

COLAPSO ESTRUCTURAL DEL “TÚNEL FALSO” EN LA CARRETERA TARIJA – BERMEJO ANÁLISIS TÉCNICO – CIENTÍFICO DE LAS CAUSAS

Alberto BENÍTEZ REYNOSO
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.
Tarija, Bolivia

Breve referencia de la trayectoria profesional

- Ingeniero Civil, Especialista en Teoría y Aplicación Práctica del Método de los Elementos Finitos y Simulación, Magíster en Ingeniería Vial y Doctor (Ph.D.) en Ingeniería.
- Más de 20 años de experiencia como docente universitario (grado y posgrado) y como consultor privado.
- Decano de la Facultad de Ciencias y Tecnología (1992-1994) y Vicerrector (1994-1997) de la Universidad Autónoma J.M. Saracho de Tarija (Bolivia).

RESÚMEN

Al comenzar la segunda semana de enero del 2007, se produce el colapso estructural prematuro del “túnel falso”, estructura de hormigón armado, construida en la carretera Tarija – Bermejo (Bolivia).

El **problema** se plantea mediante la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las causas del colapso estructural prematuro del “túnel falso” en la carretera Tarija – Bermejo?

El **objetivo** es: “determinar las causas que han provocado el colapso estructural prematuro del túnel falso en la carretera Tarija – Bermejo, que orienten la toma de decisiones más apropiadas, basadas en el conocimiento científico y tecnológico”.

La **estrategia metodológica** ha considerado una etapa racional (análisis y síntesis) y otra empírica (in-situ), la misma que ha conducido a la obtención de los **resultados**, que básicamente son los siguientes:

- Análisis de los documentos del proyecto y de la literatura técnica y científica.
- Caracterización de las condiciones en el entorno del emplazamiento de la estructura.
- Inspección técnica detallada de la estructura, antes y después del colapso.
- Establecimiento de las causas del colapso.

Dentro de las **conclusiones** de la investigación, la más importante es:

La causa fundamental del colapso estructural prematuro del “túnel falso” está directamente asociada a concepciones no apropiadas usadas en la determinación de las cargas de diseño.

STRUCTURAL COLLAPSE OF “FALSE TUNNEL” AT TARIJA – BERMEJO HIGHWAY TECHNICAL - SCIENTIFIC ANALYSIS OF CAUSES

ABSTRACT

At the beginning of January second week, 2007, the premature structural collapse of “false tunnel” has occurred, which is a concrete reinforced structure constructed at the Tarija – Bermejo (Bolivia) highway.

*So, the **problem** is: What are the causes for the mentioned premature collapse?.*

*Therefore, the main **objective** of this paper is: to determine the reasons that caused the premature structural collapse of “false tunnel” at the Tarija – Bermejo highway, with scientific and technological basis.*

*The **methodology** has considered two stages, one is the rational stage and the other one is the empirical (in-situ) stage. With this methodology, the following **results** were obtained:*

- Analysis of documents of the project and scientific and technical and scientific literature.*
- Characterization of the environment of the place on which the structure was constructed.*
- Empirical work, which is a detailed in-situ analysis of the structure both before and after the collapse.*
- Definition of causes for the premature collapse.*

*As one of the main **conclusions** of the research, we have:*

The fundamental cause that produced the premature structural collapse of false tunnel is directly associated with a wrong conception in the load design determination.

INTRODUCCIÓN

El día miércoles 03 de enero del año 2007, un periódico de la prensa regional (El País) anuncia en uno de sus titulares “CARRETERA TARIJA – BERMEJO SE CAE A PEDAZOS”. En uno de los párrafos de esta noticia se afirma: “El túnel falso inaugurado en el tramo carretero “La Mamora – Emborozú”, que fue la última obra encarada por la brasileña Queiroz – Galvao, está a punto de colapsar porque lodo y piedras ingresan hacia la plataforma, constituyéndose en permanente riesgo”.

Por otra parte, un Diputado Nacional insistentemente ha estado haciendo declaraciones y expresando su preocupación sobre el deterioro prematuro de la carretera, atribuyendo la responsabilidad al Servicio Nacional de Caminos, ahora Administración Boliviana de Carreteras. Éstas, indudablemente han sido advertencias serias y probablemente fundamentadas desde el punto de vista técnico, a las cuales, aparentemente, quienes tienen la responsabilidad directa sobre el particular, no les dieron la importancia que el caso requiere.

Al comenzar la segunda semana del mes de enero de 2007, la población tarijeña se ha visto ingratamente sorprendida con la noticia del colapso de una gran parte del llamado “túnel falso”, estructura de hormigón armado construida en la carretera Tarija – Bermejo, concretamente en el tramo Padcaya – Bermejo, en el sector denominado “Alarachi”. Las fotografías No. 1., 2. y 3., presentadas al final, dan una idea de la estructura concluida y las situaciones antes y después del colapso.

Nos referimos a una sorpresa porque, ni profanos ni entendidos en el tema, esperábamos la ocurrencia del evento citado.

Indudablemente, el hecho ha provocado las más diversas reacciones, aunque todas coinciden en expresar su preocupación y exigen investigar las causas que conduzcan a establecer responsabilidades, si las hubiere.

Pero también preocupa la ausencia de opiniones, criterios y debates, fundamentalmente técnico – científicos, por quienes tienen formación y experiencia sobre el particular.

Ante la situación descrita brevemente en los párrafos precedentes se plantea el **problema** a través de la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las causas que han provocado el colapso estructural prematuro del túnel falso ubicado en la carretera Tarija – Bermejo?.

En este marco, la Sociedad de Ingenieros de Bolivia – Departamental Tarija, como única institución que representa legalmente a los ingenieros del país (Ley de la República No. 1449), en cumplimiento de una de sus funciones, con este trabajo inicia el debate, con la perspectiva de que se generen otras iniciativas conducentes a esclarecer la situación.

En consecuencia, los **objetivos** que se pretenden son:

- Determinar las causas probables que han ocasionado el colapso estructural prematuro del túnel falso en la carretera No. 1 de la red fundamental de Bolivia, tramo Tarija – Bermejo.
- Iniciar un debate equilibrado, basado en el conocimiento científico y técnico, haciendo abstracción de cualquier interés político, empresarial o de grupo.
- Orientar imparcialmente la toma de decisiones por quienes están llamados por Ley a resolver el caso.

Advertimos que, ninguna institución pública, empresa privada o persona debe sentirse aludida (ni “afectada”, ni “defendida”), salvo que tenga razones fundamentadas para tal efecto. No pretendemos afectar la imagen, ni salir en

defensa de nadie. Simplemente cumplimos una obligación prevista en nuestras normas, pero, también es una respuesta a nuestra conciencia.

Para una mejor comprensión del lector, el análisis será fundamentalmente conceptual, es decir, se hará abstracción, en lo posible, de expresiones y desarrollos teóricos y matemáticos sofisticados.

ANTECEDENTES

La inestabilidad geológica – geotécnica de varios sectores en la carretera Tarija – Bermejo, concretamente en el tramo Padcaya – Bermejo, es un tema que los tarijeños conocemos desde hace muchísimos años. Las causas para la inestabilidad citada están redactadas en varios documentos técnicos relativos al proyecto y a la supervisión de la obra. Por ello, no se insistirá sobre el particular.

Pensamos que, para nuestros objetivos, es necesario recordar que en el tramo Padcaya – Bermejo, sector denominado Alarachi, comprendido entre las progresivas 52+400 y 52+600, aproximadamente, prácticamente todos los años, especialmente en la época de lluvias, se producen deslizamientos (derrumbes) de considerables masas de suelo y roca, lo que, evidentemente, provoca una serie de inconvenientes a los habitantes de la región y del país, que usamos la vía, además del riesgo inherente.

Precisamente, para resolver este problema, quienes tuvieron la responsabilidad sobre el tema, han considerado una serie de alternativas de solución, arribando a la conclusión de que el cálculo, diseño y construcción de un “túnel falso”, de hormigón armado, sería la solución más apropiada de modo que garantice el tránsito vehicular por el sector en toda época del año.

CRITERIOS DE CÁLCULO Y DISEÑO ESTRUCTURAL

En una estructura como la que nos ocupa, hay varios elementos que forman parte del proceso de cálculo, diseño estructural y construcción, de los cuales destacamos tres, a saber: los criterios para la concepción y estimación de las cargas, las propiedades mecánicas de los materiales y las características del suelo de fundación. Aunque, un análisis integral (sistémico) debe, ineludiblemente, considerar todos los elementos inherentes y su estrecha interrelación, así, son importantes también las tecnologías constructivas, el control de calidad en la ejecución, el mantenimiento, etc.

Sin embargo, en esta oportunidad, centraremos nuestra atención en los criterios que se han usado para la estimación de las cargas de diseño porque consideramos que es una etapa previa y de vital importancia para continuar con el proceso de cálculo y diseño.

De acuerdo con los documentos oficiales del proyecto se puede establecer que se han usado los siguientes criterios e hipótesis de cálculo¹:

1. Normas AASHTO.
2. El plano de falla del suelo deslizado será el talud natural de la roca existente.
3. El suelo deslizado encontrará su estabilidad con una pendiente de 38°, equivalente al ángulo de reposo del material observado.
4. El suelo deslizado tiene un peso unitario de 14 kN/m³.
5. El ángulo de fricción interna entre suelos y roca es de 30°.

6. El empuje horizontal ha sido determinado por las ecuaciones conocidas de la mecánica de suelos.
7. La carga vertical aplicada ha sido idealizada como una carga trapezoidal.
8. Se ha considerado un coeficiente de magnificación de cargas para el diseño por resistencia.

De los elementos citados y en base al análisis de la documentación consultada, tanto del proyecto como la literatura especializada sobre el tema, además del trabajo empírico o de campo realizado, hay dos factores que se han considerado, que nos llama la atención y son los siguientes:

1. La carga, que es fundamental para el dimensionado de la estructura y es ocasionada por el deslizamiento de las masas de suelo y roca, ha sido considerada como estática.
2. Se ha utilizado un criterio “determinista” para estimar el valor de la carga de diseño. Es decir, se asegura que un valor determinado de la carga de diseño ha de ocurrir, desconociendo que valores mayores pueden presentarse.

Si los criterios usados para la estimación de las cargas de diseño son: carga estática y criterio determinista, sobre estos dos aspectos tenemos puntos de vista diferentes, los mismos que pasamos a exponer y fundamentar a continuación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sobre el primero de los elementos manifestamos:

- La carga fundamental de diseño, que es una consecuencia del deslizamiento de las masas de suelo y/o roca, “no es, bajo ningún punto de vista, una carga estática”.
- Las características de este tipo de deslizamientos, con movimientos de masas de suelo y/o roca desde puntos con gran energía potencial (más de 400 m de altura), hacen que las mismas alcancen los pies de talud (contacto con el túnel) con grandes velocidades de más de 90 m/s (energía cinética), provocando un considerable impacto en la estructura construida. Esto conduce a establecer categóricamente que la carga es, sin lugar a dudas, “dinámica” y, dentro de las cargas dinámicas, un tipo muy especial que pertenece a la categoría de “cargas por impacto”, términos muy familiares para los ingenieros civiles. En consecuencia, los métodos previstos en la “dinámica estructural” son los más apropiados en estos casos.
- Pero no solo la carga de diseño es dinámica por las razones anotadas, sino también porque los propios movimientos de las masas de suelo y roca cambian permanentemente en el tiempo, tanto de ubicación (en un mismo sector) como de superficie de falla o deslizamiento.
- Pero, además, el fenómeno es dinámico porque está asociado con otros agentes naturales, también dinámicos, como la precipitación pluvial, la misma que, dependiendo de su duración e intensidad, puede provocar la saturación de las masas de suelo y roca y, de este modo, cargas aún más desfavorables.
- Finalmente, está ampliamente demostrado que las cargas dinámicas producidas por el impacto de un cuerpo en movimiento originan en la estructura o parte de ella efectos vibratorios. Si la carga dinámica se repite en forma periódica y su frecuencia coincide con el periodo de vibración del elemento estructural, éste puede entrar en resonancia y, cuando esto ocurre, se originan deformaciones tan grandes que conducen al colapso de la estructura.

Con relación al segundo elemento (criterio determinista para la estimación de la carga de diseño) pensamos:

- No es prudente estimar un solo valor, para la carga de diseño, como si fuese el único que pudiese ocurrir. Esto implica ignorar que otros valores (mayores) pudiesen presentarse y desconocer el concepto de riesgo, tan usado hoy en día en el moderno campo conocido como el “análisis de la confiabilidad estructural”.
- El concepto de riesgo, en términos simples, es definido como “la probabilidad de que la carga de cálculo o diseño sea igualada o excedida durante el tiempo de vida útil de la obra”. Si asumimos, como hipótesis, que una de las causas del colapso prematuro del túnel falso es la subestimación de la carga principal de diseño, se puede concluir que la misma (la carga de diseño) ha sido excedida mucho antes de que concluya la vida útil (o “inútil”) del túnel falso.
- En síntesis, lo que queremos decir es que, considerando la referida aleatoriedad y la variación permanente de los deslizamientos, las acciones o cargas que producen pudieron ser estimadas aplicando “criterios o modelos probabilistas”, lo cual permite estimar el riesgo asociado y, consecuentemente, el grado de protección de la estructura y el costo que significa.
- Vale la pena afirmar que, en toda estructura siempre existe un riesgo para personas y bienes. Una sola circunstancia o varias de ellas puede provocar el colapso. La experiencia de siniestros de infraestructuras en el mundo indica que los mismos pueden estar ligados a uno o varios de los fenómenos naturales, pero, también han habido muchos donde los errores humanos han sido la causa principal, errores de concepción en el cálculo, diseño, construcción, control de la calidad, mantenimiento durante el servicio de la estructura, etc. Lo fundamental, en el caso del cálculo y diseño estructural, es cuantificar la carga, el riesgo asociado y el grado de protección deseada, lo que se puede hacer usando criterios o modelos probabilistas.
- Argumentamos nuestra posición, detallada en los párrafos precedentes, considerando, además, la experiencia vivida en el campo de la ingeniería estructural en todo el planeta, la que ha conducido a modificar mentalidades, concepciones y códigos de diseño y construcción.
- El “Método del Elemento Finito Aleatorio” es un método moderno que permite el análisis de la estabilidad (o falla) de los taludes y la estimación de la probabilidad de falla como un criterio opuesto al clásico factor de seguridad. Además, la resistencia al corte, tan variable en estos casos, es definida estadísticamente².
- Hasta hace algunas décadas, el cálculo del hormigón armado se efectuaba con métodos clásicos y deterministas. Posteriormente se ha desarrollado el método de los estados límites, que se deriva de una combinación de los métodos de rotura y probabilistas³.
- La fiabilidad estructural es una de las disciplinas que más ha evolucionado en los últimos años. La comunidad científica internacional ya no pone en duda que todas las acciones y variables controladas por los proyectistas para el diseño estructural se consideran aleatorias, ya que no hay certidumbre en el conocimiento de su magnitud exacta, especialmente cuando se trata de fenómenos naturales. Es así como surge una nueva forma de pensamiento, análisis y trabajo en la que se aplican todos los conocimientos estructurales pero considerando a las variables “no como deterministas” sino como “aleatorias”, con el consiguiente tratamiento estadístico y probabilista del problema⁴.

Tal como se afirmó en la primera parte, las tecnologías constructivas, el control de la calidad en la ejecución y el mantenimiento son aspectos importantes de la ingeniería a considerar en el análisis, además de los criterios de cálculo y diseño. Sin embargo, al no haber sido partícipes de la ejecución de la obra y de su inherente control de calidad y, al haber asumido postura sobre una probable causa del colapso, preferimos, a continuación, incorporar otros elementos, como las advertencias hechas por algunos ciudadanos y medios de comunicación, el mantenimiento, el papel de la “ingeniería civil forense” y las conclusiones y recomendaciones finales.

EL COLAPSO: ¿UN DESASTRE EVITABLE?

Exactamente, a los siete días de advertida la situación, es decir, el 10 de enero de 2007 después del medio día, se produce el anunciado colapso.

A partir de ese momento todo el mundo se preocupa, autoridades nacionales del sector se hacen presentes, las regionales también expresan su punto de vista, los habitantes que usan la carretera se perjudican, intervienen las autoridades que por Ley tienen que ver sobre el tema (Contraloría, Ministerio Público, etc.), adoptando una serie de acciones, las cuales, seguramente, seguirán su curso hasta establecer claramente la causa o causas que provocaron el colapso.

Evidentemente, en los informes finales, especialmente de la supervisión, se hace referencia específica a los cuidados y acciones que deben emprenderse como “mantenimiento”. Se mencionan actividades relativas al mantenimiento general de todos los túneles del tramo Padcaya – Bermejo y se hacen recomendaciones específicas con relación al túnel falso.

Varias opiniones, probablemente las más esquemáticas, es decir, las más simplistas y menos analíticas, intentan responsabilizar del colapso a una “falta de mantenimiento”.

Si esa fuera la causa, la responsabilidad es evidente y, entonces, concluimos que el colapso pudo evitarse, pues, no olvidemos que, desde la advertencia del periódico El País y las varias declaraciones del mismo Representante Nacional (mencionado anteriormente) hasta el día del desastre, han transcurrido, al menos, siete días, tiempo relativamente suficiente para adoptar acciones que, como mínimo, desenlacen en una solución circunstancial.

A nivel regional, a pesar de no ser nuestra responsabilidad legal, también podríamos haber adoptado acciones para proteger, al menos, el 30% que invertimos.

Consecuentemente, ratificamos nuestra posición: si la causa fundamental del colapso fuese la ausencia de mantenimiento, el mismo pudo evitarse. Aunque en lugar del término “evitarse” preferimos usar “postergarse”, dados los argumentos de orden estructural que manejamos en nuestros resultados y discusión.

EL ROL DE LA “INGENIERÍA CIVIL FORENSE”

Sintetizamos, a continuación, algunos de los criterios y conceptos que pertenecen al campo de la ingeniería civil forense⁵.

La “ingeniería civil forense” trata de los colapsos estructurales, para establecer sus causas, pero, la experiencia de los fracasos es también una fuente inestimable de mejora de conocimientos, con vistas a evitar fracasos futuros.

La seguridad en el cálculo, diseño y construcción de estructuras debe estar basada en los principios de previsión (seguridad), prevención de riesgos y acciones correctivas, además de las ya conocidas leyes de la mecánica estructural.

Sin embargo, aún cuando una estructura haya sido concebida y ejecutada con métodos y principios técnico – científicos, su capacidad resistente y, por lo tanto, su seguridad, tiene un riesgo inherente de colapso, el mismo que se puede cuantificar y se relaciona con el grado de protección deseado y su costo. Este riesgo, por consideraciones probabilistas, por mínimo que sea, nunca será nulo.

El riesgo de colapso estructural puede ser reducido a proporciones despreciables, pero, siempre estará potencialmente presente, ante fenómenos extraordinarios o ante circunstancias anormales o, en fin, ante los errores humanos.

Las causas de los colapsos estructurales pueden ser agrupadas, en una primera visión, en dos categorías principales: las acciones del medio ambiente y fenómenos naturales, por una parte, y, la acción humana, por otra.

Dentro la acción medioambiental (mecánica, química, biológica, etc.) y de los fenómenos naturales (vientos, lluvias, rayos, variación térmica, etc.) merecen destacarse dos conjuntos con particularidades propias: la acción de las masas de suelo y roca (deslizamientos o derrumbes, asientos, expansión, empujes, sismos, etc.) y el grupo de causas debida al agua (crecidas e inundaciones, saturación, etc.).

En lo que se refiere a la acción humana se engloban diversas causas como errores o concepciones equivocadas en el cálculo, defectos de diseño, construcción, ausencia de mantenimiento, acción bélica, sabotajes, etc.

CONCLUSIONES FINALES

- Evidentemente, el agente que ha provocado el colapso del túnel falso, puede considerarse como natural, más aún si se toma en cuenta que la acción de las aguas de lluvia juegan un rol fundamental en la inestabilidad de las masas de suelo y roca.
- Sin embargo, considerando nuestros argumentos principales ya expuestos, con la finalidad de cuantificar el riesgo, el grado de protección de la estructura y la propia carga de diseño, ésta debió ser concebida y cuantificada con los dos criterios o modelos ya referidos: “carga dinámica” y “criterio o modelo probabilista”. Esta concepción, muy aplicada en la ingeniería estructural moderna, genera soluciones alternativas y permite elegir aquella que minimiza el riesgo de colapso de las estructuras. El mismo ingeniero calculista se protege al usarla.
- No estamos de acuerdo cuando se menciona a la “falta de mantenimiento” como probable causa del colapso. Ésta es una visión muy simplista de la realidad. Aún con un mantenimiento apropiado, en nuestra opinión, el colapso estructural igualmente se hubiese producido.
- Quienes tienen la responsabilidad de investigar las causas del colapso estructural prematuro del túnel falso, deberán considerar todas las etapas inherentes: concepción del proyecto, cálculo y diseño de la estructura, ejecución (incluyendo las tecnologías constructivas), control de la calidad y, por supuesto, el mantenimiento, además de los principios de la ingeniería forense.
- En síntesis, la causa fundamental del colapso estructural prematuro del “túnel falso” está directamente asociada a concepciones no apropiadas usadas en la determinación de las cargas de diseño.

NOTAS ADICIONALES

- Gran parte del trabajo de investigación, cuyos resultados se reflejan en este artículo, incluyendo la conclusión fundamental, ha sido realizado en los días previos y posteriores al colapso estructural del túnel falso.
- Hasta la fecha de conclusión del presente artículo (24 de junio de 2008), es decir, a más un año y cinco meses del colapso, nadie ha refutado nuestras conclusiones y tampoco se han establecido oficialmente las causas del colapso.
- Se tienen evidencias de que este artículo está siendo utilizado por las autoridades competentes como documento de prueba en las investigaciones que se están llevando a cabo para aclarar oficialmente la situación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Servicio Nacional de Caminos (Administradora Boliviana de Carreteras). **Documentos relativos al proyecto, construcción y supervisión de la obra.**
2. Vaughan Griffiths (2003). **Slope Stability Analysis and Risk by Finite Element.** USA.
3. Jiménez P., et al. (2001). **Hormigón armado.** GG, Barcelona.
4. Mínguez, R. (2003). **Seguridad, fiabilidad y análisis de sensibilidad en obras de ingeniería civil mediante técnicas de optimización por descomposición.** Santander.
5. Saíenz, F., et al. (2001). **La ingeniería forense y su relación con la seguridad y calidad estructural.** Revista Ingeniería Civil, No. 124, Madrid.



Fotografía No. 1: Túnel falso – obra concluida (2005)



Fotografía No. 2: Antes del colapso (enero, 2007)



Fotografía No. 3: Después del colapso (enero, 2007)