

La influencia de los aditivos químicos en el comportamiento del grout bicomponente para relleno en túneles del tipo TBM

Noticreto

Ing. Geniclesio Ramos dos Santos
Director técnico, GMG Engenharia e Consultoria, Brasil.

Dra. Camila Mamede dos Santos
Gerente de investigación y desarrollo, GMG Engenharia e Consultoria, Brasil.

Fotos y gráficos: Cortesía Toxement S.A.

Los aditivos químicos se utilizan ampliamente en concretos, argamasas, pastas y otras mezclas que usan como aglomerante principal el cemento hidráulico. Tales productos están reglamentados en diversos países, y se conocen ampliamente los efectos y eficiencia que esos químicos pueden acarrear a los compuestos que los utilizan. Sin embargo, cuando el material incluye bentonita en su composición y se altera la relación agua/cemento, los conceptos sobre el funcionamiento de los aditivos en esa nueva mezcla tienen variación, como es el caso del grout bicomponente para tuneladoras TBM. Este material está compuesto por cemento hidráulico, bentonita, agua y aditivos, y su comportamiento está totalmente influenciado y promovido por los aditivos químicos que se mezclan al grout fresco, en el túnel.



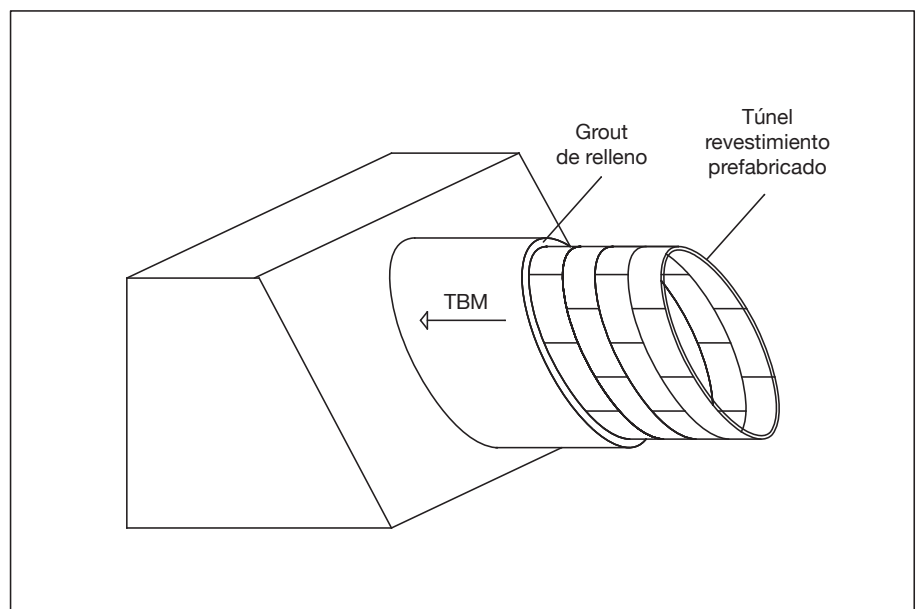
↑ Figura 1. Vista interna de túnel excavado con TBM y revestido con prefabricados de concreto.

En este artículo se abordan el comportamiento y las características generales del grout bicomponente y se detallan los tipos de aditivos usados, sus principios de funcionamiento y la respuesta del grout después de su inclusión. También se aborda el comportamiento del grout bicomponente al usar de forma racional los aditivos químicos, tanto los ya existentes para concreto como los desarrollados específicamente para esta aplicación.

Introducción

Entre las decenas de metodologías que se usan en el mundo para la perforación de túneles se cuentan las excavaciones mecanizadas que, en cuanto a seguridad y economía, presentan mayor eficiencia en determinados tipos y longitudes de túneles. Las excavaciones mecanizadas tienen mayor aplicación en ambientes urbanos y de material variable, principalmente con presencia de suelos y rocas sedimentarias, pues son extremadamente vulnerables a procesos de explosión (drill and blast), bien sea por excavación directa o por el método austriaco (NATM). En la categoría de excavaciones mecanizadas se destacan las que utilizan tuneladoras TBM (Tunnel Boring Machine), que tienen gran capacidad de avance en el túnel, además de alta eficiencia.

Los equipos TBM pueden usar un revestimiento para soporte del material envoltorio del túnel, sea suelo o roca. Tal revestimiento normalmente está compuesto por prefabricados de concreto, aunque también puede elaborarse con diversos materiales metálicos o sintéticos. Cuando se utiliza un revestimiento en concreto, el material se coloca en el espacio excavado por la tuneladora, pero este espacio tiene un diámetro superior al túnel prefabricado e instalado, por lo cual es necesario contar con material para relleno. El material que rellena este espacio debe atender rigurosos requisitos técnicos y se trata de un grout extremadamente fluido que puede o no usar aditivos. Este espacio puede variar entre 13 y 18 cm (Thewes et. al. [09]). Entre los grouts que pueden usar aditivos químicos están los grouts bicomponentes. Tienen cemento como aglomerante principal y la interacción directa con los aditivos determinará las características del grout, tanto en el estado fresco como endurecido.



→ Figura 2. Esquema representativo de proceso de excavación de túnel con TBM revestido en prefabricados de concreto.

Tipos de grout de relleno para TBM

La selección del tipo de grout para rellenar el espacio que queda entre el túnel excavado y el revestimiento prefabricado depende de unos factores que se analizan desde la concepción del proyecto y durante la selección del equipo de excavación. El tipo de material del macizo, el equipo, los materiales disponibles y las propiedades requeridas indicarán la mejor solución para el relleno. Según la EFENARC [03], los tipos de grout se pueden clasificar así:

Grout inerte

En el sistema inerte, el grout no contiene ningún tipo de cemento hidráulico y se compone por materiales granulares como cascajos, arenas, fillers y cenizas, siendo que su comportamiento como grout depende principalmente de la granulometría y de la capacidad de retención de agua de sus componentes en medio acuoso. Según la AFTES [01]: *“El control del material inyectado y su endurecimiento durante la producción e inyección son realmente complejos, debido a la renuncia progresiva de la mezcla de cemento y sustitución por otros con reacción lenta (reacción puzolánica), contribuyendo a una baja resistencia a la compresión. Este producto se inyecta directa y continuamente a lo largo de los tubos puestos al interior de la parte trasera del TBM en el último anillo, rellenando el espacio anular entre el anillo y el macizo”*.

Grout semi-inerte

En el sistema semi-inerte, el grout se compone básicamente de los mismos elementos encontrados en el tipo inerte, pero incluye un pequeño porcentaje de un material que le genera un grado de hidratación, por ejemplo, $<100 \text{ kg/m}^3$ de cemento hidráulico. No obstante, el grout puede tardar un tiempo considerable para empezar a endurecerse, aunque el endurecimiento suceda más rápidamente.

Grout activo

En este tipo de grout las reacciones de hidratación se dan por completo y, normalmente, el consumo del material ligante supera los 300 kg/m^3 . Según Pelizza et. al. [06] *“la mezcla está constituida por agua, cemento, bentonita y aditivos químicos necesarios para modificar la relación agua/material cementante y los tiempos de inicio y fin de fraguado. Es una mezcla activa con fluidez elevada. Se debe bombear fácilmente y generalmente es de efecto retardado (algunas horas), para evitar el riesgo de taponar la tubería durante el transporte y la inyección. La presencia de cemento ayuda en el desarrollo de la resistencia mecánica, que puede alcanzar valores elevados (15 - 20 MPa a los 28 días, aunque no sea realmente necesario). Este tipo de mezcla también se afecta negativamente por variaciones en sus componentes, lo cual puede llevar al taponamiento de la tubería. Esta mezcla se debe inyectar lo más cerca posible*

a las paredes para proporcionar un rápido soporte al segmento del anillo. La inyección a través de la pared del TBM en el anillo puede causar serios problemas de taponamiento”.

Monocomponente

Un grout activo desarrollado para atender los requisitos logísticos y mecánicos, sin necesidad de aditivo alguno posterior a la mezcla, se considera un grout monocomponente. Este posee mayor resistencia mecánica, aunque la logística y la composición deben ajustarse constantemente para evitar problemas de taponamiento o inicio de pegado durante el proceso de bombeo e inyección.

Bicomponente

A las ventajas de un grout monocomponente, se agregan los beneficios de un material estable hasta el momento de la aplicación, que es rápidamente reactivo después de su aplicación. Normalmente es un grout extremadamente fluido, estable en cuanto a la segregación y exudación y con la ventaja de permanecer así durante horas. Este grout recibe su segundo componente justo antes de su inyección en el espacio anillar del túnel, y en cuestión de segundos se transforma de un material estable y líquido en un material gelatinoso y con las reacciones de hidratación iniciadas.

Después de la formación del gel se inician las reacciones de hidratación que típicamente evolucionan a 50 kPa/hora , Peila et. al. [07]. Por ser extremadamente fluido, rellena eficientemente alrededor del túnel e incluso rellena algunas fallas del macizo o del suelo, dependiendo de la permeabilidad. Después de la mezcla, es posible mantener este grout estable hasta por 72 horas con poca pérdida de fluidez y sin problemas de exudación y segregación. Por tal motivo, la mezcla se puede hacer en la superficie para transportarla por tuberías hasta el lugar de aplicación.

Las dosificaciones son, en gran medida, bastante próximas, aunque los requisitos difieren en cada proyecto y los materiales usados pueden generar una dosificación diferente de las usuales. En el siguiente cuadro se encuentra una franja de dosificación típica de grouts bicomponentes usados en Brasil.

Componente A	Cemento	250 – 450 kg
	Bentonita	20 – 80 kg
	Agua	650 – 850 kg
	Controlador de hidratación	2 – 6 kg
Componente B	Acelerador	50 – 100 kg

↑ Tabla 1. Franja de dosificación de grout bicomponente.

Es necesario conocer el comportamiento del grout en el vacío de la TBM, para relacionar las condiciones operacionales de relleno con las presiones del grout en el espacio destinado, Talmon, et. al. [08]. En la Figura 3 se destaca un detalle del lugar en donde se encontró una



fuga de grout, causado probablemente por insuficiente aislamiento de las cuchillas que protegen el cuerpo del TBM contra la entrada de agua y grout.

Figura 3. Grout que superó las cuchillas de aislamiento del TBM.

Aditivos químicos para grouts bicomponentes

Los grouts en general requieren aditivos químicos para alterar sus propiedades, ya sea en estado fresco o endurecido, y lo mismo es válido para el grout bicomponente para inyección en TBM. Aunque uno de los aditivos se dosifica por separado, el “acelerador” no solo acelera, sino que principalmente altera la viscosidad del grout. De tal forma, el “acelerador” se conoce como el componente “B” del grout, y la mezcla fluida es el componente “A”. El grout fluido (componente “A”) puede emplear más de un aditivo. Aunque normalmente se usa apenas el controlador de hidratación, también se pueden usar otros aditivos como superplastificantes, modificadores de viscosidad, compensadores de retracción, etc., de acuerdo con la necesidad específica de cada grout. Se exponen a continuación los principales tipos de aditivos que se pueden usar en grouts y se da un breve resumen de su comportamiento y mecanismos de acción.

Controladores de hidratación

Es el principal aditivo del componente B del grout. Estabiliza la mezcla por horas e incluso por días, manteniéndola con la misma fluidez y viscosidad. Debe ajustarse su dosificación para que el tiempo de estabilización sea

superior al necesario para aplicación, aunque no mucho más que eso, pues su mayor dosificación aumentará la demanda del acelerador. Este aditivo actúa reduciendo la hidratación del cemento y en altas dosificaciones inhibe esta hidratación. En este último caso es imprescindible el uso de un acelerador. Conforme a lo observado por Kosmatka et. al. [05] apud. Kinney, este aditivo no presenta una normativa específica.

Superplastificantes

Existe en el mercado gran cantidad de superplastificantes y de diversas bases químicas. Por lo tanto, en un grout bicomponente cualquier superplastificante para concreto puede atender a la necesidad, desde que el controlador de hidratación se encuentre en las dosificaciones necesarias. Los superplastificantes pueden ser incompatibles con el cemento, con la bentonita o con el controlador de hidratación, por lo cual es necesario realizar pruebas previas.

Modificadores de viscosidad

El grout bicomponente incluye bentonita en su composición, aunque en algunos casos el efecto de retención de agua de la bentonita puede ser insuficiente para evitar la exudación y la segregación, generando la necesidad de incluir un aditivo que cumpla el mismo papel. Esta acción se evita siempre, principalmente cuando se tiene en cuenta el costo adicional. Cuando no haya otra opción, se utiliza el modificador de viscosidad para ayudar a retener el agua en la mezcla y mantener un sistema estable desde el punto de vista físico. Existen

variados tipos de modificadores de viscosidad, aunque lo más importante es verificar la compatibilidad del modificador con los aditivos ya presentes en la mezcla.

Compensadores de retracción

En algunos casos, principalmente cuando se utilizan cementos más reactivos, puede ser necesario el uso de aditivos que provoquen una expansión controlada del grout durante las reacciones de hidratación y que compensen las retracciones de la mezcla inyectada. Las bases químicas pueden ser diversas, pero el óxido de calcio y el polvo de aluminio son las más utilizadas y las más eficientes. Esos expansores permanecen sin reaccionar hasta el inicio de las reacciones químicas del cemento, siempre y cuando el aditivo controlador sea compatible y se encuentre en cantidad adecuada.

Aceleradores (componente B)

Aunque se conocen como aceleradores, son mucho más que eso. Cuando el producto se agrega al componente A del grout, en pocos segundos transforma una mezcla extremadamente fluida (líquida) en gel. Esa propiedad del acelerador es fundamental para la aplicación de tal tecnología, de manera que la acción principal del acelerador en el grout bicomponente no es acelerar el pegado, sino cambiar instantáneamente la reología de la mezcla, aumentando drásticamente su viscosidad y transformándola de un fluido pseudo-plástico a uno semi-sólido en segundos, que se hace sólido pasados unos minutos. Después de un cambio brusco de viscosidad en la mezcla, la saturación de algunos iones provenientes del acelerador actúa interfiriendo en el controlador de hidratación, reduciendo su efecto e iniciando el proceso de hidratación del cemento, aunque lentamente; por lo mismo, la ganancia de resistencia se produce de acuerdo con lo ya explicado. Tal tipo de acelerador se utiliza casi exclusivamente en grouts bicomponentes, ya que en otras aplicaciones esa baja ganancia de resistencia casi nunca es deseable para un acelerador.

Comportamiento del grout bicomponente con aditivos químicos

Según Guglielmetti et. al. [04] “un proyecto correcto de grout de relleno para TBM debe considerar los diversos parámetros que se refieren a tres principales campos de aplicación:

1. Aspectos prácticos, relacionados con la funcionalidad del grout que será inyectado.
2. La eficacia del grout inyectado respecto al control de asentamiento y a la interacción con el macizo y la máquina de perforación.
3. Consideración económica relacionada con el material localmente disponible y probablemente más barato frente a la mezcla ideal para el desempeño requerido”.

El grout bicomponente para TBM es distinto del que en la construcción civil se llama comúnmente grout, y ambos difieren incluso en su composición. El contenido de agua es elevado en comparación con otros tipos de grout y el posible impacto negativo se compensa con la presencia de la bentonita, pues ese mineral arcilloso retiene grandes cantidades de agua y proporciona a la mezcla viscosidad y estabilidad reológica adecuadas a la aplicación. Por ese motivo casi nunca se usa el modificador de viscosidad pero, de acuerdo con la Tabla 2, es posible notar que la calidad de la bentonita influye directamente el desempeño del grout.

Una parte de la reducción del desempeño de las bentonitas en la Tabla 2 está asociada al comportamiento del mineral arcilloso con el aditivo controlador de la hidratación, y en otra el desempeño estuvo afectado por el contenido de impurezas presentes en las bentonitas. Solo la bentonita C atendió los requisitos. El controlador de hidratación tiene impacto directo sobre la capacidad del grout bicomponente de mantener su fluidez y estabilidad por 72 horas. En caso que un controlador sea incompatible con determinada mezcla, de inmediato hay que buscar otra solución, ya sea cambiar el aditivo o los componentes del grout como cemento y bentonita, pues normalmente resulta más fácil y conveniente alterar el aditivo controlador de hidratación. El exceso de controlador de hidratación puede desestabilizar la mezcla y provocar exudación y pérdida de eficiencia del acelerador, ampliando el tiempo de formación de gel a niveles no aceptables en el proceso.

El acelerador puede formar cristales en su composición debido a un cambio brusco en la temperatura, o por contaminación. Esos cristales se depositan en el fondo del reservorio y la solución pierde concentración, creando la necesidad de emplear más producto para un mismo tiempo de formación de gel. Se presentará un problema mayor en caso que la formación de cristales se produzca en las tuberías que llevan el acelerador hasta el lugar de inyección, provocando taponamiento de las tuberías y conexiones del sistema. Según Pelizza et. al. [06] “No existe una prueba adecuada para prever su comportamiento futuro, pero el grout debe tener dos características que indican su durabilidad:

	BENTONITA A	BENTONITA B	BENTONITA C	BENTONITA D	BENTONITA E
Exudación (24 horas)	5,3%	0,9%	0,5%	8,0%	4,5%
Exudación (48 horas)	6,5%	2,0%	0,6%	8,5%	4,6%
Exudación (72 horas)	6,7%	2,5%	0,8%	8,8%	4,6%

↑ Tabla 2. Exudación de grouts bicomponentes con diferentes bentonitas, conforme EN BS EN 480-4:2005 [02].

- *La indeformabilidad: este parámetro se presenta de inmediato como el más significativo, ya que el gel está compuesto principalmente por agua. Si el agua no se pierde (por evaporación o filtración), el material permanecerá estable para siempre. Por eso es esencial que el suelo mantenga su humedad natural.*
- *La impermeabilidad técnica del suelo (10-8 m/s) es el parámetro físico que favorece la creación de la situación arriba descrita.*

Ambas características mencionadas se pueden medir en laboratorio y se pueden asumir como indicadores de durabilidad”.

Consideraciones finales

Teniendo en cuenta lo expuesto, es posible identificar la importancia de los aditivos químicos en el grout bicomponente, que es un material fundamental en el avance de las tuneladoras del tipo TBM.

Además de contribuir para que el grout se desempeñe con propiedades especiales, los aditivos químicos funcionan como una herramienta de corrección en situaciones de pequeñas desviaciones en el desempeño del grout debido a variaciones ambientales o de materiales. Es de fundamental importancia la divulgación de los estudios realizados para la viabilidad de los grouts bicomponentes usados en obras de túneles, debido a las particularidades de cada sistema, así como la contribución a las investigaciones y desarrollos de nuevos materiales, incluyendo tecnología de aditivos, que permitan cada vez más superar los obstáculos con soluciones técnicas en uso de los grouts bicomponentes.

Referencias

- [01] AFTES, (French National Tunneling Association), Choosing mechanized tunneling techniques (2005) Paris.
- [02] BS EN 480-4:2005. Admixtures for concrete, mortar and grout — Test methods - Part 4: Determination of bleeding of concrete, BSI.
- [03] EFENARC (2005). Specification and guidelines for the use of specialists products for mechanized tunneling (TBM) in soft ground and hard rock, www.efnarc.org.
- [04] Guglielmetti, V., Mahtab A. and Xu, S. (2007). Mechanized tunneling in urban area, Taylor & Francis, London.
- [05] Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Hooton, R. D. and McGrath, R. J. (2011). Design and control of concrete mixtures, Eighth Canadian Edition, Cement Association of Canada, Ottawa.
- [06] Pelizza, S., Peila, D., Borio, L., Dal Negro, E., Schulkins R. and Boscaro, A. (2010). Analysis of the Performance of Two Component Back-filling Grout in Tunnel Boring Machines Operating under Face Pressure, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2010: “Tunnel vision towards 2020”, Vancouver, 14-20 May 2010.
- [07] Peila, D., Borio, L., Pelizza, S. (2011). The behavior of a two-component backfilling grout used in a Tunnel-Boring Machine. In: Acta Geotechnica Slovenica n. 1, pp. 5-15.
- [08] Talom, A. M., and Bezuijen, A. (2006). Grout pressures around a tunnel lining, In: Tunnelling. A Decade of Progress - GeoDelft 1995–2005, Netherlands, pp. 77-82.
- [09] Thewes, M., and Budach, C. (2009). Grouting of the annular gap in shield tunneling – An important factor for minimisation of settlements and production performance, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2009 “Safe Tunnelling for the City and Environment”, Budapest, 23-28 May 2009.

RINOL



RINOL PISOCRETO S.A.S

Número 1 en Sistemas para la ejecución de pavimentos industriales



RCR Silifibre

RCR Silifibre

El sistema **RCR SILIFIBRE** ofrece un pavimento industrial de hormigón armado con fibras de acero. Pavimento industrial de gran rendimiento, con instalación de una superficie de rodadura de gran resistencia y juntas constructivas especiales. Diseñado en losas de gran superficie (técnica “**gran panel**”) utilizando métodos mecanizados de nivelación, vibrado y aplicación de capa de rodadura.



RCR Conductil VRS

RCR Conductil VRS

El sistema **RCR CONDUCTIL VRS** (Volumetric Retraction Stability) ofrece un pavimento que exige un mismo mantenimiento, debido a la ausencia total de juntas de retracción y a una gran impermeabilidad superficial.

Diseñado para losas y pasillos estrechos, permite relaciones desiguales largo - ancho, acomodando las losas a la geometría del proyecto. Al igual que con los métodos mecanizados más avanzados de nivelación. Este sistema, además, dota al pavimento de una menor porosidad lo que lo convierte en muy adecuado para zonas donde puedan producirse vertidos o manchas.



Rinol Pisocreto S.A.S.

Calle 168 No. 21 - 20

Bogotá D.C., Colombia

Teléfonos (57)(1) 878 9848/52/51/53

pisocretosa@rinolpisocreto.com.co

www.rinolpisocreto.com.co

www.rcrindustrialflooring.es

www.rocland.es