



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE
INGENIEROS DE MINAS

Ríos Rosas, 21
28003 MADRID.

DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y COMBUSTIBLES

PROGRAMA DE LA ASIGNATURA
TECNOLOGÍA DE EXPLOSIVOS

Curso : 4^o
Cuatrimestre : 1^o
Carácter : Optativa

Créditos totales
Teóricos : 3,7
Prácticos : 2,3

PLAN DE ESTUDIOS 1996

Edición 1: 2000-09-22

TECNOLOGÍA DE EXPLOSIVOS: PROGRAMA

A) OBJETIVOS Y CONTENIDOS

BLOQUE 1: FÍSICO-QUÍMICA DE LOS EXPLOSIVOS

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 1.1. Conocer la evolución de los explosivos a lo largo de la Historia, como mejor medio para comprender su concepto y su principio de aplicación civil.
- 1.2. Conocer las propiedades específicas que dan lugar a que una materia sea explosiva.
- 1.3. Comprender el concepto y las propiedades de la detonación como base del régimen de reacción de los explosivos.
- 1.4. Calcular de forma elemental propiedades dinámicas de detonación.
- 1.5. Comprender el concepto de puntos calientes.
- 1.6. Comprender los mecanismos de interacción de choques que tienen lugar en la detonación y que determinan la constitución y propagación de la detonación o la extinción de ésta.
- 1.7. Conocer los conceptos energéticos aplicables a los explosivos.

CONTENIDOS:

1.1: HISTORIA DE LOS EXPLOSIVOS

- La pólvora negra.
- Los descubrimientos de Nobel: Las dinamitas y los detonadores.
- Anfos.
- Explosivos con agua.
- Evolución futura. Esquema general de la asignatura. Bibliografía básica.

1.2: CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- Combustión, deflagración, detonación. Explosiones.
- Materiales energéticos. Explosivos.
- Obtención de la reacción explosiva. Factores que influyen en los regímenes de descomposición.

1.3: TEORÍA DE LA DETONACIÓN

- Ecuaciones de conservación.
- La detonación ideal. Ecuaciones del choque unidimensional. Choque con reacción química. Hugoniot. Detonación CJ. Otras detonaciones.
- Detonación no ideal. Zona de reacción. Teoría ZND.
- Cálculo de estados de detonación. Planteamiento general.

1.4: INICIACIÓN DE LA DETONACIÓN

- Iniciación homogénea por explosión térmica.
- Iniciación heterogénea por puntos calientes. Iniciación de explosivos heterogéneos.
- Iniciación por estímulos de baja velocidad.
- Transición de deflagración a detonación.

1.5: LA ENERGÍA DE LOS EXPLOSIVOS

- Calor de explosión y potencia de los explosivos.
- Ciclo termodinámico de la detonación. Trabajo útil.

BLOQUE 2: PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS Y MÉTODOS DE ENSAYO

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 2.1. Aplicar los métodos para la determinación de características teóricas de los explosivos.*
- 2.2. Conocer las propiedades prácticas relacionadas con la valoración energética de los explosivos, su fiabilidad y su seguridad de uso, y los métodos experimentales para su determinación.*

CONTENIDOS:

2.1: CÁLCULO DE CARACTERÍSTICAS DE LOS EXPLOSIVOS

- Planteamiento.
- Cálculo de la composición de los productos.
- Cálculo del calor y temperatura de explosión: Datos termodinámicos, método iterativo de cálculo.
- Características de detonación. Ecuaciones de Kamlet-Jacobs. Otras características teóricas de los explosivos.

2.2: CARACTERÍSTICAS PRÁCTICAS DE LOS EXPLOSIVOS

- Características energéticas: Potencia; ensayos. Poder rompedor; ensayos. Velocidad de detonación; métodos de medida.
- Características de fiabilidad: Sensibilidad a la iniciación. Transmisión de la detonación. Resistencia al agua y a la presión hidrostática.
- Características de seguridad: Sensibilidad al impacto y a la fricción. Estabilidad térmica. Resistencia al calor bajo confinamiento.

BLOQUE 3: SUSTANCIAS EXPLOSIVAS

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 3.1. Conocer la clasificación convencional de las materias explosivas.*

- 3.2. *Conocer las propiedades físicas, químicas y explosivas, las aplicaciones y los principios de fabricación de los explosivos primarios.*
- 3.3. *Conocer los principios de la nitración y su ejecución industrial en la fabricación de sustancias explosivas.*
- 3.4. *Conocer las propiedades generales de las más importantes familias de explosivos secundarios.*
- 3.5. *Conocer las propiedades físicas, químicas y explosivas, las aplicaciones y los principios de fabricación de los explosivos secundarios de aplicación en explosivos civiles.*

CONTENIDOS:

3.1: EXPLOSIVOS INICIADORES

- Propiedades generales.
- Fulminato de mercurio.
- Azida o nitruro de plomo.
- Estifnato de plomo.

3.2: EXPLOSIVOS SECUNDARIOS

- La nitración. Mecanismo. Nitraciones C, O y N. Nitraciones industriales.
- Clasificación de los explosivos secundarios
- Nitroaromáticos. Propiedades generales. La trilita.
- Ésteres nítricos. Propiedades generales. La pentrita. La nitroglicerina y el nitroglicol. Las nitrocelulosas.
- Nitraminas. Propiedades generales. El hexógeno y el octógeno.

BLOQUE 4: EXPLOSIVOS INDUSTRIALES

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 4.1. *Conocer de forma razonada la constitución y las propiedades de las diferentes familias de explosivos industriales y su ámbito de aplicación.*
- 4.2. *Conocer de forma básica los métodos de fabricación de las diferentes familias de explosivos industriales.*
- 4.3. *Conocer los riesgos asociados al empleo de explosivos en ambientes potencialmente explosivos, en particular en la minería de carbón.*
- 4.4. *Conocer la constitución, propiedades, clasificación, métodos específicos de ensayo y modo de empleo de los explosivos para uso en minería de carbón.*
- 4.5. *Conocer la constitución, propiedades, principio de fabricación y aplicaciones de la pólvora negra.*
- 4.6. *Conocer los sistemas de carga automatizada de barrenos y su aplicación según la constitución del explosivo.*
- 4.7. *Conocer la gama de productos comerciales de explosivos industriales existentes en el mercado.*
- 4.8. *Conocer y valorar los parámetros que deben tenerse en cuenta para seleccionar el explosivo para una determinada aplicación.*

CONTENIDOS:

4.1: EXPLOSIVOS CONVENCIONALES

- Explosivos gelatinosos: Propiedades, aplicaciones.
- Explosivos pulverulentos: Propiedades, aplicaciones.
- Fabricación de explosivos convencionales.
- Productos comerciales.

4.2: MEZCLAS NITRATO AMÓNICO–COMBUSTIBLE

- El nitrato amónico. Formas de presentación. Propiedades físicas. Propiedades explosivas.
- Sensibilización del nitrato amónico por combustibles.
- Propiedades de las mezclas anfo. Contenido en aceite mineral. Influencia del tamaño de grano. Efecto de la humedad.
- Aplicaciones.
- Productos comerciales.

4.3: EXPLOSIVOS ACUOSOS

- El problema del agua y el nitrato amónico
- Hidrogeles. Constitución, tipos y propiedades generales. Sensibilización. Propiedades: potencia, densidad, gases de detonación, propiedades reológicas. Aplicaciones. Fabricación.
- Emulsiones. Concepto. Emulsiones "agua en aceite". Emulsiones con sales. Propiedades: potencia, velocidad de detonación, sensibilidad, resistencia al agua. Aplicaciones. Fabricación. Mezclas emulsión/anfo: *anfós* densos.
- Productos comerciales.

4.4: EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

- Mecanismos de inflamación del grisú y el polvo de carbón. Factores que afectan a la inflamabilidad del grisú.
- Evolución y tipos de explosivos de seguridad. Explosivos con el inhibidor en la composición. Explosivos de intercambio iónico.
- Medidas de seguridad y control de los explosivos ante el grisú y el polvo de carbón. Causas más frecuentes de formación de atmósferas peligrosas de grisú y polvo de carbón. Influencia del sistema de cebado y el calibre de los cartuchos. Ensayos de clasificación. Galerías de pruebas.
- Condiciones de tiro.
- Productos comerciales.

4.5: PÓLVORA NEGRA

- Constitución y tipos.
- Fabricación.
- Aplicaciones.

4.6: CARGA DE LOS BARRENOS

- Carga de explosivos encartuchados: manual, neumática.
- Carga a granel. Explosivos granulares. Explosivos bombeables.
- Mezclado in situ.

4.7: ELECCIÓN DEL EXPLOSIVO

- Criterios de selección: humedad de barrenos, diámetro y longitud de barrenos, tipo de roca, fragmentación, forma de carga, toxicidad de los gases, naturaleza de la atmósfera, precio.

BLOQUE 5: SISTEMAS DE INICIACIÓN

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 5.1. Conocer la constitución y comprender el funcionamiento de los detonadores ordinarios, eléctricos y de tubo de choque.
- 5.2. Conocer la constitución, características y aplicaciones de la mecha lenta y el cordón de ignición.
- 5.3. Conocer los tipos y características de los detonadores eléctricos.
- 5.4. Conocer los sistemas de energización para los detonadores eléctricos y los medios de comprobación de su conexionado.
- 5.5. Conocer los riesgos existentes en la voladura eléctrica y las precauciones a adoptar.
- 5.6. Aplicar esquemas de secuenciación de voladuras mediante iniciación eléctrica.
- 5.7. Conocer los sistemas de conexión y retardo de voladuras mediante tubo de choque.
- 5.8. Aplicar esquemas de secuenciación de voladuras mediante iniciación por tubo de choque.
- 5.9. Conocer la constitución, características y aplicaciones del cordón detonante y de los sistemas de conexión y retardo aplicados con él.
- 5.10. Aplicar esquemas de secuenciación de voladuras mediante cordón detonante.
- 5.11. Conocer de modo introductorio sistemas de iniciación de empleo minoritario.
- 5.12. Conocer la constitución y modo de empleo de los multiplicadores.

CONTENIDOS:

5.1: DETONADORES ORDINARIOS Y MECHA LENTA

- Detonadores ordinarios: Descripción. Funcionamiento.
- Mechas de seguridad. Mecha lenta: Constitución, características, tipos, aplicaciones. Cordón de ignición: Constitución, características, aplicaciones.
- Ejemplos de voladuras con detonador ordinario y mecha.

5.2: DETONADORES ELÉCTRICOS

- Descripción.
- Características eléctricas. Tipos y clasificación.
- Conexión de los detonadores eléctricos.
- Sistemas de energización: pilas, explosores dinamoeléctricos, explosores de condensador. Aparatos de comprobación.
- Riesgos y precauciones en las voladuras eléctricas: corrientes errantes, líneas de transporte de energía eléctrica, electricidad estática, tormentas, energía de radiofrecuencia.
- Ejemplos de voladuras con iniciación eléctrica.

5.3: DETONADORES NO ELÉCTRICOS Y OTROS SISTEMAS DE INICIACIÓN SECUENCIAL

- Detonadores no eléctricos: Constitución y funcionamiento. Tipos de detonadores y sistemas de conexión. Ejemplos de voladuras iniciadas con detonadores no eléctricos.
- Cordón detonante: Constitución, características y tipos. Sistemas de conexión y retardo. Ejemplos de voladuras iniciadas con cordón detonante.
- Otros sistemas de iniciación secuencial. Sistema *magnadet*. Sistema *hercudet*. Detonadores electrónicos.

- Multiplicadores. Concepto y constitución. Criterios de utilización. Multiplicadores temporizados.

BLOQUE 6: VOLADURA DE ROCAS E INGENIERÍA DE EXPLOSIVOS

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 6.1. *Comprender el mecanismo de la interacción del explosivo y la roca.*
- 6.2. *Calcular la piedra teórica o recubrimiento de roca máximo que un barreno es capaz de arrancar.*
- 6.3. *Aplicar los factores que deben utilizarse para la determinación de la piedra práctica.*
- 6.4. *Calcular las magnitudes principales de diseño de las voladuras en banco.*
- 6.5. *Aplicar esquemas de secuenciación de voladuras en banco.*
- 6.6. *Conocer los distintos tipos de cuele y aplicar los métodos para su diseño.*
- 6.7. *Aplicar los métodos para el diseño de voladuras en túnel.*
- 6.8. *Conocer el concepto de voladura de contorno como medio para reducir el daño a la roca remanente.*
- 6.9. *Aplicar los principios de diseño de voladuras de contorno en sus modalidades de precorte y recorte.*
- 6.10. *Conocer las particularidades de diseño de voladuras en carbón, voladuras en zanja, voladuras de apertura, ejecución de pozos, voladuras secundarias y voladuras submarinas.*
- 6.11. *Conocer los fundamentos de diseño de voladuras en cráter invertido.*
- 6.12. *Conocer los fundamentos del diseño y ejecución de demoliciones.*

CONTENIDOS:

6.1: FRACTURACIÓN DE LAS ROCAS EN LA VOLADURA

- La resistencia de las rocas.
- Acción de la onda de choque sobre la roca: Inmediaciones del barreno. Interacción con la cara libre.
- Efecto de los gases de la explosión.
- Rotura y arranque de la roca. Fragmentación.

6.2: VOLADURAS EN BANCO

- Cálculo de la carga: teoría sueca.
- Distribución de la carga.
- Efecto del confinamiento en el fondo del barreno, la resistencia de la roca, la potencia del explosivo y la presencia de varios barrenos en fila.
- Piedra máxima. Corrección por desviaciones en la perforación y esponjamiento en voladuras de varias filas.
- Bancos de pequeña altura.
- Ejemplos de secuenciación de voladuras en banco.

6.3: VOLADURAS EN TÚNEL

- Cueles. Cálculo de la carga para pequeños ángulos de rotura.
- Influencia de las desviaciones de la perforación.
- Cueles con barrenos en ángulo. Diseño de geometría y carga.
- Cueles con barrenos paralelos. Diseño de geometría y carga.
- Esquemas de franqueo. Destroza. Zapateras. Barrenos de contorno.
- Ejemplos de secuenciación de voladuras en túnel.

6.4: VOLADURAS DE CONTORNO

- Fundamentos teóricos: Presión en el barreno.
- Precorte.
- Recorte.

6.5: VOLADURAS ESPECIALES

- Voladuras en carbón.
- Voladuras en zanja.
- Voladuras de apertura.
- Profundización de pozos.
- Voladuras secundarias.
- Voladuras submarinas.
- Voladuras de hundimiento en abanico y método VCR (*vertical crater retreat*).
- Demoliciones.

BLOQUE 7: EFECTOS MEDIOAMBIENTALES DE LAS VOLADURAS. REGLAMENTACIÓN Y SEGURIDAD

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 7.1. *Conocer los tipos de ondas sísmicas producidas en las voladuras.*
- 7.2. *Conocer el funcionamiento de los equipos de medida de vibraciones y su utilización práctica.*
- 7.3. *Comprender el concepto de carga cooperante.*
- 7.4. *Aplicar las leyes de propagación de las vibraciones.*
- 7.5. *Aplicar los criterios de prevención de daños según la estructura a proteger y la frecuencia de la vibración.
Aplicar la norma UNE sobre vibraciones.*
- 7.6. *Conocer las técnicas de diseño y ejecución de voladuras tendentes a limitar la producción de vibraciones.*
- 7.7. *Conocer las magnitudes características de las ondas explosivas en el aire y los efectos de éstas sobre personas y estructuras en función de su presión máxima.*
- 7.8. *Conocer las causas que influyen en la producción de onda aérea en las voladuras.*
- 7.9. *Conocer las técnicas de diseño y ejecución de voladuras tendentes a limitar la producción de onda aérea.*
- 7.10. *Conocer las causas que provocan el lanzamiento incontrolado de roca en las voladuras.*
- 7.11. *Conocer las técnicas de diseño de voladuras tendentes a limitar las proyecciones.*
- 7.12. *Conocer las medidas de seguridad durante el disparo para evitar daños por proyecciones.*
- 7.13. *Conocer los aspectos más importantes de la reglamentación en vigor que se aplica a los explosivos en sus fases de fabricación, almacenamiento, comercialización, transporte y utilización.*

CONTENIDOS:

7.1: VIBRACIONES

- Tipos de ondas sísmicas.
- Medición de vibraciones: Sismógrafos.
- Leyes de propagación. Predicción de los niveles de vibración.
- Criterios de prevención de daños. Aplicación de la norma española de vibraciones.
- Normas prácticas para reducir las vibraciones.

7.2: ONDA AÉREA

- Características de la onda explosiva aérea.
- Valores límite de sobrepresión.
- Factores que influyen en la emisión de onda aérea en voladuras.

7.3: PROYECCIONES

- Origen de las proyecciones.
- Velocidad y alcance de los fragmentos.
- Factores de diseño de las voladuras que afectan a las proyecciones.
- Medidas de seguridad frente a las proyecciones en el disparo.

7.4: REGLAMENTACIÓN Y PRECAUCIONES DE USO

- Reglamento de explosivos. Homologación de explosivos: Directiva 93/15/CEE. Almacenamiento de explosivos.
- Reglamento nacional de transporte de mercancías peligrosas por carretera. Medidas de precaución en el transporte de explosivos.
- Reglamento general de normas básicas de seguridad minera. Medidas de precaución en el uso de los explosivos.

B) BIBLIOGRAFÍA

BÁSICA:

- ITGE, *Manual de perforación y voladura de rocas*, 2ª ed., Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 1994.
- PERSSON, P.A., HOLMBERG, R. y LEE, J., *Rock Blasting and Explosives Engineering*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1994.
- SANCHIDRIÁN, J.A. y MUÑIZ, E., *Curso de Tecnología de Explosivos*, Fundación Gómez Pardo, Madrid, 2000. (Texto).

COMPLEMENTARIA:

- LANGEFORS, U. y KIHLSSTRÖM, B., *Técnica moderna de voladuras de rocas*, 2ª edición, Urmo, Bilbao, 1987. [Traducción al español de *The modern technique of rock blasting*, Almqvist & Wiksell, Estocolmo, 1963].
- ISEE, *Blasters' Handbook*, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, 1998.
- KONYA, C.J., *Blast Design*, Intercontinental Development Corporation, Montville, Ohio, 1995.
- QUINCHON, J. y cols., *Les poudres, propergols et explosifs*, Tomo I: Les explosifs, 2ª edición, Technique et Documentation-Lavoisier, París, 1987.
- URBANSKI, T., *Chemistry and Technology of Explosives*, Vols. I, II, III y IV, Pergamon Press, Nueva York, 1983 - 1984.

C) PRÁCTICAS EN GRUPOS REDUCIDOS

No hay.

D) PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

La evaluación se basa en la demostración de la asimilación de conocimientos y de la capacidad de aplicar los conceptos y técnicas de la asignatura en un examen final.

El examen consta de dos partes. En la primera de ellas se plantean cuestiones relativas a la asignatura, que el alumno deberá contestar sin emplear material alguno de ayuda. Las cuestiones podrán ser de tipo breve y conceptual o de desarrollo de una parte de un tema. La segunda consiste en la realización de problemas de aplicación, similares a los llevados a cabo durante el curso. La primera parte tiene un valor doble de la segunda en la calificación.