

Utilización de Encofrado Deslizante para Pozos de Gran Diámetro

Use of Slip Formwork for Large Diameter Shafts

Manuel Jiménez Hernández^a, Lucio Souza Pereira Matteucci^b,
José María Creus Fernández^c, Carlos Peña Chueca^d, José Vera Agullo^e,
Ignacio Rouco Rodríguez^f, Cristian Jesús Sánchez Correa^g, Pedro Rey Antón^h

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Infraestructuras. Director Contrato Línea 6 Metro São Paulo.

manuel.jimenez.hernandez@acciona.com

^bIngeniero Civil. ACCIONA Infraestructuras. Director Contrato Línea 6 Metro São Paulo.

lmatteucci@acciona.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Infraestructuras. Director Ingeniería Línea 6 Metro São Paulo.

josemaria.creus.fernandez@acciona.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Infraestructuras. Gerente Oficina Técnica Línea 6 Metro São Paulo.

capenac@acciona.com

^eIngeniero Químico. ACCIONA Infraestructuras. Gerente Grupo Hormigón en Infraestructuras.

jose.vera.agullo@acciona.com

^fAyudante de Obra. ACCIONA Infraestructuras. Responsable de Calidad y Medio Ambiente.

ignacio.rouco.rodriguez@acciona.com

^gIngeniero Industrial. ACCIONA Infraestructuras. Consultor Estructuras Línea 6 Metro São Paulo.

cjsanchez@acciona.com

^hArquitecto. ACCIONA Infraestructuras. BIM Manager Línea 6 Metro São Paulo.

pedro.rey.anton@acciona.com

RESUMEN

En la Línea 6 del Metro de Sao Paulo se están construyendo 10 estaciones con tipología de Pozo + Caverna donde inicialmente ejecutamos un pozo de gran diámetro para excavar posteriormente en caverna la estación. Hay que destacar que nos encontramos ante una línea a gran profundidad, con estaciones situadas a más de 60 m por lo que esta metodología a resultado de gran utilidad para la ejecución del revestimiento secundario de los pozos. No obstante, las grandes dimensiones obligan a realizar un estudio previo y una planificación muy detallada tanto del proceso de hormigonado como del proceso de cura.

ABSTRACT

On Line 6 of the Sao Paulo Metro, 10 stations are being built with the Shaft+Cavern typology where we initially executed a large diameter shaft to subsequently excavate the station in a cavern. It should be noted that we are dealing with a line at great depth, with stations located more than 60 m, so this methodology has been very useful for the execution of the secondary lining of the shafts. However, the large dimensions require a prior study and very detailed planning of both the concreting process and the curing process.

PALABRAS CLAVE: Metro São Paulo, Encofrado deslizante, Pozos gran diámetro, Tiempo de curado.

KEYWORDS: São Paulo Metro, Sliding formwork, Large diameter shafts, Curing time.

1. Introducción a los Encofrados Deslizantes.

1.1. Nociones básicas.

El sistema de hormigonado con encofrado deslizante no es una técnica nueva. Las primeras pruebas datan de la década de 1940 cuando el Ingeniero Emik Lindman inició esta técnica. Pero no fue hasta la década de 1960 cuando realmente empezó a utilizarse de forma regular en las obras. La utilización de sistemas de encofrados deslizados es altamente recomendada en estructuras de gran altura y sección (más o menos) constante, tales como pilares, chimeneas, silos y torres.

La metodología constructiva consiste en el uso de unos encofrados que se mueven de forma gradual y constante (deslizado) a medida que se va ejecutando el hormigonado de la estructura. Este sistema puede utilizarse tanto en estructuras que se ejecuten con encofrados a dos caras como en aquellas que se ejecuten con encofrado a una sola cara.

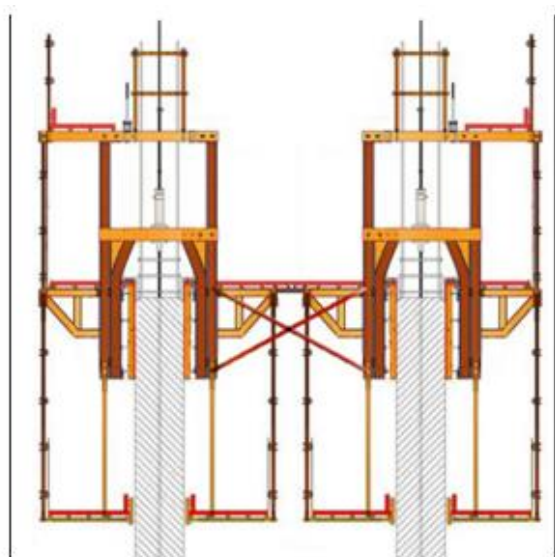


Figura 1. Esquema de encofrado deslizante a dos caras.

La diferencia entre un caso y el otro es la posición de las barras de guiado de los encofrados, sobre los que deslizan estos, que en el caso de dos caras se sitúan en el interior de la estructura, en el eje (Figura 1), mientras que en el caso de encofrado a una cara esta barra de guiado se posiciona en el exterior del encofrado (Figura 2).



Figura 2. Esquema de encofrado deslizante a una cara.

1.2. Ventajas y desventajas.

Las principales ventajas del uso de este sistema son las mejoras significativas en los plazos de ejecución que repercuten en ahorros de costes al aumentar la productividad del proceso. También se mejora de forma importante la calidad del producto final, dado que un hormigonado continuo supone una mayor homogeneidad del hormigón, y un mejor acabado superficial. Por el contrario, este sistema requiere de una

planificación y organización mayor para garantizar un hormigonado constante, así como de una serie de estudios previos sobre dosificaciones del hormigón a utilizar que nos garantice una correcta velocidad de hormigonado y fraguado y todas aquellas alternativas previamente estudiadas que nos permitan actuar ante eventuales cambios del proceso, ya sea por problemas durante el hormigonado (averías, retrasos, etc...) como ante cambio de las condiciones de contorno (cambios en la temperatura ambiente o en la temperatura del hormigón). Por último, hay que destacar que el proceso de hormigonado cuando usamos encofrado deslizante es un proceso constante que no tiene por qué ser continuo. Como comentamos, y explicaremos más tarde, un buen estudio de la dosificación del hormigón permitirá actuar ante aceleraciones o ralentizaciones del curado permitiendo si, así se desea, el realizar pausas controladas de la fase de hormigonado.

1.3. Particularidades de los pozos de gran diámetro.

Normalmente, las estructuras ejecutadas con encofrado deslizado son estructuras esbeltas en los que los espesores son relativamente reducidos, y por tanto el volumen de las tongadas de hormigón a realizar en cada avance es relativamente pequeño. Cuando hablamos de estructuras tipo pilares o torres, el acceso para hormigonar es sencillo pudiendo ubicar los equipos en el perímetro de la estructura de forma fácil.

En el caso de los pozos de gran diámetro, y especialmente en el caso de estudio de los pozos de la Línea 6 del Metro de SP, dada la profundidad de éstos, nos encontramos con grandes espesores de paredes 1.0-1.5 m, lo que implica volúmenes considerables de hormigón por tongada. Por otro lado, las profundidades de los pozos, que en algunos casos llega hasta los 70 m, unido a la reducción de espacio por tratarse

de entornos urbanos, afecta de manera significativa a la accesibilidad para el vertido del hormigón.

2. Dosificación del hormigón.

Como ya se ha comentado, la dosificación del hormigón cuando hablamos de estructuras a ser ejecutadas mediante encofrado deslizado, sin ser un hormigón especial, debe atender a ciertos criterios que permitan una trabajabilidad y unos tiempos de curado muy concretos.

Cemento.

Si bien deben utilizarse aquellos tipos de cemento que cumplan con la clase de exposición y los requerimientos marcados por la obra, como recomendación específica para hormigón deslizado, se desaconseja el uso del cemento CP-V de alta resistencia inicial, ya que es conveniente un incremento gradual de resistencias durante el deslizado. De igual forma para el correcto deslizado, se aconseja llegar a la máxima relación agua/cemento posible, siempre que cumpla con requisitos de proyecto, lo que ayudará a un endurecimiento del hormigón más gradual y controlable durante el proceso de deslizado.

Es importante, dentro de lo posible, mantener constante el porcentaje de clínker y de adiciones durante todo el suministro de hormigón a obra. Cambios en el porcentaje de adiciones y clínker, puede dar lugar a variaciones bruscas en los tiempos abiertos para deslizado disponible con una dosificación de hormigón dada. Esto cobra una especial importancia cuando hablamos de grandes espesores de hormigón como es el caso que nos ocupa.

Aditivos.

Los aditivos, además de sus funciones habituales, tendrán la función de ajustar los tiempos óptimos de deslizado. Puede emplearse un único aditivo polifuncional o una combinación de plastificante (con efecto secundario de retardo) y un superplastificante. Se

aconseja emplear una combinación de ambos aditivos, con el objetivo de deslizar la búsqueda de la trabajabilidad inicial de la búsqueda de los tiempos óptimos de deslizado.

- Contenido de finos.

Para un correcto deslizado y un buen acabado superficial se recomienda que el contenido total en finos del hormigón sea como mínimo de 400 kg/ m³, . Por tanto, el contenido en finos de las arenas debe ser tal que asegure que el citado valor de contenido mínimo en finos total de la mezcla sea superior a dicho valor.

Contenido de finos.

Habitualmente, en un hormigón convencional la relación árido fino respecto al total de áridos suele ser del 40-45 %. Sin embargo, en hormigones deslizados, para un buen deslizado y acabado superficial, es aconsejable invertir esta relación hasta aproximarse a un contenido de arena respecto al total de árido de un 55-60%.

3. Estudio del hormigón.

Una vez definida la dosificación del hormigón, pasamos a la fase de estudio del hormigón. ¿Y a que nos referimos con eso? Pues básicamente a estudiar variantes de esa dosificación, sin alterar la base, modificando las cantidades de aditivo de forma que juguemos con los tiempos de cura.

Se deben establecer al menos 5 fórmulas de hormigón con diferentes tiempos abiertos de deslizado de entre 4 y 8 horas a base de variar el contenido en aditivo plastificante (cuyo efecto secundario es el de retardo). Dichas fórmulas deben ser capaces de ajustar el ritmo de deslizado a las necesidades de cada momento.

Con el fin de ajustar las fórmulas se realizarán los ensayos descritos a continuación:

- Ensayo de inicio y fin de fraguado mediante el método de Vicat (mortero).

- Ensayo de inicio y fin de fraguado mediante el método del penetrómetro (hormigón).
- Método hincado barra corrugada. Validación del personal de obra a cargo del deslizado

Con estos ensayos obtenemos lo que llamamos curvas de deslizado (Figura 3).

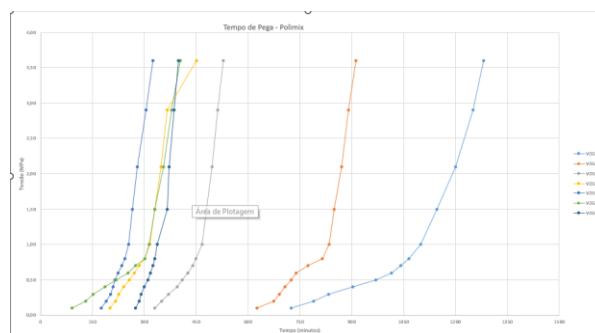


Figura 3. Curvas de deslizado.

Estas curvas determinan la evolución de la resistencia del hormigón a edades tempranas. De esta forma un mismo hormigón con las mismas características mecánicas finales, puede comenzar a fraguar en tiempos diferentes.

¿Y porque necesitamos estas curvas? Pues porque el hormigón no es una ciencia exacta. Los ensayos que se realizan para determinar estas curvas son efectuados en laboratorio, en condiciones controladas y con temperatura constante en torno a 20°C. Sin embargo, los tiempos de obtención de resistencia, se duplican o reducen a la mitad cuando la temperatura disminuye o aumenta en 11°C. Si estas variaciones son conocidas en circunstancias “ideales” de laboratorio, cuando traspasamos estos parámetros al entorno de la obra, la variabilidad de los hormigones aumenta, no solo por las condiciones de la obra, sino por la propia variabilidad del hormigón en amasadas diferentes. El tener diferentes opciones (diferentes curvas) nos permite ajustar el contenido más conveniente de aditivos a cada fase de hormigonado. Y lo que es más importante, tener soluciones preestablecidas a eventuales problemas que puedan surgir.

4. Estudio del Proceso de hormigonado

Hasta aquí, lo que se ha explicado es aplicable a cualquier estructura en la que se emplee el método de encofrados deslizados. A partir de ahora veremos las particularidades de los pozos de gran diámetro con ejemplos de las estructuras realizadas en la Línea 6 del Metro de São Paulo. Para poner en contexto la obra, la siguiente figura (Figura 4) podemos ver la envergadura de los pozos de los que estamos hablando.

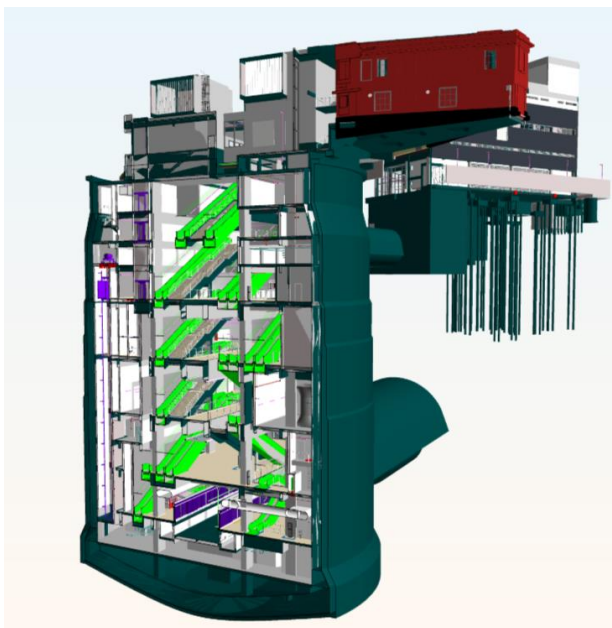


Figura 4. Sección pozo de estación Bela Vista.

Se trata de la estación de Bela Vista, con diámetro interno final de 37 m, y espesor de pared secundaria de 1,2 m. Teniendo en cuenta que la altura de los encofrados deslizantes es de 1 m, estamos hablando que para llenar la zona encofrada necesitamos en torno a 145 m³ de hormigón. A priori no parece una gran cantidad, pero hay que tener en cuenta que este volumen hay que repartirlo en un perímetro de pozo de aproximadamente 120 m lineales. Para completar la escena, en general en todas las obras de Metro, y muy en particular en São Paulo, la ubicación de las estaciones se encuentra en zonas altamente pobladas, con grandes edificios (de más de 20 pisos, en los que los recintos de obra

son reducidos y las condiciones de hormigonado no son las ideales.

Con estos parámetros, podemos estimar el tiempo que se tarda en el hormigonado, teniendo en cuenta la entrada y salida de las hormigoneras, tiempo de liberación, verificación de cono, bombeo, puntos de hormigonado, y movimiento de la trompa de hormigonado a lo largo de la estructura.

Estos parámetros y el tiempo de hormigonado no tendrían consecuencias en una estructura normal. Sin embargo en el caso de los deslizados existe un parámetro adicional que es la zona o franja óptima de deslizado. La experiencia nos dice que la franja óptima de deslizado se encuentra entre 0.20 – 0.75 MPa. y la franja máxima llegaría hasta los 3.50 MPa. En el caso de São Paulo, por las características de los hormigones locales, todos los deslizados se ejecutaron entre 1.00-4.00 MPa.

¿Dónde reside el problema (y la solución) de todos estos parámetros? Pues que se tiene que conseguir deslizar el perímetro completo del pozo cuando el hormigón este en esta franja de 1.00/4.00 MPa.

Veamos cómo sería el proceso de hormigonado. Para ello, desarrollamos el perímetro del pozo para posteriormente dividir el pozo en tramos de 4 m aproximadamente, que sería el área de influencia de un punto de vertido, por lo que tendríamos que pasar por unos 28 puntos de hormigonado en cada tongada (Figura 5).



Figura 5. Esquema de hormigonado de Pozo.

Aunque pueda parecer conservador, vamos a tomar como tiempo de hormigonado para cada punto unos 5 minutos. Este sería el

tiempo medio teniendo en cuenta las maniobras que hay que hacer para mover la bomba entre cada punto, la ubicación de la trompa entre las armaduras, que en ocasiones requiere del ajuste en campo de estas, así como de los movimientos de las hormigoneras en los reducidos recintos de trabajo. Tomando entonces estos 5 minutos de hormigonado por cada punto, en el caso de tener una sola bomba tardaríamos 120 min en recorrer el perímetro completo del pozo, mientras que en caso de dos bombas el tiempo de vertido de cada tongada es de 60 minutos.

Volvamos a las curvas de deslizado. La determinación de estas curvas, como es lógico, se obtiene a partir de diferentes medidas de la resistencia de la muestra a lo largo del tiempo. Si estos valores los presentamos en una tabla obtendríamos lo siguientes (Figura 6):

Código	Tempo	Mpa	Código	Tempo	Mpa
232	04:45	0,10	233	04:10	0,10
232	05:10	0,20	233	04:25	0,20
232	05:25	0,30	233	04:40	0,30
232	05:35	0,40	233	04:55	0,40
232	05:45	0,50	233	05:10	0,50
232	06:00	0,60	233	05:20	0,60
232	06:10	0,70	233	05:25	0,70
232	06:20	0,80	233	05:30	0,80
232	06:30	1,00	233	05:35	1,00
232	06:50	1,50	233	05:45	1,50
232	07:10	2,30	233	06:00	2,30
232	07:30	3,10	233	06:15	3,10
232	07:40	3,90	233	06:25	3,90
232	08:40	7,70	233	07:25	7,70
232	09:25	15,60	233	07:50	15,60
232	10:30	31,30	233	08:10	31,30

Figura 6. Tabla de tiempo de fraguado de diferentes curvas de deslizado.

En este caso hemos tomado dos de las cinco curvas. Podemos observar cómo los tiempos en que los hormigones van adquiriendo resistencia son diferentes. Así, los 0,70 MPa son obtenidos en 6h 10 min para un caso y 5 h 25 min en otro (en condiciones de laboratorio). De igual forma, el tiempo en que el hormigón llega a los 3,90 MPa es de 7h40 min para un caso y 6h25 min para otro. El colocar como ejemplo los tiempos para 0,70 MPa y 3,90 MPa no es aleatorio. Son las resistencias que nos marcan la franja de deslizado. Analizando los tiempos, para el primer caso tenemos una franja de deslizado de 1h30 min mientras que para el segundo caso la franja es de 1h.

En el caso que nos compete de los pozos de gran diámetro, esta determinación de la franja

de deslizado es fundamental para el éxito del hormigonado. Como comentamos anteriormente, el proceso de hormigonado a través de 28 puntos de vertido es lento y tedioso. El objetivo del proceso es realizar un deslizado del encofrado cada hora aproximadamente. No quiere decir que se tarde una hora, si no que cada hora el equivalente a una tongada. Pero para que la tongada pueda deslizarse, la resistencia del hormigón debe encontrarse dentro de la franja de deslizado. En una estructura en el que la tongada es un volumen pequeño y se vierte en poco tiempo, la “edad” del hormigón es prácticamente la misma y basta seguir la secuencia de hormigonado/deslizado. Sin embargo, con grandes volúmenes la “edad” del hormigón de una misma tongada puede tener variaciones significativas entre los primeros vertidos y los últimos (Figura 5), pudiendo a llegar a 2 h. En este caso, la ejecución de un buen deslizado es prácticamente imposible dado que cuando el último hormigón alcance los 0,70 MPa, el hormigón vertido en primer lugar tendrá 2 horas más de edad, y su resistencia habrá pasado los 3,90 MPa. Recordemos que las franjas calculadas oscilan entre 1h y 1h30 min.

Por tanto, si queremos garantizar un resultado exitoso en un proceso de deslizado, debemos analizar y calcular previamente estos tres parámetros: Curvas de deslizado, rango de deslizado y tiempos de hormigonado. Con estos tres parámetros podremos determinar que curvas son las más adecuadas (incluso descartar alguna), que necesidades de puntos de hormigonado necesitamos, y como consecuencia, que altura ideal de tongada debemos establecer.

Este análisis está hecho en base a datos de laboratorio con temperaturas controladas. Pero la obra es otra cosa. Pude ocurrir, que la realidad del hormigón no permita comenzar el deslizado con 0,70 MPa y hay que esperar a conseguir un mínimo de 1,00 MPa. En este caso la franja de deslizado se reduciría a 1h 10 min y 50 min respectivamente. Podría ocurrir también

que la temperatura del hormigón sea alta y las velocidades de cura se reduzcan a la mitad, por lo que las franjas de deslizado de nuestro ejemplo pasarían a ser de 30 min y 45 min. Si juntamos los dos efectos, las franjas de deslizado serían de 35 min y 25 min respectivamente.

Como comentamos, el hormigón no es una ciencia exacta, y si no queremos correr riesgos debemos estudiar bien todos los parámetros de proceso y tener en cuenta cambios del comportamiento del hormigón para poder definir el mejor procedimiento de deslizado.

Como resultado final de estos análisis, teniendo en cuenta los volúmenes a hormigonar, condicionamiento de los vertidos de hormigón, garantías de llegada de las hormigoneras (no olvidemos que en el ejemplo que analizamos del Metro de São Paulo, el tráfico y los tiempos de desplazamiento de la hormigoneras son factores muy a tener en cuenta), y curvas de deslizado, nos definirán que volumen máximo hormigón fijaremos para ejecutar cada hora y por tanto el espesor de la tongada de cada hormigonado.

La experiencia del Metro de São Paulo es que planear más de 2 hormigoneras por hora y bomba se torna arriesgado y no es recomendable exceder esas 2 hormigoneras por hora y bomba. Tomando este parámetro como premisa, con 2 2 hormigoneras de 6-7 m³, y 2 bombas para el vertido, trabajaremos con tongadas de entre 15 y 20 cm. Si queremos tener un deslizado constante, este tamaño de tongada nos dará la velocidad del deslizado. Como el funcionamiento óptimo de un deslizado, sea para estos pozos o para cualquier estructura, se da cuando trabajamos con el encofrado lleno, el ciclo ideal es que deslicemos a la misma velocidad que vamos llenado el encofrado.

Se puede llegar a hacer una planificación teórica de las fases de hormigonado teniendo en cuenta las tongadas (Figura 7).

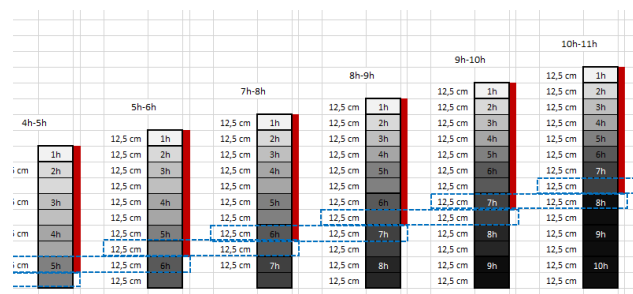


Figura 7. Calculo teórico de fases de deslizado.

Este estudio, además de ayudarnos a prever la evolución del deslizado en función de la “edad” del hormigón, nos puede ayudar a la selección de la curva de deslizado que más se ajusta a nuestra estructura. Así para casos en que trabajamos con 5 o 6 tongadas por metro, lo ideal es trabajar con curvas que den un inicio de fraguado (1.00 MPa) en torno a 6 horas, de forma que conforme vayamos deslizando, el hormigón vertido en la camada superior vaya adquiriendo resistencia a una velocidad tal que cuando llegue al fonde del encofrado, y sea la siguiente en deslizar, hayan transcurrido esas 5-6 horas y se encuentre en el punto óptimo para el deslizado. Esto que sobre el papel es relativamente sencillo de calcular, cuando se lleva a la práctica no resulta tan inmediato por Los cambios de las condiciones del hormigón principalmente por la variación de la temperatura de éste a lo largo de las 24 h del día, así como por la afección del calor de reacción que se produce en las tongadas ya deslizadas. Este efecto es especialmente significativo en el caso de nuestros pozos que se ejecutan con grandes volúmenes de hormigón.

5. Caso práctico de hormigón con encofrado deslizante en la estación de Bela Vista (Metro São Paulo).

Todo el análisis realizado hasta ahora está hecho en base a datos de laboratorio y resultados teóricos. Pero el objetivo fundamental del estudio es poder llevarlo a la práctica. En el proyecto de construcción de la Línea 6 del Metro de São Paulo llevado a cabo por ACCIONA,

entre estaciones y pozos de ventilación/salidas de emergencia, tenemos más de 20 casos de diferentes diámetros y espesores. En general, las estaciones cuentan con diámetros de excavación superiores a los 40 m y diámetros interiores finales en torno a 37 m. Además, por las características geométricas de la línea (una de las más profundas de América del Sur) la profundidad media de las estaciones es superior a la profundidad máxima actual de las líneas del Metro de São Paulo. En varios casos nos encontramos con pozos con más de 60 m de profundidad y que llegan hasta los 70 m.

Para el caso de la estación de Bela Vista, fue realizado un estudio para la ejecución del hormigonado del revestimiento secundario usando el método de encofrado deslizantes.

Como primer paso fueron determinadas las curvas de deslizado a partir del hormigón determinado por el proyecto de ejecución. En este caso se estudiaron hasta 6 curvas diferentes, de las cuales se seleccionaron 4 definitivas.

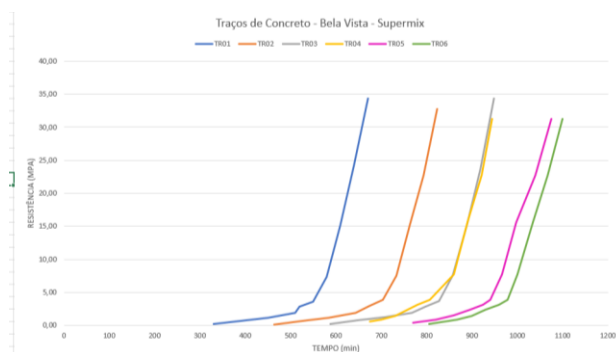


Figura 8. Curvas de deslizado Bela Vista.

Una vez establecidas las curvas de deslizado con las que trabajar fue seleccionada la curva de trabajo inicial, que es con la que se desarrollará todo el deslizado, salvo que aparezcan contratiempos o cambios significativos durante el hormigonado. En algún caso, si el cronograma lo requiere, pueden alternarse dos curvas (una más rápida y otra más lenta) para adaptarse a las temperaturas diurnas y nocturnas. En nuestro ejemplo, dado que el proceso completo tenía una estimación prevista de 12 días de trabajo, no se contempló de antemano una alternancia de curvas (sólo

ganaríamos unas horas en el plazo total). En el caso de Bela Vista optamos por tomar como curva base la TR02 (Figura 9).

Código	Tem. Decorrido	Resistência (Mpa)
TR02	463,00	0,16
TR02	526,00	0,72
TR02	583,00	1,16
TR02	643,00	1,86
TR02	673,00	2,95
TR02	703,00	3,88
TR02	733,00	7,54
TR02	763,00	15,31
TR02	793,00	22,73
TR02	823,00	32,81

Figura 9. Curva TR02 Bela Vista.

Si bien el tiempo de inicio de fraguado, y por tanto inicio de la franja de deslizado es un poco lenta (8h), la experiencia en el proyecto nos dice que estos tiempos se reducen debido a que la llegada del hormigón a obra suele presentar inicios de fraguado más rápido que los estudios de laboratorio. Además, con los espesores de pared por encima de 1 m, el calor que se genera durante la fase de fraguado en las capas inferiores hace que este tiempo se reduzca aún más.

Siguiendo con el proceso de estudio del deslizado, una vez establecidas las curvas de deslizado y la curva de inicio, seguimos con el establecimiento del proceso de hormigonado. Se estableció un ritmo de entre 2 y 4 hormigoneras para cada tongada, dadas las dificultades de acceso al recinto de obra, y se estableció un ritmo de llegada de hormigón a la obra para las 275 tongadas previstas. Como dato curioso, los primeros hormigonados se plantearon con tongadas de 21 cm, mientras que el resto del hormigonado se estableció con tongadas de 13 cm (Figura 10). Esta diferencia se produce porque en las tongadas iniciales del pozo, las más profundas, coincide con la zona de emboques de la caverna de la estación, y por tanto los volúmenes de hormigón a verter en cada “anillo” son inferiores, y con un mismo volumen de hormigón conseguimos una altura de tongada mayor (Figura 11).

Cantidad e Camadas	Altura media camada realizada (m)	Altura Acumulada (m)	Vol. media realizado por camada - m³	REALIZADO			
				Vol. acumulado - m³	Qtd media de BT de 7m por camada	Qtd. Acum. Bts (m³)	Cota inicial
1	0,21	0,21	11	11	1,5 bt de 7m³	2	736,10
2	0,21	0,42	11	21	1,5 bt de 7m³	3	736,10
3	0,21	0,63	11	32	1,5 bt de 7m³	5	736,10
4	0,21	0,83	11	42	1,5 bt de 7m³	6	736,10
5	0,21	1,04	11	53	1,5 bt de 7m³	8	737,14
6	0,21	1,25	11	63	1,5 bt de 7m³	9	737,35
7	0,21	1,46	11	74	1,5 bt de 7m³	11	737,55
8	0,21	1,67	11	84	1,5 bt de 7m³	12	737,77
9	0,21	1,88	11	95	1,5 bt de 7m³	14	737,98
10	0,21	2,09	11	105	1,5 bt de 7m³	15	737,98
11	0,21	2,29	11	116	1,5 bt de 7m³	17	738,19
12	0,21	2,50	11	126	1,5 bt de 7m³	18	738,19
13	0,21	2,71	11	137	1,5 bt de 7m³	20	738,41
14	0,21	2,92	11	147	1,5 bt de 7m³	21	738,41
15	0,21	3,13	11	158	1,5 bt de 7m³	23	739,02
16	0,21	3,34	11	168	1,5 bt de 7m³	24	739,02
17	0,21	3,54	11	179	1,5 bt de 7m³	26	739,44
18	0,21	3,75	11	189	1,5 bt de 7m³	27	739,44
19	0,21	3,96	11	200	1,5 bt de 7m³	29	739,65
20	0,21	4,17	11	210	1,5 bt de 7m³	30	740,06
21	0,21	4,38	11	221	1,5 bt de 7m³	32	740,27
22	0,21	4,59	11	231	1,5 bt de 7m³	33	740,48
23	0,21	4,80	11	242	1,5 bt de 7m³	35	740,69
24	0,21	5,00	11	252	1,5 bt de 7m³	36	740,90
25	0,21	5,21	11	263	1,5 bt de 7m³	38	741,10
26	0,21	5,42	11	274	1,5 bt de 7m³	41	741,31
27	0,21	5,63	11	285	1,5 bt de 7m³	41	741,52
28	0,21	5,84	11	296	1,5 bt de 7m³	43	741,73
29	0,21	6,05	11	307	1,5 bt de 7m³	44	741,94
30	0,21	6,26	11	318	1,5 bt de 7m³	46	742,15
31	0,21	6,46	11	329	1,5 bt de 7m³	48	742,36
32	0,21	6,67	11	340	1,5 bt de 7m³	51	742,57
33	0,21	6,88	11	351	1,5 bt de 7m³	53	742,77
34	0,21	7,09	11	362	1,5 bt de 7m³	55	742,98
35	0,21	7,30	11	373	1,5 bt de 7m³	57	743,19
36	0,21	7,51	11	384	1,5 bt de 7m³	59	743,40
37	0,21	7,72	11	395	1,5 bt de 7m³	61	743,61
38	0,21	7,93	11	406	1,5 bt de 7m³	63	743,82
39	0,21	8,13	11	417	1,5 bt de 7m³	65	744,03
40	0,21	8,34	11	428	1,5 bt de 7m³	67	744,24
41	0,21	8,55	11	439	1,5 bt de 7m³	69	744,45
42	0,21	8,76	11	450	1,5 bt de 7m³	71	744,66
43	0,21	8,97	11	461	1,5 bt de 7m³	73	744,87

Figura 10. Cálculo de espesores de tongada.

Una vez que la cota de hormigonado supera los emboques de las cavernas, los volúmenes necesarios para rellenar un mismo anillo aumentan. Como la cantidad de hormigón por anillo está prefijada para no superar los tiempos definidos para la franja de deslizado, la altura de la tongada disminuye.



Figura 11. Fotografía del proceso de ejecución del deslizado.

Así, cuando se comenzaron los trabajos de hormigonado del pozo, ya se habían establecido de antemano las características del hormigón, las curvas de deslizado que podríamos utilizar, los medios humanos y materiales para seguir un proceso continuo, la cantidad de hormigón por hora a colocar (lo cual permite una buena planificación con las plantas distribuidoras) y el plazo de ejecución previsto. De esta forma se consiguió realizar un hormigonado continuo/constante en un pozo de 60 m de profundidad, en el plazo revisto de 12 días, completando un volumen total de 5.148 m³.

Como puede apreciarse en la foto anterior, con objeto de garantizar el hormigonado continuo de la estructura, y dada la importante cantidad de acero a instalar, éste fue montado previamente al inicio del hormigonado. Para ello fueron usadas estructuras auxiliares de acero que sirvieron tanto de fijación de la estructura definitiva como de andamiaje para la ejecución de los trabajos.

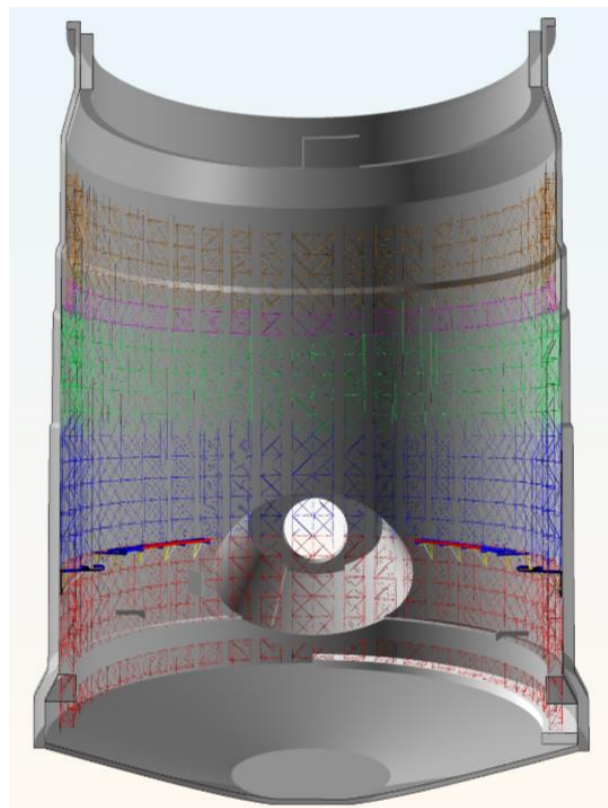


Figura 12. Esquema de torres auxiliares de montaje de acero.

6. Conclusiones.

El proceso de hormigonado con encofrados deslizantes no es un procedimiento novedoso. Es bien conocido y conocidas son sus ventajas en términos de coste y plazo de ejecución en elementos de gran altura. Sin embargo, su aplicación en entornos tan complejos como son las obras de Metro y con estructuras tan profundas ya no es tan habitual. Aprovechando la gran experiencia de ACCIONA en estructuras deslizadas, y analizando los métodos habituales utilizados en São Paulo, durante la ejecución de la obra de la línea 6 del Metro de São Paulo, se dio un paso más a la hora de la planificación y estudio del procedimiento completo de hormigonado, de forma que se minimizasen los riesgos de ejecución y el éxito del procedimiento. Además, al establecer unas reglas de trabajo claras, se podría decir que se ha conseguido estandarizar el proceso de forma que pueda acometerse cualquier tipo de estructura tipo pozo, independientemente de su profundidad, espesor de pared o dificultad de acceso.