

Estabilización del sector occidental de la antigua cantera de Punta Lucero en el Puerto de Bilbao

Stabilization works in the quarry of Punta Lucero (Port of Bilbao)

Iñigo Escobal (*), José Manuel Baraibar (**), José Luis García Mochales (***), Johnatan González (****), Manuel Arlandi (*****), Alberto Bernardo (*****)

RESUMEN

El presente artículo describe las obras de estabilización de la antigua cantera de Punta Lucero en las instalaciones de la Autoridad Portuaria de Bilbao. Estas obras han sido necesarias para acabar con la caída ocasional de piedras y bloques que amenazaban diversas instalaciones con depósitos de combustibles implantadas en la plataforma portuaria. La actuación se ha concebido considerando la oportunidad de aprovechar los materiales para un proyecto en sus proximidades, las obras del Proyecto de Espigón Central de la ampliación del Puerto de Bilbao. Por otra parte, la operación de excavación se ha organizado mediante banqueo descendente y el transporte ha sido realizado a través de pozo-túnel. Este método presenta múltiples ventajas, tanto desde el punto de vista de la seguridad como desde la perspectiva ambiental y de emisión de gases de efecto invernadero. El empleo de este sistema no tiene precedentes en obras de estabilización de laderas.

Palabras clave: estabilización; banqueo descendente; túnel; raise boring; pozo-túnel; voladura; economía circular; ecodiseño

ABSTRACT

This article describes the works of slope stabilization in the ancient quarry of Punta Lucero, in the facilities of the Port Authority of Bilbao. This technical intervention was necessary to prevent rockfalls, threatening some strategic fuel storage facilities in the port platform. The works have been designed considering that the material obtained from the works has to be employed as fill material for another contractual arrangement in the area, the construction of a Central Breakwater in the extension of the Port of Bilbao. Besides, the technique of descending benching has been employed, together with a double shaft-tunnel system. This method has many advantages, both from the perspective of safety and from an environmental point of view, as it reduces the emission of greenhouse gases. This system has no precedents in slope stabilization works.

Keywords: stabilization; descending benching; tunnel; raise-boring; shaft-tunnel; blasting; circular economy, ecodesign

(*) Ingeniero de Minas. Director General. Viuda de Sainz, S.A., Bilbao (España).

(**) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director Técnico. Viuda de Sainz, S.A., Bilbao (España).

(***) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de Construcción. Autoridad Portuaria de Bilbao, Bilbao (España).

(****) Ingeniero de Minas. Director Técnico. Lurpelan, S.A., Bilbao (España).

(*****) Ingeniero de Minas. Director. Túneles y Geomecánica, S.L., Madrid (España).

Persona de contacto/Corresponding author: jmbaraibar@viudadesainz.com (J.M. Baraibar)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7295-184X> (I. Escobal); <http://orcid.org/0000-0001-6349-2127> (J.M. Baraibar); <http://orcid.org/0000-0001-5423-7685> (J.L. García Mochales); <http://orcid.org/0000-0003-1091-6058> (J. González); <http://orcid.org/0000-0001-7935-671X> (M. Arlandi); <http://orcid.org/0000-0002-6494-5404> (A. Bernardo)

Cómo citar este artículo/Citation: Iñigo Escobal, José Manuel Baraibar, José Luis García Mochales, Johnatan González, Manuel Arlandi, Alberto Bernardo (2021). Estabilización del sector occidental de la antigua cantera de Punta Lucero en el Puerto de Bilbao. *Informes de la Construcción*, 73(562): e394. <https://doi.org/10.3989/ic.79345>

Copyright: © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 18/04/2020
Aceptado/Accepted: 08/09/2020
Publicado on-line/Published on-line: 24/06/2021

1. INTRODUCCIÓN

La cantera de Punta Lucero (Figura 1) se explotó entre los años 1970 y 1990 para el aprovechamiento de materiales en la ampliación del Puerto de Bilbao. En esta época era preciso responder al reto del crecimiento del tráfico marítimo, que se iba a ver incrementado de forma muy significativa por la instalación en Muskiz de la refinería de Petronor y de la aparición del tráfico de contenedores (1).



Figura 1. Vista aérea del sector inestable en la antigua cantera de Punta Lucero, junto a instalaciones portuarias situadas en la plataforma inferior (2)

Las labores de extracción de material, fundamentalmente para la construcción del dique de Punta Lucero, originaron un frente cuya parte más occidental no llegó a adoptar una configuración estable, ya que no pudo finalizarse tras producirse un deslizamiento masivo en la ladera (3). Estos problemas de inestabilidad se veían agravados con el tiempo y constituían un riesgo para diversas infraestructuras energéticas de almacenamiento de combustibles, como la terminal marítima de Petronor y las instalaciones de regasificación de gas natural licuado de BBG (Bahía de Bizkaia Gas).

En 2013, tras estudiar diversas alternativas de estabilización (4), la Autoridad Portuaria concluyó que la mejor so-

lución para estabilizar la zona consistía en la excavación del frente desde su cabeza, al objeto de conseguir configurar una geometría objetivo estable (Figura 2). Esta solución era la única que abordaba el problema de inestabilidad en su origen y proporcionaba garantías de eficacia a lo largo del tiempo.

La técnica seleccionada para llevar a cabo los trabajos de estabilización fue el banqueo en varios niveles en sentido descendente mediante voladuras especiales de carga reducida. Esta técnica se complementó con la ejecución de un doble sistema pozo-túnel, que minimizaba las distancias de transporte del material obtenido y sus posibles afecciones ambientales.

El árido obtenido en los trabajos de estabilización se ha utilizado como material de la unidad de obra “suministro y colocación de todo-uno en mota de confinamiento de rellenos hidráulicos”, correspondiente a la primera fase del Proyecto de Espigón Central de la ampliación del Puerto de Bilbao en el Abra Exterior (5), que se ha ejecutado de forma paralela a los trabajos de estabilización de la ladera, en otra parte del proyecto incluido en el contrato.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1 Descripción del talud a estabilizar

El proyecto de estabilización contemplaba actuar en una superficie de 4,9 Ha (Figura 3). La geometría del sector a estabilizar no era uniforme, ya que contaba con una altura de 213 m pero únicamente dos bancos, a las cotas +30 y +80.

El perfil tipo del talud a estabilizar presentaba cuatro zonas diferenciadas (Figura 4):

- Banco y berma 1. Situado en la zona inferior del talud, desde la cota +7 sobre el nivel del mar hasta la cota +33. La anchura original de la berma era de 10 m, y la inclinación del talud de 75°.
- Banco y berma 2. Desde la cota +33 hasta la cota +80, con una inclinación del talud de 75°.

GEOMETRÍA INESTABLE



GEOMETRÍA ESTABLE



Figura 2. Geometría de talud inestable, antes de los trabajos (izda.) y geometría de talud estable, después de los trabajos (dcha.)

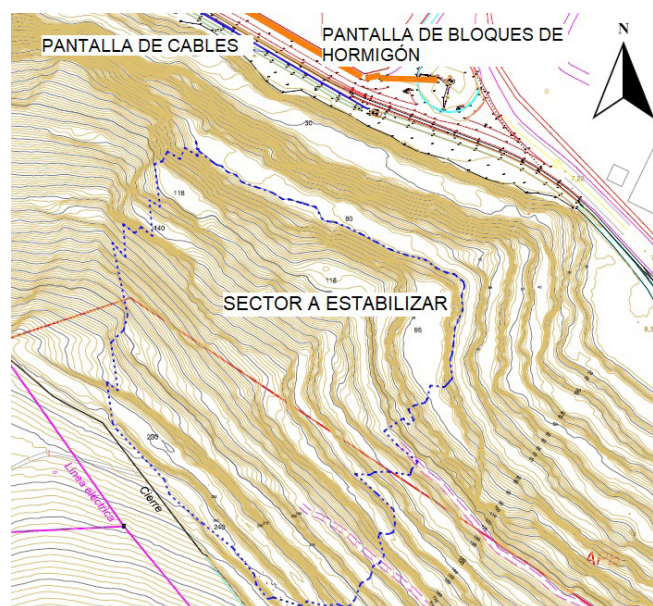


Figura 3. Vista en planta del sector a estabilizar y localización de medidas de protección de desprendimientos ocasionales

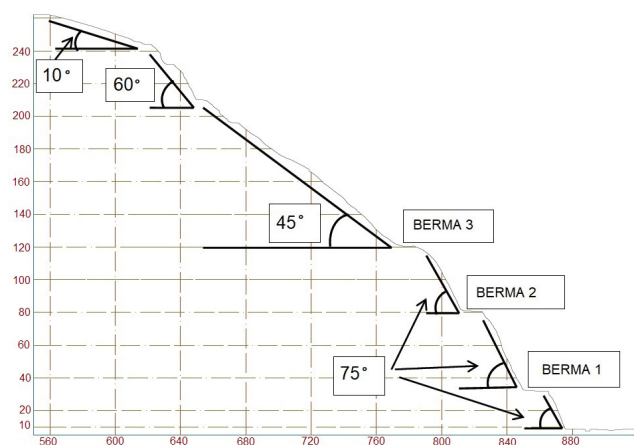


Figura 4. Perfil tipo del talud a estabilizar antes de los trabajos (4)

- Banco y berma 3. Desde la cota +80 hasta la cota +120. Esta zona se caracteriza por no disponer de acceso, por el deslizamiento del banco 4 en los años 70, durante las labores de extracción en la antigua cantera. Presenta una inclinación de 75°.
- Zona de lisos. Desde la cota +120 hasta la cota +215. Presenta una inclinación media de 45°.

La morfología del talud, así como la disposición de las discontinuidades del macizo rocoso, daban lugar a la presencia de cuñas inestables, que podían provocar deslizamientos y caídas de bloques. Los deslizamientos que se producían eran de tipo rotura planar a favor de planos de estratificación que afloraban en la cara del talud, ya que la familia principal de juntas estaba buzando a su favor y prácticamente con su misma dirección, siendo el ángulo de buzamiento mayor que el ángulo de rozamiento interno. A pesar de que en los años 90 se colocaron algunos bulones puntuales en la zona superior de lisos, no han dejado de producirse desprendimientos de bloques, bien por la distribución puntual de los bulones, bien por su deterioro físico-mecánico.

Hasta la ejecución del Proyecto de Estabilización del Sector Occidental de la Cantera de Punta Lucero, los desprendimientos ocasionales que se producían en la ladera se controlaban con un sistema doble formado por la combinación de una barrera metálica estática (pantalla de cables) y un muro de bloques de hormigón en el pie del talud, de 8,80 m de altura (Figura 5).



Figura 5. Muro de bloques en el pie del talud para controlar desprendimientos ocasionales

Debido a la gran extensión y altura de la ladera, y por la presencia de una gran cantidad de bloques inestables, con tamaños variables entre 10 cm y 1 m, existía un evidente riesgo de que al desprenderse pudieran superar la barrera existente, afectando a diversas instalaciones energéticas de almacenamiento de combustibles que se encuentran en las inmediaciones del pie de ladera.

2.2. Situación geotécnica del macizo rocoso

Los afloramientos de Punta Lucero se corresponden mayoritariamente con rocas calizas del Complejo Urgoniano (Cretácico inferior), poco meteorizadas y de alta resistencia. Se disponen en el flanco norte del Anticlinorio de Bizkaia, con dirección NW-SE y buzamientos hacia el NE.

A partir de los datos estructurales tomados en las estaciones geomecánicas, en el macizo rocoso se identificaron tres familias principales de discontinuidades, ortogonales entre sí, siendo la estratificación la más representada (S_0), y además diaclasas longitudinales (J_1) y transversales (J_2). Localmente existen variaciones en la dirección y buzamiento de las juntas. Las discontinuidades presentes en un macizo rocoso hacen del mismo un medio discontinuo y anisótropo, y por tanto dificultan su modelización. Constituyen las características más importantes para revisar la estabilidad de una ladera en roca (6).

Es de destacar que en el entorno de la cota +120 m existe un cambio general en el buzamiento de la estratificación (S_0), dándose lugar a distintos dominios de discontinuidades, según se ilustra en la Tabla 1.

Tabla 1. Discontinuidades medias presentes en el macizo rocoso

Dominio de ladera		S_0	J_1	J_2
Superior	Buzamiento	40°	80°	60°
	Dirección	050°	300°	200°
Inferior	Buzamiento	80°	80°	30°
	Dirección	035°	325°	085°

Con las diferentes familias identificadas se representaron estereográficamente los planos para cada dominio (Figura 6).

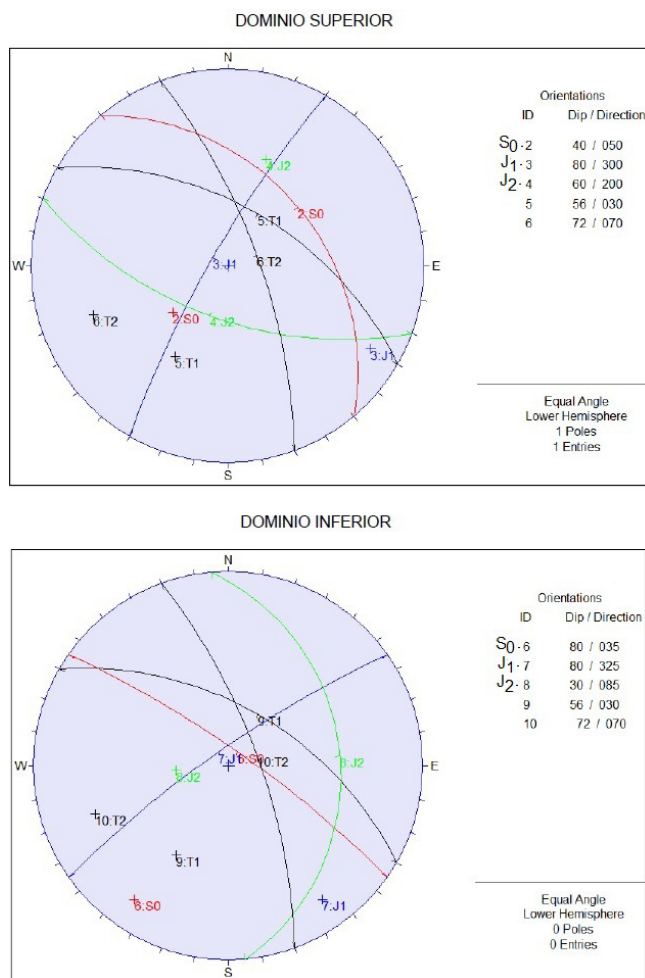


Figura 6. Representación de planos de polos para cada dominio de ladera

Las discontinuidades presentan una recurrencia media de entre 10 y 20 m, con separaciones de entre 60 cm y 6 m, dando lugar a bloques métricos. Si bien los ensayos de *tilt-test* de las juntas han arrojado ángulos de rozamiento residuales entre 40° y 46°, en los cálculos de estabilidad, por experiencia en materiales similares, se adopta un ángulo de rozamiento de $\phi=32^\circ$ para la estratificación y de $\phi=40^\circ$ para el resto de las juntas. No se ha considerado la cohesión que eventualmente podría conllevar el relleno arcilloso existente en algunos planos de estratificación.

Al buzar la estratificación a favor del talud y prácticamente con su misma dirección y al ser el ángulo de buzamiento mayor que el ángulo de rozamiento interno del plano de estratificación (S_0), antes de la intervención se producían deslizamientos de tipo rotura planar a favor de S_0 .

2.3. Solución propuesta: geometría y método de excavación

Considerando el sistema de discontinuidades del macizo rocoso, se ha definido una configuración de bancos con el objetivo principal de evitar la formación de roturas planares y caída de cuñas. La geometría final del sector presenta bancos de

15 m de altura final y bermas intermedias de entre 5 y 6 m de anchura, para un factor de seguridad a largo plazo superior a 1.4. En la Tabla 2 se indican los ángulos de talud adoptados en cada zona correspondiente al sector estabilizado.

Tabla 2. Ángulos de talud adoptados en cada zona de ladera

Frente principal de talud (SW)	Buzamiento medio de estratificación (S_0)	Ángulo de talud adoptado en geometría propuesta
Zona superior (cotas 250-205)	30°	72°
Zona media (cotas 205-115)	55°	56°
Zona inferior (cotas 115-80)	85°	64°

Con esta geometría de excavación no sólo se previene el desprendimiento de bloques, sino que se favorece la retención de posibles caídas de cuñas de material de poco volumen en sus bermas de seguridad. En el frente principal (SW), el ángulo del talud de los bancos se adaptó al análisis de estabilidad, respetando en la zona media el ángulo de buzamiento de la estratificación para prevenir precisamente las roturas planares. En los taludes laterales se han adoptado 72° (3V:1H) como ángulo de talud del banco.

En las tablas siguientes se resumen los principales factores de seguridad previstos ante roturas planares (Tabla 3) y ante roturas por cuñas (Tabla 4). Para calcularlos se han efectuado en cada caso varios análisis cinemáticos deterministas, empleando los programas *RocPlane* y *Swedge*, de la compañía *Rocscience*.

Tabla 3. Factores de seguridad previstos ante roturas planares en el frente principal del talud

Dominio de ladera	Junta S_0	Junta J_1	Junta J_2
Superior	2,71	-	-
Inferior	-	-	1,45

Tabla 4. Factores de seguridad previstos ante roturas por cuñas en el frente principal del talud

Dominio de ladera	Cuña S_0 - J_1	Cuña S_0 - J_2	Cuña J_1 - J_2
Superior	3,48	>5	-
Inferior	-	1,45	2,25

El banqueo se realizó con avance descendente desde la cabeza, a favor de las plataformas de trabajo, que comenzaban en la cota +230 m. La geometría final ha supuesto el arranque de un volumen total de 906.000 m³ de material medido en banco.

El sistema de banqueo se complementó con la construcción de un sistema pozo-túnel (Figura 7), consistente en un pozo subvertical principal de 184 m de longitud, conectado con un túnel horizontal de 210 m de longitud al que se accedía desde el pie de la ladera. Todo el material que se iba volando en los bancos de las cotas superiores se transportaba hacia la boca del pozo superior, deslizando por gravedad a través del mismo hasta formar un cono de descarga en el fondo del túnel horizontal. A medida que se trabajaba en la ladera, el acceso a la boca del pozo inicial iba siendo cada vez más dificultoso, hasta que llegaba un punto en que este pozo interfería con el talud definitivo. Por lo tanto, cuando se alcanzó la cota +102

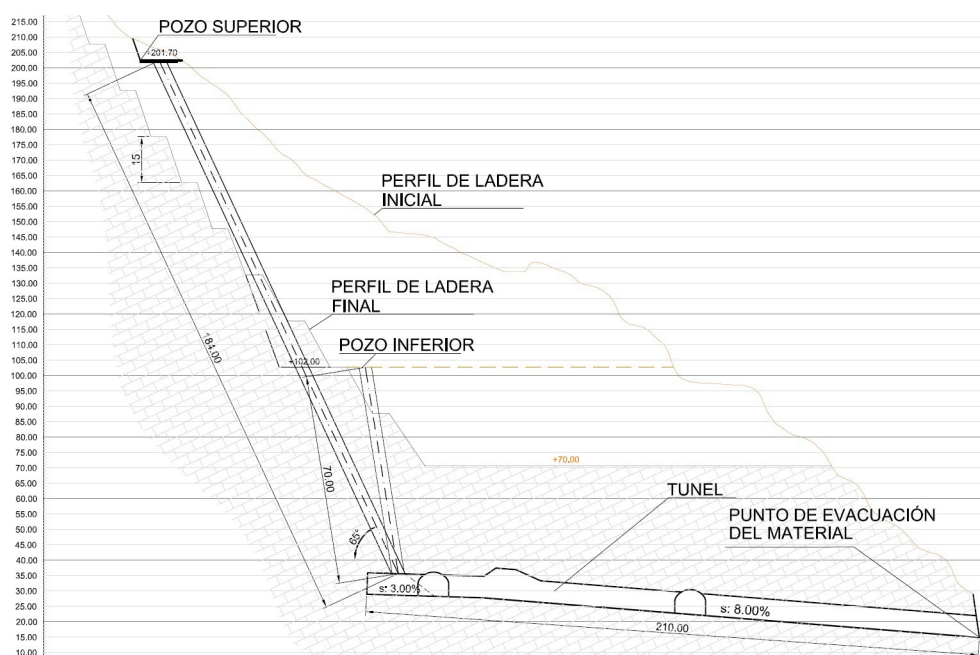


Figura 7. Sección tipo representativa del sistema pozo-túnel

se perforó un nuevo pozo subvertical, de 70 m de longitud, que desembocaba en el mismo punto que el primero, facilitando la evacuación del material existente a partir de ese nivel. El material se cargaba en el fondo del túnel y se transportaba en camiones bañera hasta el punto de destino definitivo.

El sistema pozo-túnel, también denominado chimenea-galería, es un viejo conocido de la minería (7). Sin embargo, hasta el año 2001, con su instalación y empleo en la cantera de Nafarrondo (Bizkaia), era prácticamente desconocido en el laboreo a cielo abierto en las canteras españolas (8). No existen referencias de su empleo en proyectos específicos de estabilizaciones de ladera.

El material obtenido durante los trabajos de estabilización constituyó el material base para la generación de la unidad de suministro y colocación de todo-uno en mota de confinamiento de rellenos hidráulicos correspondiente a la otra parte del proyecto incluido en el contrato, denominada “primera fase del Proyecto de Espigón Central de la ampliación del Puerto de Bilbao en el Abra Exterior” (5), que se sitúa a una distancia de 3,7 km respecto a la localización de la cantera (Figura 8).

Según los requerimientos del Pliego, se comprobó que el material cumplía las características establecidas en el artículo 331 del PG-3 (9), dedicado a los pedraplenes. Los materiales ensayados procedían de rocas estables químicamente y frente a la acción del agua y presentaban alta resistencia, del orden de 1.000 kg/cm² de resistencia a compresión simple.

Las condiciones granulométricas de colocación se situaban entre las exigidas para un pedraplén y un terraplén. Precisamente se buscaba proporcionar una granulometría lo más variada posible para poder conseguir la máxima compacidad en la mota de confinamiento.

2.4. Ventajas ambientales del proyecto y método de excavación

La solución de estabilización de ladera desarrollada en el proyecto constructivo ha supuesto una doble ventaja desde la óptica de la sostenibilidad y la economía circular.

Por una parte, el sistema de transporte mediante pozo-túnel ha conseguido, a pesar de la inversión inicial, una clara mejora



Figura 8. Localización de las dos prestaciones contractuales dentro de las instalaciones de la Autoridad Portuaria (2). Obras de estabilización de ladera (dcha.) y obras de Espigón Central de la ampliación del Puerto de Bilbao (izda.)

medioambiental respecto al transporte tradicional del material excavado a través de las pistas de la antigua cantera. Este método ha reducido el consumo energético, las emisiones de CO₂ y las emisiones de polvo, derivadas del transporte y del eventual volteo del material. Además, este método presenta otras ventajas muy significativas, como la reducción del impacto visual y el incremento de la seguridad tanto de los trabajadores como de las instalaciones colindantes (10). El ahorro de combustible que ha supuesto la ejecución del sistema pozo-túnel se cuantifica en la Tabla 5, al considerar que no han sido necesarios los vehículos pesados de transporte necesarios para trasladar el material a través de las pistas de la antigua cantera. Se han evitado un total de 4 vehículos extraviales, durante 453 días y con un consumo medio por vehículo y día de 300 l, que hubiesen supuesto un consumo de 543.600 l.

Además, el aprovechamiento del material en otra parte del proyecto incluida en el contrato, dentro de las instalaciones de la Autoridad Portuaria (Figura 8), ha evitado que un volumen total de 906.000 m³ en banco hayan circulado por las carreteras provinciales de Bizkaia, con los consiguientes ahorros en gasto de combustible, uso de infraestructuras viarias, emisión de gases de efecto invernadero y molestia a usuarios, así como el consumo tan preciado de espacio en un depósito de sobrantes autorizado. El ahorro de combustible correspondiente a este concepto ha sido de 1.223.100 l (Tabla 5). Se ha calculado teniendo en cuenta que no han sido necesarios un total de 18 vehículos bañera, durante 453 días y un consumo medio por vehículo y día de 150 l.

Tabla 5. Cuantificación de ahorro de CO₂ derivado de emplear el sistema pozo-túnel y el empleo del material en otra parte del proyecto

	Ahorro de combustible (l)	Equivalencia (kg/l (11))	kg CO₂ eq	t CO₂ eq
1. Transporte eventual del material por pistas hasta pie de ladera	543.600	2,70	1.467.720	1.467,72
2. Transporte eventual del material por carretera hasta vertedero autorizado	1.223.100	2,70	3.302.307	3.302,37
Total	1.766.700	2,70	4.770.090	4.770,09

El ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero conseguido constituye del orden del 1% del total de las emisiones anuales del sector del transporte en la comunidad autónoma del País Vasco (12).

3. DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES DE EXCAVACIÓN

3.1. Construcción del túnel

El túnel proyectado entre la cota inferior de la antigua cantera de Punta Lucero y el extremo inferior de los pozos subverticales presentaba una longitud total de 210 m, y una pendiente descendente hacia el exterior del 8% (Figura 7). Su excavación comenzó con la preparación del emboquille, que precisó previamente

el refuerzo con gunita de la zona de talud por la que comenzaba, así como la instalación de un paraguas de barras de 32 mm, sobre las que se instaló una visera de protección constituida con perfilera metálica y chapa *Bernold* gunitada (Figura 9).



Figura 9. Emboquille de túnel

El túnel se ejecutó mediante perforación y voladura, empleando la técnica de sostenimiento conocida como Nuevo Método Austriaco, que emplea hormigón proyectado y bulones. Se ejecutaba el ciclo típico consistente en las siguientes etapas: perforación de los barrenos, carga, detonación, ventilación, retirada de escombros, saneo, colocación de bulones y hormigón proyectado, replanteo topográfico y clasificación geomecánica del frente.

La sección tipo del túnel presentaba 8 metros de anchura y hastiales verticales de 4 m de altura (Figura 10). La bóveda era semicircular, de 4 m de radio. La superficie de la sección fue de 57 m² y sólo se definió un único tipo de sostenimiento para el túnel (ver Tabla 6).

Tabla 6. Definición de sostenimiento en galería y culatón de maniobra

Gunita	Fibra	Bulones	Longitud de pase
9 cm de HP-30	500 J de absorción de energía	Expansivos, de 240 kN, de 2,75 m de longitud, en malla de 1,75 x 1,75 m	3-4 m

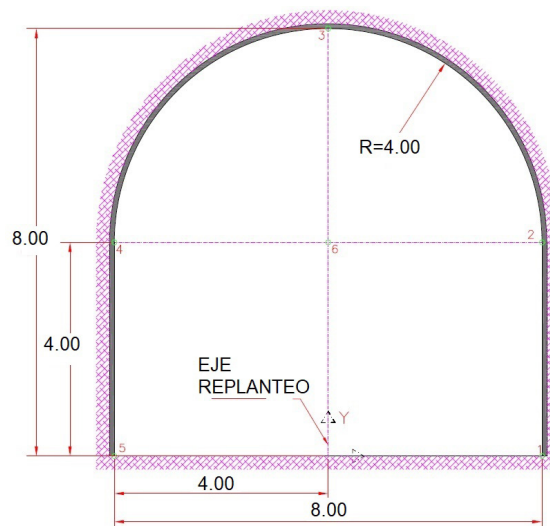


Figura 10. Sección transversal del túnel

Para facilitar el giro de las máquinas y posibles movimientos de carga se proyectó la excavación de un culatón en el fondo del túnel. Además, en el fondo del túnel se generó un anchurón para adecuar el espacio para el cono de descarga del material, así como una glorieta interior para mejorar el giro de los caminos bañera (Figura 11).

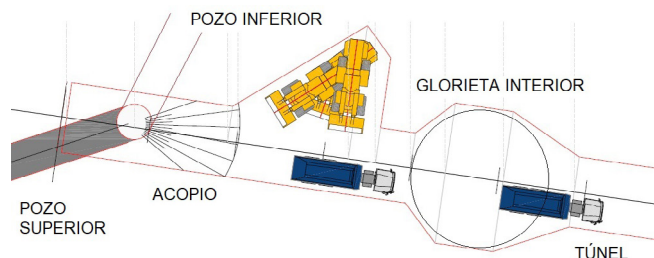


Figura 11. Planta de anchurón, culatón de túnel y glorieta interior

El proyecto del túnel se complementó con un estudio de vibraciones y onda aérea generadas por las detonaciones, en aplicación de la norma UNE 22-381-93 (13). Para ello se efectuó un inventario de todas las construcciones situadas en su entorno, clasificándose como Grupo II. El estudio concluyó que la carga operante había de limitarse a 12 kg de explosivo, tanto en las voladuras en el túnel como a cielo abierto, para respetar los límites de vibraciones establecidos por la normativa vigente. La carga operante proyectada en el túnel, no obstante, fue de 9 kg.

En relación a la onda aérea (Figura 12), el estudio concluyó que los niveles de ruido en las instalaciones industriales

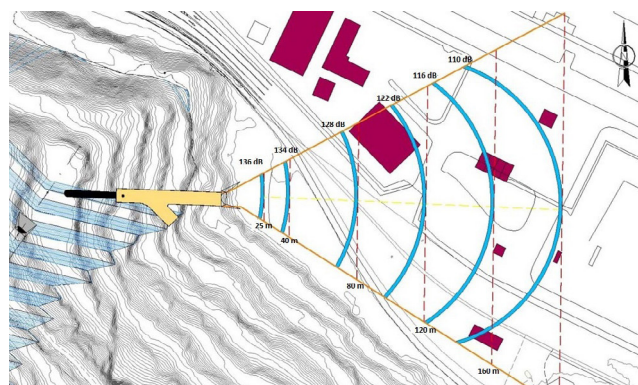


Figura 12. Isolíneas de ruido (dB) sin caballones o pantallas fonoabsorbentes en la salida de la galería inferior



cercanas, de 129 dB en las peores circunstancias, eran tolerables.

3.2. Construcción de los pozos

Para ejecutar los pozos subverticales se empleó la técnica de *raise boring*, por motivos de rapidez, coste y seguridad (Figura 13). Esta técnica se ha empleado con éxito en Bizkaia en terrenos similares, tanto en obras civiles (Metro Bilbao) como en labores mineras (Mina de Apario) (10).

Los pozos subverticales presentaban un diámetro de 4,09 m y 70° de inclinación. El pozo principal, de 184 m de longitud, comenzó a perforarse desde la cota +201,70 m. Una vez completado el túnel, en la plataforma se ubicó y ancló la máquina de *raise boring*, realizándose una base de anclaje. Seguidamente se perforó un taladro piloto con martillo en fondo y tramos de varillaje que se iban enroscando a medida que profundizaba el martillo. La purga del taladro-piloto se efectuó por medio de circulación de aire comprimido, añadiéndose agua para la decantación del polvo generado, que se recogía en la cabeza del pozo. Una vez producido el cale en la galería del túnel se desmontó el martillo y en el extremo del varillaje se procedió a acoplar una cabeza rozadora de diámetro igual al pozo a excavar. Esta cabeza iba provista de pequeños cilindros con botones de widia que, gracias a la presión y movimiento rotativo de la máquina de *raise boring*, iban excavando la roca y completando la sección del pozo desde abajo hacia arriba.

El pozo secundario, de 67 m de longitud, que comenzó a perforarse desde la cota +102 m, desembocaba asimismo en el final del túnel. Ninguno de los pozos ejecutados precisaron de sostenimiento.

3.3. Excavación por voladuras en banco

Una vez preparado el sistema pozo-túnel pudo iniciarse, desde la cota superior, el arranque de roca en la plataforma de trabajo, siguiendo el esquema que se ilustra en la Figura 14.

En primer lugar se realizaba el perfilado de los taludes definitivos, mediante la técnica de precorte por medio de explosivos, que se perforó con 76 mm de diámetro y 60 cm de separación entre barrenos. Sus longitudes se adaptaron a las condiciones topográficas, pudiendo variar entre 2,50 m y 15 m de longitud máxima.



Figura 13. Ejecución de pozos subverticales mediante la técnica de *raise boring*

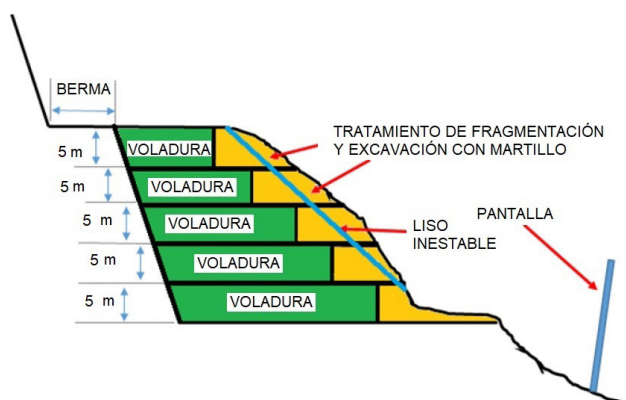


Figura 14. Esquema de ejecución de voladuras de bajo volumen

Posteriormente, se efectuaban las voladuras de producción, que se diseñaron con una altura de banco de 5 m. Se perforaron barrenos de 89 mm de diámetro, con una inclinación respecto a la vertical de 0° a 5°. Se empleó un esquema de perforación regular, adaptándose a la topografía real, con barrenos al tresbolillo. Los detonadores usados fueron de largo retardo (2.500 ms), al objeto de garantizar el completo iniciado de las voladuras y prevenir posibles accidentes en la excavación del banco ya volado. Estas voladuras se diseñaron con una carga operante de 9,58 kg. En cada voladura se consumían de media 800 kg de explosivo, con un consumo específico medio de 0,320 kg/m³.

Una vez realizada la pega, el material volado quedaba depositado sobre la plataforma de trabajo, presentando una granulometría continua, con tamaños máximos del orden de 1 m. Entonces, una retroexcavadora dotada de martillo hidráulico procedía a la fragmentación secundaria de aquellos bloques de roca con tamaño inapropiado (bloques mayores de 70 cm), que solían representar el 5% en peso de cada pega.

Por la existencia en el entorno de instalaciones industriales de almacenamiento de combustible, las voladuras diseñadas han sido de bajo volumen. De este modo se conseguía reducir al máximo las posibles desviaciones en las perforaciones e irregularidades en el espesor de piedra, y, en consecuencia, la aparición de proyecciones no deseadas. Como medida de protección adicional, se dejaba sin volar la zona más próxima al borde de la ladera (Figura 14), para evitar el desprendimiento eventual de bloques tras la voladura. Tras esta, se completaba la excavación de esta zona con excavadora equipada con martillo hidráulico.



Figura 15. Aspecto final de los taludes de la ladera estabilizada

El diseño de la voladura tipo de arranque se disponía transversalmente al frente final, facilitando así el cargue en la plataforma de trabajo y la evacuación hacia la entrada del pozo subvertical. Se definieron así plataformas horizontales de trabajo con una anchura mínima de 25 m, quedando los taludes de los bancos en situación final según se iba descendiendo (Figura 15).

3.4. Transporte por el sistema pozo-túnel

Tras la ejecución de las voladuras y después de repicar eventualmente los tamaños mayores de 70 cm, el material se cargaba y transportaba hasta las cercanías del pozo, en donde se efectuaba un vertido directo a través del mismo.

Al comienzo de la excavación se observó que el escombros presentaba, además de los bloques principales de piedra volada, una importante proporción de finos. Cuando el todo-uno de la voladura se volcaba por el pozo, se producía una segregación granulométrica, de modo que los finos se acumulaban en la parte más baja del pozo, y las piedras de mayor tamaño iban quedando en las zonas superiores. Se detectó que el sucesivo volcado de escombros dentro del pozo iba provocando el que peso de la columna que rellenaba el mismo compactara el material fino, que iba ganando en compacidad y cohesión (Figura 16).



Figura 16. Detalle de apelmazamiento en el final del pozo por existencia de finos cohesivos

A pesar de que el diámetro del pozo (4,09 m) cumplía la condición de flujo de Hambley (14), que establece que la relación entre el diámetro del pozo y el diámetro máximo de los bloques vertidos (0,70 m) ha de ser superior a 5 para garantizar el flujo libre a su través, se producían atascamientos recurrentes en el mismo que evitaban el trasiego correcto el material.

Hambley (14) establece también un diámetro de diseño recomendable en caso de presencia de materiales cohesivos [1].

$$[1] D \geq \left(\frac{2 \cdot c}{\gamma} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{r} \right) \cdot (1 + \sin \phi)$$

En la expresión [1], D representa el diámetro mínimo para evitar atascos por finos cohesivos, c representa la cohesión de los finos, γ representa la densidad aparente de los finos, ϕ representa la fricción de los finos y r es el ratio entre la longitud y la anchura de la sección del pozo, que para pozos circulares o cuadrados adopta el valor $r=1$.

Si se asignan parámetros habituales para materiales propios de canteras de caliza, se obtienen diámetros de diseño de pozo

entre 4 y 5 m (14). Con el material obtenido en la obra de estabilización, la expresión de diámetro mínimo [1] adopta el valor 3,75 m, empleando los siguientes valores medios: $c=20 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, $r=1$ y $\phi=30^\circ$.

Los recurrentes atascos en el pozo originados por la formación de arcos conformados por material cohesivo y pegajoso suponían un grave desajuste en los ritmos de producción, por lo que en fase de obra se pusieron en marcha diversas estrategias para garantizar su desatascos.

Se probaron métodos habituales para resolver este tipo de atascos (14), como el empleo de globos de helio ascendentes con explosivo, sin resultados significativos. La estrategia más eficiente para solucionar los atascos consistió en el vertido de agua desde la boca superior de los pozos (Figura 17). Esta estrategia podía deducirse indirectamente de la expresión [1], ya que el diámetro mínimo recomendado para un pozo es directamente proporcional a la cohesión de los finos que lo han de atravesar, y al añadir agua se conseguía reducir la cohesión de los finos apelmazados.



Figura 17. Vertido de agua desde la cabeza superior del pozo subvertical

4. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES VECINAS

4.1. Barreras antidesprendimientos

Durante la fase de ejecución de la excavación en sentido descendente podían generarse caídas de piedras desde los taludes, cuyas trayectorias eventualmente podían alcanzar diversos edificios, estructuras e infraestructuras cercanas.

Los bloques podían llegar a desprenderse bien por inestabilidades naturales existentes antes del inicio de los trabajos o por las vibraciones originadas por las voladuras. Asimismo, existía el riesgo de proyección de piedras generadas por las voladuras.

Para evitar sus efectos se previó la instalación de una serie de barreras dinámicas que pudieran contener los bloques desprendidos.

Para dimensionar estas barreras dinámicas se construyó un modelo de análisis dinámico de trayectorias. Este modelo permitió simular la proyección de diferentes volúmenes de material rocoso procedentes de la cabeza de la ladera, con unos pesos entre 75 kg y 2250 kg. No se estableció en el modelo nin-

guna velocidad inicial vertical, pero sí una velocidad inicial horizontal en el rango 0,5-1,0 m/s. Los valores medios de los coeficientes de amortiguación del modelo se indican en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores medios adoptados para los coeficientes de amortiguación s considerados en el modelo de análisis dinámico de trayectorias

Tipo de material	R_n (normal)	R_t (tangencial)
Afloramiento macizo rocoso	0,35	0,85
Rente rocoso	0,53	0,99
Berma	0,3	0,8
Asfalto	0,4	0,9

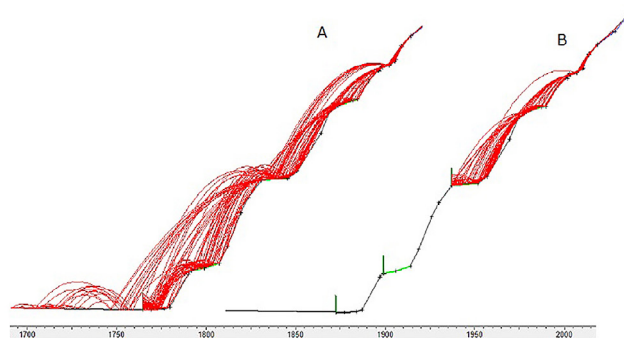


Figura 18. Simulación de trayectorias con el programa RocFall de 100 bloques de 750 kg cayendo sobre el talud en ausencia de pantallas (A) y considerando la actuación de las pantallas (B).

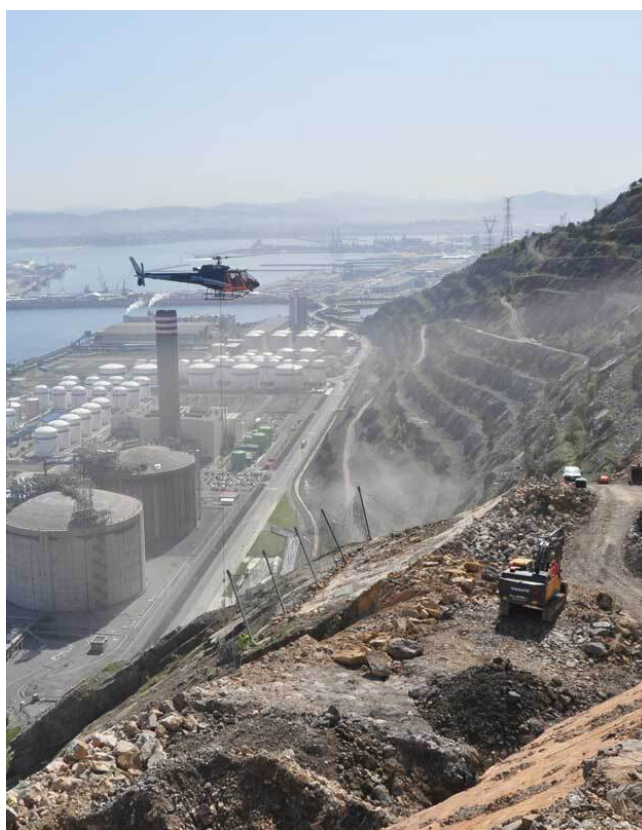


Figura 19. Instalación de pantallas empleando un helicóptero como medio auxiliar de montaje



Figura 20. Localización en planta de los equipos de registro de vibraciones y ondas de presión en modo continuo

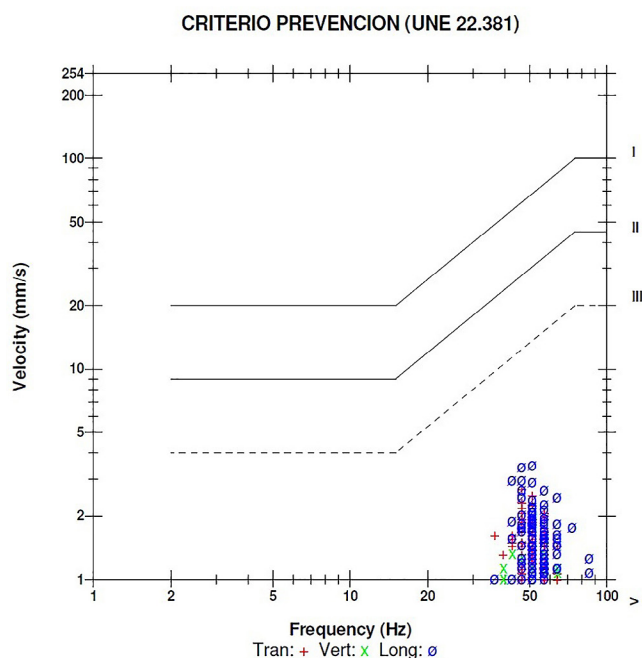


Figura 21. Detalle de registro en continuo para el control de las vibraciones producidas por las voladuras. Registro del sismógrafo situado en la torre eléctrica. Fecha 9/5/2017

Tras analizar las trayectorias posibles de los bloques en diferentes perfiles representativos de la ladera con un modelo de predicción que emplea el método Monte Carlo (Figura 18), se decidió instalar pantallas dinámicas en tres puntos correspondientes a las cotas +7, +80 y +118, para energías de impacto de 3000 kJ, 1000 kJ y 850 kJ.

La eficacia de las barreras pudo comprobarse durante el transcurso de los trabajos, ya que fueron capaces de contener los bloques que eventualmente se desprendían, generalmente tras la detonación de alguna de las voladuras de banqueo.

Los trabajos de instalación de las pantallas dinámicas han sido realizados por equipos de escaladores especialistas. El transporte de los materiales necesarios para su instalación: cables, postes, disipadores, anclajes y redes, al no poder accederse por medios terrestres, ha sido efectuado con la ayuda de un helicóptero (Figura 19).

4.2. Control de vibraciones y ondas sonoras

Durante los trabajos de ejecución del túnel y las voladuras exteriores se han instalado un total de 8 equipos de registro de vibraciones y ondas de presión en modo continuo (Figuras 20 y 21), al objeto de verificar los límites establecidos por la normativa de referencia (13) en diversos puntos estratégicos de las instalaciones cercanas al foco de los trabajos. Estos puntos de control se han situado junto a los depósitos de gas natural licuado más cercanos al pie de la ladera, junto a tuberías de transporte de combustible y en edificios de oficinas.

Con el ánimo de asegurar la transparencia en la gestión de los datos, los sensores garantizaban un registro en modo continuo, con sistema de monitorización en tiempo real y de comunicación remota de señales a través de aplicación web, posibilitando el conocimiento de los datos a todos los organismos/agentes implicados.

5. CONCLUSIONES

El principio de ecodiseño, que constituye una de las palancas para facilitar la transición hacia una economía más circular, ha condicionado la redacción del proyecto de detalle y del pliego de contratación de las obras de estabilización del sector occidental de la antigua cantera de Punta Lucero (Figura 22). El objeto principal de estas obras consistió en minimizar el riesgo de caída de bloques procedentes de una



Figura 22. Panorámica de las instalaciones portuarias desde las obras de la ladera

ladera inestable sobre diversas infraestructuras energéticas de almacenamiento de combustibles situadas junto a su pie.

Desde la fase inicial de diseño conceptual del proyecto, se ha buscado la integración temporal de los trabajos junto a las obras de ejecución del proyecto de Espigón Central de la ampliación del Puerto de Bilbao, en un mismo contrato. Esta estrategia ha permitido aprovechar el material obtenido durante las labores de estabilización como materia prima para constituir unidades de obra necesarias en la obra portuaria. La coincidencia de ambos proyectos en el tiempo presenta una clara ventaja ambiental, ya que ha evitado la extracción de 1.100.000 t de áridos de cantera y el consumo del correspondiente volumen que habría ocupado en un vertedero de residuos.

Además, dentro de los propios trabajos de estabilización, cuya ejecución ha supuesto un gran reto técnico para todos los intervinientes en la misma, se ha empleado, junto con el banqueo descendente con voladuras de baja potencia, la técnica minera de transporte mediante un sistema pozo-túnel, de la que no existen referencias de uso en este tipo de obras de carácter civil en entornos portuarios. El empleo de esta técnica presenta ventajas de seguridad, económicas y ambientales, ya que se ha conseguido reducir las distancias de transporte y se ha evitado la necesidad de disponer mucha maquinaria pesada en permanente trasiego a través de las pistas de la antigua cantera para trasladar el material extraído desde cotas superiores hasta la cota de la plataforma inferior.

REFERENCIAS

- (1) Santos, M. (2003). El Puerto de Bilbao desde 1939 hasta el umbral del siglo XXI. *Revista de Estudios Marítimos del País Vasco*, 4, 473-488.
- (2) Autoridad Portuaria de Bilbao. (2016). Balance del año 2016. Bilbao, España: APB
- (3) Autoridad Portuaria de Bilbao. (2016). Proyecto constructivo de estabilización del sector occidental de la Cantera Punta Lucero. Bilbao, España: APB
- (4) Autoridad Portuaria de Bilbao. (2013). Estudio geotécnico del talud Punta Lucero. Estudio de alternativas de estabilización. Terrasolum
- (5) Autoridad Portuaria de Bilbao. (2015). Proyecto constructivo de Espigón Central de la ampliación del Puerto de Bilbao en el Abra Exterior (1ª fase). Bilbao, España: APB
- (6) Hoek, E., y Bray, J.W. (1981). *Rock slope engineering*. Londres: Taylor & Francis group.
- (7) Andrés, P., y Isasi, J. (2007). Apario, innovación aplicada a la explotación de canteras. Áridos para una construcción sostenible. *DYNA*, LXXXII-3, 36-40.
- (8) Martín, J., y Andrés, P. (2012, 5 de octubre). Coto minero Nafarrondo (Vizcaya). Trabajo presentado en el *III Congreso nacional de áridos*, Cáceres, España.
- (9) Ministerio de Fomento (2015). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Madrid, España: Dirección General de Carreteras
- (10) Bienzobas, J., y Maza, D. (2012). Explotación sostenible de canteras y minas. *Rocas y minerales*, 491, 34-43.
- (11) Institute for European Environmental Policy. (2019). Environmentally Harmfull Subsidies (EHS). Identification and assessment. Final report. Bruselas, Bélgica: IEEP
- (12) Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda del Gobierno Vasco. (2018). Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero. Bilbao, España: Ihobe
- (13) AENOR (1993). *UNE 22-381-93 Control de vibraciones producidas por voladuras*. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- (14) Arlandi, M., Bernardo, A., y Escobal, I. (2019). Sistemas pozo-túnel para el desescombrado de canteras. En C. López Jimeno (Ed.), *Ingeotúneles* (26). Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas (UPM)