



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

cpc@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión
Tecnológica de Santiago de Cuba
Cuba

Pérez-Díaz, Yanosky; Nápoles-Sayous, Nuria; González-Díaz, Liliana
DISEÑO DE TÚNELES HIDRÁULICOS EN ZONAS SÍSMICAS
Ciencia en su PC, núm. 1, enero-marzo, 2017, pp. 42-55
Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba
Santiago de Cuba, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181351125004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

DISEÑO DE TÚNELES HIDRÁULICOS EN ZONAS SÍSMICAS DESIGN OF HYDRAULIC TUNNELS IN SEISMIC AREAS

Autores:

Yanosky Pérez-Díaz, yanosky@eipi.gtm.hidro.cu. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos. Guantánamo, Cuba.

Nuria Nápoles-Sayous, nuria@uo.edu.cu¹

Liliana González-Díaz, liliana@uo.edu.cu¹

¹Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

Debido al cambio climático los períodos de sequía y las inundaciones se han incrementado en todo el orbe, de ahí que los túneles hidráulicos han tomado importancia estratégica para la mitigación de estos desastres. En Cuba la gestión de los recursos hídricos se basa en la construcción de los trasvases. En el país los túneles se construyen actualmente según el método noruego de tunelado (MNT). Para el diseño se utiliza la clasificación basada en el índice Q, desarrollada por Barton y otros en 1974. Este método posee limitaciones para el diseño del revestimiento definitivo de los túneles hidráulicos en cuanto a factores de seguridad, no considera otras acciones además de las geológicas y no contempla la forma de la excavación. En este artículo se proponen estados de carga que se pueden tener en cuenta para el diseño del revestimiento de los túneles hidráulicos que se construirían en Cuba, específicamente en zonas de peligro sísmico.

Palabras clave: túneles hidráulicos, revestimiento, sequía extrema, peligro sísmico.

ABSTRACT

Due to the climatic change, the periods of drought and the floods have been increased in the entire world, for that reason the hydraulic tunnels has taken strategic importance for the mitigation of these disasters. In Cuba the water management is based on the Water Transfer construction. At the moment in the country the tunnels are built according to the Norwegian tunneling method (NTM). The design is used by the classification based on the Q index, developed by Barton and others in 1974. This method possesses limitations for the design of the definitive lining of the hydraulic tunnels as for safe factors, it doesn't consider other loads besides the geologic ones and it is not considered the form of the excavation. This work proposes loads for the design of the lining of hydraulic tunnels to build in Cuba, specifically in areas of seismic danger.

Key words: Hydraulic tunnels, lining, extreme drought, seismic danger.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, la contaminación del medioambiente, el crecimiento de las ciudades y el desarrollo sostenible de las mismas son problemas actuales y futuros. El desarrollo urbano y la deforestación están modificando de forma dramática la respuesta hidrológica natural, ya que rompen el ciclo de lluvia y filtración de la tierra. Las principales consecuencia de estas modificaciones son las inundaciones y las sequías extremas, que se ven agravadas por el cambio climático.

El crecimiento de las zonas urbanas en los últimos años sobrepasa cualquier previsión, diseño o planeamiento de servicios urbanos. En los países en desarrollo la proporción de personas que viven en ciudades casi se ha duplicado desde 1960 (desde menos del 22 % hasta más del 40 %), mientras que en las regiones más desarrolladas la proporción ha aumentado desde el 61 % hasta el 76 %.

Las inundaciones por fuertes lluvias son cada vez más comunes en las ciudades, debido al crecimiento de las áreas impermeables, la transformación lluvia-escorrentía, que es alterada en los procesos de urbanización, y las obsoletas infraestructuras de drenaje existentes en las ciudades. Estas inundaciones provocan la pérdida de bienes.

En el otro extremo, los períodos de largas sequías producen desabastecimiento de agua y daños sustanciales a las economías, sobre todo en las ramas de la agricultura. El crecimiento urbanístico y la demanda de la agricultura cada día requieren más agua para sostener su desarrollo.

Debido a su situación geográfica, topografía e insularidad, Cuba es particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático. La escasez de agua es uno de los factores más importantes que afectan y limitan el acceso de la población a un agua segura y a un suministro continuo, por lo que están en riesgo no solo las necesidades humanas básicas y las actividades económicas, sino también el sector de producción de alimentos (agroindustria y agricultura). Además, las reducidas precipitaciones y la limitada capacidad de almacenamiento de agua hacen que los recursos de agua se encuentren

susceptibles a la intrusión salina, un problema creciente debido a la sobreexplotación de las fuentes de agua subterránea. Para mitigar este problema es necesario implementar tecnologías y prácticas innovadoras en el manejo del agua (López, *et al*, 2013).

Cuba ejecuta dos proyectos destinados al perfeccionamiento del sistema hidráulico del país, los cuales incluyen la construcción de cuatro trasvases y la rehabilitación de las redes de 11 ciudades.

A lo largo de la historia los hombres han construido túneles, al principio como medio de acceso a minerales subterráneos y luego como vías de comunicación en función de sus crecientes necesidades, esta actividad se entiende como el primer ejercicio de ingeniería llevado a cabo (ETSECCPB. - UPC). Las metodologías para el diseño y edificación de túneles han variado con el desarrollo de las tecnologías, a partir de estudios y observaciones y la creación e implementación de un conjunto de técnicas para la ejecución eficiente de estas obras.

Los túneles hidráulicos, como su nombre lo indica, son los destinados a conducir agua. Esta función en específico les confiere su singularidad. Existe una gran variedad en cuanto a su uso. Las condiciones de trabajo pueden ser a presión o por conducción libre. Esto es una peculiaridad que condiciona el diseño, así como la necesidad de evitar que el agua entre o salga del túnel, lo cual obliga a prestar una atención especial a la estanquidad. Por otro lado, no presentan diferencias importantes con otros túneles, exceptuando el hecho de que suelen ser más largos y generalmente de menor sección transversal que los de transporte; luego se diseñarían para garantizar su integridad, impermeabilidad y adecuada conductividad hidráulica (Dolz y Gómez, 1994).

En Cuba generalmente los túneles hidráulicos de los trasvases se proyectan en Holguín. Para el diseño de estos se han usado métodos empíricos, como el método noruego de tunelado, que se basa principalmente en el diseño mediante la Q de Barton y Grimstad (2014); además, se utiliza el método de Bieniawski (1979) a modo de comprobación. Ambos métodos están basados en la caracterización de la roca del macizo. En la literatura existe una gran

dispersión en cuanto al cálculo de los revestimientos y los estados de cargas a tener en cuenta en el proceso. De ahí que el diseño de los revestimientos quede a criterio de los especialistas.

Las limitaciones de los métodos empíricos no son consideradas en los diseños estructurales de los revestimientos de túneles, entre estas se pueden citar:

- 1- No permiten cuantificar los coeficientes de seguridad de los elementos del sostenimiento, lo cual no permite evaluar cuán óptimos son los diseños.
- 2- No permiten considerar el efecto de la forma geométrica de la sección del túnel, lo cual conlleva a mayor espesor de los elementos estructurales y por consiguiente aumenta la sección a excavar.
- 3- No tienen en cuenta los efectos de sitio, que implica la magnitud de los efectos sísmicos.
- 4- No se analizan otras acciones tensionales, aparte de las geológicas, que puedan actuar sobre el túnel, como la presión del agua en el interior del túnel y las cargas sísmicas.
- 5- Las consideraciones de realizar o no los cálculos estructurales de los revestimientos y la forma de hacerlo quedan a criterio del proyectista.

Otro aspecto es la no existencia de normativas que regulen el proceso de diseño, lo cual provoca que los proyectistas realicen, por lo general, proyectos muy conservadores, basados principalmente en su experiencia y con criterios propios; como medida de seguridad utilizan la comparación con otros proyectos ejecutados.

En general, se muestra un panorama marcado por la ausencia de normativas para el diseño de los revestimientos en túneles hidráulicos y el poco consenso entre los profesionales sobre el diseño estructural del revestimiento de túneles.

MÉTODOS Y DISEÑO DE REVESTIMIENTO EN TÚNELES

En las condiciones cubanas la construcción de los túneles hidráulicos se realiza mediante perforación y voladura. El sostenimiento inicial se diseña mediante el método noruego de tunelado, basado en la clasificación de Barton y Grimstad. El revestimiento se asume como el brindado por este método.

Clasificación según el índice Q de Barton y Grimstad (2014)

La clasificación cuantitativa basada en el índice Q establece una clasificación que se obtiene a partir de la expresión (1), la cual considera 6 parámetros procedentes de la observación del macizo rocoso:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

donde Q es el índice de clasificación del macizo, RQD es el índice de fracturación, J_n es el índice de diaclasado, J_r es el índice de rugosidad, J_a es el índice de alteración, J_w es el coeficiente reductor por la presencia de agua y SFR el factor de reducción por esfuerzos (Stress Reduction Factor).

Este método establece un factor de seguridad para la longitud de avance sin sostener, el cual se calcula según la expresión (2):

$$F_s = \frac{LTE}{L} \quad (2)$$

donde L es la luz real después de resanar y LTE es la luz teóricamente activa, se calcula por la expresión (3):

$$LTE = 2CTE Q^{0.4} \quad (3)$$

donde CTE es la categoría del tramo a excavar.

Este factor de seguridad es para determinar la longitud de túnel que se puede excavar sin realizar el sostenimiento inicial.

Para definir y seleccionar el tipo de sostenimiento que se va a utilizar, Barton y Grimstad (2014) proponen emplear el Método Noruego de Excavación de Túneles (MNET). Sin embargo, la tecnología de excavación a utilizar (perforación y voladura o máquinas tuneladoras) ejerce una notable influencia en el tipo de sostenimiento que se puede emplear, debido a las irregularidades y sobreexcavaciones producidas por las voladuras, frente a las máquinas integrales, las cuales proporcionan generalmente una superficie más regular y lisa; aunque en estos últimos casos no se descarta la aparición de sobreexcavaciones, si existen muchas familias de grietas con una baja resistencia.

La experiencia ha demostrado que la aplicación de un espesor normal de hormigón proyectado (5 – 10 cm) en túneles excavados mediante perforación y

voladura no proporciona sostenimiento estructural, como en el caso del revestimiento clásico de hormigón; por lo que en la práctica se recomienda complementarlo con un bulonado sistemático o arcos armados, reforzado con hormigón proyectado.

A pesar de las diferencias entre el sostenimiento y el revestimiento, actualmente en la construcción prolifera, cada vez más, el empleo de un revestimiento único que desempeña ambas funciones, al quedar instalado definitivamente durante la etapa de excavación, lo cual plantea un serio problema a resolver en cuanto a la calidad de los materiales a utilizar y el diseño propio del revestimiento; generalmente es muy usado en rocas de muy buena calidad (Bobet, 2012).

Este método es general para todo tipo de túneles, aunque su mejor efectividad es en macizos de rocas buenas y muy buenas, donde las rigideces del macizo y la estructura soterrada son similares.

Generalmente para el caso de túneles hidráulicos no se analizan las cargas producidas por el agua, según el tipo de conducción, libre o a presión; no se consideran las cargas o efectos del sismo y no se tienen en cuenta factores de seguridad que contemplen la vida útil y la calidad de la ejecución.

Hasta hace relativamente poco la percepción dentro de la comunidad de ingeniería era que las estructuras enterradas no necesitaban diseñarse para resistir esfuerzos sísmicos, ya que estas se mueven con el terreno debido a su menor masa, comparada con la del terreno circundante; por lo tanto, no experimentan esfuerzos significativos. Esta percepción cambió drásticamente a raíz de la falla de la estación del metro de Daikai en Kobe, Japón, durante el terremoto de Kobe en 1995 (Bobet, 2012).

Los esfuerzos dinámicos en una estructura enterrada sometida a ondas de compresión y cortante, perpendiculares al eje del túnel, son solo del 10 % al 15 % mayores que los esfuerzos obtenidos en un análisis estático en el que los esfuerzos o deformaciones del suelo lejos de la estructura son los máximos producidos por el terremoto. La amplificación dinámica de las ondas de esfuerzos en un túnel se puede ignorar cuando la longitud de onda de las

velocidades máximas es al menos ocho veces mayor que el ancho del túnel. En estos casos, la fuerza sísmica se puede calcular como una carga estática (Bobet, 2012).

Actualmente existen dos métodos para el diseño sísmico de estructuras enterradas. El primero consiste en llevar a cabo análisis no lineales de suelo-estructura mediante el uso de elementos finitos o diferencias finitas, que incluyen fuerzas de inercia. Los movimientos sísmicos se aplican a los bordes de contorno que resultan de la discreción del medio y producen las ondas de propagación del temblor en el terreno. Estos movimientos provienen de registros de aceleraciones de velocidades que emulan los espectros de respuesta de diseño. En el segundo método, o método pseudoestático, se desprecian las fuerzas de inercia. Las sollicitaciones sísmicas se simulan como esfuerzos o deformaciones estáticas aplicados al suelo lejos de la estructura. En el método pseudoestático la interacción suelo-estructura puede o no tomarse en cuenta. Cuando se incluye la interacción como parte del análisis, se usan típicamente elementos finitos o diferencias finitas para encontrar la magnitud de los esfuerzos y desplazamientos o deformaciones inducidos por el sismo en el túnel. Cuando se desprecia la interacción suelo-estructura, se supone que la estructura sigue las deformaciones del terreno. Esto se conoce como método de deformaciones de campo libre, en el cual el diseño se hace para que la estructura soporte las deformaciones de campo libre sin perder su integridad (Bobet, 2011).

Aunque el método de las deformaciones de campo libre resulta muy atractivo debido a su simplicidad, es un método equivocado y no debería usarse. La razón fundamental es que no se toma en cuenta la interacción suelo-estructura. Si la estructura es mucho más rígida que el terreno circundante, el diseño puede resultar demasiado conservador. El método debe abandonarse porque no es posible saber a ciencia cierta cuál es el factor de seguridad que resulta de los cálculos y es muy posible que resulte en un diseño inseguro. Si la estructura es más flexible que el terreno circundante, la hipótesis de que se

deforma siguiendo al terreno no es correcta y los resultados caen del lado de la inseguridad.

Generalmente el análisis se puede hacer mediante programas de análisis geotécnico, que a partir de la modelación brindan las tensiones en las paredes del túnel; estas tensiones luego se procesan en un programa de modelación estructural, por ejemplo Sap 2000, y se obtienen los resultados o diseños de la estructura del revestimiento.

En el país no existe la tecnología necesaria para hacer la caracterización del suelo mediante las ecuaciones de continuidad, fundamentales para los programas de análisis geotécnico y la realización del método de elementos finitos. Luego, la consideración de la interacción suelo-estructura y su consiguiente análisis estático es aceptable.

El campo dinámico de esfuerzos que actúa sobre una excavación subterránea se puede sustituir por un campo de esfuerzos normales (onda P) y cortantes (onda S) aplicados, respecto a la excavación, en el infinito, considerando que en un campo dinámico oscilatorio los esfuerzos varían desde un valor mínimo a un valor máximo. Para efectos de los cálculos se asumen los valores extremos de los esfuerzos normales y cortantes (Mondéjar y Blanco, 2000).

Se puede aceptar que el campo inicial de esfuerzos en un macizo rocoso afectado por sismos está constituido por el campo estático (gravitacional o tectónico) y el campo dinámico producido por estos. Si se considera un campo estático puramente gravitatorio, a partir de la Ley de Hook generalizada, se puede demostrar que el esfuerzo principal mayor es vertical. El campo inicial dinámico se puede analizar como un campo estático de componentes normales y cortantes (Mondéjar y Blanco, 2000).

Otra forma aceptada es el cálculo del incremento dinámico del empuje debido al sismo, donde se utiliza la expresión (4):

$$\Delta DEa = (1/2 \gamma H^2)(K_a - K_0)(1 - C_{sv}) \quad (4)$$

donde

γ es la densidad del suelo

H es la profundidad a la que se calcula el empuje

Kas es el coeficiente de presión dinámico activo

Ka es el coeficiente de presión activa

Csv es el coeficiente sísmico vertical

Con estos métodos se obtiene un estado de carga sísmico estático equivalente, el cual puede ser modelado con cualquier programa de análisis estructural.

Otro estado de cargas que debe ser considerado son las presiones debido al fluido. Pueden existir dos casos principales, cuando el túnel funciona por conducción libre o a presión; en el primer caso las presiones son pequeñas y generalmente pueden no tenerse en cuenta para el análisis estructural del revestimiento.

En el caso de los túneles que trabajan a presión, debido a la necesidad de estanquidad del revestimiento, se deben comprobar estas tensiones ante la posibilidad del fracturamiento hidráulico.

Cuando la presión interna en el túnel es mayor que los esfuerzos de confinamiento generados por la carga litostática, existen las condiciones para que se produzca fracturamiento hidráulico; o sea, apertura de fisura que permite la fuga de agua desde el túnel hacia el macizo. Para este caso se debe diseñar el revestimiento que garantice la mínima apertura de fisuras.

RESULTADOS

Se propone realizar el diseño geotécnico del túnel por el método del índice Q; esto brindaría el sostenimiento de la sección del túnel, útil en el proceso constructivo y para facilitar la construcción del revestimiento definitivo. A partir de esto se toman en función del macizo dos soluciones. En el caso de las rocas calificadas de buenas el revestimiento puede asumirse, y es bien visto en la bibliografía internacional, como el propio sostenimiento; siempre y cuando cumpla con todas las restantes características exigidas para el revestimiento. Para el caso de túneles a presión se deberá revisar el facturamiento hidráulico. En caso de sismo se comprobará la sección solo cuando las aceleraciones sean superiores a 0.2g (Conde, 2013).

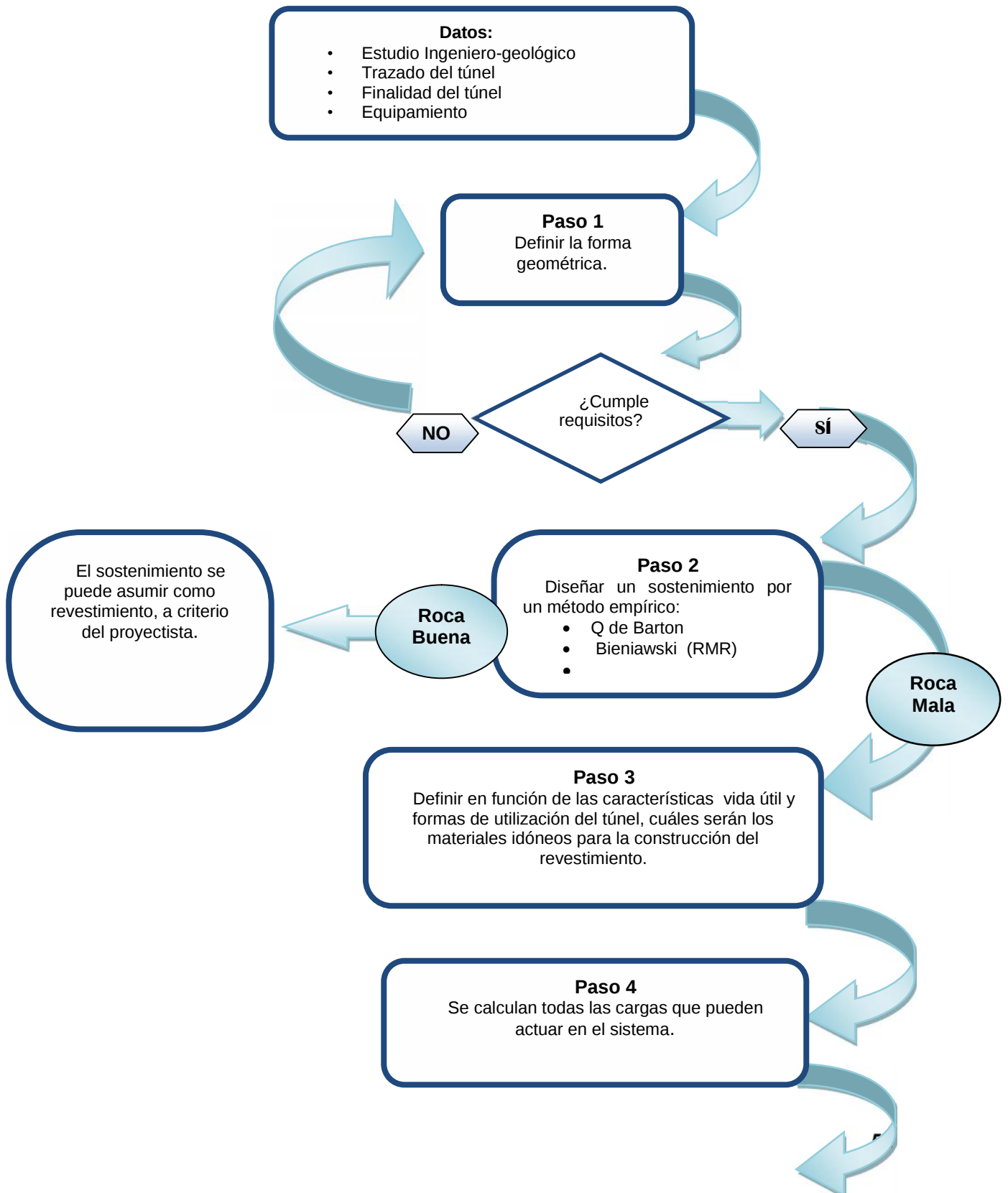
Cuando la clasificación de las rocas sea mala, se deberá tomar el sostenimiento dado por el método como temporal y no se tendrá en cuenta su aporte para el cálculo del revestimiento. En este caso se harán las combinaciones de carga según la norma vigente (Oficina Nacional de Normalización (ONN), 2006). Se proponen las siguientes combinaciones de cargas:

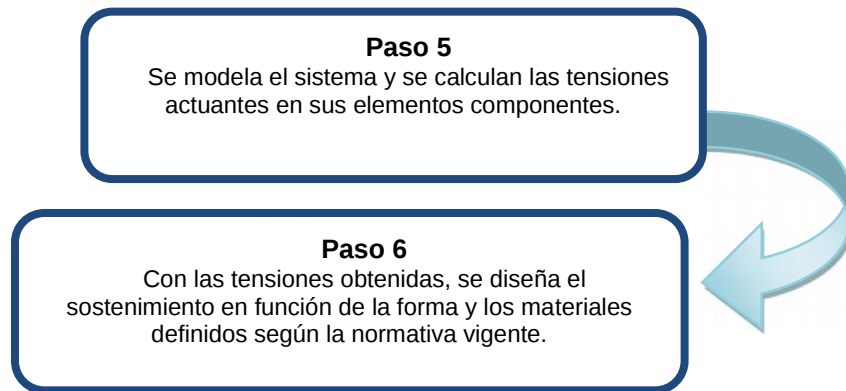
- 1.4 (permanente)
- 1.4 (permanente + fluido a presión)
- 1.2 (permanente + fluido a presión) + 1.4 (sismo)
- 1.2 (permanente) + 1.4 (sismo)

Las cargas debido al proceso de construcción del túnel no son consideradas, ya que ocurren cuando está el sostenimiento. La estructura del túnel se modela según su forma geométrica, teniendo en cuenta las disposiciones constructivas y el método de ejecución del túnel. Para el diseño se debe comprobar, además de la resistencia a los esfuerzos, las deformaciones y la fisuración.

Los materiales del diseño deberán contemplar la forma y colocación de los mismos en obras subterráneas y el tiempo de vida útil de la estructura.

Metodología propuesta para el diseño del revestimiento estructural de túneles en Cuba





CONCLUSIONES

Prácticamente no existe documentación normativa para este tipo de diseño, fundamentalmente en Cuba. La bibliografía internacional aborda el tema con cierto grado de dispersión, sin que se logre un consenso general sobre el diseño estructural de los revestimientos. La importancia de este tipo de túneles ha propiciado un avance en la parte ejecutiva de ellos, pero en el país la experiencia es muy escasa.

Se deben tener en cuenta todas las combinaciones posibles debido a que todos los túneles son diferentes en cuanto a su ubicación, tipo de geología y condiciones de trabajo.

Basado en todo lo anterior se ha realizado una metodología acorde a las condiciones actuales de Cuba para el diseño estructural del revestimiento de túneles hidráulicos, la cual podría hacer converger los métodos de diseño en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barton, N. y Grimstad, E. (2014). *El sistema Q para la selección del sostenimiento en el método noruego de excavación de túneles*. Noruega: Norwegian Geotechnical Institute.

Bobet, A. (julio-agosto, 2011) Diseño Sísmico de estructuras subterráneas. *Revista Geotecnia*, 220, 18-25.

Bobet, A. (2012). Comportamiento sísmico de túneles, *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 12(1), 69-75.

Conde R. (2013). *Diseño de túneles*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/174487684/Tunel-Hidraulica-Estructuras>

Cuba. Oficina Nacional de Normalización (2006). *NC 450:2006 Edificaciones—Factores de carga o ponderación— Combinaciones*. La Habana: autor.

Dolz, J., Gómez, M. (1994). *Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores*.

ETSECCPB. - UPC. *Historia de los túneles y su evolución histórica. Ingeniería Geológica. Excavaciones Subterráneas.* Recuperado de <http://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/01Historia.pdf>

López, C. M., *et al.* (sep.-dic., 2013). Uso de aguas de segunda calidad en ciclo urbano del agua para las condiciones cubanas. *Rev. Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXIV(3), 86-94.

Mondéjar, O. y Blanco R. (2000) Cargas actuantes en túneles de Moa. *Revista Minería y Geología*, XVI I(2), 42-46.

Recibido: junio de 2016

Aprobado: diciembre de 2016