



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA ESCUELA
POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y
ENERGÍA



Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN EN LOS REQUISITOS DE
VENTILACIÓN EN EJECUCIÓN DE TÚNELES Y GALERÍAS
MINERAS ASOCIADA A LA ORDEN TEC/1146/2018**

**Analysis of the Variation in Ventilation Requirements in the
Execution of Tunnels and Mining Galleries Associated with
Order TEC/1146/2018**

Para acceder al título de:

**Grado en Ingeniería de
los Recursos Mineros**

Autor: Darío Sánchez Sierra

Director: Rubén Pérez Álvarez

Convocatoria: Noviembre 2023

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	OBJETIVO Y ALCANCE	10
3.	ESTADO DEL ARTE.....	12
3.1.	LA VENTILACIÓN EN EJECUCIÓN.....	12
3.2.	LA METODOLOGÍAS DE AVANCES EN TÚNELES Y GALERÍAS. METODOLOGÍA CONVENCIONAL.....	15
3.2.1.	Geometría del frente de avance en la metodología convencional.....	18
3.3.	LOS EXPLOSIVOS	19
3.4.	HUMOS	21
3.5.	Legislaciones en materia de calidad del aire en túneles en ejecución a nivel internacional.....	26
3.6.	La legislación española.....	27
4.	METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	32
4.1.	METODOLOGÍA DE CÁLCULO. PARÁMETROS A CONSIDERAR.	32
4.1.1.	Volúmenes producidos	33
4.1.2.	Concentraciones iniciales.....	33
4.1.3.	Concentraciones límite	34
4.1.4.	Cálculo del caudal	35
4.1.5.	Influencia del caudal en los cálculos de sobrepresión	36
4.1.6.	Influencia del caudal en los cálculos de potencia.....	39
4.2.	SUPUESTOS ADOPTADOS PARA EL CÁLCULO.....	39
4.2.1.	Esquemas de perforación.....	41
4.2.2.	Carga	44
4.2.3.	Características del explosivo	46
4.2.4.	Calidad de los humos	47
4.3.	IMPLEMENTACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO	49
5.	RESULTADOS.....	53
5.1.	SUPUESTO 1 - Túnel N-611.....	53
5.1.1.	Resultados I.T.C. antigua.....	53
5.1.2.	Resultados orden TEC	54
5.2.	SUPUESTO 2 - TÚNEL DE ARRIARÁN	55
5.2.1.	Resultados I.T.C. antigua.....	55
5.2.2.	Resultados orden TEC	56

5.3.	SUPUESTO 3 – GALERÍA MINERA.....	57
5.3.1.	Resultados I.T.C. antigua	57
5.3.2.	Resultados orden TEC	58
5.4.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	58
5.4.1.	Variaciones en los requisitos de caudal asociados al cambio normativo.	58
5.4.2.	Variaciones de la especie química preponderante.....	62
5.4.3.	Influencia en la sobrepresión.	63
5.4.4.	Influencia en la potencia teórica.	64
6.	CONCLUSIONES	65
7.	ANEXO DE CÁLCULO	67
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	74

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3.1: Frontal cargadora de perfil bajo	13
Ilustración 3.2: Ventilación longitudinal de un túnel durante el período operativo.	14
Ilustración 3.3: Tubería de ventilación durante el avance de una galería.....	14
Ilustración 3.4: Rozadora	15
Ilustración 3.5: Tuneladora	16
Ilustración 3.6: Fases del avance por perforación y voladura.	17
Ilustración 3.7: Zonas de la Voladura	18
Ilustración 3.8: Estructura del monóxido de carbono.....	22
Ilustración 3.9: Estructura del dióxido de carbono.....	23
Ilustración 3.10: Estructura del monóxido de nitrógeno.	23
Ilustración 3.11: Estructura del dióxido de nitrógeno.....	23
Ilustración 4.1: Esquema de ventilación soplante de un túnel.	34
Ilustración 4.2: Esquema de Tiro de Cuele, Destroza y Contorno del supuesto 1.....	42
Ilustración 4.3: Ampliación de la zona del Cuele del supuesto 1	42
Ilustración 4.4: Esquema de Tiro de destroza del supuesto 1	42
Ilustración 4.5: Esquema de Tiro de Cuele, Destroza y Contorno del supuesto 2.....	43
Ilustración 4.6: Ampliación de la zona del Cuele del supuesto 2	43
Ilustración 4.7: Esquema de Tiro del supuesto 2	43
Ilustración 4.8: Esquema de Tiro del supuesto 3	44
Ilustración 4.9: Ampliación de la zona del Cuele del supuesto 3	44
Ilustración 4.10: Óxidos de Carbono producidos por 1 kg de goma.....	48
Ilustración 4.11: Óxidos de Nitrógeno producidos por 1kg de goma	48
Ilustración 5.1: Caudal de ventilación específico para CO	59
Ilustración 5.2: Caudal de ventilación específico para CO ₂	60
Ilustración 5.3: Caudal de ventilación específico para NO	60
Ilustración 5.4: Caudal de ventilación específico para NO ₂	61
Ilustración 5.5: Comparativa de requisitos de caudales máximos.....	61
Ilustración 5.6: Necesidades de caudal para los gases tóxicos para la normativa antigua.	62



Ilustración 5.7: Necesidades de causal para los gases tóxicos para la normativa actual.

..... 62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Efectos del CO	25
Tabla 3.2: Efectos del NO ₂	25
Tabla 3.3: Efectos del CO ₂	25
Tabla 3.4: Efectos del NO	26
Tabla 3.5: Valores máximos de exposición a gases tóxicos durante 8 horas	26
Tabla 3.6: Valores Límite ambientales Orden de 13 de septiembre de 1985	28
Tabla 1.7: Valores Límite ambientales Orden TEC/1146/2018	28
Tabla 3.8: Mediciones a realizar en función del Índice de exposición obtenido	30
Tabla 4.1: Valores Límite ambientales Orden de 13 de septiembre de 1985	35
Tabla 4.2: Valores Límite ambientales de la Orden TEC/1146/2018	35
Tabla 4.3: Valores del coeficiente de pérdida de carga	37
Tabla 4.4: Valores de λ_s	37
Tabla 4.5: Valores para λ_p	38
Tabla 4.6: Valores de ξ	38
Tabla 4.7: Carga de explosivos por ciclo en el supuesto 1	45
Tabla 4.8: Carga de explosivos por ciclo en el supuesto 2	45
Tabla 4.9: Carga de explosivos para el supuesto 3	46
Tabla 4.10: Propiedades de la goma Riodin de Maxam	46
Tabla 4.11: Propiedades del ANFO de Maxam	47
Tabla 4.12: Gases producidos en diferentes estudios	49
Tabla 4.13: Valores límite ambientales actuales para 8 horas normativa actual	50
Tabla 4.14: Valores límite ambientales para 8 horas normativa antigua	50
Tabla 4.15: Volumen total de gases producidos por los explosivos	50
Tabla 4.16: Proporción de gases producidos por kg de explosivo	50
Tabla 5.1: Concentración de gases tóxicos en el supuesto 1	53
Tabla 5.2: Caudales requeridos en el supuesto 1 para normativa antigua	53
Tabla 5.3: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 1 para normativa antigua	54
Tabla 5.4: Sobrepresión en el supuesto 1 para normativa antigua	54
Tabla 5.5: Potencia absoluta en el supuesto 1 para normativa antigua	54
Tabla 5.6: Caudales requeridos en el supuesto 1 para normativa actual	54
Tabla 5.7: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 1 para normativa actual	55
Tabla 5.8: Sobrepresión en el supuesto 1 para normativa actual	55
Tabla 5.9: Potencia absoluta en el supuesto 1 para normativa actual	55

Tabla 5.10: Concentración de gases tóxicos en el supuesto 2.	55
Tabla 5.11: Caudales requeridos en el supuesto 2 para la normativa antigua	55
Tabla 5.12: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 2 para la normativa antigua	56
Tabla 5.13: Sobrepresión en el supuesto 2 para la normativa antigua	56
Tabla 5.14: Potencia absoluta en el supuesto 2 para la normativa antigua	56
Tabla 5.15: Caudales requeridos en el supuesto 2 para la normativa actual	56
Tabla 5.16: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 2 para la normativa actual	56
Tabla 5.17: Sobrepresión en el supuesto 2 para la normativa actual	57
Tabla 5.18: Potencia absoluta en el supuesto 2 para la normativa actual	57
Tabla 5.19: Concentración de gases tóxicos en el supuesto 3	57
Tabla 5.20: Caudales requeridos en el supuesto 3 para la normativa antigua	57
Tabla 5.21: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 3 para la normativa antigua	57
Tabla 5.22: Sobrepresión en el supuesto 3 para la normativa antigua	57
Tabla 5.23: Potencia absoluta en el supuesto 3 para la normativa antigua	58
Tabla 5.24: Caudales requeridos en el supuesto 3 para la normativa antigua	58
Tabla 5.25: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 3 para la normativa actual	58
Tabla 5.26: Sobrepresión en el supuesto 3 para la normativa actual.....	58
Tabla 5.27: Potencia absoluta en el supuesto 3 para la normativa actual	58
Tabla 7.1: Dimensiones de los 3 supuestos.	67
Tabla 7.2: Volúmenes de gas producido por kg de explosivo.	67
Tabla 7.3: Proporciones de gases producidos por explosivo.	67
Tabla 7.4: Valores límite admisibles en ambas normativas	67
Tabla 7.5: Masas de explosivos utilizadas y volúmenes de gases producidos por ellas.....	68
Tabla 7.6: Gases nocivos producidos por la goma.	68
Tabla 7.7: Gases nocivos producidos por el ANFO.....	68
Tabla 7.8: Volúmenes de gases totales producidos totales.	68
Tabla 7.9: Concentraciones tras las voladuras.	69
Tabla 7.10: Caudales requeridos para la normativa actual.	69
Tabla 7.11: Caudales requeridos para la normativa antigua.	69
Tabla 7.12: Características de la tubería para la normativa actual	70
Tabla 7.3: Pérdida de carga en la tubería para la normativa actual	70
Tabla 7.14: Características de la tubería para la normativa antigua	70
Tabla 7.15: Pérdida de carga en la tubería para la normativa actual	70
Tabla 7.16: Parámetros del túnel para ambas normativas.	71
Tabla 7.17: Pérdidas de carga en el túnel para la normativa actual.....	71



Tabla 7.18: Pérdidas de carga en el túnel para la normativa antigua.	71
Tabla 7.19: Pérdidas por singularidades en la normativa actual.	71
Tabla 7.20: Pérdidas por singularidades en la normativa antigua	72
Tabla 7.21: Sobrepresión requerida en la normativa actual.....	72
Tabla 7.22: Sobrepresión requerida en la normativa actual.....	72
Tabla 7.23: Potencia calculada para la normativa actual	72
Tabla 7.24: Potencia calculada para la normativa actual	73

1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, los trabajos subterráneos han sido necesarios. Por un lado, para el desarrollo de la minería, actividad que ha permitido el avance de la humanidad, gracias al aporte por parte de aquella de materias primas que se han sabido aprovechar. Por otro lado, la ejecución de túneles ha permitido agilizar el desarrollo de las comunicaciones y las ciudades, al contribuir a la mejora de las conexiones terrestres, consiguiendo unas vías de mejor calidad y más rápidas.

En cualquier ámbito laboral es importante garantizar la seguridad y salud de todos los operarios, pero el tipo de trabajos anteriormente mencionados conlleva unas características y peculiaridades especiales que han de tenerse en cuenta en cuenta. Algunas de ellas están precisamente ligadas a las condiciones de desarrollo de los trabajos, como por ejemplo puede ser la falta de ventilación natural en el avance de labores. Esta circunstancia hace necesario forzar el ingreso de aire en las mismas, ya sea para garantizar los caudales mínimos requeridos por parte de los trabajadores, garantizar temperaturas compatibles con la actividad o, en una vertiente más ligada a la temática abordada en el presente trabajo, la dilución de humos. En este sentido, cabría distinguir entre los originados como consecuencia de motores térmicos, o la asociada a las voladuras, cuestión analizada en el presente trabajo a través de la consideración de la incidencia que las modificaciones en el ámbito normativo han conllevado de cara a la determinación de los requisitos mínimos exigibles.

La Orden TEC/1146/2018, por la que se aprobó la I.T.C. 04.7.06 y que modificó la I.T.C. 05.0.02, engloba un conjunto de medidas que garantizan la seguridad y la salud de los trabajadores frente a peligros derivados de las condiciones de trabajo con respecto a la presencia de gases tóxicos en la atmósfera, derivados del desarrollo de los trabajos [1].

El Real Decreto 863/1985, 2 de abril, aprobó el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, en el que se establecen unas reglas mínimas de seguridad aplicables en la minería y cualquiera de sus variantes siempre que sean necesarios la aplicación de la técnica minera o el uso de explosivos [2].

A la hora de realizar un trabajo, han de garantizarse que se cumplen los diferentes artículos para cumplir con los requisitos de seguridad de su equipo. Es importante igualmente que la legislación anteriormente mencionada, específica, no es la única que habrá de observarse, ya que igualmente se estará sujeto al cumplimiento de las normativas extensivas a otros ámbitos de trabajo, no exclusivamente mineros, tales como la Ley de Prevención de Riesgos Laborales [3].

2. OBJETIVO Y ALCANCE

Al dimensionar los requisitos de ventilación de una determinada obra o labor subterránea, deben tenerse en cuenta tanto las características del método de ejecución, como aspectos técnicos tales como la plantilla presente en dicha ejecución, o los equipos que de forma simultánea operen en la misma. Este análisis de requisitos simultáneos permitirá plantear escenarios que podrán presentarse a lo largo de la ejecución de la labor, debiendo ser el mayor de los requisitos de caudal el que finalmente se seleccione para el dimensionamiento del equipo o los equipos destinados a garantizar una adecuada ventilación.

Como se ha señalado, la sistemática de ejecución es fundamental, ya que los requisitos asociados a alternativas como el avance mecánico, ya sea a plena sección o mediante ataque puntual, diferirán sustancialmente a los que deberán satisfacerse si se recurre a la metodología convencional. De esta manera, al realizar un túnel o galería mediante la aplicación de la metodología de perforación y voladura, en la detonación de los explosivos se desprenden diversos gases que pueden resultar perjudiciales para la salud, siendo algunos de ellos asfixiantes o tóxicos, y pudiendo por ello resultar mortíferos en función de la concentración presente en la atmósfera.

En este sentido, y para conseguir que la exposición a estos gases no repercuta sobre la salud de los trabajadores, se debe conseguir un ambiente favorable en el que los contenidos existentes de gases producidos por los explosivos no sobrepasen ciertos valores límite, que vendrán condicionados por las características de la especie química considerada.

La forma de reducir la concentración de dichos gases es mediante una adecuada ventilación. La ventilación de un túnel o una galería minera por lo general suele llevar asociados notables consumos energéticos, por lo que un cálculo adecuado de las necesidades asociadas a un proyecto concreto resulta interesante en la búsqueda de optimización en este sentido, pero sin perder de vista en ningún momento la garantía del que sin duda debe considerarse como aspecto fundamental a la hora de llevar a cabo el dimensionamiento de dichos equipos: el cumplimiento de los requisitos de seguridad y salud de los trabajadores, que asegure el bienestar de los operarios.

Los explosivos son mezclas de sustancias combustibles y oxidantes que, a través de una adecuada iniciación, se transformarán de forma súbita en un gran volumen de gases, a grandes presiones y temperaturas. La cantidad y calidad de dichos gases dependerá del tipo y características del explosivo o explosivos utilizados en las labores de voladura, circunstancia íntimamente ligada con aspectos tales como el quimismo de las mezclas empleadas, o el balance de oxígeno, que no únicamente podrá condicionar la potencia, sino también la calidad de los humos producidos. Las concentraciones admisibles de estos gases han ido modificándose con el tiempo, estableciéndose por lo general marcos de exigencia crecientes y una mayor categorización en base a las especies químicas derivadas de la detonación. En la actualidad, estas especies y límites vienen dadas en la orden TEC/1146/2018, constituyendo esta la última en modificar los valores admisibles de estos gases. Como ya se ha mencionado, la forma de reducir la concentración de los

gases es a través de la ventilación, pero dada la variación de los valores permitidos a lo largo del tiempo, consecuentemente los requisitos de caudal han ido experimentando modificaciones. El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es analizar la variación en los requisitos de ventilación asociados al cumplimiento de los requisitos asociados a los parámetros de la nueva normativa, analizando diferentes situaciones.

Para ello, se llevará a cabo una investigación inicial destinada a, en base a los resultados derivados de diversas publicaciones, caracterizar las especies químicas y volúmenes obtenidos a partir de la detonación de diferentes tipologías de explosivos. En base a dicho trabajo, se adoptarán unos valores considerados como representativos, que constituirán la base a partir de la cual realizar posteriores determinaciones. Tras el desarrollo de esa búsqueda inicial, se seleccionarán dos escenarios diferentes, que pueden resultar ilustrativos de las condiciones de trabajo en emplazamientos confinados, tales como un túnel y una galería minera. Por otro lado, también se estudiará como afectarán a los parámetros de ventilación el tipo de explosivo empleado.

Debe de tenerse en cuenta que únicamente se obtendrán los valores teóricos de caudal, sobrepresión y potencia, no llevándose a cabo la selección del ventilador ni se presupuestará la instalación, quedando dichos aspectos fuera del alcance del presente T.F.G., que se centrará fundamentalmente en analizar la incidencia en los requisitos de caudal del cambio normativo experimentando en cuanto a las limitaciones de concentraciones admisibles de gases nocivos derivados de las voladuras, para periodos de trabajo de ocho horas, se refiere.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. LA VENTILACIÓN EN EJECUCIÓN

Como ya se ha mencionado con anterioridad, en espacios de trabajo como pueden ser túneles y galerías es necesario mantener unas condiciones ambientales óptimas, que se traduzcan en una atmósfera respirable, no tóxica. Esta garantía podrá implicar además el alcanzar una adecuada temperatura de confort para el desarrollo de las labores, la mejora de la visibilidad, o por ejemplo la reducción de otros agentes que puedan resultar nocivos para la salud del operario o peligrosos, como por ejemplo pueda ser la desorción y concentración en la atmósfera de determinados gases procedentes de las formaciones, o el polvo derivado de la aplicación de determinadas formas de avance, como pueda ser el mecanizado. Este hecho obliga a renovar el aire para impedir que los gases y humos alcancen unas concentraciones límite definidas por la normativa.

Como se ha mencionado, durante la ejecución de un túnel no solamente se han de tener en cuenta los efectos producidos por la acción de los explosivos en la producción de gases y humos. Además, ha de considerarse la producción de humo y gases por parte de la maquinaria que se utiliza para las labores como carga, transporte o perforación, que en porcentaje variable podrá ser diésel. Estos motores de combustión producen emisiones tales como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, aldehídos, como el benceno y el formaldehído, hidrocarburos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y hollín. La presencia de estas emisiones no conllevan un peligro inminente en el exterior. Sin embargo, acumulados en la atmósfera de un túnel, pueden suponer un gran peligro para el personal que opere en el mismo.[4]

Además, gracias a la ventilación, que se usa para reducir la concentración de los gases, se va a conseguir mantener la zona de trabajo a una temperatura apropiada para el desarrollo de la actividad. Esta temperatura no excederá de los 33°C.[5]



Ilustración 3.1: Frontal cargadora de perfil bajo (Fuente: Pixabay)

Dependiendo de la fase de la vida del túnel en la que se encuentre, pudiendo distinguir entre las etapas de funcionamiento y de explotación, se deberá garantizar una ventilación con cierto nivel de rendimiento. Debido a la mayor emisión de contaminantes durante la construcción se requerirá un caudal de ventilación superior, en su mayoría, en la zona del frente de avance, ya que además de ser donde se forman gran parte de estos gases, es en sus proximidades donde se encuentra el personal durante largos períodos de tiempo de su jornada laboral.

Durante el período operativo de un túnel, la ventilación quedará instalada de manera fija, sin haber variaciones en los requerimientos de ventilación de servicio, en tanto no haya variaciones sustanciales en los parámetros para los cuales ésta fuese dimensionada (pudiéndose considerar aspectos tales como la intensidad y tipología vehicular, emisiones individuales asociadas, etc). Sin embargo, durante la etapa de ejecución, la ventilación deberá ir adaptándose a los cambios que se experimenten. Los cambios en los requerimientos de ventilación durante la fase de ejecución pueden variar incluso durante la misma jornada, en función de la actividad que en un momento dado pueda estar desarrollándose (por ejemplo, cuando se necesite extraer los gases producidos por una voladura). Además, según vaya avanzando el frente, han de prolongarse los conductos de ventilación mediante la conexión en serie de más tramos de tuberías.



Ilustración 3.2: Ventilación longitudinal de un túnel durante el período operativo. (Fuente: Pixabay)

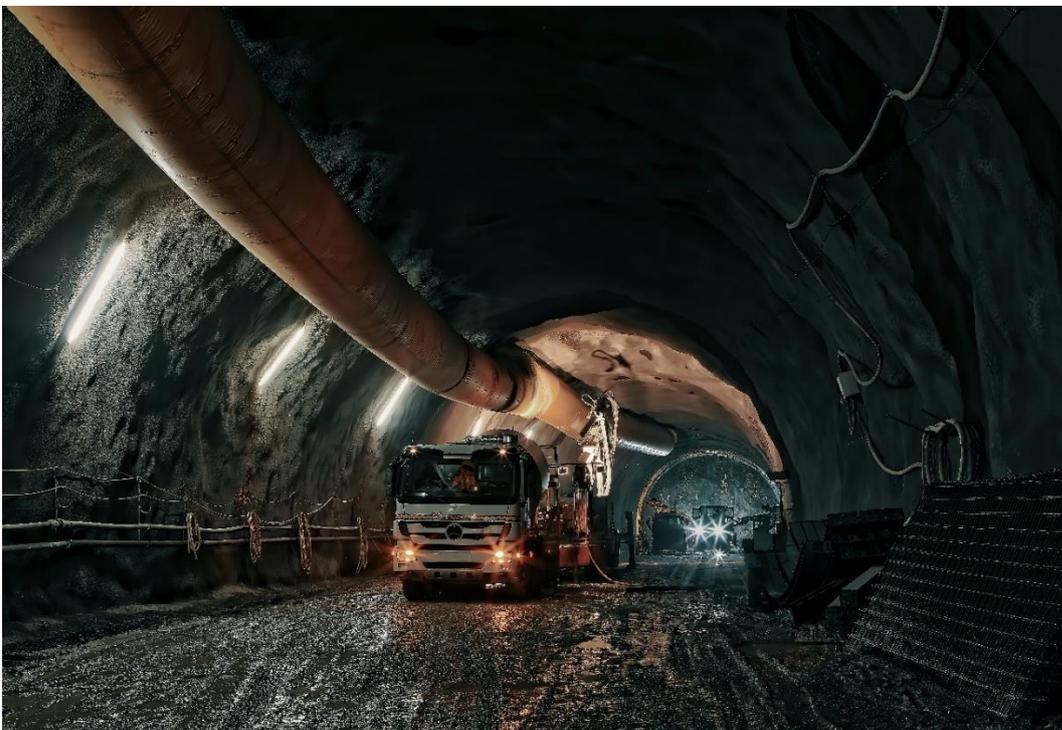


Ilustración 3.3: Tubería de ventilación durante el avance de una galería. (Fuente: Pixabay)

En las etapas de vida del túnel anteriormente mencionadas, también la instalación varía. Durante la ejecución, solamente existe una entrada a la labor, a través del propio emboquille. Así, la forma más habitual es conseguir una ventilación de aire desde la entrada de la labor hacia el frente de trabajo se lleva a cabo mediante un sistema formado por tuberías y ventiladores. Este sistema, se puede considerar soplante, si se sopla el aire limpio desde el exterior hacia el interior a lo largo de la tubería, provocando la salida del aire contaminado, o aspirante, si los ventiladores extraen el aire contaminado desde el frente al exterior a través de dicho conducto. De esta manera, a través del establecimiento de un ducto artificial a través del cual el aire accederá o será evacuado, se consigue establecer un circuito con puntos de ingreso y salida, característica de la que el túnel o la labor, por hallarse en fase de ejecución, carece.

3.2. LA METODOLOGÍAS DE AVANCES EN TÚNELES Y GALERÍAS. METODOLOGÍA CONVENCIONAL.

Las diferentes metodologías conocidas para el avance de túneles se pueden englobar en la excavación por minadores, por topes y escudos y por perforación y voladura.

-Los minadores o rozadoras (Figura 3.4.) son máquinas de ataque puntual que atacan a la roca puntualmente mediante una cabeza giratoria que se encarga de rozarla. El material que se fragmenta es gestionado por un sistema de recogida que lo conduce desde el frente hacia la parte trasera de la máquina con la finalidad de que no se acumule en el frente y facilitar su desalojo. El brazo del equipo, que puede ser fijo o articulado, da soporte a la cabeza, yendo ambos montados sobre el chasis.



Ilustración 3.4: Rozadora (Fuente: Pixabay)

-Por otro lado, existen las máquinas destinadas a la excavación del túnel a plena sección, en función de la resistencia de la roca pueden identificarse como tuneladoras (Figura 3.5), ya sean topes o escudos. Los topes están diseñados para rocas medias y duras, no requiriendo a priori despliegue de soporte inicial. Los escudos, por su parte, se utilizan en rocas blandas y terrenos inestables o con problemas de agua, lo que implica que requieran de la colocación de sostenimiento de dovelas rápidamente. Los topes presentan en una cabeza giratoria que contiene varios discos cortadores, estando accionada por motores eléctricos. El empuje se ejercerá sobre los hastiales mediante grippers laterales. Los escudos avanzan de forma similar, pero en este caso el empuje que se ejerce es sobre el sostenimiento establecido en base a la colocación de anillos de

dovelas constituidos por segmentos de hormigón, ya que tratándose de materiales poco competentes no soportarían el esfuerzo asociado al empuje de los grippers, permitiendo además dichos segmentos actuar como sostenimiento.



Ilustración 3.5: Tuneladora

A la hora de escoger entre estos métodos hay que tener en cuenta las ventajas de cada uno. Por ejemplo, entre minadores o topos y escudos, si se necesita flexibilidad, maniobrabilidad, se precisa de un espacio reducido de montaje, menor coste, un mantenimiento más accesible y una ventilación más rápida, lo adecuado sería escoger minadores.

Los topos y escudos podría ser una buena opción debido a su gran rendimiento, entre 3 y 6 m/hora, pero son sus limitaciones las que reducen notablemente sus campos de aplicación, por ejemplo, la sección debe ser circular, el radio de curvatura de unos 300 m, son máquinas que requieren gran inversión y plazos de transporte y montaje, y ocupan un gran espacio para poder operar con ellas. Si cumple con las condiciones pedidas son muy interesantes en largos túneles. [5]

-Por último, está la forma de avance que se considerará en este TFG. Se trata del avance por perforación y voladura. Es una técnica muy utilizada debido a sus grandes ventajas, como su versatilidad, la posibilidad de asumir secciones cambiantes, la adaptabilidad a diversas litologías, la baja inversión inicial y la fácil movilidad de los equipos entre otras. Su ciclo se puede dividir en fases:

1. Replanteo y Perforación de barrenos: se procede a ejecutar los taladros que alojarán el explosivo conforme al diseño de un esquema de perforación que se ajuste a las características del macizo, y se adecúe a la sección.

2. Carga: Se cargarán los explosivos y se llevará a cabo la conexión de los accesorios, para seguidamente, tras el correspondiente desalojo, las comprobaciones y la emisión de una señal acústica, se proceda al disparo de la voladura.
3. Voladura: Tras verificarse el disparo, dado el aporte energético trasladado a los explosivos por parte de los detonadores, se producirá la fragmentación y proyección de la roca.
4. Ventilación: Renovación del aire para llevar a cabo la dilución del tapón de humos.
5. Saneo y bulonado: Esta etapa tiene por fin eliminar el riesgo de desprendimiento durante las labores.
6. Desescombro: Limpieza del frente para continuar con el siguiente ciclo.
7. Gunitado: Para evitar desprendimientos.

Conviene señalar que, en este caso concreto, se han considerado en las labores de sostenimiento la aplicación de dos técnicas concretas, las de bulonado y gunitado, pero que podrían implicar la aplicación de otras sistemáticas, en función de las necesidades particulares asociadas al tramo concreto de ejecución que se considere. Las etapas anteriormente señaladas se recogen en la ilustración 3.6.

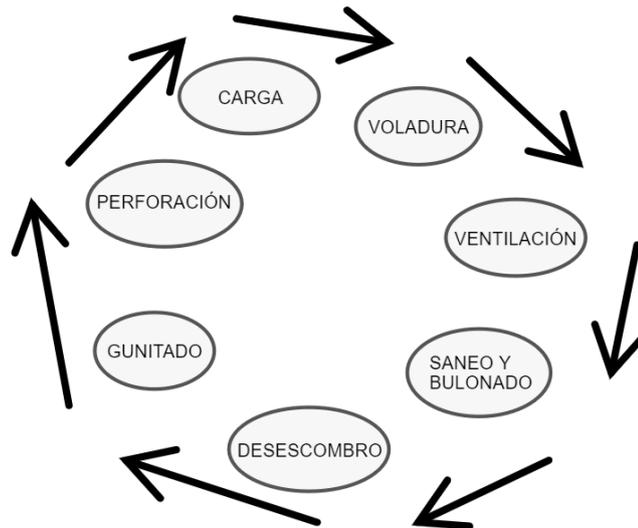


Ilustración 3.6: Fases del avance por perforación y voladura. (Fuente: *Elaboración propia*)

Comparando el método de avance mediante minadores con el de perforación y voladura, el primero de ellos admite una mecanización mayor, un perfilado más exacto, la roca remanente no es agrietada como con los explosivos, se caracteriza además por la ausencia de vibraciones y menores necesidades de sostenimiento. A pesar de eso, son grandes las ventajas de los explosivos, asociadas fundamentalmente a la versatilidad que ofrecen ante macizos de condiciones cambiantes o en el caso de trabajar con rocas altamente abrasivas. A estos aspectos, además han de sumarse los grandes avances tecnológicos enfocados a la mejora de la eficiencia, la seguridad en su manejo, y la reducción de efectos adversos de las voladuras tales como vibraciones, onda aérea o

proyecciones, por lo que el avance mediante metodología convencional sigue teniendo un amplísimo campo de aplicación.

3.2.1. Geometría del frente de avance en la metodología convencional.

Tras considerar las principales características y ventajas de la metodología convencional, y con anterioridad al apartado dedicado a la caracterización de los explosivos, es conveniente considerar las distintas partes en base a las cuales se va a dividir el frente, debiendo adecuarse el esquema de perforación a la sección que se busca lograr, y a las características del macizo rocoso. En este sentido, la figura siguiente recoge las principales zonas a considerar, que serán descritas a continuación.

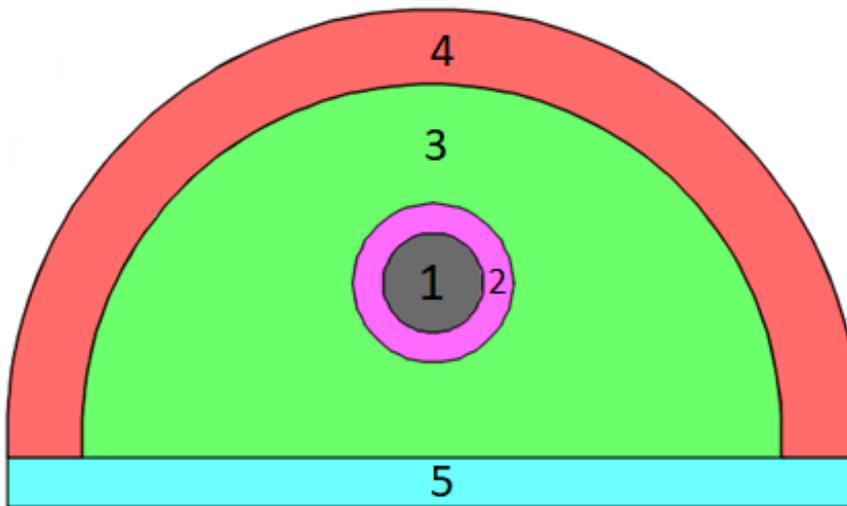


Ilustración 3.7: Zonas de la Voladura

1. Cuele: Habitualmente se encuentra en la zona central del frente, aunque puede haber excepciones. Está constituido por un conjunto de barrenos que pueden ir cargados de explosivo o pueden ir vacíos. El objetivo de estos barrenos vacíos es facilitar la rotura de la roca consiguiendo una cara libre.
2. Contracuele: Se trata de un conjunto de barrenos que rodean al cuele. El objetivo del contracuele es ensanchar el hueco creado por el cuele, y así, crear una cara libre para facilitar la fractura de la destroza. En este caso todos los barrenos llevan explosivo. Presentan un consumo específico menor que el cuele.
3. Destroza: Se trata del área comprendida entre el contracuele y el contorno, en cuanto a volumen de arranque, se trata de la parte más importante del frente. Tiene menores consumos específicos de explosivo. El esquema utilizado en la destroza, dependerá de varios factores: tipo de roca, diaclasado, diámetro del barreno, profundidad de avance, tipo de explosivo, secuencia de encendido y granulometría deseada.

4. **Contorno:** Está formado por una franja que delimitará la sección del túnel o galería. Se puede diferenciar en dos partes principales, la corona, que es la parte superior y los hastiales que se refieren a los laterales. Los barrenos del contorno son siempre angulados, esto se debe a que además de arrancar piedra, tienen que dejar el perfil del túnel o galería sin que se vaya reduciendo conforme se avance.

5. **Zapateras:** Está formado por un conjunto de barrenos que se ubican en la parte inferior del frente. En general, son los últimos en dispararse, además, están sobrecargados, esto se debe a que precisan de una energía adicional para elevar la piedra, enfrentándose a la gravedad. Al ser habitualmente la última zona en dispararse, no solamente tiene que elevar la piedra que contiene, sino que también tiene que elevar el escombros generado previamente en el resto de zonas.

3.3. LOS EXPLOSIVOS

Los explosivos están compuestos por una mezcla de sustancias, unas combustibles y otras oxidantes. En caso de que en dicha mezcla se incorporen sustancias intrínsecamente explosivas como sensibilizadores, el producto final se denominará “explosivo convencional”. Como norma general, aquellas mezclas explosivas que carezcan en su composición de sustancias que individualmente resulten explosivas se designan como “agentes explosivos”. Debidamente iniciadas, tanto los explosivos convencionales como los agentes explosivos reaccionan, generando una reacción exotérmica en la que se produce de forma súbita una cantidad de gases a altas temperaturas que ocupan un volumen muy superior al del propio explosivo. Dicha liberación súbita, unido al trabajo confinado del explosivo, propicia su empleo como agente rompedor y propulsor [5].

Los explosivos suponen una forma muy eficiente de generación súbita de energía en un volumen muy reducido, de ahí su alta rentabilidad.

Dentro de sus propiedades, se puede encontrar:

- **Potencia y energía:** Es una de las propiedades más importante ya que dice la cantidad de energía disponible para producir los efectos mecánicos. Es decir, condiciona la capacidad que el explosivo presenta para la fragmentación y proyección de los materiales.
- **Poder rompedor:** Esta característica indica la capacidad del explosivo de quebrantar la roca gracias, solamente, a la onda de detonación, sin incluir la presión de los gases.
- **Velocidad de detonación:** Se trata de la velocidad a la que se transporta la onda a través del explosivo diferenciándose deflagrantes $v < 2000$ m/s y detonantes, $v > 2000$ m/s. La primera de las modalidades es la de uso más extendido tanto en minería como en obra civil, quedando la segunda variante restringida a aplicaciones concretas en la extracción de roca ornamental (a través de

- alternativas como el método finlandés) o, en determinadas circunstancias, la ejecución de microvoladuras.
- Densidad: En la mayoría de los explosivos (pudiendo presentar como excepción el ANFO de baja densidad) está comprendida entre 0.8 y 1.6g/cm³ . En este sentido es importante tener en cuenta que determinadas variantes, como por ejemplo los ANFOs, podrán ver condicionada la posibilidad de alcanzar un resultado favorable de la voladura por la densidad que el explosivo pueda alcanzar, existiendo un valor máximo a partir del cual el explosivo podrá verse inertizado (densidad de muerte) debido a, por ejemplo, factores como la inyección de gases procedentes de la detonación de barrenos previos en la secuencia de disparo, a través de vías preferentes como puedan ser fisuras ya existentes en el macizo.
 - Presión de detonación: Dependiente de la densidad y de la velocidad de detonación.
 - Estabilidad: Es la capacidad del explosivo de mantener sus propiedades constantes frente al paso del tiempo, siempre que esté almacenado en condiciones adecuadas.
 - Resistencia al agua: Capacidad del explosivo de no perder sus propiedades explosivas al entrar en contacto con el agua.
 - Sensibilidad: Se refiere a la cantidad de energía que hay que aplicar a un explosivo para su iniciación. Podrán distinguirse distintos tipos de sensibilidad: al detonador, a la onda de choque, a la llama, al calor, a la electricidad, al rozamiento y al choque.
 - Transmisión de la detonación: Propiedad en la que al iniciarse un cartucho se le transmite la onda explosiva al siguiente cartucho sin que ambos estén en contacto, designándose igualmente como transmisión por simpatía.
 - Resistencias a las bajas temperaturas: Ciertos explosivos con nitroglicerina tienden a congelarse al bajar de los 8°C. Para solventar esta situación se añade nitroglicol (perteneciente igualmente a la familia de los ésteres nítricos), y así su punto de congelación se reducirá hasta unos -20°C.
 - Humos: Son el conjunto de todos los gases que se forman durante la reacción de la detonación del explosivo. Dependiendo del tipo de explosivo, podrán por ejemplo generarse vapor de agua, , dióxido de carbono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno [5].

Dependiendo de su aplicación, los explosivos pueden diferenciarse en primarios y secundarios:

- Explosivos primarios: Debido a su alta energía y sensibilidad son los que se usan como iniciadores para detonar los explosivos secundarios. Se utilizan en detonadores y en multiplicadores, pudiendo presentarse como ejemplos con aplicación actual la pentrita, hexolita (mezcla de pentrita y exógeno), nitruro de plomo y estífnato de plomo.
- Explosivos secundarios: Son los que realizan el arranque de las rocas. A pesar de que son menos sensibles, lo que incrementa el grado de seguridad en la

realización de la voladura, llevan a cabo un mayor trabajo útil. Formados por sustancias que pueden ser intrínsecamente explosivas o no, pudiendo de esta manera, y como ya se mencionó anteriormente, distinguirse en agentes explosivos y explosivos convencionales.

- Agentes explosivos: No suelen llevar compuestos intrínsecamente explosivos, como sucede, por ejemplo, en los casos del ANFO, ALANFO, Hidrogeles, Emulsiones, ANFO pesado y mezclas comerciales de ANFO-Hidrogel.
- Explosivos convencionales: Con el objetivo de sensibilizar la mezcla, estos incluyen en su composición sustancias intrínsecamente explosivas, fundamentalmente ésteres nítricos, y dando lugar a las dinamitas, ya sean pulverulentas o gelatinosas.

Por otra parte, los explosivos pueden ser clasificados en diferentes categorías, en función del volumen de humos nocivos que se producen como reacción de la detonación, se clasifica en:

- Categoría A: Una producción de humos menor de 2,27 litros de humos nocivos por cada 100 gramos de explosivo detonado. En este grupo se encuentra la dinamita como el Riodin M de Maxam [6].
- Categoría B: Una cantidad de humos comprendida entre 2,27 y 4,67 litros por cada 100 gramos de explosivo detonado. En esta categoría se encuentra el ANFO, como el PAX 8 de EPC [7].
- Categoría C: Se trata de la peor categoría en cuanto a producción de humos, produciendo más de 4,67 litros de humos nocivos por cada 100 gramos de explosivo.

Con los avances tecnológicos en la fabricación de explosivos, en algunos se ha conseguido reducir los humos nocivos producidos en ciertos explosivos, posibilitando un paso a una categoría mejor.

Las variantes actuales, sí son dotadas en su composición de un agente inhibidor, o de un par iónico a partir del cual el mismo pueda generarse, podrán aplicarse en contextos de labores con riesgo de atmósferas explosivas, conforme a las posibles restricciones que su categorización impliquen. Constituyen estas variantes los denominados “explosivos de seguridad”.

3.4. HUMOS

En el desarrollo de una galería o túnel es muy importante mantener controlados los humos. Como ya se ha comentado, en una explotación a cielo abierto los humos se disipan rápidamente de forma natural. Por ello, los humos que se forman en una labor subterránea cobran mucha más importancia que en labores a cielo abierto.

Para el estudio de los humos hay que tener en cuenta dos situaciones: fase de construcción y fase de funcionamiento. Durante la fase de funcionamiento de un túnel

la gran parte de los humos y gases son los formados por los vehículos dotados de motores de combustión interna que lo atraviesan. Sin embargo, durante la fase de ejecución, existen humos provenientes de las labores de ejecución del túnel. Además, antes del calado del túnel o labor no hay ventilación natural, lo que favorece a la existencia de una mayor concentración de humos al dificultarse la difusión de los mismos [8].

Esas labores de ejecución son las que hacen posible el avance en el túnel o galería, formándose los humos, en gran parte, en el frente de trabajo.

Resumiendo, en las labores de construcción de un túnel los humos son formados por los equipos de transporte destinados al desalojo y la maquinaria implicada en las tareas de carga, la perforación (en función de las características de los equipos empleados), y los humos generados como consecuencia de la voladura. [8]

El conjunto de productos resultantes de una voladura, forman los humos. Estos humos, dependiendo de su origen pueden clasificarse en:

- Gases derivados de la reacción química.
- Vapor de agua.

En cuanto a los gases generados, dependerá de varios factores, como la formulación de la reacción, o el confinamiento al que esté sometido el explosivo, que podrán condicionar el balance de oxígeno.

Para fijar unas limitaciones, los gases producidos como consecuencia de la detonación del explosivo han de clasificarse en función de las posibles interacciones negativas con el organismo, pudiendo valorar de esta manera, su peligrosidad. Las especies químicas que pueden encontrarse tras haberse producido una voladura son, esencialmente, el monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de azufre, monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno.

- Monóxido de carbono: Gas incoloro e inodoro, que al respirarlo se une a la hemoglobina en la sangre impidiendo el transporte de oxígeno lo que puede provocar dolores de cabeza, mareos, náuseas e incluso la muerte.

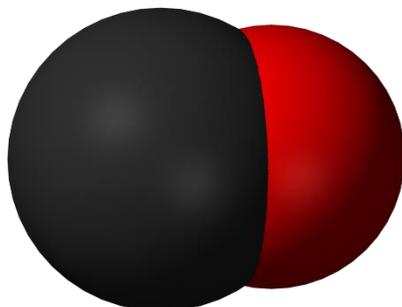


Ilustración 3.8: Estructura del monóxido de carbono. *En color negro el carbono, en color rojo el oxígeno. Imagen libre de derechos. Fuente: commons.wikimedia.org*

- Dióxido de carbono: No es tóxico como tal en bajas proporciones, sin embargo, en altas concentraciones puede ser un gas asfixiante, de ahí que sea del que más concentración se admite.

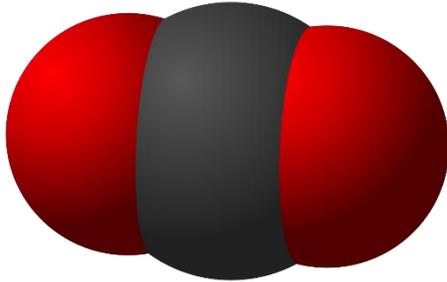


Ilustración 3.9: Estructura del dióxido de carbono. *En color negro el carbono, en color rojo el oxígeno. Imagen libre de derechos. Fuente: commons.wikimedia.org*

- El monóxido de nitrógeno es incoloro e inodoro, el dióxido de nitrógeno tiene un color rojizo. Puede afectar a las vías respiratorias y agravar enfermedades preexistentes, tales como el asma, y afectando a la salud pulmonar en general.

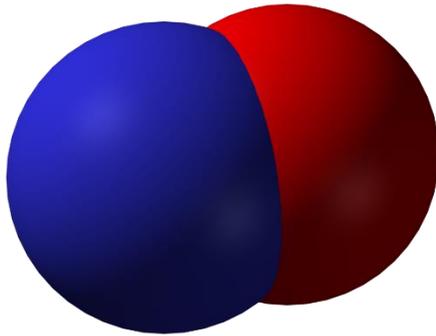


Ilustración 3.10: Estructura del monóxido de nitrógeno. *En color negro el nitrógeno, en color rojo el oxígeno. Imagen libre de derechos. Fuente: commons.wikimedia.org*

- El dióxido de nitrógeno posee un color marrón amarillento tóxico para la salud, irritante y precursor de la formación de nitrato. Principalmente, afecta al sistema respiratorio.

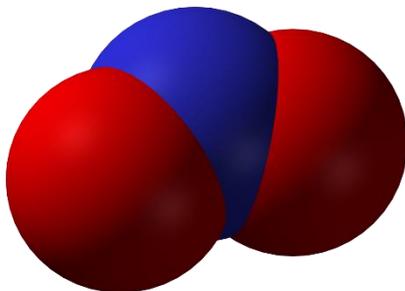


Ilustración 3.11: Estructura del dióxido de nitrógeno. *En color negro el nitrógeno, en color rojo el oxígeno. Imagen libre de derechos. Fuente: commons.wikimedia.org*

Durante el desarrollo de este T.F.G. los gases que se van a estudiar son:

- Gases para tener en cuenta para el dimensionamiento del caudal, generados por la detonación de explosivos:
 - o Monóxido de carbono (CO).
 - o Óxidos de nitrógeno (NO + NO₂) (NO_x). La consideración de éstos, ya sea en conjunto o por separado, vendrá condicionada por la normativa que se aplique a los cálculos.
 - o Dióxido de carbono (CO₂).
- Gases secundarios que no condicionarán el dimensionamiento del caudal, que se pueden estar presentes en las labores:
 - o Sulfuro de hidrógeno (SH₂).
 - o Dióxido de azufre (SO₂).
 - o Hidrógeno (H₂).

A la hora de establecer los umbrales admisibles, han de considerarse dos enfoques sustancialmente diferentes. Por un lado, se diferenciarán concentraciones máximas admisibles durante la jornada de 8 horas, pudiendo igualmente establecerse limitaciones, para periodos de tiempo más breve, siendo este último menos restrictivo. Esto se debe a que los gases acceden al cuerpo a través de los pulmones, y de los pulmones pasan a la sangre haciendo imposible ciertos procesos biológicos, pudiendo interferir con el transporte del oxígeno por el cuerpo mediante la sangre. Este proceso continúa si no se detiene la exposición al gas, es por ello que una persona se pueda exponer a una concentración más alta si se trata de un período corto de tiempo. Si las concentraciones sobrepasan las máximas admisibles, será obligatorio desalojar la zona por los riesgos que puede conllevar, acarreando los efectos recogidos en las siguientes tablas:

Tabla 3.1: Efectos del CO [9]

CO	EFFECTOS
50 ppm	Tolerable
100-500 ppm	Dolores de cabeza y vómitos
1000 ppm	Síntomas graves en 30 minutos
100000 ppm	Muerte en minutos

Tabla 3.2: Efectos del NO₂ [9]

NO ₂	EFFECTOS
60 ppm	Irritación de garganta
100-150 ppm	Tos y síntomas graves en 30 minutos
250 ppm	Muerte en minutos

Tabla 3.3: Efectos del CO₂ [9]

CO ₂	EFFECTOS
3000 ppm	Respiración acelerada
5000 ppm	Respiración costosa
8000 ppm	Dolores y posibilidad de muerte
10000 ppm	Agotamiento respiratorio
15000 ppm	Concentración letal
25000 ppm	Perdida rápida de conciencia

Tabla 3.4: Efectos del NO [9]

NO	EFFECTOS
25 ppm	Cansancio y mareos
100 ppm	Síntomas graves en 30 minutos
>100 ppm	Muerte

Las medidas para reducir la exposición a gases tóxicos se fundamentan en mantener a los trabajadores lejos de la voladura y en ventilar el frente para lograr una atmósfera respirable previa a la reincorporación de aquellos a la labor, y pudiendo así continuar con las labores en condiciones de seguridad.

3.5. Legislaciones en materia de calidad del aire en túneles en ejecución a nivel internacional.

A la hora de analizar los reglamentos de calidad del aire en diferentes países, el grado de definición es diverso, no convergente en muchos casos, e incluso pueden localizarse normativas poco claras o inexistentes en el caso de países en vías de desarrollo.

Muchos países no tienen una normativa de elaboración propia sobre la ventilación y control de la calidad del aire. En este sentido, pueden presentarse algunos ejemplos, como Costa Rica, Puerto Rico, República Dominicana, Venezuela y Perú, que se pueden apoyar en capítulos creados por la NFPA (National Fire Protection Association), una organización surgida en Estados Unidos para elaborar leyes relativas al fuego y los humos y también controlar el cumplimiento de los requisitos establecidos por ellos mismos. La Tabla 3.13 recoge un resumen de los valores máximos admisibles para periodos de exposición de 8 horas de trabajo, conforme a diversos documentos normativos [10],[11],[12],[13],[14],[15].

Tabla 3.5: Valores máximos de exposición a gases tóxicos durante 8 horas
Fuente: Elaboración propia a partir de normativas vigentes en diferentes países

	CO	CO2	SO2	H2S	NO	NO ₂
ESPAÑA	25	5000	0.5	5	25	3
PERÚ	25	5000	-	10	-	-
COLOMBIA	50	5000	-	20	-	5
MÉXICO	50	5000	-	20	-	5
ARGENTINA	25	5000	-	10	25	3
FRANCIA	50	2500	-	-	25	3
ITALIA	50	2500	1	20	25	1

Como se puede observar, todos los países analizados presentan unos parámetros similares, dependiendo del gas tratado.

3.6. La legislación española.

La legislación española en materia de calidad del aire en túneles y galerías viene determinada por la instrucción técnica complementaria 04.7.06 “Control de gases tóxicos en la atmósfera de las actividades subterráneas”, aprobada por la orden TEC/1146/2018, la cual modifica además la instrucción técnica complementaria 05.0.02., “Especificaciones para minas subterráneas de carbón y labores con riesgo de explosión. Contenidos límites de metano en la corriente de aire” del Reglamento General de Normas básicas de Seguridad Minera (RGNBSM).

Es de alta importancia la modificación de la ITC 05.0.02, ya que en dicha actualización es donde se añade un apartado que trata de las Concentraciones límite de hidrógeno y de otros gases explosivos, que si bien no serían productos a considerar de una voladura, si han de tenerse en cuenta a la hora de plantear una adecuada ventilación en una labor potencialmente afectada por su presencia.

El objetivo de la ITC 04.7.06 es fijar unos valores límites ambientales con la finalidad de proteger a los trabajadores frente a las consecuencias que puede acarrear la exposición de gases ya mencionados.

Los riesgos de la formación de una atmósfera explosiva debido a la formación de gases se siguen rigiendo por su normativa e ITC específica.

Esta normativa diferencia unos valores límites de exposición diaria (VLA-ED) y los valores límites para exposición de corta duración (VLA-EC). Los valores límites admisibles representan unos valores a los que puede estar expuesto un trabajador a diario durante toda su vida laboral sin sufrir unos efectos adversos para la salud. Como ya se ha dicho, estos valores solamente se tendrán en cuenta para la exposición de los trabajadores, no se tendrán en cuenta para otros aspectos que pueden depender de la atmósfera como la existencia de incendios o de atmósferas explosivas[1].

En la Tabla 3.6. se pueden observar los valores límite admisibles de la orden del 13 de septiembre de 1985, no vigente en la actualidad, pero que se utilizará para las comparaciones de requisitos de ventilación de dicha orden con las limitaciones actuales, Orden TEC/1146/2018[2].

Tabla3.6: Valores Límite ambientales Orden de 13 de septiembre de 1985 *por la que se aprueban determinadas Instrucciones Técnicas Complementarias de los capítulos III y IV del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera [1]*

	VLA-ED (ppm)	VLA-EC (ppm)
CO	50	100
CO ₂	5.000	12.500
SO ₂	5	10
SH ₂	10	50
NO + NO ₂	10	25
H ₂	1000	10000

Tabla 1.7: Valores Límite ambientales Orden TEC/1146/2018. *Fuente: Orden TEC/1146/2018 [2]*

	VLA-ED (ppm)	VLA-EC (ppm)
CO	25	100
CO ₂	5.000	12.500
SO ₂	0,5	1
SH ₂	5	10
NO	25	30
NO ₂	3	5

Los valores de los gases podrán ser corregidos en caso de ser necesario para condiciones de presión y temperaturas concretas.

Además, para la seguridad de los trabajadores en todas las áreas el oxígeno no descenderá del 19%.

En el cuarto apartado de la Orden TEC/1146/2018 se habla de las obligaciones del empresario en lo relativo a esta orden.

En primer lugar, se debe realizar un análisis de los riesgos para salud y seguridad de los trabajadores. Concretamente, el apartado trata sobre todas las medidas que hay que tomar en las actividades subterráneas, como el control de los lugares donde se producen las acumulaciones de gases, la ventilación, conocer los datos históricos sobre concentraciones. En caso de no existir se toman mediciones y conclusiones de los resultados del análisis de vigilancia y salud.

Después del análisis se deberá de asegurar que la emisión de gases tóxicos no hará que se superen los valores límite de concentración.

Además, se tendrá que encargar de que se lleven a cabo revisiones iniciales, periódicas y de control. En función de los resultados que arrojen estos controles, se tomarán las medidas oportunas. Por ejemplo, si los valores no son aceptables, se deberá cerrar la zona de trabajo hasta que se resuelva el problema y se obtengan unos resultados favorables. Una vez se obtengan resultados favorables, se limitará a realizar revisiones periódicas para comprobar que sigue siendo una zona de trabajo que no compromete la seguridad y salud de los trabajadores.

En el quinto apartado se trata sobre las mediciones de las concentraciones y establece los tipos de mediciones que se deberán realizar respecto a su forma de ejecutarse[2].

- Medición inicial y periódicas: Se deberá medir la exposición del trabajador mediante el muestreador que deberá realizar la medida en el mismo lugar desde donde el trabajador respira. Es importante tener en cuenta que es la medición inicial en la que hay que basarse para establecer el riesgo al que están sometidos los trabajadores.

Para determinar la exposición laboral para la jornada laboral (CEL), es decir 8 horas, se recurrirá a la expresión siguiente:

$$CEL = \frac{\sum c_i \times t_i}{\sum t_i} = \frac{c_1 \times t_1 + c_2 \times t_2 + c_3 \times t_3 + \dots + c_n \times t_n}{8} \quad (1)$$

Donde:

c_i = concentración del tóxico obtenida en cada periodo i homogéneo y representativo, en caso de no haber exposición $c=0$

t_i = duración de cada periodo i , normalmente 8 horas, si no se extrapolará a 8 horas

Así, a partir de la concentración y con los valores límite admisibles en 8 horas se obtendrá el límite de exposición de la sustancia (I), conforme a la expresión siguiente:

$$I = \frac{CEL}{VLA-ED} \quad (2)$$

Una vez calculado el índice, se irá a la Tabla 3.10 con el resultado y se buscará la periodicidad con la que se tomarán las mediciones:

Tabla 3.8: Mediciones a realizar en función del Índice de exposición obtenido
Fuente: Orden TEC/1146/2018

I obtenido	Medición de control	Medición Periódica
$I \leq 0,1$, al menos, tres jornadas diferentes	No es necesario	6 meses
$I \leq 0,25$, al menos, tres jornadas diferentes	Mensual	6 meses
$I < 1$, al menos, tres jornadas diferentes, y la media aritmética $\leq 0,5$.	Semanal	6 meses
$I < 1$, al menos, tres jornadas diferentes, y la media aritmética $> 0,5$.	Diaria	6 meses
	Se llevará a cabo un estudio e implantación de medidas de prevención específicas en función del origen del gas	
$I \geq 1$	Exposición inaceptable. Se debe corregir la situación.	

Es importante tener en cuenta que hay que realizar un número de medidas que sean representativas. Además, la concentración c_i podrá hacer sospechar que en ciertas mediciones se superan los valores límite para un período corto de tiempo, caso en el que se han de tomar las medidas oportunas.

- Mediciones de control: Su periodicidad viene fijada en la anterior tabla, las mediciones se realizarán durante un período de tiempo de 15 minutos en las condiciones más desfavorables de toda la jornada laboral.

Independientemente de las medidas de control, en caso de considerarse oportuno por parte de la dirección facultativa o el personal de prevención, se podrán realizar medidas, que se integrarán en el registro de mediciones y se dejará indicado el motivo de que se haya decidido tomar esas medidas [1].

En este apartado, también se establece la estrategia para realizar la metodología de medición, teniendo ésta en cuenta los trabajos en los que hay alta probabilidad de que se generen atmósferas nocivas, tales como el disparo de explosivos, uso de maquinaria, dilución de gases y ventilación.

Los equipos de medición han de ser acreditados de acuerdo con los criterios establecidos en la ITC 12.0.01, aprobada por la Orden ITC/1683/2007, del 29 de mayo, y modificaciones de esta. Asimismo, se llevarán a cabo las correspondientes comprobaciones y calibraciones que se establecen en el apartado 6 de la ITC 12.0.01.

En cuanto a vigilancia de la salud, es de gran importancia y obligatorio por parte del empresario que se realicen exámenes médicos a todos los trabajadores que puedan transitar por zonas con una exposición a gases tóxicos. Los exámenes médicos se realizarán cuando el trabajador sea nuevo, y posteriormente con una periodicidad para controlar que sigue teniendo un estado de salud correcto. Además, si se detecta algún daño de salud en algún trabajador, se examinará al resto de trabajadores que estén expuestos a la misma atmósfera o similar [2].

El empresario se encargará de que se revisen todas las medidas de prevención y protección que se hayan adoptado según se hayan detectado las alteraciones en la salud de los trabajadores.

Se ha de garantizar que todos los trabajadores estén formados en materia de los riesgos asociados a sus puestos de trabajo y, en esta Orden en concreto, a los riesgos derivados de la exposición a gases tóxicos. Así, han de tener conocimiento sobre los valores límite, medidas tomadas en la aplicación de la ITC, resultados de evaluaciones, controlar el correcto uso de los equipos de protección individual y dar un buen uso y mantenimiento a la maquinaria que puede generar gases tóxicos [2].

4. METODOLOGÍA Y MATERIALES

Una vez se han definido los condicionantes asociados al empleo de los explosivos en túneles y labores de interior, y aspectos ligados tanto a la caracterización de dichas mezclas, como a aspectos derivados de la normativa en relación con los gases producidos como consecuencia de las voladuras se va a presentar la metodología considerada para la determinación de los caudales asociados a la dilución del tapón de humos de las voladuras.

En el presente apartado, también se van a definir los diferentes supuestos adoptados en base a los cuales se desarrollarán los cálculos, los valores de producción de gases asfixiantes y tóxicos en función de la bibliografía consultada, y finalmente la herramienta de cálculo implementada mediante Excel.

4.1. METODOLOGÍA DE CÁLCULO. PARÁMETROS A CONSIDERAR.

El dimensionamiento de los requisitos de ventilación, requisito previo para la adecuada selección del equipo a disponer en el túnel o labor, pasa por un procedimiento destinado, en primer lugar, a la determinación del caudal de aire a satisfacer. Dicho caudal vendrá definido por la operación más demandante que vaya a desarrollarse en la labor. Partiendo de las premisas del presente T.F.G., centrado en el análisis de cómo el cambio en el marco normativo incide en los requisitos de ventilación asociados a la dilución del tapón de humos derivado de una voladura, será éste el criterio que se adopte para el cálculo, y que a posteriori, considerando las características aerodinámicas de la tubería, la propia labor (en el retorno del aire en el caso de una ventilación soplante) y las singularidades, permitirán determinar los requisitos de sobrepresión. Todo ello, y considerando los parámetros de rendimiento del ventilador, proporcionarán una orientación en términos de potencia.

En cualquier caso, y dada la naturaleza del presente T.F.G., se prestará especial atención a la determinación de los caudales requeridos para la dilución de cada una de las especies químicas nocivas presentes en la atmósfera tras haber acontecido la voladura. Dicho cálculo, exige conocer en primer lugar los volúmenes de gases no deseados producidos, que vendrán condicionados por el tipo de explosivo y la cantidad del mismo detonada. En base a dichos volúmenes, y estimando aquel en el que los gases se supondrían localizados tras la voladura, se determinará la concentración de cada especie. La consideración de los límites de concentración admisibles (que podrán diferir en función de la normativa considerada), y el tiempo disponible para la dilución, permitirá determinar el caudal. La formulación destinada a la obtención de dichos parámetros se recogerá en los siguientes apartados.

4.1.1. Volúmenes producidos

Como se ha mencionado con anterioridad, el explosivo en su detonación genera importantes volúmenes de gases, que revisten gran importancia en el mecanismo de rotura de la roca. La acción de los explosivos en las rocas se fundamenta en dos efectos:

- El primer efecto es el producido por la onda de detonación que se traslada a través de la roca, con efectos compresivos y tractivos. Esto condiciona la generación de una red de fisuras, que se verá intensificada por el rebote de la onda en el frente libre. En el caso de voladuras a cielo abierto, la existencia de un segundo frente libre asociado al talud favorece la fisuración, si bien en el caso de voladuras de avance en interior, el cuele, con sus limitaciones asociadas, ha de suplir la ausencia de ese segundo frente libre, mediante alternativas como por ejemplo el empleo de barrenos vacíos, o la generación de nuevas superficies libres de cara a la rotura y evacuación de los materiales de la destroza, una vez hayan sido proyectados los de las zonas del cuele y el contracuele.
- El segundo efecto es el que se crea por inyección de los gases en las fisuras generadas como consecuencia de la onda de choque, lo que además contribuye a la proyección y desplazamiento del escombros.

Sin embargo, en el estudio de este T.F.G., no se tendrán en cuenta los efectos mencionados, ya que el objetivo es el análisis de los gases nocivos para la salud de los trabajadores, ya sean tóxicos o asfixiantes.

El cálculo del volumen total de gases generados en la voladura se realizará multiplicando la masa del explosivo utilizado por la producción de humos por kilogramo de explosivo. Posteriormente, de ese volumen total de humos producidos, con las proporciones relativas a cada especie química que se desee evaluar (en base a datos que podrán ser proporcionados por el fabricante, o tal y como sucede en el presente estudio, obtenidos a partir de una revisión bibliográfica), se obtendrán los volúmenes de cada gas definido.

$$Volumen\ Producido(l) = masa(kg) \times \frac{volumen(l)}{masa(kg)} \quad (3)$$

Tras haberse determinado el volumen total de gases producidos, para obtener el volumen de gases nocivos se ha de estimar la parte proporcional, mediante los porcentajes ya proporcionados:

$$V_{gas} = Volumen\ producido \times proporción\ de\ gas(\%) \quad (4)$$

La proporción de cada gas, como ya se ha indicado, se obtendrá a partir de datos proporcionados por el fabricante, o como en el caso actual, a partir de la consideración de valores proporcionados por la literatura.

4.1.2. Concentraciones iniciales

El cálculo de las concentraciones iniciales es necesario para obtener una estimación de los gases presentes en el área de trabajo inmediatamente después de la voladura.

En el caso de los túneles o labores no ejecutados a sección completa, se han de estimar las concentraciones en dos fases, primero en la voladura del avance y posteriormente en la voladura de la destroza. En las galerías o labores ejecutadas a sección completa, la estimación se hace en una sola fase.

La concentración se define como volumen de cada especie química generada, dividido entre el volumen del tapón.

El tapón del túnel o galería (representado en verde en la figura 4.1) se define como el volumen comprendido entre el frente remanente tras la ejecución de la voladura y la boca soplante de la tubería de ventilación (representada en amarillo en la figura 4.1). Para calcular ese valor, se multiplica la longitud entre frente y boca de la tubería por la sección del túnel.

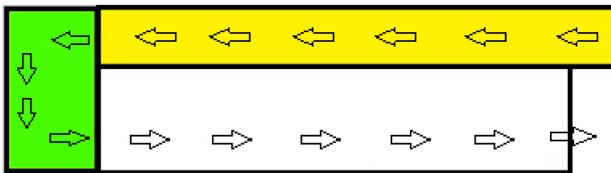


Ilustración 4.1: Esquema de ventilación soplante de un túnel. Fuente: elaboración propia.

La sección que se utilizará es la perteneciente a cada frente.

$$V_{Tapón} = Sección \times Longitud_{Tapón} \quad (5)$$

$$Longitud_{Tapón} = sección \times \sqrt{5} \quad (6)$$

Como ya se ha mencionado, una vez obtenidas las concentraciones y volumen total del frente del trabajo, se estima la concentración, que para hacer la comparativa con los niveles máximos permitidos, se expresará en ppm.

$$Concentración\ gas = \frac{V_{gas}}{V_{Tapón}} \quad (7)$$

Por último, en el caso de las voladuras que se han realizado mediante goma y ANFO, se han de sumar las concentraciones de los mismos gases producidos por los diferentes explosivos.

4.1.3. Concentraciones límite

Tal y como se ha expuesto en capítulos anteriores, existen unas concentraciones de gases a los que no se debe exponer a ningún trabajador. Con el paso de los años las normativas han ido actualizándose, volviéndose más restrictivas y exigiendo una ventilación más eficaz, asegurando así, la seguridad y salud de los trabajadores.

Las actualizaciones que se han sufrido pueden ser observadas en las siguientes tablas, partiendo de unas concentraciones menos restrictivas en la tabla 4.1 a las actuales, en la tabla 4.2, donde existen unas restricciones de concentración mayores.

Tabla 4.1: Valores Límite ambientales Orden de 13 de septiembre de 1985 *por la que se aprueban determinadas Instrucciones Técnicas Complementarias de los capítulos III y IV del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera*

	VLA-ED (ppm)	VLA-EC (ppm)
CO	50	100
CO ₂	5.000	12.500
SO ₂	5	10
SH ₂	10	50
NO + NO ₂	10	25
H ₂	1000	10000

Tabla 4.2: Valores Límite ambientales de la Orden TEC/1146/2018 *Fuente: Orden TEC/1146/2018*

	VLA-ED (ppm)	VLA-EC (ppm)
CO	25	100
CO ₂	5.000	12.500
SO ₂	0,5	1
SH ₂	5	10
NO	25	30
NO ₂	3	5

4.1.4. Cálculo del caudal

En el momento de la voladura, hay una formación repentina de una gran cantidad de gases nocivos para la salud en la zona de trabajo, la forma de garantizar un aire limpio y apropiado para la respiración humana es mediante la ventilación.

Para una correcta ventilación se ha de realizar una estimación correcta de caudal. Se ha de asegurar la limpieza del aire con el objetivo de que sea respirable, sin provocar una ventilación en exceso, que generará un derroche innecesario de energía, ya que se habrán alcanzado las concentraciones admisibles, se traduciría en pérdidas económicas innecesarias.

Para el cálculo del caudal hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Concentración admisible (C): Se trata de la concentración apta para la respiración, está fijada en la orden TEC/1146/2018. Es la concentración deseada en la ejecución de la ventilación.
- Concentración inicial (Ci): Es la concentración existente en el momento de la voladura, se ha de reducir hasta alcanzar la concentración admisible.
- Volumen del frente (V): Es el volumen de aire entre la tubería y el frente, se calcula multiplicando la sección del frente por la longitud del espacio comprendido entre la tubería y el frente.
- Caudal (Q): El caudal de aire suministrado gracias a uno o varios compresores.
- Tiempo (t): Es el tiempo requerido para pasar de la concentración inicial hasta la concentración admisible.

Para obtener un caudal, se ha de establecer un tiempo, ambas variables son inversamente proporcionales, a un mayor caudal será necesario un menor tiempo de ventilación. [10]

$$Q = \frac{V}{t} \times Ln \frac{Ci}{C} \quad (8)$$

4.1.5. Influencia del caudal en los cálculos de sobrepresión

A la hora de elegir una tubería hay varios factores a tener en cuenta, en función del material del que estén fabricadas, pueden ser rígidas como el metal o el plástico o flexibles, como material textil u otros tipos de plásticos. Además, hay otras propiedades como la resistencia aerodinámica, coeficientes de fuga, su peso, facilidad de manejo y conductividad eléctrica.

Cuando un fluido, como el aire, circula por un conducto, como puede ser una tubería de ventilación, se producen unas pérdidas. Las pérdidas son la consecuencia del rozamiento del aire con las paredes de la tubería, se estima teniendo en cuenta variables como longitud y diámetro de la tubería, caudal que circula por la tubería, el coeficiente α , que dependerá de la rigidez de la tubería, el coeficiente de pérdida de carga que dependerá del material del que esté fabricado la tubería [8].

La expresión que define la pérdida de carga es:

$$\Delta X_c = 0,98 \times \frac{\lambda \times L \times Q^\alpha}{D^5} \quad (9)$$

Siendo:

- L : Longitud de la tubería.
- D : Diámetro de la tubería
- Q : Caudal de la ventilación
- λ : Coeficiente de pérdida de carga
- α : Coeficiente dependiente de la rigidez

Para la longitud de túnel, en todas situaciones tendrá el valor de los 500 m del túnel.

Para la obtención del diámetro, se utilizará la siguiente fórmula:

$$D = 0,225 * \sqrt{Q} \quad (10)$$

Esta fórmula sirve para estimar el valor que debería de tener el diámetro, pero realmente no es el que se va a usar, con el diámetro calculado se ha de consultar en un catálogo el valor inmediatamente superior, ya que es poco probable que existan tuberías con el mismo diámetro que el calculado.

El coeficiente α tendrán un valor de 2 para tuberías rígidas y 1,7 para tuberías flexibles.

Para el coeficiente de pérdida de carga λ dependerá del material, viene dado en la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Valores del coeficiente de pérdida de carga [8].

TUBERÍA		Coeficiente pérdida de carga
RÍGIDAS	En materia plástica	0,018
	Metálicas nuevas (lisas)	0,0205
	Contrachapado (madera)	0,022
FLEXIBLES	Bien suspendidas	0,021
	Mal suspendidas	0,026

La resistencia aerodinámica del túnel puede calcularse mediante la siguiente fórmula, que depende del coeficiente de pérdida de carga, el perímetro del conducto en el tramo, su sección y su longitud. Es importante destacar que esta fórmula se particulariza para un peso específico del aire de 12.01 N/m³ [8]:

$$R = 153,03 \times \frac{\lambda \times P \times L}{s^3} \quad (11)$$

Donde: $\lambda = 0,7 \times \lambda_p + 0,3 \times \lambda_s \quad (12)$

Tabla 4.4: Valores de λ_s [8].

Suelo		λ_s
Hormigonado o asfaltado		0,03
Profundidad media de las rugosidades	5 cm	0,06
	15 cm	0,08
	30 cm	0,108

Tabla 4.5: Valores para λ_p [8].

SOSTENIMIENTO		λ_p	
Roca revestida	Pared bien recortada	0,058	
	Acabado medio	0,084	
	Irregular	0,108	
Roca bulonada	Bien recortada	0,058	
	Acabado medio	0,084	
	Irregular	0,108	
	Con tela metálica	0,13	
Roca revestida	Hormigón liso	0,022	
	Albañilería	Buen estado	0,025
		Estado medio	0,03
		Irregular	0,04

Una vez obtenido R, la pérdida de carga viene dada por:

$$\Delta X_t = R \times Q^2 \tag{13}$$

Por último, hay unas pérdidas de carga que añadir que son las provocadas por las singularidades:

$$\Delta X_{sing} = R_{sing} \times Q^2 = \xi \times \frac{\gamma_{aire} \times Q^2}{2 \times g \times S^2} = \xi \times \frac{0,61 \times Q^2}{S^2} \tag{14}$$

Donde ξ se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 4.6: Valores de ξ [8].

SINGULARIDAD		
Cambio de dirección, ángulo recto aristas vivas		1,4
Cambio de dirección ángulo recto sin aristas	Radio interior = (1/4) x Radio exterior	0,6
	Radio interior = (2/5) x Radio exterior	0,3
Emboquille		0,6
Trampilla		3,6
Enlace con pozo con aristas vivas		2
Enlace con pozo sin aristas		1

Se ha de tener en cuenta que cuando el aire circula por el túnel durante la ventilación, también se encuentra obstáculos en su salida, esos obstáculos son los ocasionados a causa del rozamiento del aire con la tubería, esa resistencia viene dada por la expresión:

$$R = R_t \times (1 + 0,15 * \sum d_k) \tag{15}$$

Siendo:

- R_t : La resistencia total del túnel
- R : La resistencia del túnel sin obstáculos
- dk : El diámetro de cada tubería presente en el túnel

Así, finalmente se puede obtener la sobrepresión, que será la suma de las pérdidas de carga previamente calculadas, es decir, pérdida de carga en las tuberías, pérdidas en el túnel y debidas a singularidades y obstáculos[8].

$$Sp = \Delta X_c + \Delta X_t + \Delta X_{sing} \quad (16)$$

Siendo:

- ΔX_c : Pérdida de carga en la tubería.
- ΔX_t : Pérdida de carga en el túnel.
- ΔX_{sing} : Pérdidas de carga en las singularidades.

4.1.6. Influencia del caudal en los cálculos de potencia

Una vez se conozcan los requisitos de caudal, se podrá calcular la potencia necesaria para conseguirlo. Además, hay otros dos factores que se deben tener en cuenta para la estimación de la potencia instalada. Se trata de la depresión y el rendimiento del ventilador.

La depresión es igual a la sobrepresión que se ha explicado en el anterior apartado, al necesitarse una presión extra para vencer las pérdidas, es necesario aumentar la potencia. El rendimiento es el otro factor que se ha de tener en cuenta, ya que sin él, el cálculo solamente abordaría la potencia útil, pero lo que más interesa a la hora de reducir el gasto energético es la potencia absorbida, que nos viene dada por el rendimiento [8].

La potencia se determina:

$$W = Q \times \Delta h \times \frac{1}{\eta} \quad (17)$$

Donde:

W = Potencia absorbida

Q = Caudal

Δh = Depresión

η = Rendimiento

4.2. SUPUESTOS ADOPTADOS PARA EL CÁLCULO.

Tras la descripción de la metodología que se aplicará para el cálculo del caudal (que permitirá llevar a cabo la comparativa de los cambios asociados a dichos requisitos derivados del cambio normativo experimentado en España) y los restantes parámetros de ventilación, es conveniente presentar los supuestos en base a los cuáles se llevarán a cabo los cálculos.

Con objeto de extrapolar los resultados del estudio a diversas tipologías de aplicación de la metodología convencional de avance en ámbitos ligados a la minería y la obra civil, se han adoptado tres escenarios de base, que toman como referencia tres trabajos académicos ligados al dimensionamiento de galerías mineras, o de túneles. Seguidamente, se presentarán los parámetros ligados a las voladuras asociadas a dichos documentos.

Los esquemas de perforación que se usarán en el presente trabajo, serán esquemas adaptados, procedentes de T.F.G.s presentados por estudiantes ya egresados del Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros. Tal y como ya se ha expuesto, se va a estudiar el avance en una galería minera, y por otro lado se estudiará el avance en túneles. En ambos casos, la forma de avance será mediante perforación y voladura.

En los casos de túneles, se utilizarán esquemas de los Trabajos de D. David Abando Seco, "Proyecto de ejecución de túnel carretero en la N-611" (supuesto 1) y de D^a. Luz M^a Cerezo Álvarez, "Diseño y cálculo de voladuras para el túnel de Arriarán" (supuesto 2) y. El motivo de adoptar estos dos trabajos reside en la diferente variedad de explosivos por los que se opta en cada T.F.G, tema que se abordará más adelante.

Para el ejemplo de la galería minera (supuesto 3) se tomará como referencia el diseño realizado en el T.F.G. de D. Alejandro Somarriba Fernández, "Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)".

Conviene señalar algunas particularidades correspondientes a cada supuesto.

En el primer supuesto, un túnel carretero de la carretera N-611, se trata del avance del túnel mediante avance y destroza. Por ello, se realizarán dos ciclos de ventilación, uno entre ambas voladuras y otro al finalizar la segunda sección. Ambas secciones suman una superficie de 80 m², además se van a utilizar dos tipos de explosivo para conseguir el avance, goma y ANFO. Al realizarse utilizando dos explosivos diferentes se va a poder observar los requisitos de ventilación para un avance de su sección y con los explosivos mencionados.

El segundo supuesto, un túnel carretero en Arriarán, como similitud con el anterior, también se realiza en dos secciones con sus dos correspondientes ciclos de ventilación, sin embargo, tiene dos diferencias significativas con el primer supuesto. En primer lugar, su sección es superior, 119 m², en segundo lugar, su carga de explosivos es diferente, no solo en tratarse de una carga superior, unos 220 kg, además, solamente se utiliza goma como explosivo, por lo tanto, se obtendrán unos humos diferentes que en el resto de los supuestos.

Por último, el tercer caso tiene una aplicación en otro campo, la minería, se trata de una galería En este caso y al igual que en el primero, la carga se basará en el empleo de goma y ANFO. La particularidad en este caso viene dada por realizarse a sección completa (una sección de 112m²). Por lo tanto, bastará con una ventilación por cada avance.

4.2.1. Esquemas de perforación.

El número de barrenos y el diámetro de estos vienen determinados en función de la sección del frente.

El hecho de tener los esquemas del frente es la primera parte para obtener la carga de la voladura, y así, comenzar con el cálculo de los gases generados por el explosivo. Seguidamente se recogerán los esquemas correspondientes a cada documento de referencia.

El esquema de tiro de la N-611 se divide en dos fases, en primer lugar, la voladura se realiza en la destroza, posteriormente se realizará la voladura de la zapata, tal y como se ve en la secuencia indicada. En este caso, también se ha dejado un barreno vacío para que exista una cara libre por la que pueda salir la voladura.

Dicho barreno se podrá desplazar en alguna dirección con la finalidad de que los barrenos vacíos no se encuentren uno tras otro en sucesivas voladuras. La sección total del túnel es de 80 m², ejecutándose en dos partes, 60 m² la destroza y 20 m² la zapatera.

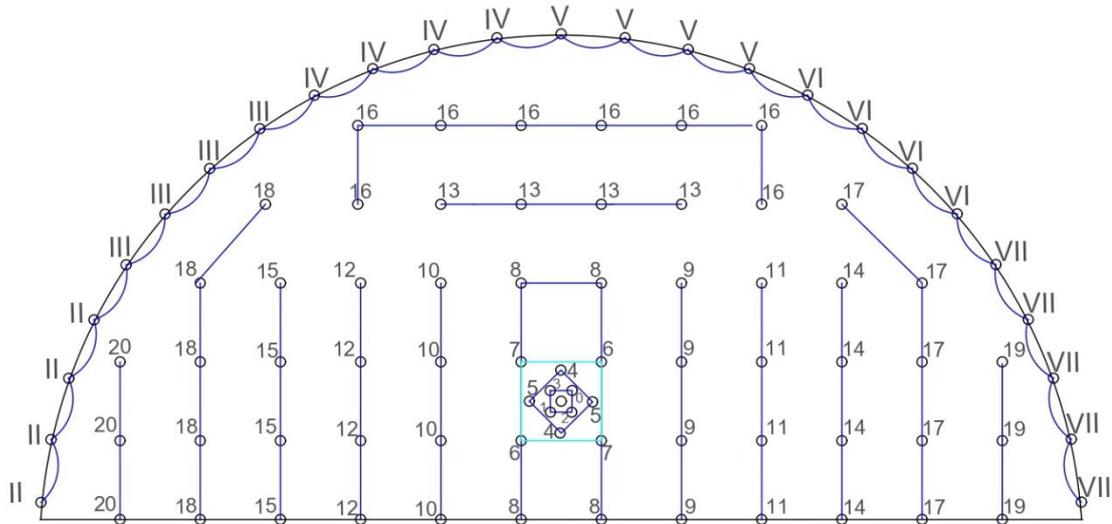


Ilustración 4.2: Esquema de Tiro de Cuele, Destroza y Contorno del supuesto 1, Túnel de Carretera N-611 [19]

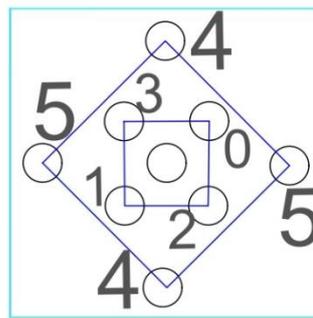


Ilustración 4.3: Ampliación de la zona del Cuele del supuesto 1

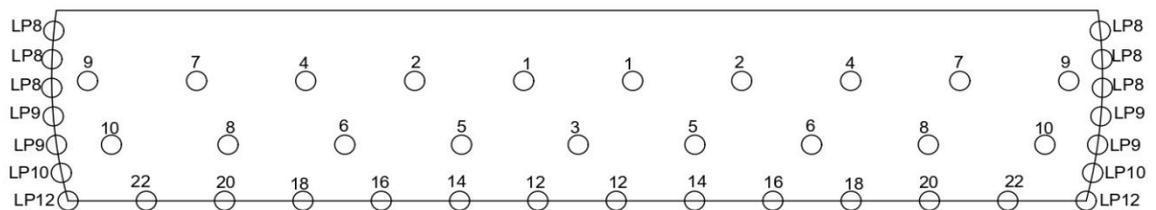


Ilustración 4.4: Esquema de Tiro de destroza del supuesto 1, Túnel Zapatera Carretera N-611 [19]

En el segundo supuesto, túnel de Arriarán, se trata de un esquema con un cuele cilíndrico de 4 secciones, tiene muchos barrenos en poca superficie, por ello, a la hora de perforar, es de gran importancia mantener el paralelismo en los barrenos, en caso contrario, se avanzaría con una geometría no deseada, distinta en el frente y en el fondo. Para sacar la segunda cara libre se ha optado por cuatro barrenos vacíos. Al igual que en el caso

anterior, la posición del cuele podrá variar con el fin de que no coincida el fondo del barreno con la perforación del barreno nuevo.

La sección total de este túnel es de 120 m², correspondiendo a 63 m² de destroza y 56 m² de zapatera.

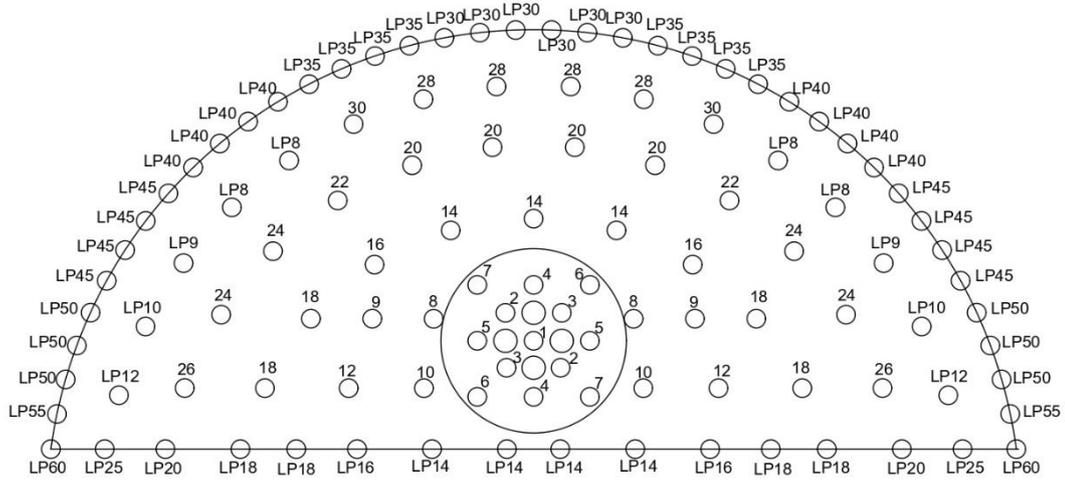


Ilustración 4.5: Esquema de Tiro de Cuele, Destroza y Contorno del supuesto 2, túnel de Arriarán [20]

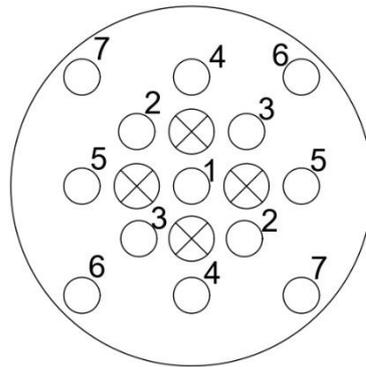


Ilustración 4.6: Ampliación de la zona del Cuele del supuesto 2

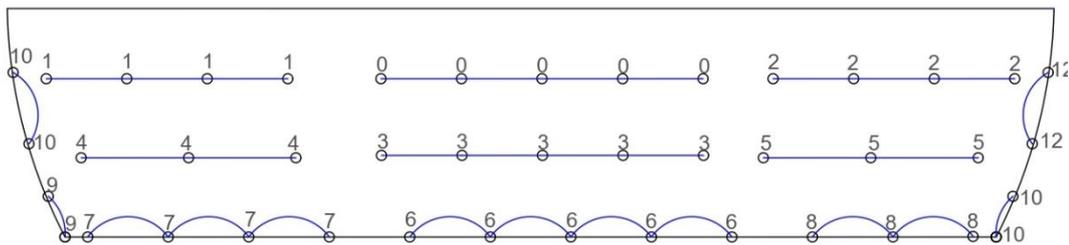


Ilustración 4.7: Esquema de Tiro del supuesto 2, túnel de Arriarán [20]

En el caso de la galería, por motivo de sus dimensiones, se ha optado por realizar una voladura a sección completa. En el centro se ha dejado un barrenos libre, así hay una segunda cara libre para permitir la salida de la voladura.

Se va a tener 3 cargas diferentes, la de la galería minera, la del túnel de la N-611 y la del túnel de Arriarán.

En este caso la sección total es de 72 m².

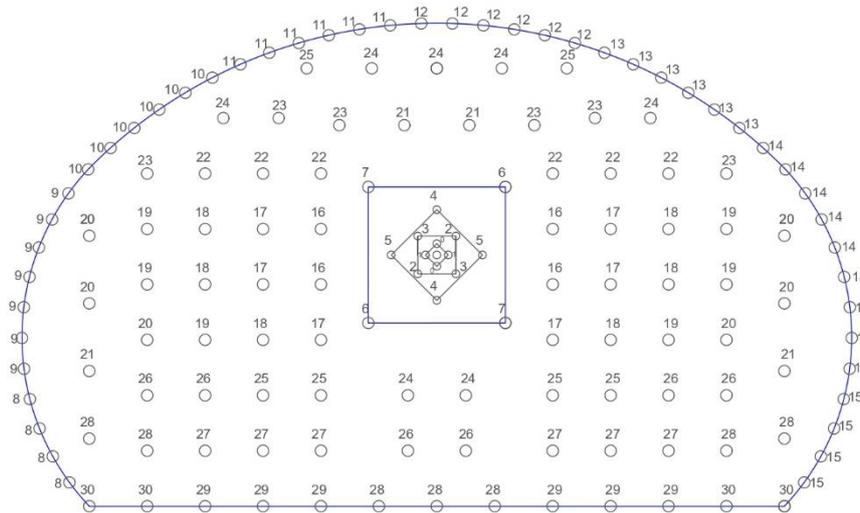


Ilustración 4.8: Esquema de Tiro de Cuele, Destroza, Contorno y Zapatera del supuesto 3, Galería minera [21]

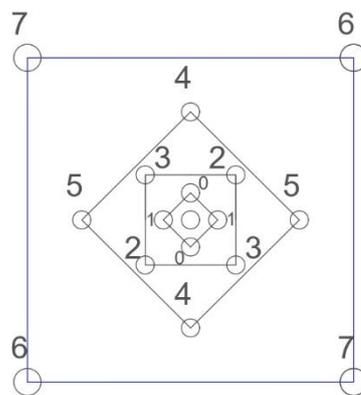


Ilustración 4.9: Ampliación de la zona del Cuele del supuesto 3

4.2.2. Carga

En las voladuras se encontrarán diferentes cargas de explosivos. A excepción de algunos barrenos del cuele, que pueden ir sin carga, el resto de barrenos tendrán carga de explosivos. Los explosivos que se utilizarán son dinamita goma, de nombre comercial Riodin y ANFO, de nombre comercial Rioxam, ambos del fabricante Maxam.

Además de los cartuchos de goma y del ANFO, en los barrenos se podrá encontrar detonadores, cuya función es la de iniciar la onda explosiva que inicie la detonación. Los detonadores pueden ser de tipo eléctricos, no eléctricos o electrónicos.

Las cargas de la voladura se calcularán en función de la geometría de los barrenos realizados.

Para la temática del presente TFG, son diferentes los dos túneles y la galería minera, el motivo es que en ambos túneles la voladura se da en dos secciones diferentes, teniendo que ventilar entre ambas voladuras, sin embargo, la voladura de la galería minera es a sección completa, teniendo que ventilar al finalizar. En cuanto a las cargas se obtiene:

- Supuesto 1. Túnel N-611: En este caso la carga es de Riodin con Rioxam.

Tabla 4.7: Carga de explosivos por ciclo en el supuesto 1 [19]

	Riodin	Rioxam	Explosivos
CUELE	25kg	-	25kg
DESTROZA	35,9 kg	29,9 kg	65,7 kg
RECORTE	28,5 kg	15,3 kg	43,7 kg
ZAPATERA	35,9 kg	29,9 kg	65,7 kg
TOTAL	125,2 kg	75kg	199kg

- Supuesto 2. Túnel de Arriaran:

Tabla 4.8: Carga de explosivos por ciclo en el supuesto 2 [20]

	Riodin
CUELE	53,4 kg
DESTROZA	153,5 kg
RECORTE	16,7 kg
ZAPATERA	71,4 kg
TOTAL	295,1 kg

- Supuesto 3. Galería minera:

Tabla 4.9: Carga de explosivos para el supuesto 3 [21]

	Riodin	Rioxam	Explosivos
CUELE	18kg	-	18kg
DESTROZA	64 kg	42,7 kg	106,7 kg
RECORTE	12,368 kg	-	12,4 kg
ZAPATERA	17,7 kg	11,3 kg	29 kg
TOTAL	112,1 kg	54 kg	166,1 kg

4.2.3. Características del explosivo

Como ya se ha comentado, los explosivos a utilizar en los ejemplos mencionados son la goma y el ANFO, concretamente, se utiliza Riodin M se pueden encontrar sus características en la página web de la empresa que lo comercializa, Maxam.

Tabla 4.10: Propiedades de la goma Riodin de Maxam (Fuente: www.maxamcorp.com)

Densidad	1,30 g/cm ³
Velocidad de detonación	5000 m/s
Calor de explosión	4,02 MJ/kg
Presión de detonación	128Kbar
Volumen de gases	905 l/kg
Resistencia al agua	Buena
Categoría de humos	1ª

Se trata de un explosivo de uso industrial, cuya consistencia es semigelatinosa, puede actuar en voladuras con roca tanto blanda como dura.

Al tratarse de un explosivo gelatinoso posee una gran resistencia al agua, pudiéndose utilizar en barrenos con presencia de agua, incluso podría ser utilizado en voladuras submarinas.

Además de su poder y su gran resistencia al agua, otra ventaja muy destacable es su seguridad, ya que, debido a su baja sensibilidad a la fricción e impacto, se puede manipular con seguridad.

Una desventaja importante es la cantidad de humos producidos por kg de explosivo, en este caso la producción de humos es mayor de 46,7 l/kg, así queda definido como un explosivo de Clase C, lo que conlleva que se realice un análisis de concentraciones límites de gases tóxicos en los trabajos a desarrollar.[16]

Tabla 4.11: Propiedades del ANFO de Maxam (Fuente: www.maxamcorp.com)

Densidad	0,8 g/cm ³
Velocidad de detonación	2500-5100 m/s
Calor de explosión	3,6 MJ/kg
Presión de detonación	90Kbar
Volumen de gases	1000 l/kg
Resistencia al agua	Sensible
Categoría de humos	1ª

Por otro lado, el ANFO es un explosivo pulverulento compuesto por una mezcla de nitrato amónico y un combustible líquido, gas-oil. Debido a su naturaleza, es sensible al contacto con el agua.

La proporción de combustible líquido en la mezcla es de gran importancia. La mezcla estequiométrica óptima consiste en aproximadamente un 94.3% de nitrato amónico y un 5.7% de gasoil. En términos más concretos, esto equivale a 50 kilogramos de nitrato amónico mezclados con 3.7 litros de fueloil. A medida que aumenta el porcentaje de gasoil en la mezcla, la sensibilidad del explosivo disminuye.[16]

4.2.4. Calidad de los humos

La calidad de los humos y su toxicidad es una característica muy importante a la hora de elegir un explosivo, sobre todo en labores subterráneas como es el caso. A peor calidad de humos del explosivo, mayor será el requisito caudal.

A pesar de que la legislación española tenga en cuenta varias especies contaminantes, existe una dificultad en la búsqueda de información de producción de gases nocivos producidos en función del explosivo. En los catálogos de empresas como Maxam o EPC la información que facilita no aborda este tema, limitándose solamente a dar información sobre el volumen total de gases producidos sin establecer diferencias dentro de ellos.

Por ello, se ha tenido que realizar una extensa búsqueda de documentos que traten la producción de diferentes gases por diferentes explosivos. Para ellos los criterios utilizados han sido en inglés tales como: “fumes quality”, “Explosives”, “Dynamite”, “Emulsión”, “Explosive Slurry”, “ANFO”.

Gracias a los documentos se ha podido realizar una estimación sobre la relación del NO y NO₂ dentro del NO_x. Por sistema, la disociación de estos dos gases se toma como un 90% NO y un 10 % NO₂, eso se cumple en varios casos, como la detonación de la goma o los gases generados por un motor de combustión, pero no siempre es así. Por ejemplo, en los gases generados por ANFO, el conjunto de gases que forma el NO_x, aproximadamente un 75% pertenece al NO, mientras un 25% pertenece al NO₂.

Además de los propios explosivos y las rocas, otro factor a tener en cuenta es el confinamiento de los explosivos, la producción de gases tóxicos en los humos varía en función de si el explosivo se encuentra confinado o no, tal y como se puede observar en los siguientes gráficos, análisis de los humos producidos por la goma:

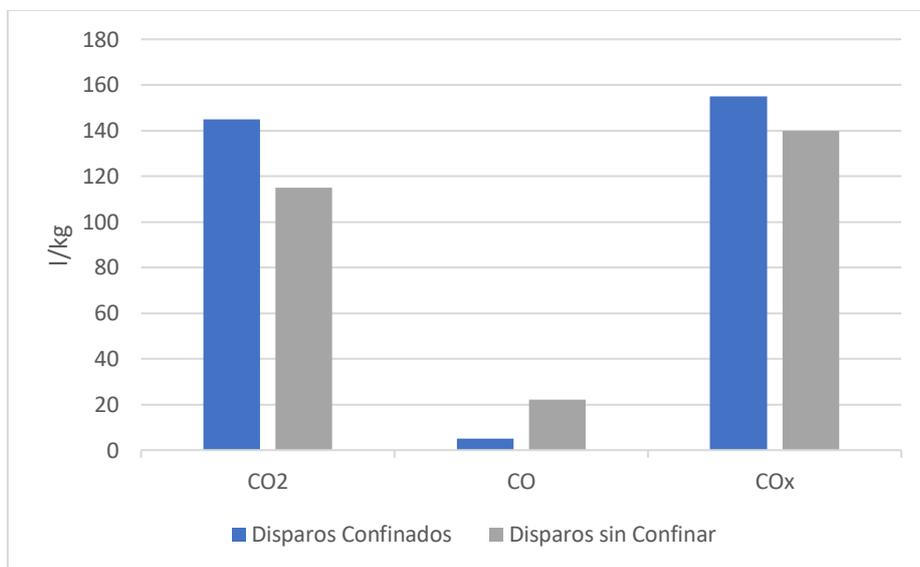


Ilustración 4.10: Óxidos de Carbono producidos por 1 kg de goma

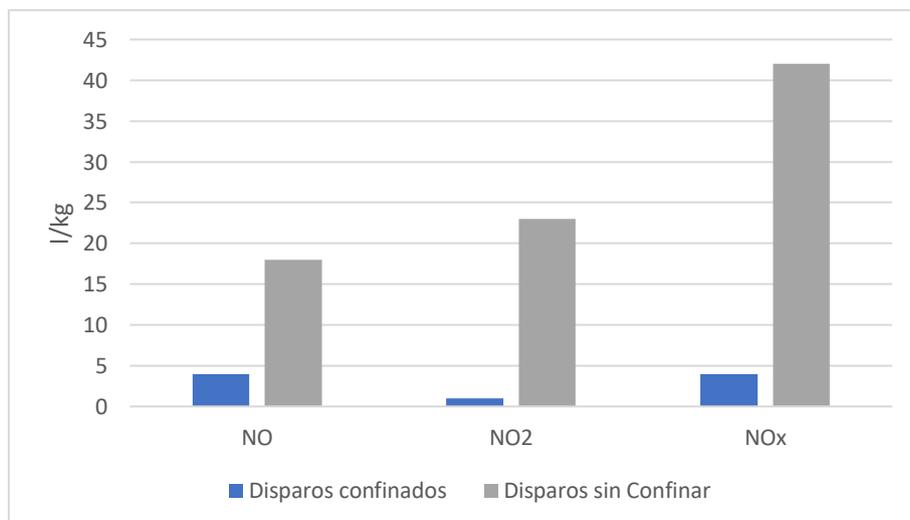


Ilustración 4.11: Óxidos de Nitrógeno producidos por 1kg de goma

Para clasificar los gases producidos por el ANFO y la goma se han consultado varias fuentes, tal y como se puede observar en la siguiente tabla se han escogido dos de las fuentes para comprobar las variaciones existentes de un estudio a otro:

Tabla 4.12: Gases producidos en diferentes estudios. [17], [18]

	Fuente 1		Fuente 2	
	ANFO	GOMA	ANFO	GOMA
CO	0,58%	0,65%	0,63%	1,70%
CO ₂	14,50%	18,50%	8,76%	20%
NO	0,36%	0,10%	0,12%	0,90%
NO ₂	0,12%	0,01%	0,056%	0,01%

Por lo tanto, al realizar una voladura con goma, concretamente Riodin M, por cada kg de este explosivo se producen 905 litros de humos, la proporción de gases nocivos con los que se van a trabajar en el presente TFG son:

- CO: 1,7%
- CO₂: 20%
- NO: 0,9%
- NO₂: 0,01%

Por otra parte, el ANFO produce unos 1000 litros por kg, se los que su contenido en gases nocivos es:

- CO: 0,65%
- CO₂: 8,78%
- NO: 0,124%
- NO₂: 0,056%

4.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO

A la hora de realizar los cálculos pertinentes, debido a su facilidad para procesar datos, se ha optado por utilizar la herramienta de Excel.

Se han realizado las mediciones simultáneamente en los tres supuestos, manteniendo ciertos valores fijos en los 3 casos, como, por ejemplo:

- Valores límite ambientales:

Tabla 4.13: Valores límite ambientales actuales para 8 horas normativa actual. Fuente: Orden TEC/1146/2018

1146/2018	VLA-ED
CO	25
CO ₂	5.000
NO	25
NO ₂	3

Tabla 4.14: Valores límite ambientales para 8 horas normativa antigua. Fuente: R.G.N.B.S.M.

1985	VLA-ED
CO	50
CO ₂	5.000
NO + NO ₂	10

- Volumen total de gases generado por cada explosivo:

Tabla 4.15: Volumen total de gases producidos por los explosivos.

Vol. Gas Goma	905 litros
Vol. Gas ANFO	1000 litros

- Proporciones de gases producidos por kg de explosivo:

Tabla 4.16: Proporción de gases producidos por kg de explosivo.

	Goma	ANFO
CO	1,70%	0,65%
NO	0,90%	0,12%
CO ₂	20,00%	8,78%
NO ₂	0,01%	0,06%

A partir de las masas utilizadas y mediante las características de los explosivos se obtiene el volumen de gases y dividiéndolo por el volumen del tapón de gases se obtiene la concentración en ppm.

Esta concentración deberá lograrse que descienda hasta alcanzar los valores límite de ambas normativas en el tiempo estipulado para llevarse a cabo la ventilación. A la hora de medir la concentración se pueden dar dos casos:

- Caso 1: La concentración obtenida en la voladura es inferior al valor máximo permitido por las normativas. En el caso de que esto llegase a suceder, al cumplir con los valores límite ambientales, para el gas examinado en concreto, no es necesaria su ventilación, pero sí lo será para otros gases más restrictivos.
- Caso 2: La concentración del gas medida es superior al valor límite admisible. Para ello se requiere de ventilación en el frente. El caudal requerido vendrá dado por:

$$Q = \frac{V}{t} \times \text{Ln} \frac{C_i}{C} \quad (18)$$

Siendo:

- Q: Caudal (m³/s)
- V: Volumen del tapón (m³)
- t: Tiempo de ventilación.(s)
 - Para el supuesto de la galería minera se considerará un tiempo de media hora (1800 segundos).
 - Para obra subterránea, se considerarán 10 minutos (600 segundos)
- Ci: Concentración inicial obtenida tras la voladura (ppm).
- C: Concentración a obtener, dada en las normativas (ppm).

Para realizar el cálculo del caudal en la hoja de cálculo, solamente cuando se da el caso 2 se ha optado por una estructura condicional if. Cuando el valor de la concentración es inferior a la concentración límite, resulta un caudal nulo, en caso contrario, lo calculará. La estructura será la siguiente:

$$= SI (C_i > C; \left(\frac{V}{t}\right) \times \text{Ln} \left(\frac{C_i}{C}\right); 0) \quad (19)$$

La estructura descrita se deberá realizar para cada gas de cada voladura y ha de ser comparado en ambas normativas para observar así los caudales requeridos para cada caso.

Una vez se han obtenido los caudales requeridos para cada gas se ha de escoger el caudal máximo obtenido, es decir, el más restrictivo, lo que significa que al realizar la ventilación para ese gas también se habrá realizado para los menos restrictivos. Para escoger el máximo se usará el comando siguiente:

$$= MAX(fila) \quad (20)$$

La comparación de los caudales máximos obtenidos en base a los dos marcos normativos considerados permitirá alcanzar el objetivo fundamental del presente T.F.G.: evaluar la incidencia de dicha modificación en los requisitos de ventilación de túneles y labores mineras en ejecución mediante metodología de avance convencional.

Posteriormente, una vez obtenidos los caudales requeridos, se proceden a determinar los restantes parámetros relativos a la ventilación. Para ello se ha de calcular la sobrepresión, es decir, la suma de las pérdidas, tal y como lo explicado en el 4.1.5.:



- Pérdida de carga en la tubería.
- Pérdida de carga en el túnel.
- Pérdidas singulares de carga en el túnel.

Una vez obtenida la sobrepresión, multiplicándola por el caudal, se podrá obtener la potencia absorbida, dato de interés para conocer el consumo energético de la ventilación.

5. RESULTADOS

Se recogen seguidamente los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología recogida en el apartado anterior, a los tres supuestos adoptados como base, y considerando las limitaciones asociadas a los dos marcos normativos considerados.

En este sentido, es importante mencionar que en el caso la normativa antigua, el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se representa como un óxido de nitrógeno, NO_x. En la orden vigente en la actualidad se representan el NO y el NO₂ por separado, diferenciando ambos gases, que no tienen los mismos efectos. Esta diferenciación, a priori puede parecer insignificante, sin embargo, puede provocar variaciones importantes en los requisitos de caudal de una normativa a la otra.

5.1. SUPUESTO 1 - Túnel N-611

En primer lugar, para obtener los requisitos de caudal es necesario tener calculado previamente las concentraciones en el frente de trabajo tras las voladuras. Como ya se ha mencionado, en este caso se hace a dos secciones, por lo tanto, todos los cálculos se realizarán dos veces. Es importante tener en cuenta que, a pesar de realizarse en diferentes fases, hay variables del dimensionamiento de las tuberías, como su diámetro que se mantienen constantes, no sería viable realizar cambios en la voladura de cada sección. Por lo tanto, el dimensionamiento se ha calculado para la fase más restrictiva de las dos.

Para poder realizar la comparación con la normativa antigua, se han sumado las concentraciones de ambos óxidos de nitrógenos.

Tabla 5.1: Concentración de gases tóxicos en el supuesto 1. *Expresado en ppm.*

	CONCENTRACIONES (ppm)				
	CO	NO	CO ₂	NO ₂	NO + NO ₂
Fase 1	466,1	219	5626,31	9,32	228,32
Fase 2	208,51	92,013	2547,66	5,58	97,6

5.1.1. Resultados I.T.C. antigua

Tabla 5.2: Caudales requeridos en el supuesto 1 para normativa antigua m³/s.

	CO	CO ₂	NO + NO ₂	Q. máximo
Fase 1	13,31	0,70	18,65	18,65
Fase 2	8,51	0	13,58	13,58

Una vez obtenidos los requisitos de ventilación, el que se ha de cumplir es el mayor, el más limitante. Cuando en los requisitos de caudal se obtiene un 0, significa que no se precisa de ventilación para alcanzar los valores límite del gas correspondiente, eso es

debido a que la concentración del dicho gas no sobrepasa los valores límite ambientales expuestos en la normativa.

En esta ocasión, midiendo los caudales para cumplir con los valores límite de la I.T.C. antigua en un tiempo de media hora, el caudal limitante obtenido para ambas fases es el requerido para la ventilación del NO_x que se ha de reducir hasta alcanzar 10 ppm de NO_x.

Con el caudal calculado, no solo se reducirá la concentración del NO_x, el resto de los gases también se encontrarán dentro de los valores límites ambientales.

Tabla 5.3: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 1 para normativa antigua.

	Pérdida Carga tubería (Pa)	Pérdida carga túnel (Pa)	Singularidades (Pa)
Fase 1	1253,07	152,58	0,0332
Fase 2	730,98	80,93	0,0176

Sumando las pérdidas en tubería y túnel, se obtiene la sobrepresión necesaria para que no haya un déficit de caudal:

Tabla 5.4: Sobrepresión en el supuesto 1 para normativa antigua. Expresado en Pascales.

	Sobrepresión (Pa)
Fase 1	1405,68
Fase 2	811,93

Tabla 5.5: Potencia absoluta en el supuesto 1 para normativa antigua. Expresado en kilovatios.

	Potencia absoluta (kw)
Fase 1	34,96
Fase 2	14,71

5.1.2. Resultados orden TEC

Tabla 5.6: Caudales requeridos en el supuesto 1 para normativa actual m³/s.

	CO	NO	CO2	N02	Q. máximo
Fase 1	17,44	12,94	0,7	6,76	17,44
Fase 2	12,65	7,77	0	3,7	12,65

Para la normativa actual, no son los óxidos de nitrógenos los que fijan el valor mínimo de caudal como en el caso de la normativa antigua, sino que es el monóxido de carbono (CO) para ambas fases. El NO queda 4,5 m³/s por debajo del CO. Además de cambiar el gas tóxico limitante, en esta ocasión, con la normativa actual, los requisitos de caudal se ven reducidos.

Tabla 5.7: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 1 para normativa actual.

	Pérdida Carga tubería (Pa)	Pérdida carga túnel (Pa)	Singularidades (Pa)
Fase 1	1671,9	133,45	0,017
Fase 2	967,9	70,15	0,009

Sumando las pérdidas en tubería y túnel, se obtiene la sobrepresión necesaria:

Tabla 5.8: Sobrepresión en el supuesto 1 para normativa actual.

	Sobrepresión (Pa)
Fase 1	1805,37
Fase 2	1038,063

Tabla 5.9: Potencia absoluta en el supuesto 1 para normativa actual.

	Potencia Absoluta (kw)
Fase 1	41,99
Fase 2	17,51

5.2. SUPUESTO 2 - TÚNEL DE ARRIARÁN

Este supuesto, tiene la particularidad de que el explosivo utilizado es únicamente goma, por lo tanto, todos los gases tóxicos son producidos solamente por la goma.

Las concentraciones obtenidas en el frente tras la voladura son los siguientes:

Tabla 5.10: Concentración de gases tóxicos en el supuesto 2. *Expresado en ppm.*

	CONCENTRACIONES (ppm)				
	CO	NO	CO2	NO2	NO + NO2
Fase 1	530,17	280,68	6237,34	3,12	283,8
Fase 2	169,24	89,6	1991,07	1	90,59

5.2.1. Resultados I.T.C. antigua

Tabla 5.11: Caudales requeridos en el supuesto 2 para la normativa antigua m^3/s .

	CO	CO2	NO + NO2	Q. máximo
Fase 1	25,54	2,39	36,19	36,19
Fase 2	13,19	0	23,84	23,84

Tal y como se puede observar, a pesar de que estos gases únicamente provienen de la detonación de goma, al igual que en el primer supuesto, para la normativa antigua son los óxidos de nitrógeno los limitantes.

Tabla 5.12: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 2 para la normativa antigua.

	Pérdida Carga tubería (Pa)	Pérdida carga túnel (Pa)	Singularidades (Pa)
Fase 1	795,48	206,99	0,056
Fase 2	391,2	89,81	0,025

Sumando las pérdidas en tubería y túnel, se obtiene la sobrepresión necesaria:

Tabla 5.13: Sobrepresión en el supuesto 2 para la normativa antigua.

	Sobrepresión (Pa)
Fase 1	1002,53
Fase 2	481,04

Tabla 5.14: Potencia absoluta en el supuesto 2 para la normativa antigua.

	Potencia absoluta (kw)
Fase 1	48,38
Fase 2	15,29

5.2.2. Resultados orden TEC

Tabla 5.15: Caudales requeridos en el supuesto 2 para la normativa actual m^3/s .

	CO	NO	CO2	N02	Q. máximo
Fase 1	33,04	26,16	2,39	0,42	33,04
Fase 2	20,69	13,81	0	0	20,69

Para la ventilación, con el objetivo de alcanzar los valores límite vigentes en la actualidad, se ha obtenido el CO como limitante para ambas fases, al igual que en el primer supuesto para esta normativa. El caudal requerido en este caso se ha reducido con la entrada de la normativa actual.

Tabla 5.16: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 2 para la normativa actual.

	Pérdida Carga tubería (Pa)	Pérdida carga túnel (Pa)	Singularidades (Pa)
Fase 1	681,35	172,51	0,028
Fase 2	307,41	67,63	0,011

Sumando las pérdidas en tubería y túnel, se obtiene la sobrepresión necesaria:

Tabla 5.17: Sobrepresión en el supuesto 2 para la normativa actual.

	Sobrepresión (Pa)
Fase 1	853,88
Fase 2	375,05

Tabla 5.18: Potencia absoluta en el supuesto 2 para la normativa actual.

	Potencia Absorbida (kw)
Fase 1	37,62
Fase 2	10,35

5.3. SUPUESTO 3 – GALERÍA MINERA

Tabla 5.19: Concentración de gases tóxicos en el supuesto 3. *Expresado en ppm.*

	CONCENTRACIONES (ppm)				
	CO	NO	CO ₂	NO ₂	NO + NO ₂
Fase 1	685,83	323,82	8270,72	13,34	337,16

Para el caso del presente supuesto se realiza la voladura a sección completa, de ahí que solamente se observe una fase de ventilación.

En este supuesto se utilizan dos explosivos diferentes, goma y ANFO, como en el primer supuesto, sin embargo, los resultados pueden cambiar por no usarse las mismas proporciones de cada explosivo.

5.3.1. Resultados I.T.C. antigua

Tabla 5.20: Caudales requeridos en el supuesto 3 para la normativa antigua m^3/s .

	CO	CO ₂	NO + NO ₂	Q. máximo
Fase 1	13,21	2,54	17,74	17,74

Una vez observados los caudales requeridos, al igual que los 2 anteriores supuestos para la normativa antigua, vuelve a ser el NO_x el gas más limitante.

Tabla 5.21: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 3 para la normativa antigua.

	Pérdida Carga tubería (Pa)	Pérdida carga túnel (Pa)	Singularidades (Pa)
Fase 1	1720,85	137,31	0,038

Sumando las pérdidas en tubería y túnel, se obtiene la sobrepresión necesaria:

Tabla 5.22: Sobrepresión en el supuesto 3 para la normativa antigua.

	Sobrepresión (Pa)
Fase 1	1858,2

Tabla 5.23: Potencia absoluta en el supuesto 3 para la normativa antigua.

	Potencia Absoluta (kw)
Fase 1	43,96

5.3.2. Resultados orden TEC

Tabla 5.24: Caudales requeridos en el supuesto 3 para la normativa antigua m^3/s .

	CO	NO	CO2	N02	Q. máximo
Fase 1	5,57	12,92	2,54	7,53	12,92

El caudal calculado para reducir para cumplir con los valores límite en el caso de la orden TEC vigente, es el requerido para reducir el nivel de NO. En los anteriores supuestos con la norma actual no ocurre lo mismo, esto se debe al balance de goma-ANFO y las cargas que se han utilizado.

A pesar de haberse obtenido un caudal limitante procedente de un gas diferente, para este caso, al igual que los anteriores los requisitos de caudal se han reducido respecto a la normativa antigua.

Tabla 5.25: Pérdidas en la ventilación en el supuesto 3 para la normativa actual.

	Pérdida Carga tubería (Pa)	Pérdida carga túnel (Pa)	Singularidades (Pa)
Fase 1	1589,85	72,79	0,012

Sumando las pérdidas en tubería y túnel, se obtiene la sobrepresión necesaria:

Tabla 5.26: Sobrepresión en el supuesto 3 para la normativa actual.

	Sobrepresión (Pa)
Fase 1	1662,65

Tabla 5.27: Potencia absoluta en el supuesto 3 para la normativa actual.

	Potencia Absoluta (kw)
Fase 1	28,64

5.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.4.1. Variaciones en los requisitos de caudal asociados al cambio normativo.

Es importante tener en cuenta que el caudal que se ha calculado es únicamente para reducir la concentración de gases tóxicos provocados por los explosivos, sin tener en cuenta la maquinaria o los gases generados por los propios trabajadores.

Como se puede observar en los cálculos del anterior apartado, debido a la existencia de una tendencia con la nueva normativa en la que las concentraciones límite se han reducido, a priori, podría parecer que el caudal resultante se verá incrementado, sin embargo, en las situaciones estudiadas, el caudal con la normativa vigente es inferior al requerido por la normativa antigua.

El hecho de que los caudales se hayan reducido para la normativa actual ha de ser analizado, ya que, al analizar los caudales por separado, algunos gases, en la actualidad precisan de un mayor caudal, sin embargo, al buscar el caudal máximo con ambas normativas es en el antiguo el que conlleva una mayor ventilación.

Analizando los caudales obtenidos para los gases, individualmente, se obtiene:

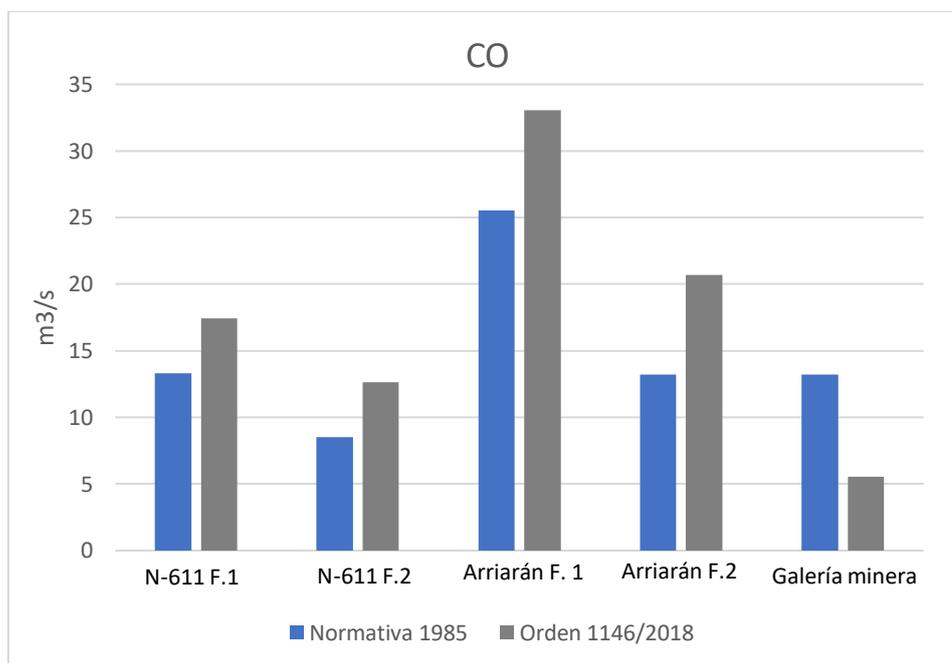


Ilustración 5.1: Caudal de ventilación específico para CO

En el caso del monóxido de carbono en la mayoría de los supuestos se requiere un mayor caudal en la actualidad, sin embargo, la excepción ocurre en la situación de la galería minera, en este caso es superior el caudal requerido para los requisitos anteriores, se debe a dos factores, la producción de CO por los explosivos y al volumen de tapón.

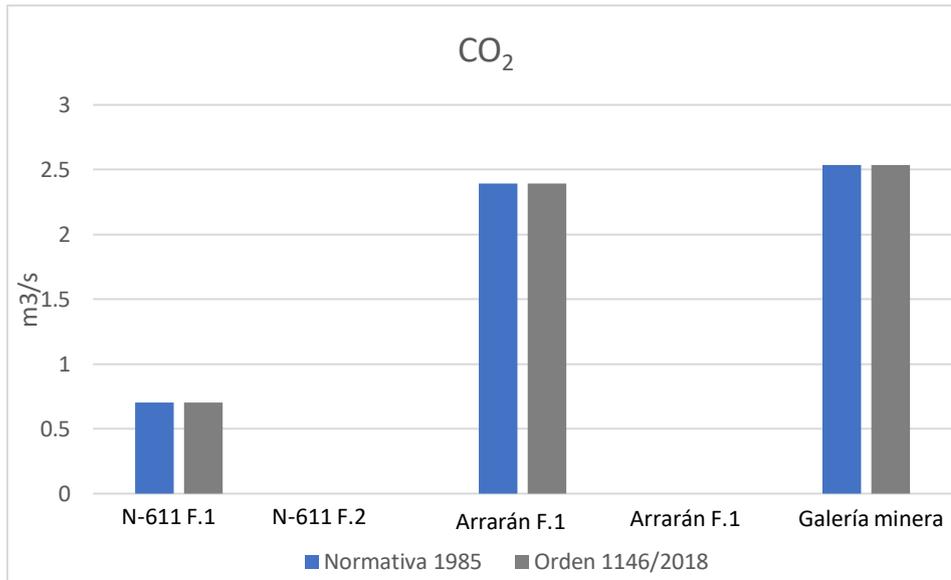


Ilustración 5.2: Caudal de ventilación específico para CO₂

En el caso del dióxido de carbono existen los mismos requisitos de caudal para ambas normativas, esto es debido a que los valores límite de ambas normativas son coincidentes.

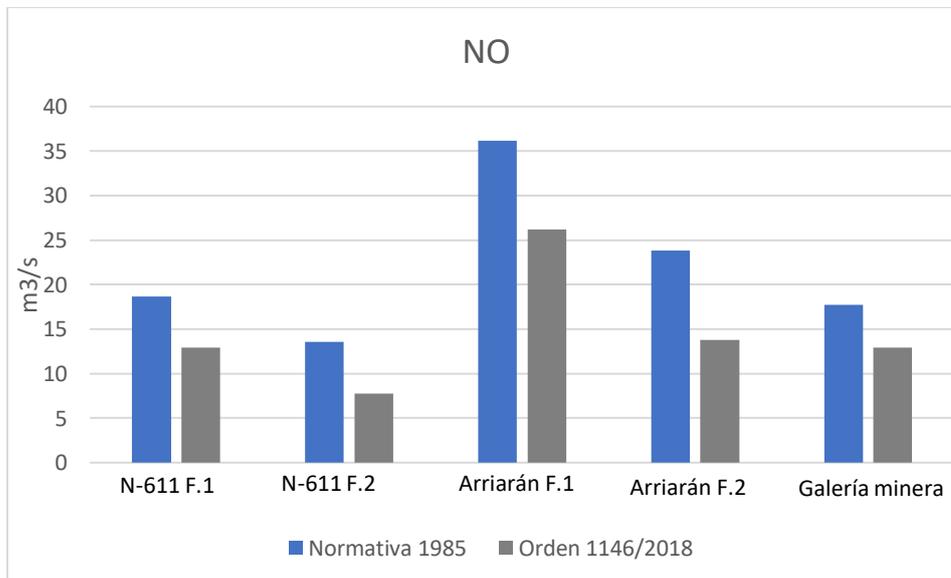


Ilustración 5.3: Caudal de ventilación específico para NO

En el caso del monóxido de nitrógeno se puede observar para todas las situaciones estudiadas, en la actualidad se requiere un caudal de ventilación inferior al antiguo. Para poder realizar la comparación se ha utilizado el caudal del NO_x, también se hará así para el caso del NO₂.

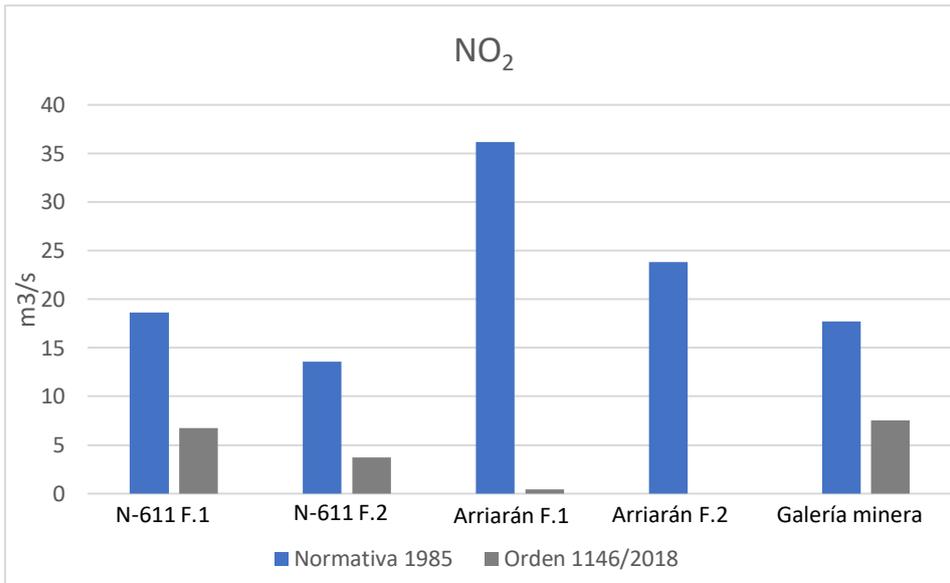


Ilustración 5.4: Caudal de ventilación específico para NO₂.

En lo referente al dióxido de nitrógeno, ocurre al igual que en el monóxido de nitrógeno, para la normativa actual se requiere de un caudal inferior.

Así, teniendo en cuenta todos los caudales máximos para cada gas, se obtienen los caudales necesarios para cada supuesto, pudiendo comparar los caudales necesarios para cada normativa, siendo los siguientes:

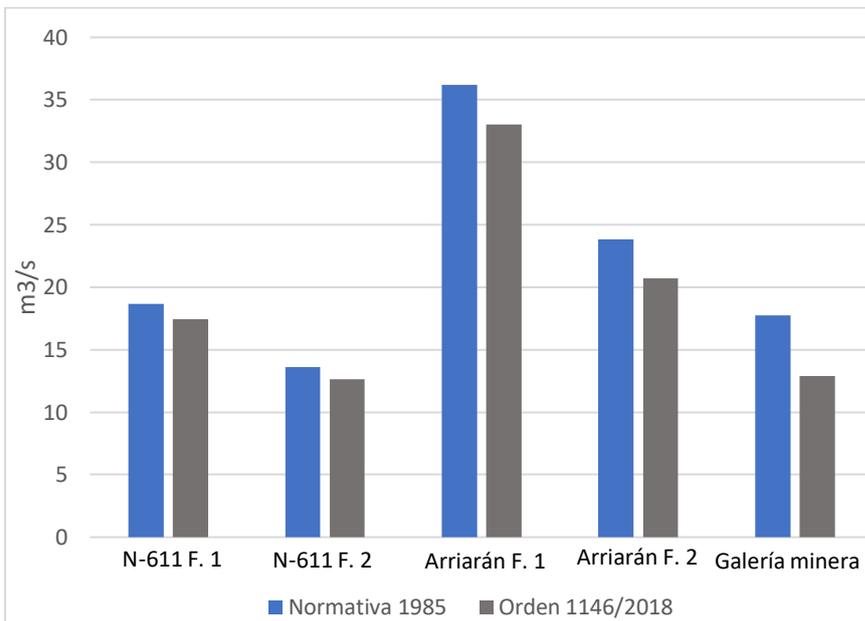


Ilustración 5.5: Comparativa de requisitos de caudales máximos.

En definitiva, una vez comparados los requisitos y teniendo en cuenta los valores más restrictivos, el resultado es un caudal menor para la orden 1146/2018 en todas las situaciones.

5.4.2. Variaciones de la especie química preponderante.

Durante el proceso de ventilación, al ventilar la especie química limitante, en consecuencia, también serán diluidas el resto de especies químicas. Al realizar los cálculos necesarios se ha podido observar que esa especie no siempre ha de ser la misma, como se observa a continuación:

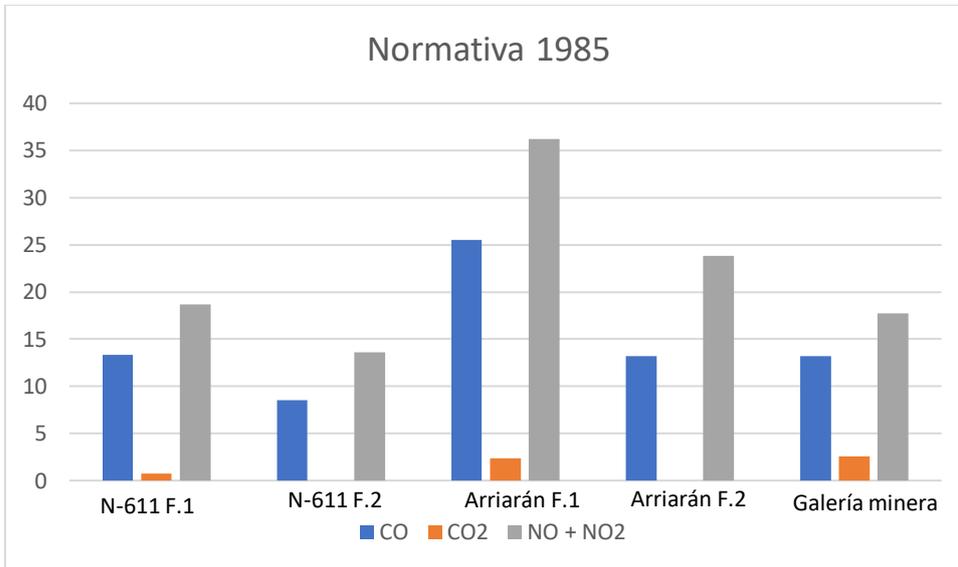


Ilustración 5.6: Necesidades de caudal para los gases tóxicos para la normativa antigua.

Para todos los casos de la normativa antigua, la especie preponderante es el NO_x en primer lugar, seguido por el CO para el siguiente puesto dominante.

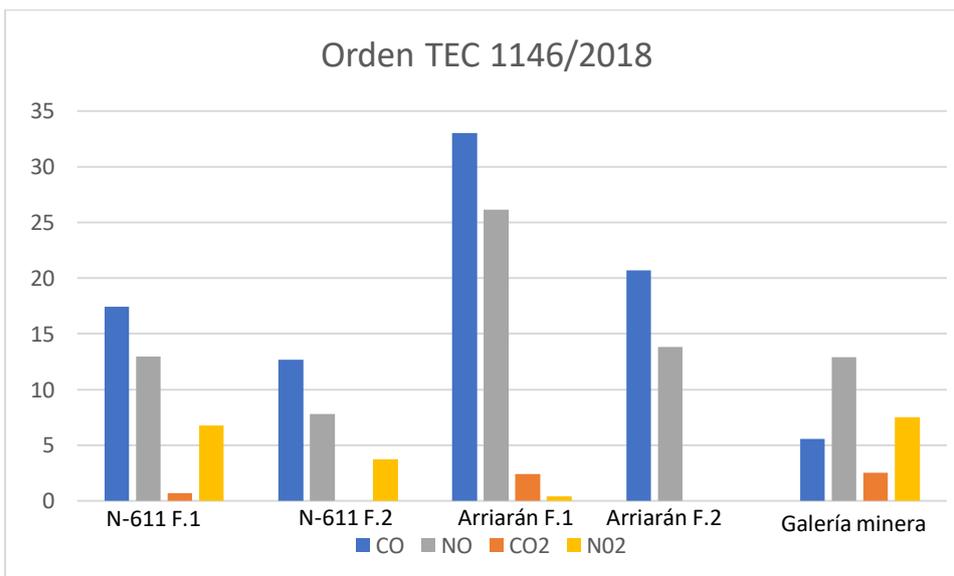


Ilustración 5.7: Necesidades de causal para los gases tóxicos para la normativa actual.

Para el caso de la normativa actual, la especie preponderante no es la misma, en este caso es el monóxido de carbono, a excepción del caso de la galería minera que, por sus características, tiene el monóxido de carbono como preponderante.

Es decir, en los casos estudiados, aplicando la normativa antigua, el gas dominante es el formado por los óxidos de nitrógeno, NO_x , mientras que, en la actualidad, en la mayoría de los casos, el gas dominante es el monóxido de carbono, CO . El hecho de que el NO_x sea tan restrictivo en la primera normativa, ocurre por tomar como un gas dos gases diferentes, el NO y el NO_2 , con la normativa actual se tratan como los dos gases diferentes que son, así se han podido obtener unos valores límite menos restrictivos por separado que unidos.

5.4.3. Influencia en la sobrepresión.

Es importante recordar el significado de la Sobrepresión, la suma de las pérdidas de carga en las tuberías y en el conducto a ventilar, es decir, el túnel o galería, incluyendo las singularidades.

- En primer lugar, las pérdidas de carga que se producen en las tuberías son de gran importancia debido a su magnitud, que es alta en comparación al resto de pérdidas, este valor es dependiente de las características de la propia tubería, como sus dimensiones y su rigidez, y de otros factores como el caudal.

Para estudiar las situaciones con las que se ha trabajado, en cuanto a características de la tubería que vienen dadas por su material, para todos los casos se han tomado los mismos datos. En donde se ha diferenciado una de otras ha sido en el caudal, que se ha usado el calculado para reducir las concentraciones en el tiempo establecido, y por otro lado el diámetro, que se ha calculado a partir del caudal.

Así, se puede establecer que, a mayor caudal, existirán unas mayores pérdidas, y a mayor diámetro las pérdidas se verán reducidas, sin embargo, es importante tener en cuenta que el diámetro va a ser dependiente del caudal, y este caudal no puede ser inferior del calculado, por ello, no se podrá optar por escoger un gran diámetro para reducir las pérdidas sin tener en cuenta el caudal.

- Por otro lado, las pérdidas generadas en el túnel dependen directamente de la resistencia aerodinámica, que depende de factores propios del túnel como la textura de las paredes y suelos y es directamente proporcional al perímetro y al caudal e inversamente proporcional a la sección.

En conclusión, la resistencia aerodinámica será la misma para un mismo túnel, sin embargo, las pérdidas aumentarán exponencialmente con el aumento del caudal, aplicando esto a las situaciones estudiadas, al requerirse un mayor caudal para la normativa antigua, existe una mayor pérdida aerodinámica en el túnel.

- Por último, las pérdidas provocadas por las singularidades son las menores de las tres. Este tipo de pérdidas engloba situaciones como cambios de dirección, o aristas en el pozo, al haberse calculado como un emboquille simple, el resultado

será un valor pequeño, se diferenciará en unos casos y otros en el caudal, que será directamente proporcional y la sección que será inversamente proporcional.

En definitiva, debido a la gran influencia de las pérdidas en las tuberías, no se puede determinar que la sobrepresión calculada para una normativa u otra vaya a ser siempre superior o inferior, tal y como se ha comprobado en las situaciones estudiadas. Esto ocurre, en gran parte, por la selección del diámetro de tubería disponible, ya que, al calcular el diámetro para cierto caudal, se ha de escoger el siguiente superior, y es dicho diámetro con el que se deben realizar los cálculos.

Por lo tanto, la suma de las 3 pérdidas es determinante para obtener la sobrepresión, ya que, a la hora de calcular la potencia necesaria, es la sobrepresión la que se va a multiplicar por el caudal y el rendimiento, en definitiva, a más pérdidas aerodinámicas, más sobrepresión se necesita para mantener los requisitos de caudal, siendo esto, universal a todos los casos.

5.4.4. Influencia en la potencia teórica.

La potencia teórica, que se define como el producto del caudal y la sobrepresión, incluyendo el rendimiento, es un parámetro fundamental en la evaluación de sistemas de ventilación. Es importante destacar que, aunque los cambios de normativa que se han estudiado son relevantes, no son el único factor determinante en la obtención de una potencia superior o inferior en un sistema de ventilación.

En el análisis de las tres situaciones diferentes, se observa que la potencia requerida para la ventilación varía en función de la normativa vigente. En una de estas situaciones, se identifica un incremento en la potencia necesaria bajo la normativa actual, lo que implica un mayor consumo energético. Sin embargo, en las otras dos situaciones, se observa una reducción en la potencia necesaria, lo que podría traducirse como un ahorro energético.

Un aspecto adicional que debe considerarse en la selección del ventilador es la elección del tipo de ventilador en sí. Esta elección puede depender de las existencias y disponibilidad en la empresa donde se adquiera el ventilador.

6. CONCLUSIONES

Tras concluir este estudio, centrándose en el análisis de los requisitos de caudal, puede resultar sorprendente que, a pesar de partir de unas concentraciones aparentemente más limitantes en la normativa actual, generalizando, se puede afirmar que en la actualidad los requisitos de caudal se han reducido, respecto a los calculados para la normativa antigua.

Otro aspecto que es importante recalcar, es que el hecho de asumir el NO y el NO₂ como NO_x por parte de la normativa antigua tiene un peso importante en los resultados de este estudio. Es probable que si en el momento que se desarrolló la normativa antigua se hubieran asumido como dos gases por separado, los valores límite ambientales podrían haber sido menos limitantes, ya que en la actualidad los dos gases por separado son mucho menos restrictivos que como NO_x.

Además, tomar el NO_x de forma genérica es incorrecto de cara a realizar las proporciones, ya que en la combustión de un motor o en la explosión de cierta cantidad de goma, mantiene la proporción inicial de 90% de NO y un 10% de NO₂, sin embargo, estas proporciones no se guardan para otro tipo de reacciones químicas, como en el caso del ANFO, que se mantienen unas proporciones de 75% de NO y de 25% de NO₂. Probablemente, esta falta de proporción sea motivo de la alta restricción del NO_x para la normativa antigua.

Aunque con el presente TFG se ha intentado realizar una representación de 3 situaciones diferentes con unas características que sean lo suficientemente representativas, existen más factores que se han de tener en cuenta en el dimensionamiento de la ventilación, como podrían ser la detonación del explosivo con unas condiciones deficitarias de oxígeno con respecto a las condiciones teóricas. Todo ello hace aconsejable el recurrir a la aplicación de factores de seguridad en el dimensionamiento de la ventilación, ya que los caudales aquí presentados podrían considerarse como valores mínimos a satisfacer.

En cuanto a la aplicación práctica, es importante conocer que con el cambio de normativa no ha habido unas diferencias demasiado significativas en cuanto a la potencia necesaria de los ventiladores, es decir, en gran parte de los casos el cambio del marco normativo no implicaría cambios sustanciales en los requisitos teóricos de los ventiladores a aplicar, tras el cambio de normativa, ya que en dos de las situaciones estudiadas se requiere de una potencia inferior y en la situación en la que se requiere una potencia superior, no se obtiene un resultado sustancialmente distante del asociado al supuesto inicial.

En algunos casos, se pueden reducir los costes con la entrada de la nueva normativa, sin embargo, en ciertas ocasiones se va a pagar más por la ventilación con la entrada de los nuevos requisitos.



Si se desean optimizar los costes ocasionados en el avance del túnel, se pueden recalcular parámetros, como el tipo de maquinaria y la cantidad de explosivos utilizada, pero siempre se debe cumplir con los requisitos de seguridad y salud en el puesto de trabajo.

7. ANEXO DE CÁLCULO

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, para la realización de los cálculos se ha utilizado la herramienta de Microsoft, Excel.

Debido a la existencia de 3 casos cuyos cálculos son iguales, prácticamente en su totalidad, se ha realizado la estimación para las 3 situaciones de forma simultánea.

En primer lugar, se establecen los datos de partida:

Tabla 7.1: Dimensiones de los 3 supuestos.

	Sección(m ²)	Long Tapón(m)	Volumen (m ³)
N-611	80	44,7	3577,7
Arriarán	119	54,5	6490,7
Galería	71,55	42,3	3026,1

Tabla 7.2: Volúmenes de gas producido por kg de explosivo.

Vol. Gas Goma (l)	905
Vol. Gas ANFO (l)	1000

Tabla 7.3: Proporciones de gases producidos por explosivo.

	Goma	ANFO
CO	1,70%	0,65%
NO	0,90%	0,12%
CO ₂	20,00%	8,78%
NO ₂	0,01%	0,06%

Tabla 7.4: Valores límite admisibles en ambas normativas

1146/2018	VLA-ED	VLA-EC	1985	VLA-ED	VLA-EC
CO	25	100	CO	50	100
CO ₂	5.000	12.500	CO ₂	5.000	12.500
NO	25	30	NO + NO ₂	10	25
NO ₂	3	5			

Una vez establecidos los datos de partida, se realizan los cálculos para obtener las concentraciones, cálculos comunes para ambas normativas:

Tabla 7.5: Masas de explosivos utilizadas y volúmenes de gases producidos por ellas.

		MASAS (kg)		VOLÚMENES (litros)	
		Goma	ANFO	Goma	ANFO
N-611	Fase 1	89,3	45,1	80840	45117
	Fase 2	35,9	30	32462,3	29867
Arriarán	Fase 1	223,7	0	202423,1	0
	Fase 2	71,4	0	64617	0
Galería	Fase 1	112,1	54	101441,5	53984

Tabla 7.6: Gases nocivos producidos por la goma.

		VOLÚMENES GASES GOMA (litros)			
		CO	NO	CO2	N02
N-611	Fase 1	1374,3	727,6	16168	8
	Fase 2	551,9	292,2	6492,5	3,2
Arriarán	Fase 1	3441,2	1821,8	40484,6	20,2
	Fase 2	1098,5	581,6	12923,4	6,5
Galería	Fase 1	1724,5	913	20288,3	10,1

Tabla 7.7: Gases nocivos producidos por el ANFO.

		VOLÚMENES GASES ANFO (litros)			
		CO	NO	CO2	N02
N-611	Fase 1	293,3	55,9	3961,3	25,3
	Fase 2	194,1	37	2622,3	16,7
Arriarán	Fase 1	0	0	0	0
	Fase 2	0	0	0	0
Galería	Fase 1	350,9	66,9	4739,8	30,2

Tabla 7.8: Volúmenes de gases totales producidos totales.

		Volumen Total Gases (litros)			
		CO	NO	CO2	NO2
N-611	Fase 1	1667,5	783,5	20129,3	33,3
	Fase 2	746	329,2	9114,8	20
Arriarán	Fase 1	3441,2	1821,8	40484,6	20,2
	Fase 2	1098,5	581,6	12923,4	6,5
Galería	Fase 1	2075,4	979,9	25028,1	40,4

Tras obtener los volúmenes de cada gas y con los volúmenes de tapón, incluidos en los datos de partida, se procede al cálculo de las concentraciones:

Tabla 7.9: Concentraciones tras las voladuras.

		CONCENTRACIONES (ppm)				
		CO	NO	CO2	NO2	NO + NO2
N-611	Fase 1	466	218	5626	9	228
	Fase 2	208	92	2547	6	98
Arriarán	Fase 1	530	281	6237	3	284
	Fase 2	169	90	1991	1	91
Galería	Fase 1	686	324	8271	13	337

Con las concentraciones iniciales y admisibles se calculan los caudales con ambas normativas, tal y como se explica en el apartado 4.1.4.:

Tabla 7.10: Caudales requeridos para la normativa actual en m³/s.

CAUDALES 1146/2018		CO	NO	CO2	NO2	Q. máximo
N-611	Fase 1	17,44	12,94	0,7	6,76	17,44
	Fase 2	12,65	7,8	0	3,7	12,65
Arriarán	Fase 1	33	26,16	2,39	0,42	33,04
	Fase 2	20,69	13,81	0	0	20,69
Galería	Fase 1	5,57	12,92	2,54	7,53	12,92

Tabla 7.11: Caudales requeridos para la normativa antigua en m³/s.

CAUDALES 1985		CO	CO2	NO + NO2	Q. máximo
N-611	Fase 1	13,31	0,70	18,65	18,65
	Fase 2	8,515	0	13,58	13,58
Arriarán	Fase 1	25,54	2,39	36,19	36,19
	Fase 2	13,19	0	23,84	23,84
Galería	Fase 1	13,21	2,54	17,74	17,74

Una vez obtenidos los caudales se puede comenzar a realizar el cálculo de las pérdidas, en primer lugar, las pérdidas de carga en las tuberías, para ello se han de establecer los parámetros de las mismas:

Tabla 7.12: Características de la tubería para la normativa actual

		Características tubería					
		Diámetros tubería (mm)	Catálogo diam (m)		λ	Longitud (m)	Coef. Rigidez
N-611	Fase 1	940	0,955	AVH71	0,021	500	1,7
	Fase 2	800	0,955	AVH71	0,021	500	1,7
Arriarán	Fase 1	1293	1,42	AVM112	0,021	500	1,7
	Fase 2	1023	1,42	AVM112	0,021	500	1,7
Galería	Fase 1	809	0,871	AVH63	0,021	500	1,7

Tabla 7.3: Pérdida de carga en la tubería para la normativa actual

		ΔX_c (Pa)
		Pérdida de Carga
N-611	Fase 1	1671,91
	Fase 2	967,9
Arriarán	Fase 1	681,35
	Fase 2	307,41
Galería	Fase 1	1589,85

Tabla 7.14: Características de la tubería para la normativa antigua

		Características tubería					
		Diámetros tubería (mm)	Catálogo diam (m)		λ	Longitud (m)	Coef. Rigidez
N-611	Fase 1	972	1,035	AV80	0,021	500	1,7
	Fase 2	829	1,035	AV80	0,021	500	1,7
Arriarán	Fase 1	1354	1,42	AVM112	0,021	500	1,7
	Fase 2	1099	1,42	AVM112	0,021	500	1,7
Galería	Fase 1	948	0,955	AVH71	0,021	500	1,7

Tabla 7.15: Pérdida de carga en la tubería para la normativa actual

		ΔX_c (Pa)
		Pérdida de Carga
N-611	Fase 1	1253,1
	Fase 2	730,98
Arriarán	Fase 1	795,49
	Fase 2	391,2
Galería	Fase 1	1720,85

Tras haber obtenido las pérdidas en las tuberías, se procede al cálculo de las pérdidas en el túnel, estableciendo en primer lugar, los parámetros del túnel:

Tabla 7.16: Parámetros del túnel para ambas normativas.

		Resistencia aerodinámica			
		Perímetro (m)	Sección (m ²)	λ Resist.	Resis. Aerod.
N-611	Fase 1	38,21	80	0,0768	0,43853425
	Fase 2	38,1	80	0,0768	0,43853425
Arriarán	Fase 1	45,3	119	0,0768	0,15801362
	Fase 2	45,3	119	0,0768	0,15801362
Galería	Fase 1	27,2	71,55	0,0768	0,43617196

Tabla 7.17: Pérdidas de carga en el túnel para la normativa actual.

		ΔX_t (Pa)
		Pérdida de carga
N-611	Fase 1	133,45
	Fase 2	70,15
Arriarán	Fase 1	172,51
	Fase 2	67,63
Galería	Fase 1	72,79

Tabla 7.18: Pérdidas de carga en el túnel para la normativa antigua.

		ΔX_t (Pa)
		Pérdida de carga
N-611	Fase 1	152,58
	Fase 2	80,93
Arriarán	Fase 1	206,99
	Fase 2	89,81
Galería	Fase 1	137,31

Por último, se procede al cálculo de las pérdidas por las singularidades, tal y como se expone en el apartado 4.1.5.:

Tabla 7.19: Pérdidas por singularidades en la normativa actual.

		ΔX sing. (Pa)
		Singularidades
N-611	Fase 1	0,02
	Fase 2	0,01
Arriarán	Fase 1	0,03
	Fase 2	0,01
Galería	Fase 1	0,01

Tabla 7.20: Pérdidas por singularidades en la normativa antigua.

		ΔX sing. (Pa)
		Singularidades
N-611	Fase 1	0,03
	Fase 2	0,02
Arriarán	Fase 1	0,06
	Fase 2	0,02
Galería	Fase 1	0,04

Una vez calculadas todas las pérdidas, con la suma se obtienen las sobrepresiones:

Tabla 7.21: Sobrepresión requerida en la normativa actual.

		Sobrepresión (Pa)
N-611	Fase 1	1805,37
	Fase 2	1038,06
Arriarán	Fase 1	853,88
	Fase 2	375,05
Galería	Fase 1	1662,65

Tabla 7.22: Sobrepresión requerida en la normativa actual.

		Sobrepresión (Pa)
N-611	Fase 1	1405,68
	Fase 2	811,93
Arriarán	Fase 1	1002,53
	Fase 2	481,04
Galería	Fase 1	1858,2

Tras el cálculo del caudal, la sobrepresión y con el rendimiento establecido se obtiene la potencia absorbida por los ventiladores:

Tabla 7.23: Potencia calculada para la normativa actual

		Pot. Abs (kW)
N-611	Fase 1	41,99
	Fase 2	17,51
Arriarán	Fase 1	37,62
	Fase 2	10,35
Galería	Fase 1	28,64

Tabla 7.24: Potencia calculada para la normativa actual

		Pot. Abs (kW)
N-611	Fase 1	34,96
	Fase 2	14,71
Arriarán	Fase 1	48,38
	Fase 2	15,29
Galería	Fase 1	43,96

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «BOE-A-2018-14894 Orden TEC/1146/2018, de 22 de octubre, por la que se aprueba la instrucción técnica complementaria 04.7.06 “Control de gases tóxicos en la atmósfera de las actividades subterráneas” y se modifica la instrucción técnica complementaria 05.0.02 “Especificaciones para minas subterráneas de carbón y labores con riesgo de explosión. Contenidos límites de metano en la corriente de aire”, del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.» Accedido: 6 de septiembre de 2023. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-14894
- [2] «BOE-A-1985-10836 Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.» Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1985-10836>
- [3] «BOE-A-1995-24292 Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales. » Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1995-24292>
- [4] «eLCOSH : Gases del escape de diesel». Disponible en: <https://www.elcosh.org/document/2231/d000609/Gases+del+escape+de+diesel.html>
- [5] LÓPEZ JIMENO, CARLOS, LÓPEZ JIMENO, EMILIO, GARCÍA BERMÚDEZ, PILAR, 2003. Manual de perforación y voladura en rocas. España: Editado por Carlos López Jimeno. ISBN 84-96140-03-2
- [6] Catálogo Productos/Explosivos Maxam. Disponible en: <https://www.maxamcorp.com/>
- [7] Catálogo Productos/Explosivos EPC group. Disponible en: <https://www.epc-espana.com/>
- [8] LÓPEZ JIMENO, CARLOS, 1998. Manual de túneles y obras subterráneas. España ISBN 84-921708-1-6
- [9] SEGURIDAD MINERA, 2018 ¿Cómo se generan los gases tóxicos en minería? Disponible en: <https://www.revistaseguridadminera.com/>
- [10] «Texto completo | Argentina.gob.ar». Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-295-2003-90396/texto>
- [11] «Decreto 1335 de 2019 - Gestor Normativo - Función Pública». Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=98231>
- [12] «Tunnels et Espace Souterrain - N° 281 – Juillet-Août-Septembre 2022». Disponible en: <https://www.aftes.fr/fr/product/tunnels-et-espace-souterrain-n-281-juillet-aout-septembre-2022/>
- [13] «Dossier n. 28/1996 - Gli scavi in sotterraneo. Analisi dei rischi e normativa in materia di sicurezza — Innovazione sanitaria e sociale». Disponible en: <https://assr.regione.emilia-romagna.it/pubblicazioni/dossier/doss028>

- [14] «Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Ed. 2020 - Informes y publicaciones - Ministerio de Energía y Minas - Plataforma del Estado Peruano». Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4339000-reglamento-de-seguridad-y-salud-ocupacional-en-mineria-ed-2020>
- [15] «NFPA 1989: Calidad del aire respiratorio - Infoteknico».] Disponible en: <https://www.infoteknico.com/nfpa-1989-2019/>
- [16] PÉREZ ÁLVAREZ, RUBÉN, BARRAL RAMÓN, NOEMÍ. Apuntes de la asignatura Laboreo I, 2018. OCW Universidad de Cantabria. Disponible en: <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=216>
- [17] SOARES GONÇALVES, ANA CATARINA, 2019. Air quality in underground mining. Portugal.
- [18] ZAWADZKA MALOTA, IWONA, 2015. Testing of mining explosives with regard to the content of carbon oxides and nitrogen oxides in their detonation products. Polonia
- [19] ABANDO SECO, DAVID, 2015, Trabajo de fin de grado:Proyecto de ejecución de túnel carretero en la N-611
- [20] CEREZO ÁLVAREZ, LUZ M^a, 2015 Diseño y cálculo de voladuras para el túnel de arriarán
- [21] SOMARRIBA FERNÁNDEZ, ALEJANDRO, 2019 Estudio comparativo del método de tuneladora vs explosivos para rampa minera en Barruecopardo (Salamanca)