
“Comité Técnico Asesor, CTA”

NOTA TÉCNICA No. 6

Comentarios técnicos referentes al soporte de vía del tramo subterráneo de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Elaborada para:
Secretaría de Obras y Servicios

CDMX
Enero 21, 2022

En esta Nota Técnica se presentan los comentarios, a su fecha de elaboración, del Comité Técnico Asesor, CTA, referentes al soporte de vía del tramo subterráneo de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro, STC Metro.

Antecedentes

Debido a las distintas problemáticas existentes en los materiales que conforman el soporte de vía, las cuales se hacen evidentes al observar el alto nivel de mantenimiento demandado en el tramo subterráneo de la Línea 12 del STC Metro, el CTA emitió el 27 de agosto de 2021 las siguientes recomendaciones:

- Medir periódicamente asentamientos en superficie y deformaciones del túnel, así como niveles piezométricos en los puntos aledaños al túnel con la intención de controlar los niveles de extracción de agua y, poder así, prevenir situaciones de riesgo.
- Atender las filtraciones mediante impermeabilizaciones, captación y conducción de agua, e inyecciones en las uniones de las dovelas.
- Desazolver los cárcamos y restituir los sistemas automatizados correspondientes con equipos de capacidad adecuada.
- Establecer un sistema de bombeo eficiente en zonas anegadas.
- Obtener muestras de balasto para efectuar los ensayos de laboratorio correspondientes y verificar su estado. Dependiendo de los resultados de los ensayos se determinaría la necesidad de cambiarlo.
- Revisar el material granular tipo base durante la ejecución de las calas en el balasto para verificar su grado de compactación, resistencia e integridad. Se recomendó verificar también que se cumplan las especificaciones de diseño para la compactación y que se tuviera una resistencia mínima de proyecto de 2 kg/cm^2 determinada mediante pruebas de placa. De no cumplir lo anterior, se recomendó la sustitución por un material menos susceptible al agua y a las acumulaciones de deformaciones plásticas ante cargas cíclicas, tal como un concreto fluido o ciclópeo con resistencia a la compresión de 20 kg/cm^2 , en aquellas zonas donde se requiera.

- Revisar las instalaciones y sus sujeciones, por corrosión y en caso de ser necesario reemplazarlas.
- El CTA también recomendó cumplir con los procedimientos de mantenimiento para garantizar un comportamiento adecuado a corto, mediano y largo plazo.
- Para la reapertura de la línea, se recomendó la renivelación y realineación de la vía.

En seguimiento a estos comentarios la empresa Ingenieros Civiles Asociados, ICA, generó una serie de documentos técnicos, los cuales incluyen: 1) Pruebas de placa en material grava-arena tipo base, 2) Pruebas de desgaste de los Ángeles, DLA, en el material de balasto, 3) Granulometrías en el material de balasto, 4) Análisis del soporte de vía mediante un modelo numérico, y 5) Documento diagnóstico de AECOM referente al estado del túnel y sistema de soporte de vía en el tramo subterráneo. La finalidad de los cinco apartados mencionados anteriormente es identificar el origen de la problemática. A partir de la revisión de estos estudios el CTA emitió los siguientes comentarios:

1) Pruebas de placa realizadas por ICA en el material grava-arena tipo base

Las Figuras 1 y 2 presentan el resumen de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas a partir de pruebas de placa realizadas por LIEC y LANCO, y presentadas por ICA. Como se puede observar las curvas exhiben una deformación plástica después del primer ciclo de carga-descarga, lo cual pone de manifiesto la no-linealidad esperada en estos materiales granulares, inclusive para los esfuerzos de trabajo de diseño, por lo que no pueden ser caracterizados mediante un modelo elástico lineal, como el utilizado en su modelo numérico de soporte de vía, que se describe en el informe “reporte geotécnico del estudio del comportamiento esfuerzo-deformación en los estratos de balasto y relleno grava-arena por el peso del tren en condición estática y dinámica” desarrollado por ICA. La Tabla 1 presenta la deformación plástica obtenida para estos materiales, asociada a una carga de trabajo de 5 kg/cm². **Considerando que las deformaciones se obtuvieron con un sólo ciclo de carga y descarga, se recomendó, realizar pruebas que consideren un mayor número de ciclos (al menos 50 ciclos para una carga de 2 kg/cm², y al menos 30 ciclos para una carga de 5 kg/cm²), con el fin de caracterizar adecuadamente el potencial de generación de deformaciones plásticas asociadas**

a la ocurrencia de una carga repetida. Sin embargo, a la fecha de elaboración de este informe, no se llevaron a cabo estas pruebas.

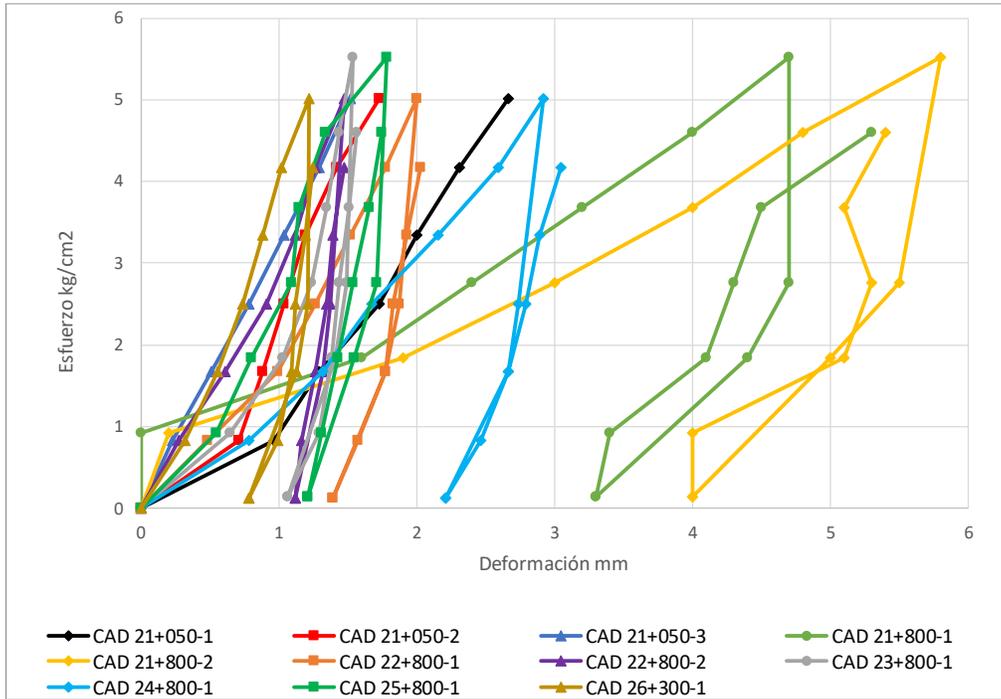


Figura 1. Curvas esfuerzo deformación obtenidas por la empresa LIEC (pruebas de placa)

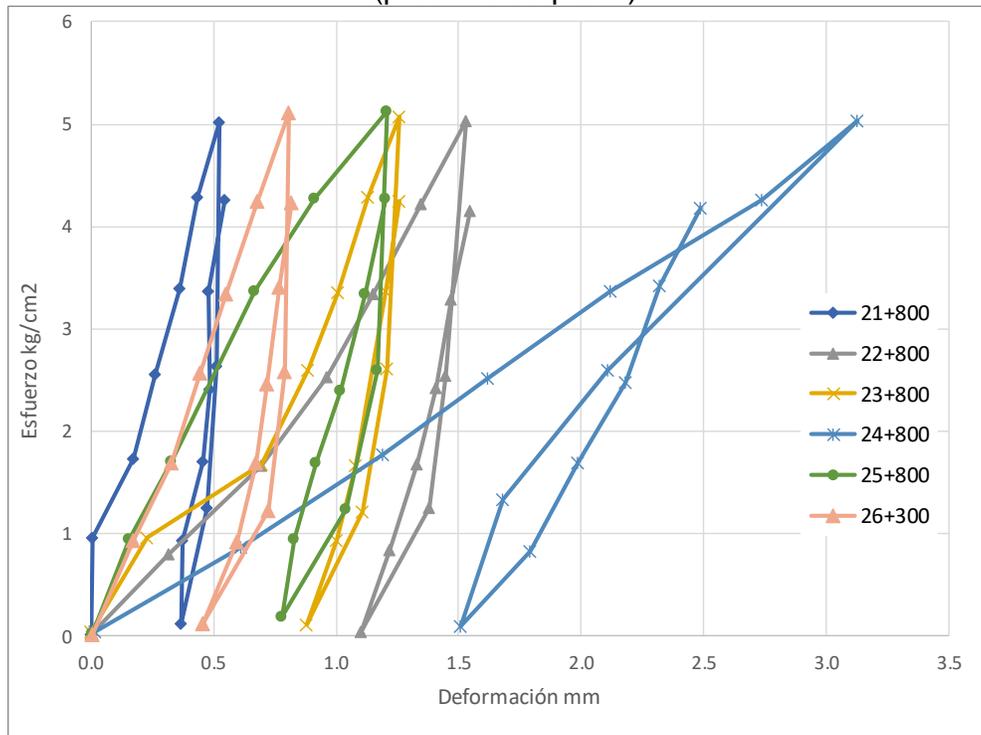


Figura 2. Curvas esfuerzo deformación obtenidas por la empresa LANCO (pruebas de placa)

Tabla 1. Deformación plástica durante el primer ciclo de carga-descarga

Laboratorio	Muestra	Deformación plástica medida para una carga de 5kg/cm ² (mm)	Deformación plástica estimada para una carga de 2kg/cm ² (mm)
LANCO	21+800	0.4	0.1
	22+800	1.1	0.6
	23+800	0.9	0.6
	24+800	1.5	0.6
	25+800	0.8	0.2
	26+300	0.5	0.2
LIEC	21+800-1	3.3	1.2
	21+800-2	4.0	1.4
	22+800-1	1.4	0.9
	22+800-2	1.1	0.5
	23+800-1	1.1	0.9
	24+800-2	2.2	1.2
	25+800-1	1.2	0.7
	26+300-1	0.8	0.5

Con base en las pruebas de placa realizadas, se puede concluir que existe un alto potencial de generación de deformaciones plásticas durante carga cíclica, lo que debe tomarse en cuenta en la acumulación de asentamientos del soporte de vía a largo plazo, para los esfuerzos de trabajo, y por ende en el mantenimiento requerido.

2) Pruebas de desgaste de los Ángeles, DLA, realizadas por ICA en el material de balasto

De las 64 pruebas de desgaste, DLA, ejecutadas en el balasto por la empresa ICA, 54 exhiben valores mayores a 12, cota superior recomendada por Instituto Mexicano del Transporte, IMT, y STC Metro. Este valor límite es coincidente con lo establecido en la normatividad de la Unión Europea UNE-EN 13450. Lo cual indica que el material es susceptible a un desgaste arriba del promedio durante su vida útil.

3) Pruebas de granulometría realizadas por ICA en el material de balasto

Con la finalidad de determinar la distribución de los tamaños de partícula del balasto encontrado in-situ, se llevaron a cabo pruebas de granulometría. La Figura 3 presenta las curvas granulométricas obtenidas por LIEC y LANCO para diferentes cadenamientos, así como su curva promedio y sus envolventes. Como podemos ver en la Figura 4 estas

curvas granulométricas difieren de los límites establecidos durante la etapa de diseño, los cuales pueden consultarse en el documento “PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00”. Así mismo, las envolventes quedan por fuera de los límites establecidos por diferentes normativas internacionales, (i.e. UNE (Unión Europea); ETA-04-01 (Australia), Tipo C4 (AREMA)).

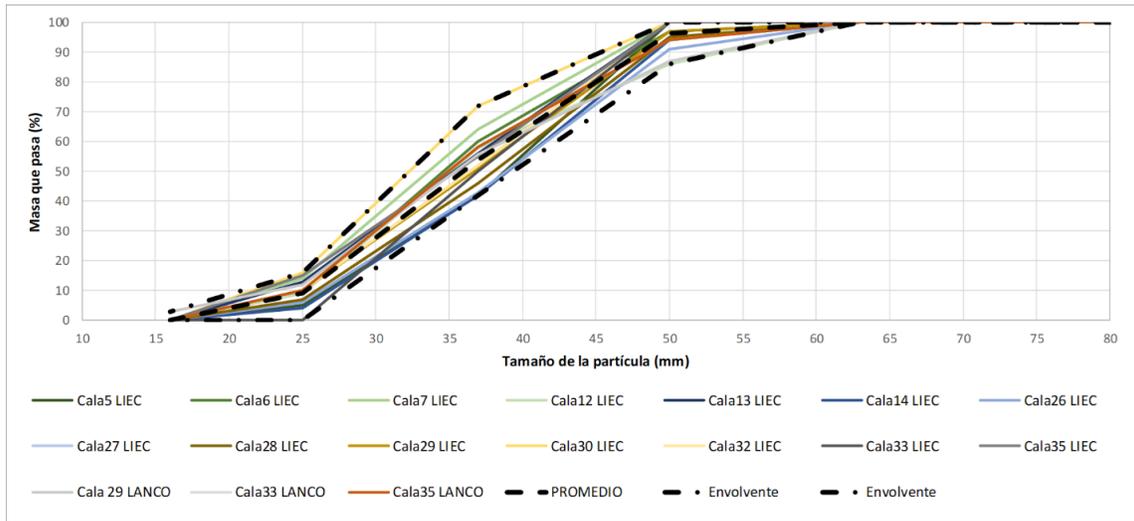


Figura 3. Curvas Granulométricas

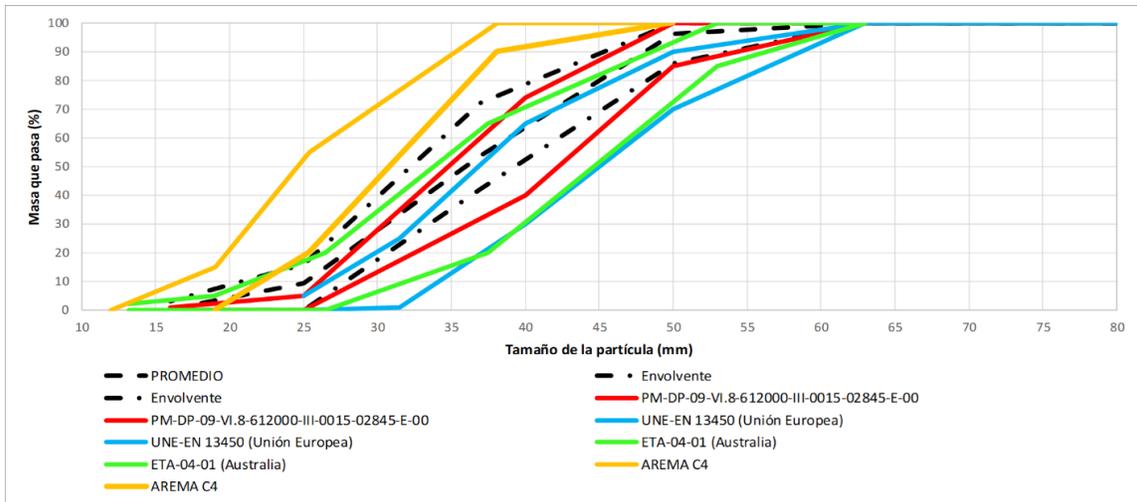


Figura 4. Comparación de curvas granulométricas, con los estándares internacionales que norman este parámetro

Como pudo observarse en la Figura 4, la distribución granulométrica del balasto colocado in-situ, no cumple con el estándar internacional AREMA. Por lo que su desempeño y vida útil pueden verse limitados, generando potencialmente problemas de nivelación del sistema de vías. Es evidente que el material de balasto ha sufrido una cierta degradación en el tiempo en lo que se refiere a su granulometría, debido a la rotura de partículas.

4) Análisis del soporte de vía realizado por ICA mediante un modelo numérico

En este apartado se presentan las observaciones técnicas sobre el documento “*reporte geotécnico del estudio del comportamiento esfuerzo-deformación en los estratos de balasto y relleno grava-arena por el peso del tren en condición estática y dinámica*”, presentado por ICA.

- El modelo constitutivo considerado para simular el comportamiento de los materiales de la subbase de grava-arena fue elástico lineal, con el cual no se podrán capturar las deformaciones plásticas acumuladas asociadas a la carga cíclica generada por el paso de los trenes durante la vida útil del proyecto. Es recomendable considerar un modelo no-lineal.
- Referente al punto anterior ICA ha informado que las consideraciones implementadas en el modelado cumplen satisfactoriamente con su objetivo (conocer la distribución de esfuerzos y deformaciones elásticas del balasto y relleno grava-arena asociadas al peso del tren); según ICA:

... “la recomendación del CTA de considerar un modelo avanzado, para estimar las deformaciones plásticas carece de sentido, porque el mantenimiento del sistema de vías reinicia las condiciones, por tanto, los materiales trabajan constantemente en un estado elástico”...

Para lo cual el CTA reiteró que el problema de la caracterización de las deformaciones plásticas esperadas durante la carga cíclica asociada al paso del tren es la variable principal para reducir los costos de mantenimiento asociados a la degradación acumulada de la estructura de soporte de la vía durante la vida útil del proyecto.

- Al afirmar que las deformaciones calculadas mediante el modelo elástico lineal no se acumulan durante la carga cíclica se pone en evidencia la primera desventaja del modelo constitutivo empleado.
- El módulo de elasticidad utilizado por ICA para caracterizar la rigidez de los durmientes fue obtenido mediante la ecuación ($4400\sqrt{f'c}$, en MPa), la cual no aplica para elementos preesforzados como lo son los durmientes.

- *Al respecto del punto anterior ICA confirmó que la ecuación empleada no es válida para el tipo de elemento, sin embargo, indicó que para el objetivo de su estudio, un elemento rígido que distribuye una sobrecarga, la ecuación puede aplicarse según el criterio de su equipo técnico.* Al respecto el CTA comenta que el estado de esfuerzos y deformaciones finales del sistema riel-durmiente-suelo es función de las rigideces particulares de cada elemento del sistema, por lo que la correcta caracterización de estos parámetros de acuerdo con las condiciones encontradas in-situ es crucial en el análisis de esfuerzos bajo el sistema de soporte de vía.
- El valor del módulo de elasticidad para el material grava-arena tipo base fue tomado de la literatura técnica (i.e. 70 MPa), y no es coincidente con lo reportado mediante las pruebas de placa realizadas (i.e. entre 20 y 60 MPa).
- Existen dudas en las cargas utilizadas, según las especificaciones cada bogie tiene dos ejes, y la descarga por eje es de 15 ton. Sin embargo, el análisis considera una descarga de 7.5 ton por eje. Además, no se consideran los factores de impacto relacionados con el comportamiento dinámico del tren. Con base en lo anterior se infiere que con las cargas consideradas se estimarán esfuerzos y sollicitaciones menores a las reales.
- En el documento se afirma que el bulbo de esfuerzos solo afecta al estrato del balasto, lo cual es incorrecto y no es coincidente con lo reportado en el propio documento de ICA.

5) Documento diagnóstico de AECOM referente al estado del túnel y sistema de soporte de vía en el tramo subterráneo

El 8 de enero de 2022 el CTA recibió los comentarios realizados por AECOM a los estudios de ICA. El documento es preponderantemente recopilatorio de los trabajos llevados a cabo por ICA, ya revisados y comentados por el CTA. Después de su revisión, el CTA emite los siguientes comentarios:

- En todo momento se deja claro que el documento en cuestión no es un dictamen, ni tampoco constituye una validación sobre los métodos de construcción realizados por ICA.
- Algunas observaciones se basan en la normatividad establecida en los denominados “libros naranja”, los cuales no aplican a sistemas de rodamiento

férreo como el que se tiene en este proyecto. Además de ser una referencia obsoleta para sustentar una opinión técnica.

- AECOM considera una separación entre durmientes de 53 cm, cuando en realidad esta es de 60 cm, referida a eje de durmientes.
- Al determinar los espesores de los materiales que conforman el soporte de vía, AECOM indica que sus cálculos difieren en 10 cm en comparación con los valores determinados por ICA.
- AECOM indica que no se le entregó información precisa sobre el diámetro de rueda y separación entre durmientes, con lo cual su opinión podría modificarse.

El informe de AECOM destaca lo siguiente:

- 1) ... *“Esta supervisión puede avalar los resultados aportados en la primera estimación según AREMA, pero ha de recordarse que, a la fecha de redacción del proyecto, el manual de AREMA vigente era el de 2008 y, conforme al mismo, **el espesor total demandado para las capas de balasto y sub-balasto sería 10 cm superior al diseño**”.*
- 2) *“Respecto al material especificado para esta capa de base o sub-balasto. AECOM considera que el éxito de una solución de estas características, que resulta técnicamente válida, está muy condicionado por las condiciones de puesta en obra; lográndose la adecuada compactación, y también de manera relevante por las condiciones de mantenimiento, que permitan administrar posibles filtraciones de agua que pudieran alterar estas capas de material de plataforma de vía. Si esto se garantiza, las soluciones de este tipo resultan viables”...*

Tomando en cuenta lo anterior, es evidente que el informe de AECOM ratifica el incumplimiento cabal del espesor de diseño, así como la gran dependencia de las características de puesta en obra del material granular, y de la presencia de agua asociada a las filtraciones que pudieran afectar estas capas de material.

Revisión de la opción de inyecciones propuesto por PICSA

Para fines de prevenir futuras contingencias, el CTA recomendó considerar la sustitución del material tipo base por un material menos susceptible al agua como un concreto ciclópeo o fluido de resistencia especificada a la compresión de 20 kg/cm², en aquellas zonas donde se requiera. Buscando la optimización de los tiempos de construcción y la minimización de costos, la empresa diseñadora “PICSA” ha propuesto un procedimiento alternativo a base de inyecciones, con la finalidad de mejorar el material tipo base. Inicialmente PICSA llevó a cabo un estudio sobre el módulo de reacción de la estructura de vía, aplicando cargas sobre el sistema riel-durmiente-balasto con un convoy cargado y midiendo las deformaciones elásticas máximas, con lo cual se estimó el módulo de vía en diversos puntos del tramo subterráneo. Lo que, a su vez, permitió la identificación de manera indirecta de zonas de debilidad potencial, susceptibles a acumular deformaciones plásticas. Aunque esta metodología presenta áreas de oportunidad importantes, tales como que no se indica el valor de la carga máxima considerada, y que la normatividad en la que se basa fue originalmente planteada para pavimentos, por lo que es importante que se justifique su aplicabilidad para vías férreas urbanas, los resultados finales fueron coincidentes con las áreas identificadas como problemáticas debido al mantenimiento excesivo que demandan, y con las zonas sujetas a mayor desgaste durante la operación del tren, (tramos en curva y áreas con problemas de inundación), por lo que el CTA las consideró como las mínimas necesarias a intervenir.

Al respecto de la especificación de inyecciones el CTA indica que esta opción es viable, siempre y cuando se ejecute aplicando estrictos controles de calidad, que garanticen una intervención homogénea de la vía. Debe considerarse la dificultad constructiva de su implementación en la época de lluvias, y el impacto de esta situación en los tiempos de fraguado. Los comentarios del CTA referentes a la especificación PICSA, en relación a esta propuesta de inyecciones se enlistan a continuación.

1. Falta especificar el procedimiento en caso de que al inicio de la inyección las perforaciones presenten rechazo de la mezcla, bajo la presión máxima indicada.
2. No se han indicado los parámetros que justifiquen las presiones de inyección.

3. Definir tiempos de fraguado esperados y/o dosificación durante la posible utilización de acelerantes. El ciclo de obra demandará la necesidad de poder transitar lo antes posible sobre la zona mejorada, por lo que es imperativo definir este periodo de tiempo.
4. Para las zonas en las cuales se detectaron tirantes de agua en el material tipo base deben plantearse procedimientos específicos, en caso de que continúen presentando el mismo problema.
5. No se presentan lineamientos sobre el control de calidad.
6. En caso de que no sea posible introducir el tubo ciego por los registros existentes, debe presentarse alguna alternativa para cumplir con este objetivo, tales como agrandar los registros y contar con gatos de empuje, lo anterior en conjunto con las actividades necesarias que deben realizarse para restituir los trabajos de abocinamiento.
7. Incluir una nota en los planos que indique que la distancia entre puntos de inyección podrá modificarse con base en los resultados que se observen en campo, con la finalidad de tener un mejoramiento homogéneo.
8. El CTA está en espera de las pruebas de laboratorio ante carga sostenida y cíclica que sustenten las dosificaciones de proyecto.
9. Se solicitan planos de detalle de drenaje.
10. La especificación entregada al CTA se presenta en forma de borrador con algunos errores de redacción y ortografía. Falta sustentar las recomendaciones con la normatividad aplicable.
11. Debe establecerse la resistencia esperada después del fraguado inicial alcanzado a las 24 horas.

El CTA queda a la espera de recibir la información faltante relacionada con el procedimiento de inyección propuesto por PICSA, para realizar la evaluación final de esta alternativa.