



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 3: 2006-09-22

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 iniciación y propagación de la detonación.*
- 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. Azida 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.
- 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 y principio de funcionamiento de los detonadores electrónicos.*
- 5.10. *Aplicar esquemas de secuenciación de voladuras mediante iniciación electrónica.*
- 5.11. *Conocer la constitución, características y aplicaciones del cordón detonante y de los sistemas de conexión y retardo aplicados con él.*
- 5.12. *Aplicar esquemas de secuenciación de voladuras mediante cordón detonante.*
- 5.13. *Conocer de modo introductorio sistemas de iniciación de empleo minoritario.*
- 5.14. *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

- Constitución y funcionamiento.
- Tipos de detonadores y sistemas de conexión y retardo.
- Ejemplos de voladuras iniciadas con detonadores no eléctricos.

5.4: DETONADORES ELECTRÓNICOS

- Constitución y funcionamiento.
- Sistemas de programación y energetización.
- Ejemplos de voladuras iniciadas con detonadores electrónicos.

5.5: OTROS SISTEMAS DE INICIACIÓN

- Cordón detonante: Constitución, características y tipos. Sistemas de conexión y retardo. Ejemplos de voladuras iniciadas con cordón detonante.
- Multiplicadores. Concepto y constitución. Criterios de utilización. Multiplicadores temporizados.

BLOQUE 6: Voladura de rocas e ingeniería de explosivos

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 6.1. *Comprender los mecanismos de 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 el modelo de fragmentación Kuz-Ram para estimar la distribución granulométrica del escombros.*
- 6.6. *Aplicar esquemas de secuenciación de voladuras en banco.*
- 6.7. *Conocer los distintos tipos de cuele y aplicar los métodos para su diseño.*
- 6.8. *Aplicar los métodos para el diseño de voladuras en túnel.*
- 6.9. *Conocer el concepto de voladura de contorno como medio para reducir el daño a la roca remanente.*
- 6.10. *Aplicar los principios de diseño de voladuras de contorno en sus modalidades de precorte y recorte.*
- 6.11. *Conocer las particularidades de diseño de voladuras en carbón, voladuras en zanja, voladuras de apertura, ejecución de pozos, voladuras secundarias y voladuras submarinas.*
- 6.12. *Conocer los fundamentos de diseño de voladuras en cráter invertido.*
- 6.13. *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.
- Modelos de fragmentación. Modelo Kuz-Ram.

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: OTRAS VOLADURAS

- Voladuras en carbón.
- Voladuras en zanja.
- Voladuras de apertura.
- Profundización de pozos.
- Voladuras secundarias.
- Voladuras submarinas.
- Voladuras de hundimiento en abanico y método VCR.
- 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:

- ISEE, *Blasters' Handbook*, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, 1998.
- KONYA, C.J., *Blast Design*, Intercontinental Development Corporation, Montville, Ohio, 1995.
- 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].
- 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

Prácticas en cantera. Se realizan mediciones de perfil de banco, de vibraciones y de velocidad de detonación. Los alumnos deberán utilizar los datos medidos para hacer un diseño de la voladura. Realizarán un informe que será la base de calificación de las prácticas.

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.

La nota de las prácticas podrá contribuir hasta un 10 % de la nota global.