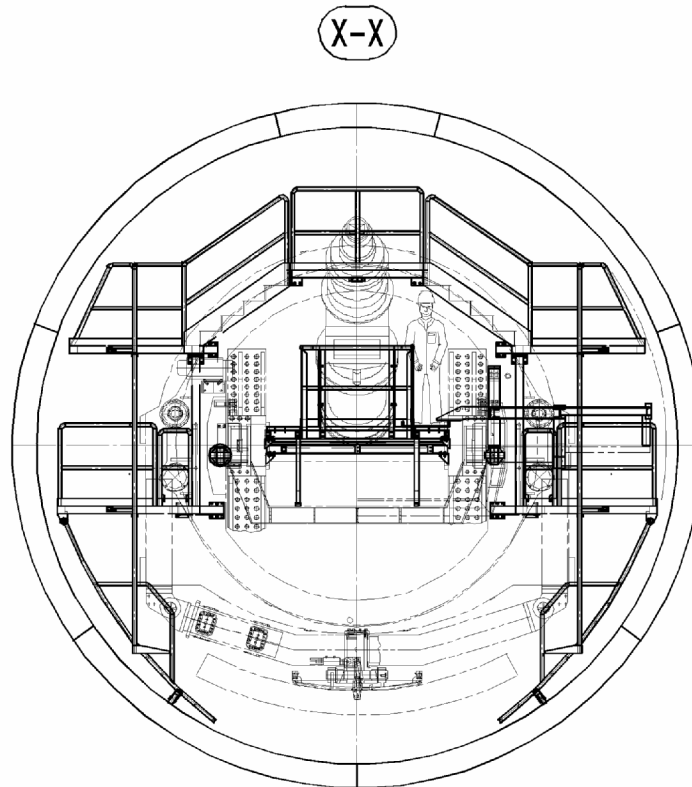


Figura 12. Esquema transversal de la zona de la EPB donde se realizan las medidas de convergencia (Herrenknecht).

Como se puede apreciar en las Figuras 11 y 12, la complejidad de la zona obliga a estudiar muy bien que visuales hay, y la posibilidad de acceder físicamente hasta esos puntos.

Finalmente se decidió realizar medidas en el anillo desde la primera posición que ocupa, respecto al frente de la excavación, hasta la situación en que este mismo anillo tiene cuatro nuevos anillos construidos por delante de él.

2.2.1.2 Fase 2: Familiarización y práctica con la cinta de convergencia

Como es sabido en el ámbito de la construcción, uno de los factores determinantes en la prosperidad de una obra es el tiempo. En consecuencia, una de las exigencias que se palpaba en el ambiente era la de realizar las medidas con rapidez y no tener que repetirlas ni una sola vez.

Por lo tanto, la familiarización y la práctica con la cinta de convergencia han sido un requisito indispensable, tanto para realizar rápidamente las medidas, como para realizar unas medidas de calidad.

2.2.1.3 Fase 3: Posicionamiento de los anclajes

Aunque a primera vista parece que este apartado no tiene una gran importancia, en la práctica ha sido todo lo contrario.

En una primera instancia se había decidido instalar unas arandelas con unos ganchos en los propios pernos que unen los distintos anillos (no los que unen dovelas de un mismo anillo), pero más adelante se desestimó esta opción, ya que colocar el punto de sujeción de la cinta de convergencia en un punto tan vulnerable a ser manipulado por cualquier operario era un riesgo que no se quiso asumir (es muy difícil informar a todo el personal que se encuentra trabajando en la máquina, que si se mueve, aunque sean unos milímetros, estas arandelas, los resultados que salen ya no son fiables). Además, en la primera situación de anillo a medir, estos pernos no están instalados, ya que se encuentran en el perfil más próximo al frente de excavación y aún falta otro anillo para poder enroscar los pernos.

En consecuencia, se decidió instalar unos anclajes exclusivamente para la sujeción de la cinta. El problema de esta opción era la de determinar donde instalarlos, ya que tenían que ser unos puntos que fuesen independientes de la situación de la clave (dovela K), puesto que en cada anillo la situación de la K es distinta y su posición no se conoce hasta unos diez minutos antes de la construcción del propio anillo. Esto tenía su importancia, ya que los puntos medidos en diferentes anillos preferiblemente tenían que ser los mismos para poder comparar mejor los resultados obtenidos, y el hecho de colocar unos anclajes referenciados por la posición de la clave no ayudaba.

Finalmente, se colocaron los anclajes alineados a los pernos que unen distintos anillos entre sí, ya que estos siempre están igualmente alineados, independientemente de la posición de la clave.

Para evitar problemas con las ventosas de rector y los anclajes y reducir el tiempo de instalación, se decidió realizar los taladros antes de instalar el anillo y una vez instalado el anillo fijar los anclajes.

2.2.1.4 Fase 4: Puntos necesarios para determinar la deformada

En esta fase se determinaron el mayor número posible de puntos que se podían medir y que posteriormente se podían modificar mediante un conjunto de puntos, de los cuales se conocían las coordenadas (x, y, z).

Esta modificación hace referencia a la posibilidad de transformar las medidas relativas de desplazamiento de un punto a medidas absolutas (este punto se ha movido de la posición x_1, y_1 , a la x_2, y_2).

Para llevar a cabo esta misión se escogieron un mínimo de tres puntos, en donde se iban a instalar anclajes, y de los cuales se podía determinar sus coordenadas, mediante técnicas topográficas durante todas las posiciones que toma el anillo respecto la máquina. Además de mirar si desde los puntos, sin conocimiento de sus coordenadas, se podía realizar un mínimo de dos medidas entre estos puntos y los de coordenada conocida.

En la Figura 13 se muestran los puntos de referencia, los de medida de convergencia y las visuales que se consideraron posibles de realizar.

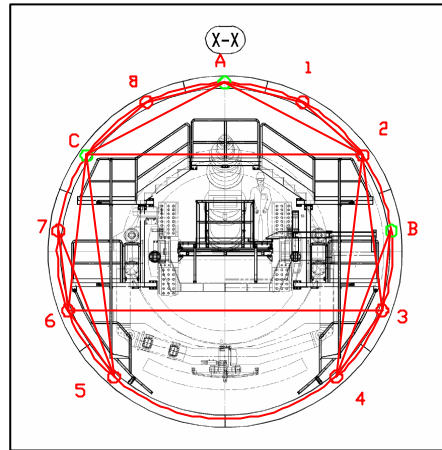


Figura 13. Esquema de visuales (líneas rojas), anclajes sin coordenadas (círculos rojos) y anclajes con coordenadas (círculos verdes).

2.2.1.5 Fase 5: Realización de las medidas de convergencia

La realización de las medidas de convergencia se llevó a cabo en dos anillos distintos, el anillo 804 y el 818.

Las medidas realizadas en el anillo 804 se efectuaron el 8 de noviembre del 2006 y se realizaron de forma simultánea las medidas de convergencia con las determinaciones de las coordenadas de los anclajes de "referencia". Estas últimas medidas, realizadas por el equipo de topografía de la obra.

Para ilustrar la evolución de algunas medidas de convergencia entre dos puntos se presentan las Figuras 14 y 15.

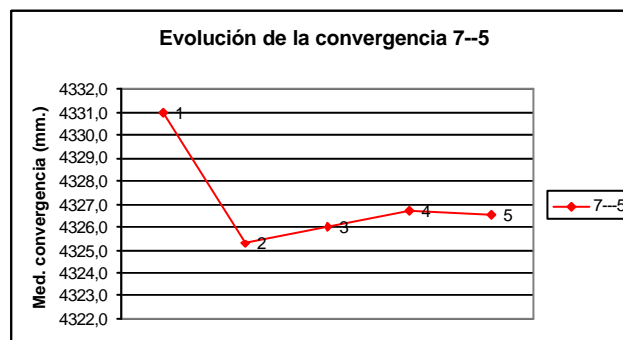


Figura 14. Convergencia entre el punto 7 y el 5.

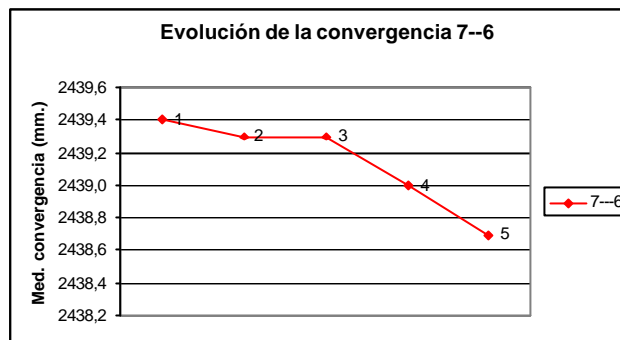


Figura 15. Convergencia entre el punto 7 y el 6.

En el caso de anillo 818 las medidas de convergencia se realizaron durante toda la noche del 9 de noviembre del 2006.

En ambos casos se siguió la misma metodología de trabajo:

- Realización de los taladros durante el avance de la excavación previa a la instalación del anillo de estudio.
- Instalación de los anclajes durante la instalación del anillo.
- Realización de las medidas de convergencia. Estas medidas se realizan con la máquina parada. (30 min aprox.).
- Nuevo avance de la excavación y construcción de un nuevo anillo.
- Realización de las medidas de convergencia en una nueva situación entre anillo y escudo.
- Se repiten estos dos últimos pasos hasta que el anillo de estudio tiene cuatro anillos por delante de él.

Toda la información detallada de las medidas de convergencia se encuentra en el anexo de medidas.

2.2.2 Referenciación de las medidas de convergencia mediante topografía

Como ya se ha mencionado anteriormente, hay unos puntos de los cuales se determinan sus coordenadas mediante técnicas topográficas, con la finalidad de poder dar coordenadas a los puntos de los cuales únicamente se conoce su desplazamiento relativo.

Para poder determinar las coordenadas de estos puntos, se ha instalado un teodolito en el propio túnel, a una distancia lo suficientemente lejos del frente para garantizar que no se mueve. El teodolito se ha fijado al revestimiento del túnel mediante una ménsula, diseñada expresamente para este estudio. Para poder orientar el teodolito se ha instalado un prisma lo más lejos posible del frente y con el se le han dado unas coordenadas absolutas al aparato (por ejemplo $x=100$, $y=150$, $z=0$. No son coordenadas UTM).

A partir de este instante se han calculado las coordenadas de los puntos (anclajes) de referencia para cada situación del anillo respecto al escudo de la máquina.

2.2.3 Tratamiento de los datos para obtener la deformación radial del túnel

En este apartado se muestra el procedimiento que se ha empleado para transformar unas medidas de convergencia a unas medidas de desplazamientos radiales con relación al eje del túnel.

Una vez se tienen todas las medidas de convergencia y las coordenadas de los puntos de referencia, se inicia el primer paso de transformación. Este primer paso consiste en determinar las coordenadas (x, y) de los puntos medidos mediante convergencias.

Para poder determinar sus coordenadas se introducen los puntos de referencia en el Autocad, con sus coordenadas correspondientes (determinadas mediante técnicas topográficas). A continuación, desde dos puntos de referencia se representan unos círculos, con centro en cada punto de referencia y radio igual a la medida de convergencia que forma el segmento definido por uno de los puntos de referencia y el punto al cual se le intenta determinar su posición en el espacio (coordenadas). Una vez se han representado los círculos se define la posición del nuevo punto como el punto de intersección entre los dos círculos (de los dos puntos de intersección que hay entre los círculos se elige el que se aleja menos de la geometría inicial del túnel. Normalmente uno de los puntos de intersección da unos desplazamientos totalmente irreales) (Figura 16).

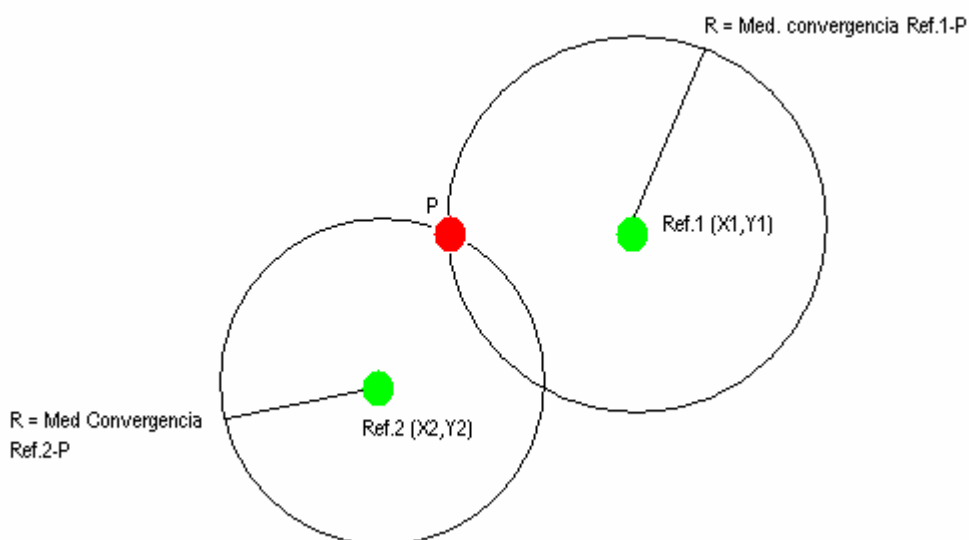


Figura 16. Determinación de nuevo punto (X,Y).

Esta operación se realiza tantas veces como haga falta, hasta determinar todas las coordenadas de los puntos de estudio.

Una vez se han determinado las coordenadas de un punto de "convergencia" este punto pasa a ser un punto de referencia y puede ser utilizado para determinar las coordenadas de otro punto.

Todas estas operaciones se realizan un total de cinco veces, ya que las medidas se han realizado en cinco posiciones distintas entre el anillo y el escudo de la EPB.

A continuación se determinan los desplazamientos verticales y horizontales de cada punto, en todas sus distintas posiciones (Figura 17), es decir, el desplazamiento vertical y horizontal que ha experimentado un punto de la posición inicial (anillo en la posición (1) más próxima al frente de excavación) hasta una de distinta (posición 2, 3, 4 y 5).

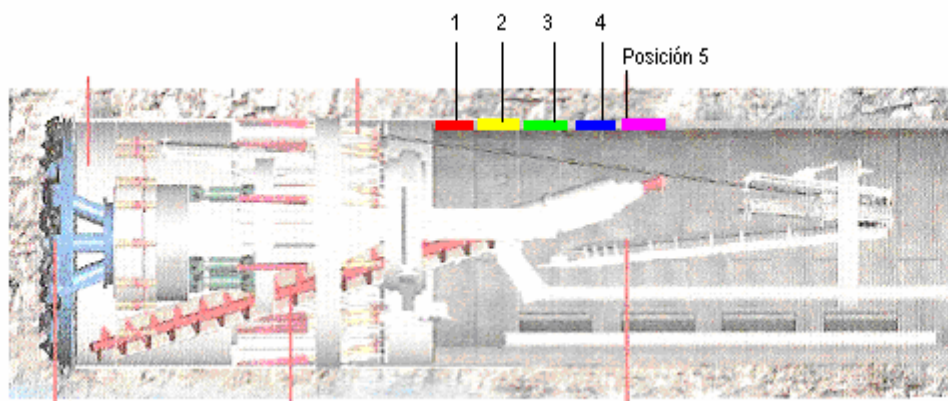


Figura 17. Distintas posiciones del anillo de estudio respecto al escudo.

Seguidamente se representan los valores de los desplazamientos verticales y horizontales dentro del entorno de Autocad. La representación se realiza a partir de segmentos rectos verticales y horizontales, de longitud igual al desplazamiento experimentado por el punto.

Una vez se han representado estos "vectores de desplazamientos" se representa la resultante de la combinación de los desplazamientos verticales y horizontales (Figura 18).

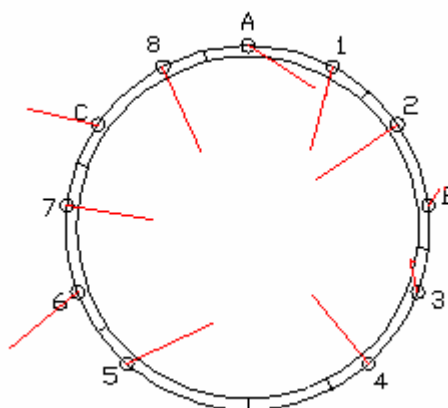


Figura 18. Resultante de los desplazamientos verticales y horizontales (escala exagerada).

Esta representación se repite para todas las combinaciones de posiciones que se consideran interesantes para el estudio (combinación 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 2-3, 2-4 y 2-5).

Finalmente se realiza un abatimiento de estos "vectores" sobre unas líneas que unen los puntos de medida con el eje del túnel y así se determina la deformación radial del anillo de dovelas.

En el anexo de resultados se recogen todos los resultados de este análisis.

2.2.4 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de las deformaciones del túnel se han representado de dos formas distintas. Una de ellas es una representación gráfica del propio revestimiento del túnel y sus desplazamientos en distintas etapas.

La otra forma de representación se basa en dibujar los valores de los desplazamientos radiales en un gráfico donde en el eje de ordenadas se representa el valor de los desplazamientos y en el eje de las abscisas el ángulo que forma la proyección radial de los desplazamientos respecto a la clave del túnel.

2.2.4.1 Resultados obtenidos en el anillo 804

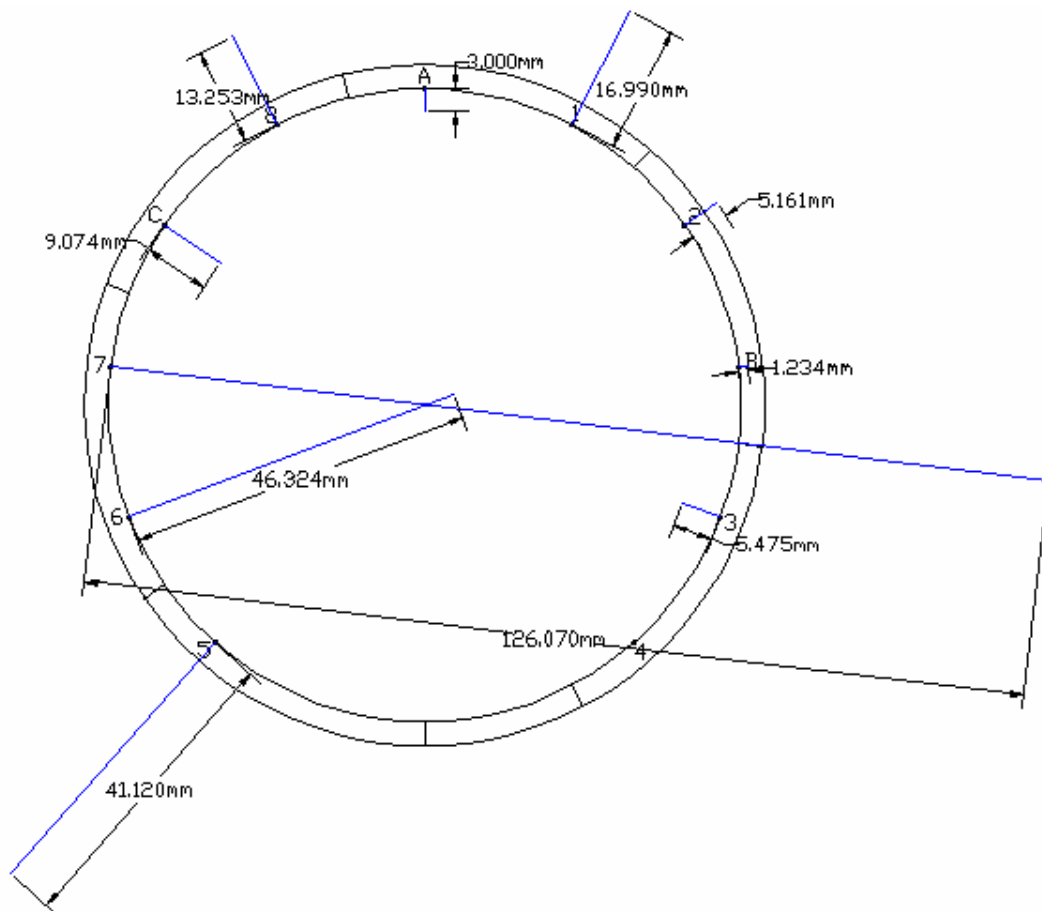


Figura 19. Representación gráfica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 3.

En esta representación gráfica (Figura 19) y en todas las siguientes (Figura 20, 21, 22, 25, 26 y 27), la escala de los desplazamientos se ha exagerado hasta tal punto que los desplazamientos más pequeños también se hacen visibles.

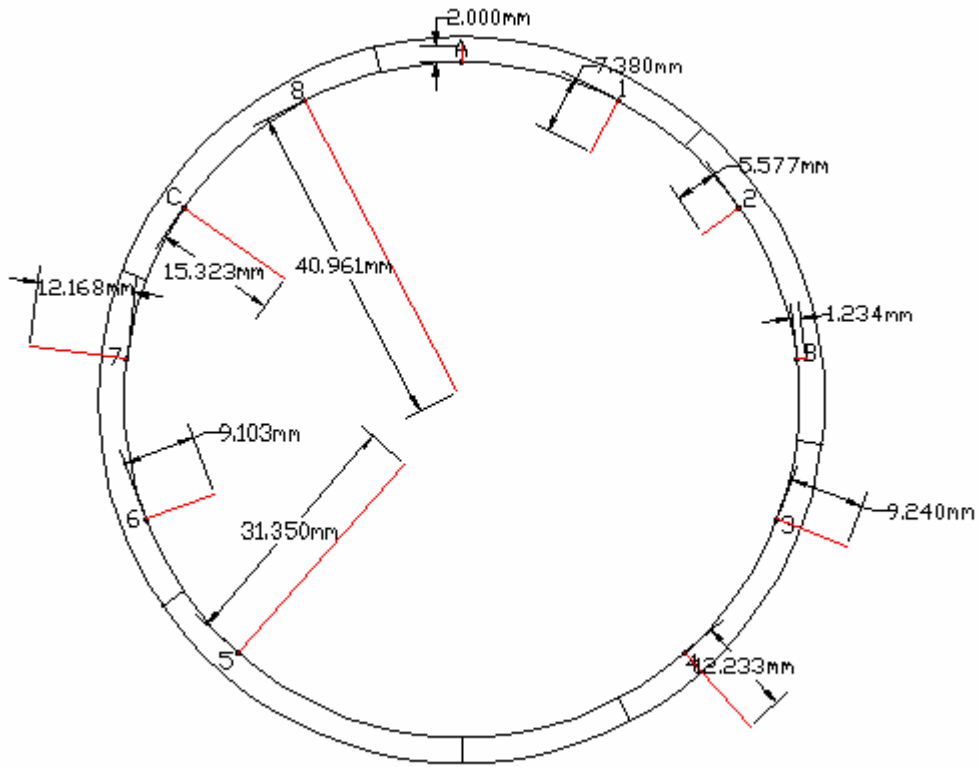


Figura 20. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 4.

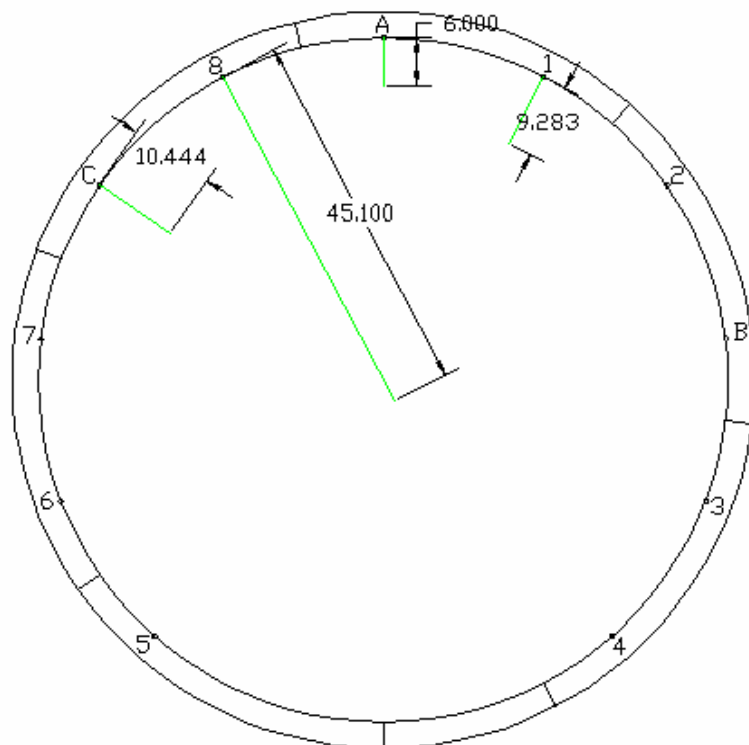


Figura 21. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 5.

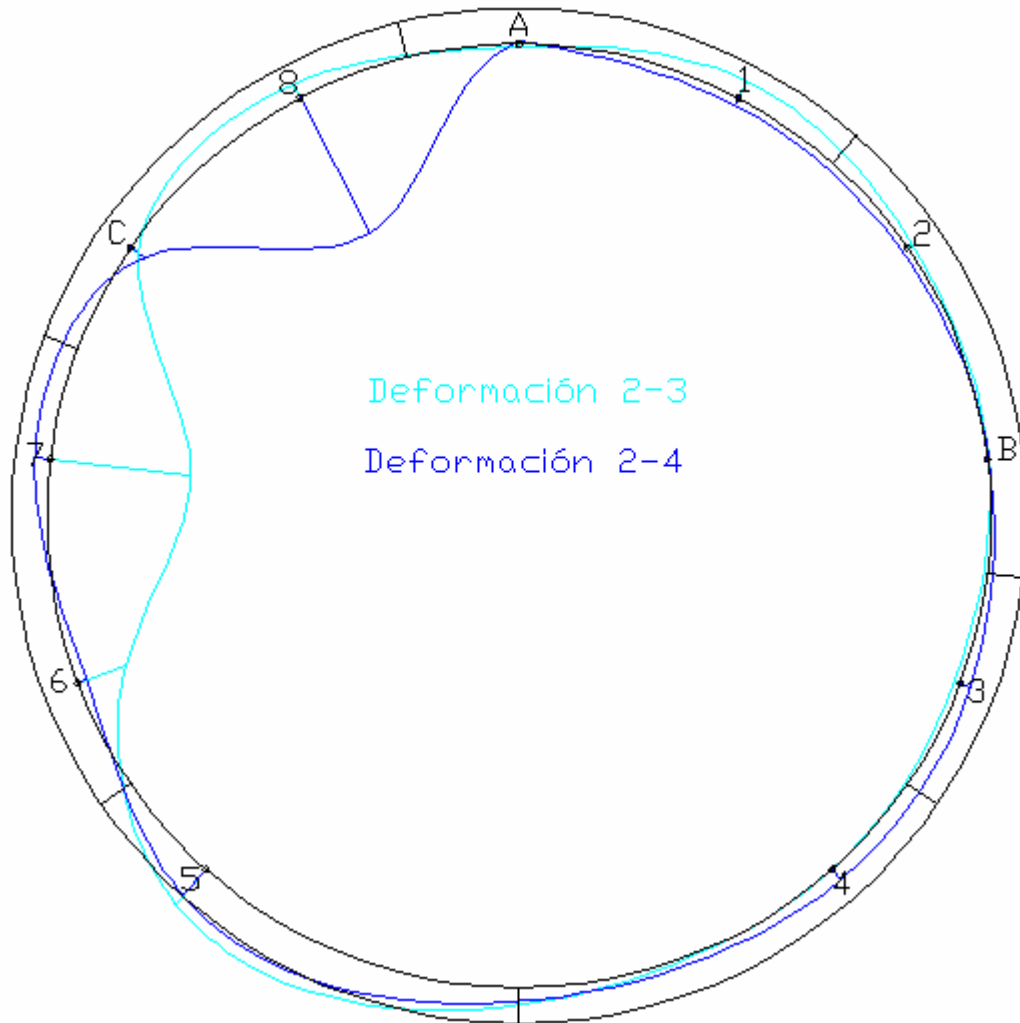


Figura 22. Deformación del anillo de dovelas 804.

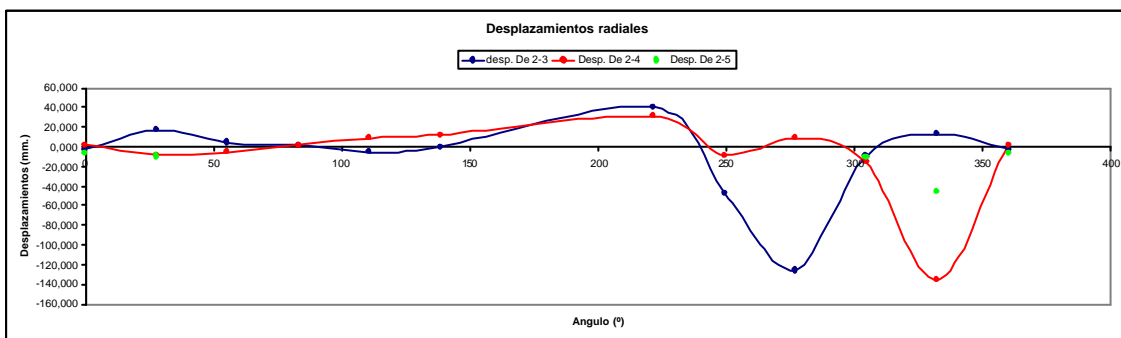


Figura 23. Deformación del anillo de dovelas 804.

Los valores positivos significan hinchamiento, mientras que los negativos significan contracción.

Una de las cosas que más sorprende de la deformación del anillo 804 (Figura 22 y Figura 23) es el hecho que la deformación se concentra en una zona muy reducida y que la deformación entre la posición 2-3 y la 2-4 ha sufrido una "especie de rotación".

Es muy probable que este cambio en la geometría de la deformación 2-3 y la 2-4 tenga que ver con el fenómeno de la inyección de mortero de cola.

En el caso de la deformación 2-3, seguramente la línea de mortero que inyectaba a más presión era la A5, mientras que en la posición 2-4 era la línea A6 (ver Figura 24).

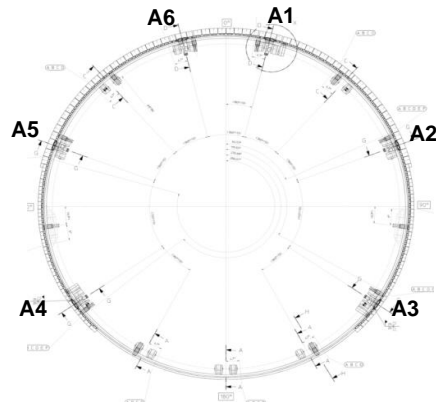


Figura 24. Esquema de situación de las líneas de inyección de mortero.

2.2.4.2 Resultados obtenidos en el anillo 818

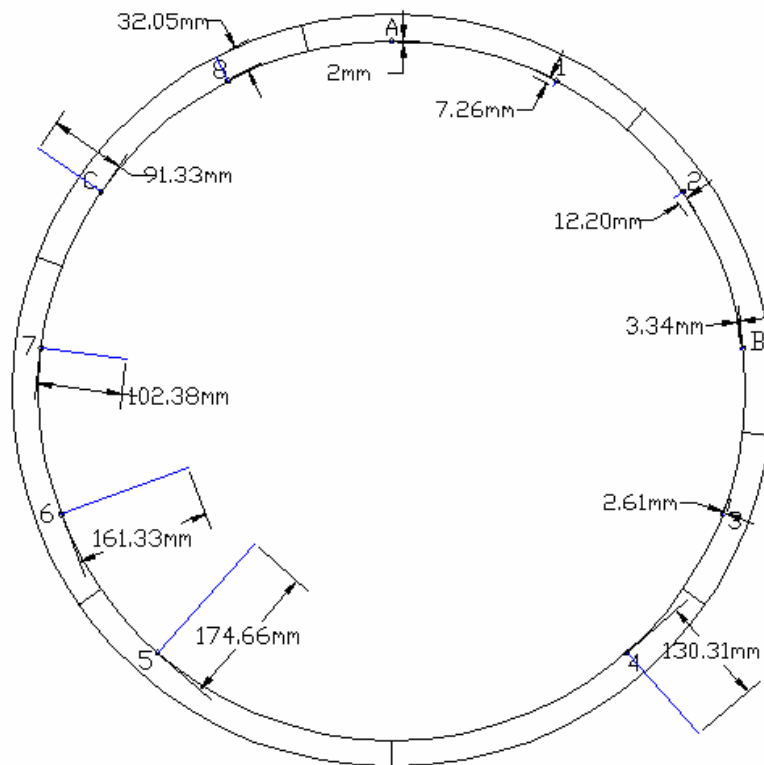


Figura 25. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 3.

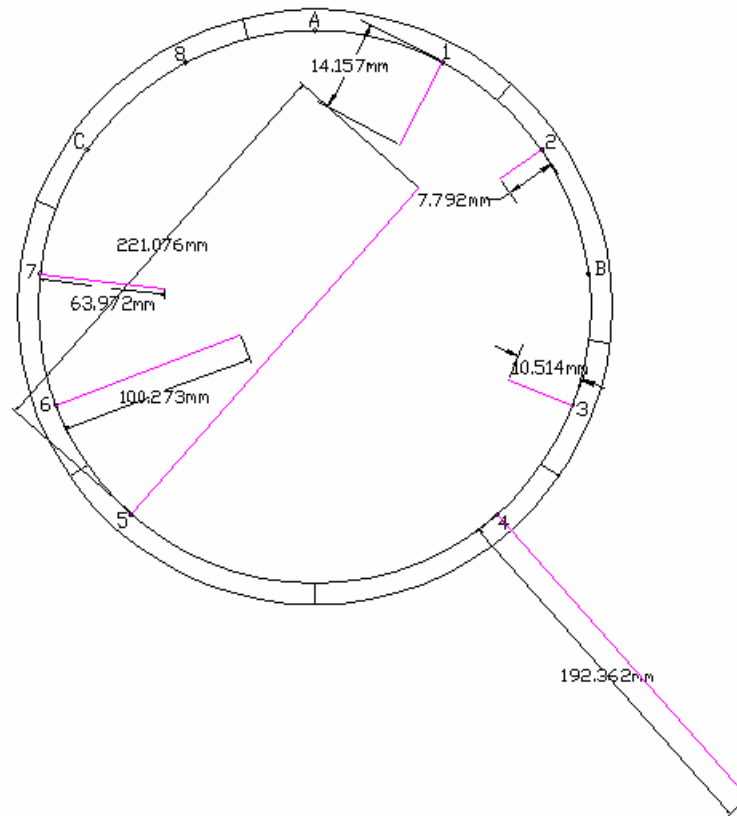


Figura 26. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 4.

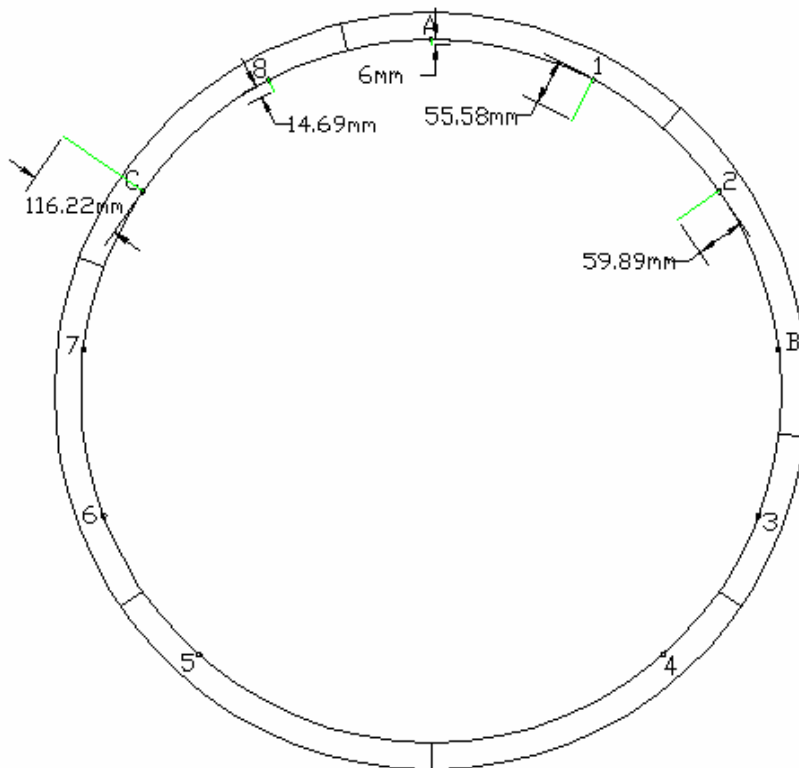


Figura 27.1 Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 4.

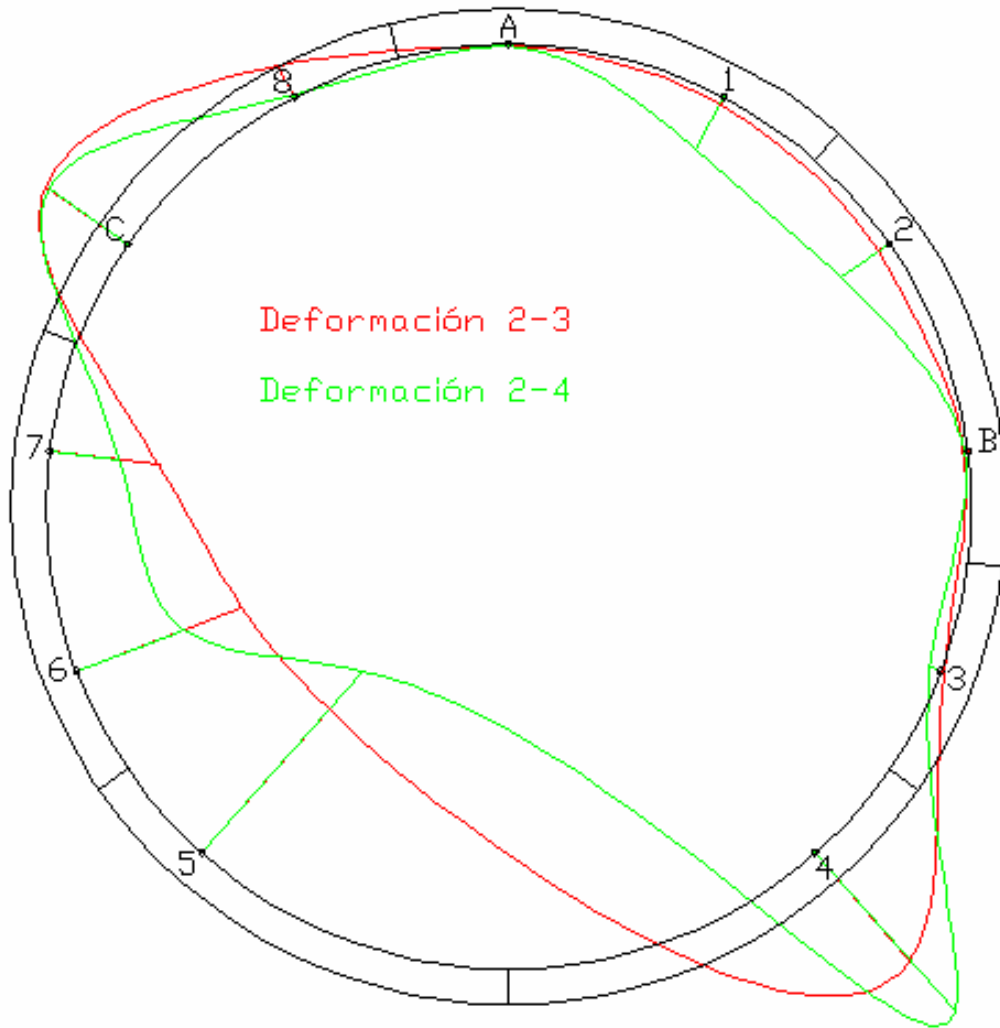


Figura 28. Deformación del anillo de dovelas 818.

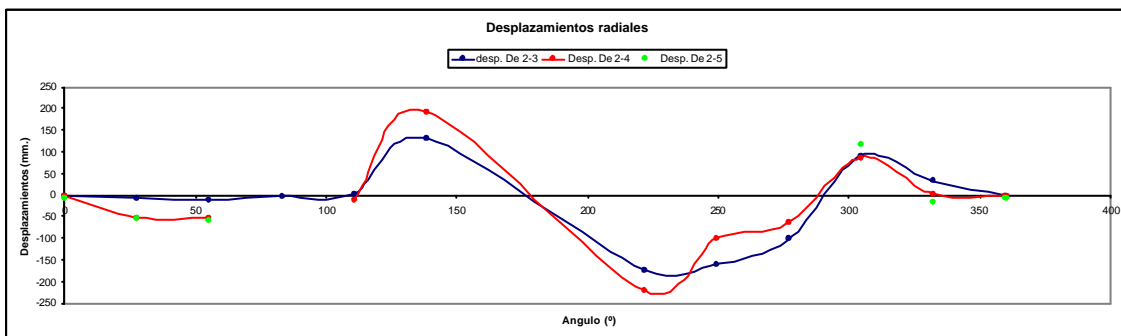


Figura 19. Deformación del anillo de dovelas 818.

En este caso, las deformadas que se obtienen (Figura 28 y Figura 29), tanto la 2-3 como la 2-4, siguen una evolución relativamente constante.

2.3 Determinación de la deformada mediante métodos topográficos (perfilómetros)

Debido al número limitado de medidas de convergencia que se han realizado dos únicos anillos (804 y 818), ha sido necesario utilizar el gran número de perfilómetros, realizados por el equipo de topografía de la UTE, con la finalidad de poder definir el comportamiento del revestimiento del túnel.

Los perfilómetros son unas medidas topográficas que se realizan para determinar la deformación final del túnel en distintas secciones a lo largo de éste.

La intención de trabajar con los perfilómetros, radica en la idea de poder determinar una "deformada promedio final" y compararla con los resultados obtenidos con las convergencias. De este modo se puede estimar lo cerca o lejos que esta la deformación medida en los anillos próximos al escudo, respecto la final, además de comprobar si coincide geoméricamente.

2.3.1 Tratamiento de los datos para obtener la deformación radial del túnel

Estrictamente, en este caso, no ha habido un tratamiento de los datos para determinar la deformación radial, ya que directamente se nos ha proporcionado un archivo CAD con la geometría inicial del túnel y sus desplazamientos radiales finales.

Únicamente se ha determinado el ángulo que forman los puntos en donde se ha medido los desplazamientos y la clave del túnel.

La finalidad de determinar estos ángulos, radica en la idea de comparar las graficas obtenidas con las convergencias (Figura 23 y Figura 29) y las de los perfilómetros (Figura 31).

Debido a la propia evolución de la obra, únicamente se han tenido perfilómetros hasta el PK 10+747. Este hecho sería un problema si la variabilidad de los resultados entre perfilómetros fuese muy distinta, cosa que no sucede.

En consecuencia, se ha escogido el perfilómetro del PK 10+747 (Figura 30) que es el más próximo a los anillos medidos.

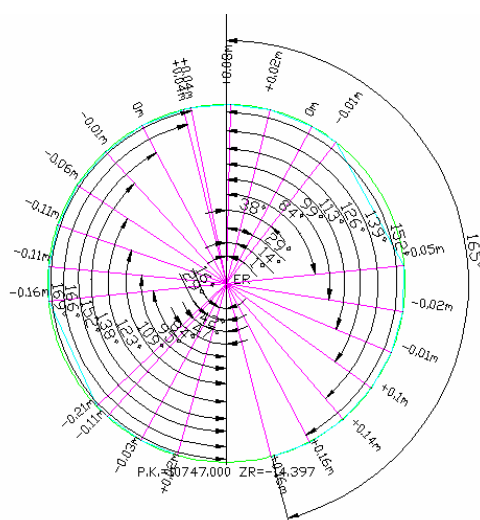


Figura 30. Representación grafica de perfilómetro (PK: 10+747).

2.3.2 Resultados obtenidos

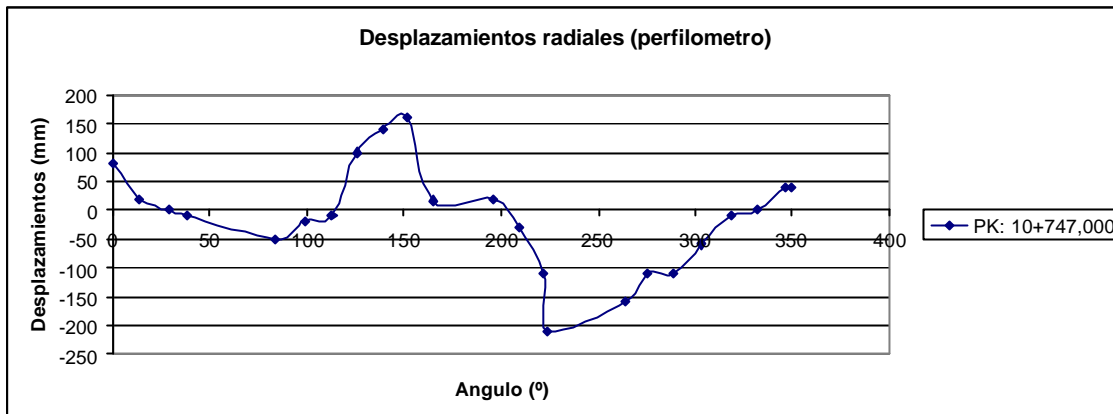


Figura 2 Deformación final del anillo de dovelas.

En el anexo de resultados se recogen todos los resultados de este análisis.

Debido que se ha supuesto que esta es la deformación final, se ha calculado el área que encierra la gráfica que define la deformación (Figura 31) y se ha realizado la diferencia entre la parte positiva (hinchamiento) y la negativa (contracción) con la finalidad de determinar la contracción final del revestimiento.

El cálculo se ha llevado a cabo mediante triángulos y el valor de la contracción obtenido ha sido del 0,55% respecto al área total del túnel (perímetro exterior del revestimiento de dovelas).

2.4 Comparación de las deformadas obtenidas mediante convergencias y perfilómetros

Como se ha comentado anteriormente, con esta comparación se intenta ver lo lejos o cerca que se está de la deformación final, además de comprobar si el método combinado de convergencias y topografía es acertado para determinar la deformada del revestimiento.

La comparación se ha realizado mediante las gráficas de desplazamiento radial vs ángulo en relación a la clave (Figura 32, 33 y 34).

2.4.1 Resultados obtenidos

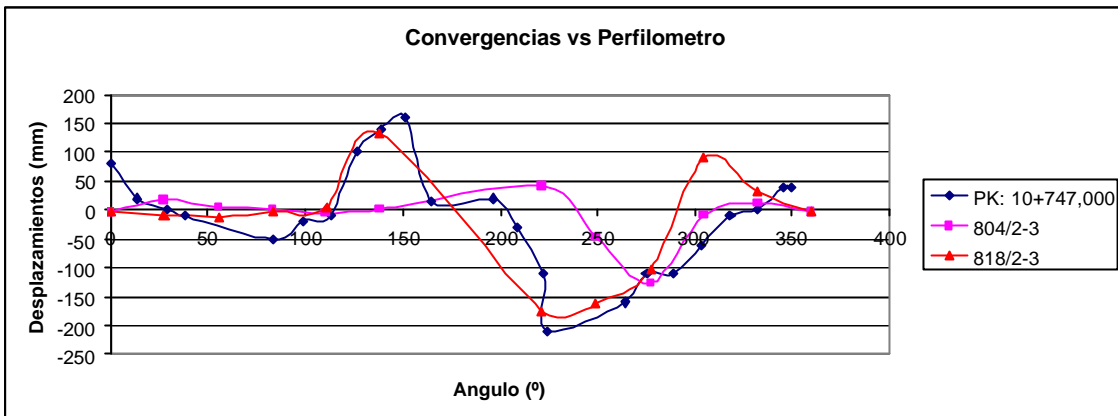


Figura 32. Comparación de las deformadas entre las posiciones 2-3 (convergencia) y la final (perfilómetro).

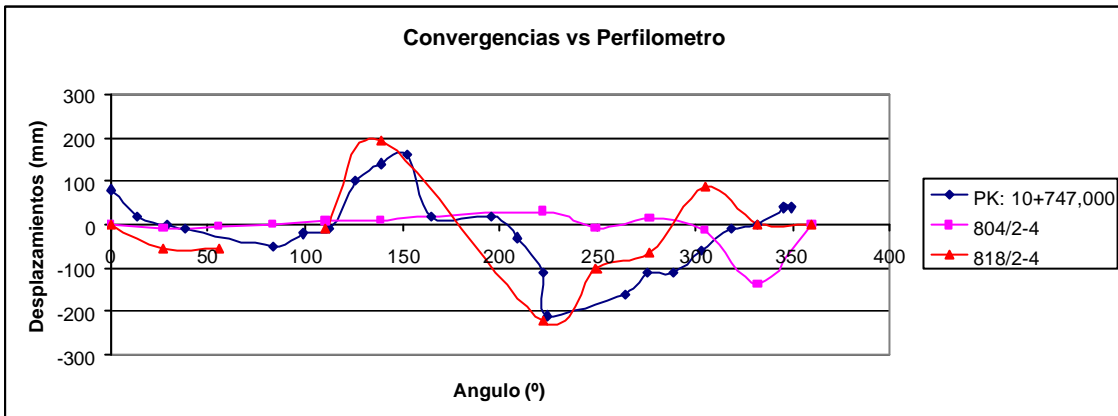


Figura 33. Comparación de las deformadas entre las posiciones 2-4 (convergencia) y la final (perfilómetro).

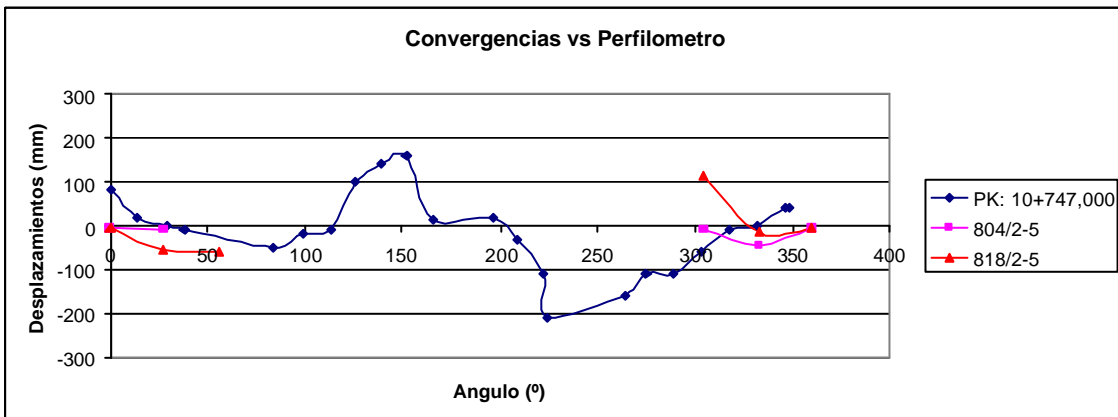


Figura 34. Comparación de las deformadas entre las posiciones 2-5 (convergencia) y la final (perfilómetro).

2.4.2 Conclusiones

De las medidas del anillo 804 y de su posterior comparación, no se ha extraído ninguna conclusión relevante, ya que su geometría es notablemente distinta a la que se extrae del perfilómetro. Únicamente se puede apreciar que los valores máximos de los desplazamientos se encuentran relativamente próximos al rango de los finales.

En el caso de los resultados obtenidos en el anillo 818, la situación es totalmente distinta a la anterior, ya que en este caso se pueden extraer un conjunto de conclusiones relevantes.

Estas conclusiones son las siguientes:

- La deformación del anillo de dovelas es prácticamente instantáneo a su salida del escudo. Esto queda patente en el hecho de que las deformaciones medidas entre la posición 2 y la tres posiciones (pos. 2, justo antes de salir del escudo, pos. 3, inmediatamente después de salir del escudo) son prácticamente iguales a las que da el perfilómetro (deformación final).
- Debido a la coincidencia geométrica entre la deformada del anillo 818 y la del perfilómetro, se supone que, en la mayoría de los casos, la deformada del túnel es similar a la del anillo 818. En consecuencia se puede afirmar que la mayoría de los desplazamientos se producen en la zona próxima a la solera.
- El valor de la contracción final del túnel ha resultado ser de un 0,55% el área del túnel.
- Se ha podido verificar que la técnica empleada para determinar la deformada (convergencia con puntos referenciados) es relativamente fiable, ya que hay que considerar que se han conseguido resultados similares con dos técnicas totalmente distintas que ni siquiera han sido realizadas por la misma persona (persona convergencia distinta a persona topografía). Además del plus que supone poder medir las deformaciones de forma inmediata a la salida del escudo, cosa que es muy difícil con las técnicas puramente topográficas.