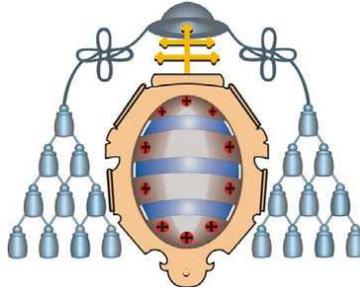


UNIVERSIDAD DE OVIEDO



PROGRAMA DE DOCTORADO

MINERÍA, OBRA CIVIL Y MEDIOAMBIENTE

MODELIZACIÓN DE LOS FENÓMENOS GASODINÁMICOS

Autor: D. Juan José Fernández Díaz

Director: D. Celestino González Nicieza

Julio 2012

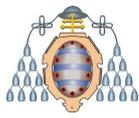
AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi director Celestino González Nicieza, Catedrático del Departamento de Explotación y Prospección de Minas y a Inmaculada Álvarez Fernández, Profesora Titular del mismo departamento, su inestimable colaboración en todos los aspectos relacionados con la confección de esta tesis, a lo largo de los años que ha durado la investigación.

También me gustaría agradecer a la Empresa HUNOSA, en la que he trabajado más de quince años, por las facilidades que siempre me ha dado para la realización de todos los ensayos. Igualmente a todo el personal de los distintos Pozos e Instalaciones por su colaboración en el día a día y en el trabajo de campo. También me gustaría dar las gracias, especialmente, a Albino González García, compañero de trabajo durante los últimos años, por la dedicación prestada. Su ayuda ha resultado fundamental en esta tesis.

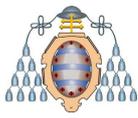
Finalmente, me gustaría agradecer a la Dirección General de Minas del Gobierno del Principado de Asturias y a sus técnicos el apoyo y la financiación parcial del proyecto de investigación.

Dedicada a mi familia por su apoyo incondicional durante todos estos años y a mis padres por sus ánimos constantes para llegar al final. Sin ellos no habría sido posible terminar esta tesis.

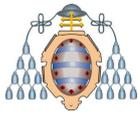


ÍNDICE DE CONTENIDOS

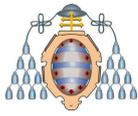
1	OBJETO DE LA TESIS	1
2	INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE	3
2.1	MECANISMOS DE LOS FENÓMENOS GASODINÁMICOS	4
2.2	EVALUACIÓN DE LOS FENÓMENOS GASODINÁMICOS	6
2.2.1	COMPOSICIÓN DEL GAS CONTENIDO EN EL YACIMIENTO DE CARBÓN	6
2.2.2	LABORES MINERAS Y GEOLOGÍA	8
2.2.3	PROPIEDADES DEL CARBÓN QUE INFLUYEN EN LA SORCIÓN DE GAS	9
2.2.3.1	Humedad	9
2.2.3.2	Rango y composición del carbón	10
2.2.3.3	Resistencia del carbón	10
2.3	ESTRUCTURA FÍSICA DEL CARBÓN	11
2.4	SORCIÓN DEL GAS POR EL CARBÓN	13
2.4.1	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	14
2.4.2	DESORCIÓN	16
2.5	CONTENIDO DE GAS EN EL CARBÓN	17
2.6	MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN GAS DEL CARBÓN	19
2.6.1	MÉTODOS DIRECTOS	19
2.6.2	MÉTODOS INDIRECTOS	19
2.7	FLUJO DE GAS EN EL CARBÓN	20
2.8	EFFECTO DE LAS PROPIEDADES DEL CARBÓN EN EL ALMACENAMIENTO DE GAS	21
2.8.1	VARIACIONES DE LA MATRIZ DEL CARBÓN	21
2.8.2	VARIACIÓN DE LA POROSIDAD	22
2.8.2.1	Modelo API (Sawyer, Paul y Schraufnagel, 1990)	22
2.8.2.2	Modelo de Palmer y Mansoori (1996)	23
2.8.2.3	Combinación de ambos modelos (Pekot y Reeves, 2003)	23



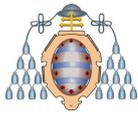
2.8.3	PERMEABILIDAD DEL CARBÓN	24
2.8.3.1	Efecto Klinkenberg	26
2.8.3.2	Estado tensional	27
2.8.3.3	Estructura geológica del carbón	28
2.8.3.4	Contenido en agua	29
2.9	INFLUENCIA DEL GAS EN LA VARIACIÓN VOLUMÉTRICA DEL CARBÓN	29
2.9.1	CAMBIOS DE VOLUMEN DEBIDO A LA ADSORCIÓN	30
2.9.2	RETRACCIÓN DEL CARBÓN POR DESORCIÓN	34
3	<u>PREDICCIÓN Y MEDIDAS PREVENTIVAS</u>	37
3.1	PRINCIPALES TÉCNICAS PREVENTIVAS UTILIZADAS	37
3.1.1	ESTUDIO DEL ESTADO TENSIONAL DEL TERRENO	38
3.1.2	INYECCIÓN DE AGUA	39
3.1.3	DEGASIFICACIÓN MEDIANTE SONDEOS	41
3.2	ÍNDICES DE RIESGO Y PROTOCOLOS DE ACTUACIÓN	41
3.2.1	VELOCIDAD DE DESORCIÓN	42
3.2.2	ÍNDICE “G _i ”	43
3.2.3	PRUEBAS DE PERFORACIÓN. TEST DE JAHNS	45
3.2.4	EL ÍNDICE K _T	47
3.2.5	ÍNDICE DE EMISIÓN DE GAS	48
4	<u>SIMULACIÓN DE INYECCIÓN DE GAS EN CARBÓN</u>	50
4.1	PRINCIPIOS BÁSICOS DEL PROGRAMA FLAC-2D	50
4.1.1	GEOMETRÍA DEL MODELO	50
4.1.2	MODELO CONSTITUTIVO	51
4.1.3	PROPIEDADES DEL TERRENO	51
4.1.4	CONDICIONES DE CONTORNO	52
4.1.5	FASES DE EXPLOTACIÓN	52
4.1.6	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO	53



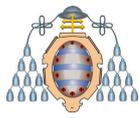
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	54
4.3 INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE SONDEO Y LA PRESIÓN DE INYECCIÓN	58
4.3.1 SONDEOS DE 10 M DE LONGITUD	59
4.3.1.1 Modelo 1: Presión de inyección 100 MPa	59
4.3.1.2 Modelo 2: Presión de inyección 50 MPa	60
4.3.1.3 Modelo 3: Presión de inyección 10 MPa	60
4.3.2 SONDEOS DE 7,5 M DE LONGITUD	61
4.3.2.1 Modelo 4: Presión de inyección 100 MPa	61
4.3.2.2 Modelo 5: Presión de inyección 50 MPa	62
4.3.2.3 Modelo 6: Presión de inyección 10 MPa	62
4.3.3 SONDEOS DE 5 M DE LONGITUD	63
4.3.3.1 Modelo 7: Presión de inyección 100 MPa	63
4.3.3.2 Modelo 8: Presión de inyección 50MPa	64
4.3.3.3 Modelo 9: Presión de inyección 10 MPa	64
4.3.4 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS	65
4.3.5 SIMULACIÓN CARDOX	68
4.4 INFLUENCIA DE LA PERMEABILIDAD DEL CARBÓN	74
4.4.1 PERMEABILIDAD 0,0002 MD/ SONDEO 10 M/100 MPa	74
4.4.2 PERMEABILIDAD 0,002 MD/ SONDEO 10 M/100 MPa	75
4.4.3 PERMEABILIDAD 0,02 MD/ SONDEO 10 M/100 MPa	76
4.4.4 PERMEABILIDAD 0,2 MD/ SONDEO 10 M/100 MPa	76
4.4.5 COMPARATIVA DE PERMEABILIDADES	77
5 ENSAYOS DE INYECCIÓN DE CO₂	78
5.1 ENSAYOS DE LABORATORIO A MEDIA ESCALA	78
5.1.1 LA INYECCIÓN Y EL CONTROL DE GAS	80
5.1.2 CAPTACIÓN DE DATOS	81
5.1.3 MEJORA DE LA PERMEABILIDAD	82
5.1.3.1 Inyección de CH ₄	82
5.1.4 FRACTURACIÓN DE LA ROCA POR ALTA PRESIÓN DE GAS	88



5.1.5	INYECCIÓN DE CH ₄ TRAS LA FRACTURACIÓN DE LA ROCA	89
5.2	ENSAYOS “IN SITU”	94
5.2.1	MARCO GEOLÓGICO	94
5.2.2	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	95
5.2.3	INYECCIÓN Y DESCARGA DE GAS	96
5.2.4	OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN EL ENSAYO “IN SITU”	99
6	TRABAJOS REALIZADOS EN LA MINA	106
6.1	MODELO DE COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS	107
6.2	ESTADO TENSIONAL DEL TERRENO	111
6.2.1	ESTADOS TENSIONALES CREADOS POR LABORES DE LA PROPIA CAPA	121
6.2.2	ESTADOS TENSIONALES CREADOS POR LABORES DE OTRA CAPA	126
6.2.3	ESTADOS TENSIONALES DINÁMICOS	129
6.2.4	INFLUENCIA DE LOS ESTRECHONES	133
6.3	EL GAS EN EL CARBÓN	136
6.3.1	CINÉTICA DE DESORCIÓN	138
6.3.2	ANÁLISIS DEL FLUJO DE GAS. PERMEABILIDAD	139
6.4	COMBINACIÓN GAS Y PRESIONES	141
6.4.1	CASO 1: INCREMENTO DEL ESTADO TENSIONAL DE FORMA MODERADA	142
6.4.2	CASO 2: INCREMENTO DEL ESTADO TENSIONAL DE FORMA IMPORTANTE	148
6.5	DESCRIPCIÓN DE LAS LABORES OBJETO DE ESTUDIO	149
6.5.1	AVANCE DEL 1º NIVEL IZQUIERDA DE 8ª II DEL POZO MONTSACRO	150
6.5.2	AVANCE DEL 2º NIVEL DERECHA DE 8ª II DEL POZO MONTSACRO	152
6.5.3	AVANCE DEL 4º NIVEL DERECHA DE 8ª II DEL POZO MONTSACRO	154
6.5.4	AVANCE DEL 5º NIVEL DERECHA DE 8ª II DEL POZO MONTSACRO	157
6.5.5	AVANCE DEL NIVEL 2.3 SUR DE LA CAPA JULIA DEL POZO SOTÓN	158
6.5.6	AVANCE DEL NIVEL 2.4 SUR DE LA CAPA JULIA DEL POZO SOTÓN	159
6.5.7	AVANCE DEL NIVEL 4.1 NORTE DE LA CAPA JULIA DEL POZO SOTÓN	160
6.5.8	AVANCE DEL 1 NIVEL IZQUIERDA DE LA EXPLOTACIÓN 863 DEL POZO SAN NICOLÁS	164
6.5.9	AVANCE DEL 1 NIVEL DERECHA DE LA EXPLOTACIÓN 863 DEL POZO SAN NICOLÁS	167



6.5.10	AVANCE DEL NIVEL 3 DERECHA DE 8ª DEL POZO MONTSACRO	171
6.5.11	GOLPE DE TECHO DURANTE EL SUTIRADO NIVEL 2.3 N CAPA JULIA DEL POZO SOTÓN	172
6.6	CONCLUSIONES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS EN MINA	175
7	<u>MEDIOS DE PREVENCIÓN ENSAYADOS EN MINA</u>	<u>177</u>
7.1	INYECCIÓN DE AGUA	177
7.1.1	PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN DE AGUA	179
7.1.2	FENÓMENOS GASODINÁMICOS PRODUCIDOS DURANTE LA INYECCIÓN	181
7.1.2.1	Avance del 1º nivel derecha de la explotación 863 del Pozo San Nicolás	181
7.1.2.2	Avance de los niveles de la capa Julia del Pozo Sotón	185
7.2	SONDEOS DE DISTENSIÓN	188
7.2.1	SISTEMA DE CONTROL DE EFICACIA DE LA DESGASIFICACIÓN	196
7.3	SONDEOS DESCENDENTES	200
7.3.1	CONTROL DE EFICACIA DE LA DESGASIFICACIÓN	203
7.4	RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES PREVENTIVAS	206
8	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>210</u>
9	<u>FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN</u>	<u>213</u>
9.1	TRABAJOS EN EL LABORATORIO	213
9.2	TRABAJOS EN LA MINA	214
10	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>215</u>
	<u>ANEXO I: PUBLICACIÓN COMPLEMENTARIA</u>	<u>221</u>



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Isoterma de adsorción de CH ₄	7
Figura 2.2.- Isoterma de adsorción de CO ₂	7
Figura 2.3.- Isoterma de adsorción de metano en carbones australianos con distintas humedades ...	9
Figura 2.4.- Distribución típica del sistema de macroporos del carbón	11
Figura 2.5.- Imagen de lámina delgada de carbón	12
Figura 2.6.- Relación entre los tres sistemas de poros del carbón.....	12
Figura 2.7.- Isotermas de adsorción de CO ₂ , CH ₄ y N ₂	15
Figura 2.8.- Relación entre permeabilidad y deformación volumétrica	26
Figura 2.9.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de CO ₂	30
Figura 2.10.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de CH ₄	31
Figura 2.11.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de CO ₂ /CH ₄	31
Figura 2.12.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de N ₂	31
Figura 2.13.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de diferentes gases	32
Figura 2.14.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 2" con 3 MPa de diferentes gases	32
Figura 2.15.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 3" con 3 MPa de diferentes gases	33
Figura 2.16.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 4" con 3 MPa de diferentes gases	33
Figura 2.17.- Deformación volumétrica por desorción para carbón "Tipo 4" y diferentes gases	34
Figura 2.18.- Deformación volumétrica frente a presión de CO ₂ para el carbón "Tipo 4"	36
Figura 3.1.- Zona de influencia de una galería o nivel (AITEMIN)	38
Figura 3.2.- Grado de desgasificación para la fase de avance.....	39
Figura 3.3.- Efecto de la inyección de agua en la capacidad de sorción del carbón	40
Figura 3.4.- Situaciones posibles.....	45
Figura 4.1.- Esquema inicial del modelo.....	54

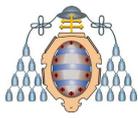


Figura 4.2.- Geometría y dimensiones del modelo	55
Figura 4.3.- Geometría del modelo tras el avance de la galería en carbón.....	56
Figura 4.4.- Geometría del modelo tras la perforación del sondeo en el frente	56
Figura 4.5.- Esquema del modelo en la fase de inyección	57
Figura 4.6.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	59
Figura 4.7.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	60
Figura 4.8.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	61
Figura 4.9.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	61
Figura 4.10.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	62
Figura 4.11.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	63
Figura 4.12.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	63
Figura 4.13.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	64
Figura 4.14.- Estado plástico del modelo tras la inyección.....	64
Figura 4.15.- Zonas definidas para el análisis de los modelos de inyección.....	65
Figura 4.16.- Comparativa de los modelos con sondeo de 10 m de longitud.....	66
Figura 4.17.- Comparativa de los modelos con sondeo de 7,5 m de longitud.....	67
Figura 4.18.- Comparativa de los modelos con sondeo de 5 m de longitud.....	67
Figura 4.19.- Esquema de una cánula CARDOX.....	68
Figura 4.20.- Características de los tubos CARDOX y sus aplicaciones	69
Figura 4.21.- Estado plástico con sondeo de 10 m, presión de inyección de 190 MPa.....	70
Figura 4.22.- Estado plástico con sondeo de 10 m, presión de inyección de 276 MPa.....	71
Figura 4.23.- Estado plástico con sondeo de 7,5 m, presión de inyección de 190 MPa.....	71
Figura 4.24.- Estado plástico con sondeo de 7,5 m, presión de inyección de 276 MPa.....	72
Figura 4.25.- Estado plástico con sondeo de 7,5 m y presión de inyección de 78 MPa.....	73
Figura 4.26.- Estado plástico del modelo con permeabilidad 0,0002 mD	75

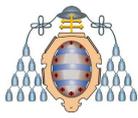


Figura 4.27.- Estado plástico del modelo con permeabilidad 0,002 mD	75
Figura 4.28.- Estado plástico del modelo con permeabilidad 0,02 mD	76
Figura 4.29.- Estado plástico del modelo con permeabilidad 0,2 mD	76
Figura 4.30.- Comparativa del comportamiento para diferentes permeabilidades.....	77
Figura 5.1.- Muestra de carbón	79
Figura 5.2.- Componentes del ensayo	80
Figura 5.3.- Distribución de los sondeos.....	80
Figura 5.4.- Circuito de inyección y control de gas	81
Figura 5.5.- Captación de datos.....	82
Figura 5.6.- Inyección de metano.....	82
Figura 5.7.- Ensayo de inyección de metano.....	83
Figura 5.8.- Detalle del ensayo de inyección con aumento del caudal.....	84
Figura 5.9.- Comparativa descarga real en S1 y gráfica de calibración del modelo	85
Figura 5.10.- Resultados de calibración de permeabilidad con CH ₄	86
Figura 5.11.- Representación del ajuste de la curva presión de gas-permeabilidad para CH ₄	87
Figura 5.12.- Resultados de permeabilidad en ensayos a gran escala y laboratorio con CH ₄	87
Figura 5.13.- Sistema de presión de gas direccional	88
Figura 5.14.- Secuencia de la detonación PYROC	89
Figura 5.15.- Inyección de CH ₄ tras el ensayo de fracturación del carbón.....	89
Figura 5.16.- Bajas presiones en la inyección de CH ₄ tras el ensayo de fracturación.....	90
Figura 5.17.- Ensayo de inyección de CH ₄ antes y después del ensayo de fracturación	91
Figura 5.18.- Detalle comparativo de las cargas antes y después del ensayo de fracturación	92
Figura 5.19.- Cese de la inyección de gas antes y después del ensayo de fracturación	92
Figura 5.20.- Comparativa ensayo real-calibración mediante modelo de la descarga de S2	93
Figura 5.21.- Zona de estudio.....	94

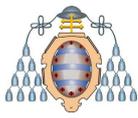


Figura 5.22.- Cánula de gas.....	95
Figura 5.23.- Disposición de las cánulas de gas.....	96
Figura 5.24.- Ensayo de inyección de gas "in situ"	97
Figura 5.25.- Presión en la cánula de control durante la inyección de gas.....	97
Figura 5.26.- Presión del sondeo de inyección después de cesar la inyección.....	98
Figura 5.27.- Presión en la cánula de control después de cesar la inyección	99
Figura 5.28.- Malla del modelo creado para simulación del ensayo "in situ"	100
Figura 5.29.- Presión inicial en C1.....	101
Figura 5.30.- Comparación carga C2 real y modelo	102
Figura 5.31.- Comparación descarga C2 real y modelo	102
Figura 5.32.- Ecuación de ajuste de la relación permeabilidad calibrada-presión en el ensayo.....	103
Figura 5.33.- Representación del ajuste de la curva presión de gas-permeabilidad en el ensayo ..	103
Figura 5.34.- Curva presión-permeabilidad (aire comprimido y N ₂) con presión axial de 1 MPa.	104
Figura 5.35.- Resultados de permeabilidad en ensayos a gran escala y laboratorio con CH ₄	105
Figura 6.1.- Estado tensional.....	107
Figura 6.2.- Comportamiento elástico.....	107
Figura 6.3.- Compresión triaxial	108
Figura 6.4.- Ensayos triaxiales con diferentes confinamientos	108
Figura 6.5.- Comportamiento elastoplástico	109
Figura 6.6.- Ensayos triaxiales con diferentes confinamientos, Capa Julia	110
Figura 6.7.- Estado tensional sobre un elemento de roca.....	112
Figura 6.8.- Desequilibrio al abrir una galería	112
Figura 6.9.- Detalle de carga inicial en un hastial	113
Figura 6.10.- Primera deformación tras abrir una galería	113
Figura 6.11.- Nuevo estado de equilibrio	114

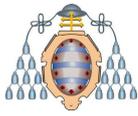


Figura 6.12.- Distribución de tensiones con la distancia a la galería	116
Figura 6.13.- Plastificación	116
Figura 6.14.- Tensión en la dirección tangencial	117
Figura 6.15.- Tensión en la dirección radial.....	117
Figura 6.16.- Comportamiento elastoplástico con rotura	118
Figura 6.17.- Confinamiento del carbón por deformación de los hastiales.....	119
Figura 6.18.- Ejemplo de sobretensión en la capa de carbón	119
Figura 6.19.- Tensiones horizontales en una guía en 2UA	120
Figura 6.20.- Plastificación en torno a la galería.....	121
Figura 6.21.- Hastial competente	123
Figura 6.22.- Hastial débil.....	123
Figura 6.23.- Tensión principal en el caso de una capa con hastiales competentes	124
Figura 6.24.- Tensión principal en el caso de una capa con hastiales débiles.....	125
Figura 6.25.- Tensión perpendicular a la capa en profundidad	126
Figura 6.26.- Estados tensionales creados por otras capas.....	127
Figura 6.27.- Ejemplo para capa égida y macizo residual.....	128
Figura 6.28.- Capa sin explotar	129
Figura 6.29.- Inicio de la explotación	129
Figura 6.30. Desarrollo de la onda	130
Figura 6.31.- Primer hundimiento	131
Figura 6.32.- Nuevo ciclo de carga	131
Figura 6.33.- Nuevo hundimiento	132
Figura 6.34.- Incremento de presión sobre los cuadros metálicos al acercarse un sutirado.....	132
Figura 6.35.- Cálculo de galería a 400 m de profundidad con estrechones.....	133
Figura 6.36.- Cálculo de galería a 950 m de profundidad con estrechones.....	134

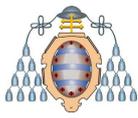


Figura 6.37.- Cálculo de galería a 1.200 m de profundidad con estrechones.....	134
Figura 6.38.- Situación de máxima tensión en una capa sin estrechón	135
Figura 6.39.- Situación de máxima tensión en una capa con estrechón	135
Figura 6.40.- Curva de desorción	136
Figura 6.41.- Registro de los índices de riesgo en un sondeo en carbón.....	138
Figura 6.42.- Sondeo realizado en la capa Julia.....	139
Figura 6.43.- Reducción espontánea de concentraciones en capa Senrina.....	140
Figura 6.44.- Situación de partida	142
Figura 6.45.- Aumento moderado de tensiones.....	143
Figura 6.46.- Reducción de permeabilidad	143
Figura 6.47.- Evolución hacia el FGD	144
Figura 6.48.- Presión en la zona de retención	145
Figura 6.49.- Rotura de zona de retención	145
Figura 6.50.- Liberación súbita del gas adsorbido	145
Figura 6.51.- La propia presión de gas rompe la estructura del carbón	146
Figura 6.52.- Evolución de un FGD.....	147
Figura 6.53.- Situación de partida	148
Figura 6.54.- Aumento de las tensiones	148
Figura 6.55.- Evolución del FGD.....	149
Figura 6.56.- Plano de Labores 1º Nivel Izquierda de 8ª II del Pozo Montsacro.....	150
Figura 6.57.- Evolución de la concentración de gas y V_1 (Nivel Izquierda 8ª II – Montsacro)	151
Figura 6.58.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (Nivel Izquierda, 8ª II – Montsacro).....	152
Figura 6.59.- Concentración de gas y V_1 (Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro).....	153
Figura 6.60.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro)	153
Figura 6.61.- Plano de labores (Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro).....	154

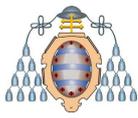


Figura 6.62.- Concentraciones de gas y V_1 (4º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro)	155
Figura 6.63.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (4º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro).....	155
Figura 6.64.- Plano de labores (4º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro).....	156
Figura 6.65.- Concentración de gas y V_1 (5º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro).....	157
Figura 6.66.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (5º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro).....	158
Figura 6.67.- Situación de los frentes de sutiraje y el avance (Nivel 2.3 Sur Julia - Sotón)	158
Figura 6.68.- Cambios de potencia en los niveles (Nivel 2.3 Sur Julia - Sotón).....	159
Figura 6.69.- Situación de los sutirajes y el nivel de avance (Nivel 2.4 Sur Julia - Sotón)	159
Figura 6.70.- Cambios de potencia en los niveles (Nivel 2.4 Sur Julia - Sotón).....	160
Figura 6.71.- Evolución de la Concentración de gas y V_1 (Nivel 4.1 Norte Julia - Sotón).....	161
Figura 6.72.- Concentración de gas en las dos venas de carbón (Nivel 4.1 Norte Julia - Sotón)...	161
Figura 6.73.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (Nivel 4.1 Norte Julia - Sotón)	162
Figura 6.74.- Concentración de gas en las dos venas de carbón (sondeos ascendentes).....	162
Figura 6.75.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (sondeos ascendentes)	163
Figura 6.76.- Situación del sutiraje y el avance del nivel (Nivel 4.1 Norte Julia - Sotón).....	163
Figura 6.77.- Concentración de gas y V_1 (1 Nivel Izquierda, 863 - San Nicolás).....	165
Figura 6.78.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (1 Nivel Izquierda, 863 - San Nicolás).....	166
Figura 6.79.- Plano de labores (1 Nivel Izquierda, 863 - San Nicolás).....	166
Figura 6.80.- Concentración de tensiones por hundimiento incompleto.....	167
Figura 6.81.- Concentración de gas y V_1 (1 Nivel Derecha, 863 - San Nicolás)	168
Figura 6.82.- Situación del nivel y labores próximas (1 Nivel Derecha, 863 - San Nicolás).....	169
Figura 6.83.- Evolución de las tensiones (1 Nivel Derecha, 863 - San Nicolás)	170
Figura 6.84.- Concentración de gas y V_1 (Nivel 3 Derecha, 8ªI - Pozo Montsacro).....	171
Figura 6.85.- Situación de las labores (Nivel 3 Derecha, 8ªI - Pozo Montsacro).....	172
Figura 6.86.- Situación de las labores (Nivel 2.3 Norte, Capa Julia - Pozo Sotón)	173

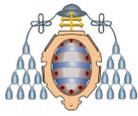


Figura 6.87.- Situación de las zonas sutiradas (Nivel 2.3 Norte, Capa Julia - Pozo Sotón).....	174
Figura 6.88.- Resumen de las variables que intervienen en un FGD	175
Figura 7.1.- Gráficos tensión-deformación	177
Figura 7.2.- Influencia de la humedad en la adsorción	178
Figura 7.3.- Equipo de inyección de agua.....	179
Figura 7.4.- Inyección de agua en el frente de avance	180
Figura 7.5.- Gráfico del desprendimiento de gas durante la inyección	180
Figura 7.6.- Medidas de V_1 en el entorno del primer FGD (1º nivel derecha, 863 - San Nicolás)	181
Figura 7.7.- Medidas de V_1 en el segundo FGD (1º nivel derecha, 863 - San Nicolás).....	182
Figura 7.8.- Medidas de V_1 en el entorno del tercer FGD (1º nivel derecha, 863 - San Nicolás)..	183
Figura 7.9.- Medidas de V_1 en el entorno del cuarto FGD	184
Figura 7.10.- Gráficos de humedad y V_1 en sondeos de control (Nivel 2.4 Norte, Julia - Sotón) .	185
Figura 7.11.- Plano de labores del avance del Nivel 4.1 Norte (Julia – Sotón).....	189
Figura 7.12.- Evolución de las concentraciones de gas.....	189
Figura 7.13.- Distribución de los sondeos de desgasificación y distensión	190
Figura 7.14.- Situación de la zona de sobretensión antes de los sondeos	191
Figura 7.15.- Situación de la zona de sobretensión después de los sondeos	191
Figura 7.16.- Evolución de un sondeo de distensión.....	192
Figura 7.17.- Distribución de los nuevos sondeos de distensión y desgasificación	193
Figura 7.18.- Situación de la zona de sobretensión después de los nuevos sondeos.....	194
Figura 7.19.- Situación del Nivel después del FGD.....	195
Figura 7.20.- Emisión de gas durante la desgasificación	197
Figura 7.21.- Desprendimiento de metano a lo largo del tiempo	198
Figura 7.22.- Zona a desgasificar	199
Figura 7.23.- Evolución del índice de desgasificación.....	199

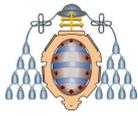
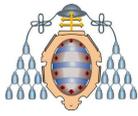
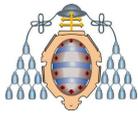


Figura 7.24.- Situación de los sondeos descendentes en la entrada del nivel	201
Figura 7.25.- Situación de los sondeos en el frente del nivel	201
Figura 7.26.- Emisión de metano en el Nivel 2.4 Norte.....	202
Figura 7.27.- Concentraciones de gas en 2005 y 2006.....	204
Figura 7.28.- Plano de labores con los sondeos verticales	204
Figura 7.29.- Evolución de las concentraciones Q1, Q2 y Q3	205
Figura 7.30.- Variables que intervienen en un FGD	206
Figura 7.31.- Comparación del IDD con la potencia de la capa.....	207



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Valores de la velocidad inicial de desprendimiento crítica.....	44
Tabla 3.2.- Volúmenes de finos para el test de Jahns.....	46
Tabla 4.1.- Propiedades mecánicas de los materiales modelizados	55
Tabla 4.2.- Características de los modelos analizados	58
Tabla 5.1.- Presión de gas máxima en cada sondeo	85
Tabla 5.2.- Presión de gas máxima registrada en cada sondeo	86
Tabla 5.3.- Parámetros de las cánulas de gas	96
Tabla 6.1.- Valores medios de la resistencia a compresión simple de los hastiales.....	122
Tabla 7.1.- Características de la inyección.....	187



1 OBJETO DE LA TESIS

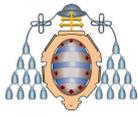
A lo largo de toda la historia de la minería del carbón han ocurrido accidentes, en algunos casos mortales, como consecuencia de los “Fenómenos Gasodinámicos”, denominación genérica que se utiliza cuando se producen eyecciones violentas de carbón acompañadas de gas metano.

En algunas explotaciones de carbón de la Cuenca Central Asturiana se han presentado este tipo de fenómenos. Generalmente van asociados a determinadas capas que, por sus características, las hacen especialmente propensas a estos fenómenos. A medida que aumenta la profundidad de las explotaciones su frecuencia también aumenta y resulta absolutamente necesario revisar y actualizar los métodos de prevención y control.

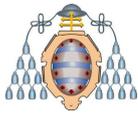
Aunque se han dedicado grandes esfuerzos y recursos económicos a su investigación, aún a día de hoy no se sabe con total certeza qué mecanismos los desatan y como pueden prevenirse o al menos preverse, para tomar las medidas de seguridad adecuadas. Obviamente, los diferentes estudios realizados han arrojado algo de luz respecto a las técnicas preventivas, como la desgasificación, que se vienen utilizando durante las últimas décadas en todas las minas potencialmente peligrosas.

Para entender los mecanismos, así como las estrategias de prevención y control de estos fenómenos, es esencial conocer y aprender de los accidentes del pasado. Sin embargo, no siempre se ha dispuesto de todos los datos para hacer un análisis en profundidad de lo ocurrido, sobre todo en los primeros accidentes. En esa época era frecuente calificarlos de fortuitos y se asociaban al propio laboreo y al metano contenido en las capas que se explotaban. Esto ha llevado al desarrollo de teorías que, con posterioridad, han resultado erróneas o poco precisas y no han servido para tomar las medidas preventivas adecuadas.

De acuerdo a Suchman (1961) un evento puede ser clasificado como un accidente si es inesperado, inevitable e inentendible. Es decir, un evento es un accidente si da pocos avisos y ocurre rápidamente. En el momento en que se pasa a entender el fenómeno que lo desencadena desaparece el accidente.



El presente trabajo conducente a Tesis, realizado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Oviedo y la Empresa HUNOSA, tiene como objetivo el establecer un modelo de comportamiento del “Fenómeno Gasodinámico” que permita mejorar su prevención durante la ejecución de labores de avance en las explotaciones por sutiraje con subniveles horizontales. Se trata de profundizar en el conocimiento de estos fenómenos e investigar nuevos métodos en el tratamiento de incidentes que se vienen produciendo, ocasionalmente, durante la fase de avance con minador de galerías en carbón tensionadas con importantes cantidades de metano.



2 INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

Los “Fenómenos Gasodinámicos”, en adelante FGD, consisten básicamente en desprendimientos súbitos de carbón y gas, debido a un problema de tensiones inducidas por la propia explotación y al gas, de forma conjunta.

Un FGD se produce cuando el equilibrio existente inicialmente en el macizo de carbón, entre el estado tensional y las fuerzas debidas a la presión de gas, se rompe para pasar, mediante una proyección súbita de carbón y gas, a una situación más estable.

De forma más concreta, en los avances y frentes de explotación, puede existir una situación tensional en equilibrio inestable, junto con un gradiente de concentración de gas de forma que, en algunas ocasiones y ante acciones iniciadoras, evoluciona rápidamente hacia un equilibrio más estable liberando toda la energía acumulada.

Los yacimientos de carbón están fundamentalmente asociados a dos tipos de gas: metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El CH_4 es generado como consecuencia del proceso de carbonización, mientras que el CO_2 a menudo penetra en la capa de carbón debido a la presencia de rocas ígneas cercanas.

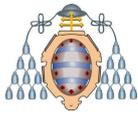
Ambos gases pueden resultar peligrosos cuando se encuentran en cantidades elevadas dentro de la capa de carbón. Así, el CH_4 resulta explosivo para concentraciones en aire comprendidas entre el 5 y el 15 %, y el CO_2 , en concentraciones superiores al 2 %, comienza a causar daños fisiológicos.

La descarga de gas del carbón puede producirse de tres formas:

- Flujo ocasional desde los poros y grietas.
- Flujo más o menos constante desde grietas o irregularidades de la capa.
- Fenómenos gasodinámicos en la zona de labores mineras.

Los dos últimos casos se dan en pocas ocasiones, pero son los más peligrosos en el contexto de las labores mineras. El problema de los FGD viene dado por la combinación de varios factores: tensiones mecánicas, contenido en gas y propiedades físicas y mecánicas del carbón.

Una combinación desfavorable de estos factores con los propios de las labores mineras, puede llevar a un peligroso accidente si no se toman las medidas oportunas.



La influencia que el gas contenido en el carbón ejerce en la generación de FGD en minas subterráneas, requiere la comprensión y conocimiento de los mecanismos de circulación del gas en el carbón y de las características de sorción del propio carbón.

La cantidad de gases que quedan en el seno de la capa de carbón durante las labores depende de la potencia de la capa, la profundidad del yacimiento, la estructura y resistencia del carbón, la geología de la zona y el estado tensional.

En los apartados siguientes se tratarán todos estos temas.

2.1 Mecanismos de los fenómenos gasodinámicos

Existen numerosos modelos que tratan de explicar la generación de FGD en las labores mineras. En general, como factores desencadenantes, se da mucha importancia al contenido y flujo de gas, a las tensiones mecánicas que soporta el carbón y a la fracturación del mismo. Kidybinski (1980) propone la existencia de tres zonas en el seno de la capa de carbón por delante del frente de avance de las labores:

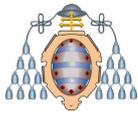
- Zona de protección o desgasificada (pocos metros por delante del frente de avance).
- Zona de alta presión o zona activa.
- Zona de estabilización de presión.

Dentro de este modelo deben darse tres fases fundamentales para que se produzca un FGD:

- Fracturación del carbón a compresión en la zona activa.
- Almacenamiento de gas en la zona de alta presión.
- Flujo de materiales, carbón triturado y gas, hacia la galería de avance desde la zona de alta presión creada.

Gray (1980) considera la existencia de dos posibles mecanismos de inicio del FGD. Por una parte, la rotura a tracción de carbón no confinado en la zona del frente y por otra la tubificación (erosión interna) de material sometido a cortante.

Litwiniszyn (1985) propone un modelo basado en el hecho de que el gas se encuentra dentro del carbón en una fase condensada. Cuando una onda de choque



atraviesa el carbón, se produce un cambio de fase y la sustancia líquida pasa a estado gaseoso. Esta transformación repentina hace que la estructura interna del carbón se destruya y se inicie el FGD. Existen varias cuestiones que apoyan la hipótesis de este modelo:

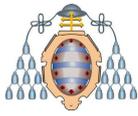
- A veces se producen golpes o sacudidas a la vez que los FGD.
- En minas en las que se trabajaba sin maquinaria, se escucharon varios “golpes” en el interior del carbón justo antes de que se produjese FGD.

Sin embargo, Paterson (1986) señala diversas ambigüedades en este modelo, especialmente las que hacen referencia al origen de la supuesta “onda de choque”.

Otros autores, Jagiello (1992) han propuesto modelos basados en descripciones termodinámicas. En este caso la premisa de partida es que la liberación de gas que se produce al penetrar en la capa de carbón, lleva aparejada una disminución de la temperatura del sistema. Como resultado del trabajo realizado por el gas emitido, la energía del sistema decrece, pero el gas que aún se encuentra en el carbón tiene cierta cantidad de “trabajo” almacenado, que puede ser invertido en la generación de un FGD.

Autores como Tingkan Lu *et al.* (2011) estudian estos fenómenos en minas de China, en las que las capas de carbón son poco resistentes y tienen alto contenido en gas. Consideran que el FGD es debido al alto almacenamiento de energía interna en el carbón, y proponen disminuir dicha energía mediante técnicas como la inyección de agua en sondeos mediante tubería ranurada.

Kang Ping Chen (2011) explica un nuevo mecanismo para predecir los FGD en minas subterráneas de carbón, considerando estos desprendimientos como súbitos y violentos, arrojando gran cantidad carbón y gas (metano y dióxido de carbono) del frente de trabajo de la mina subterránea. Este fenómeno conduce a la explosión de gas y a la contaminación de la atmosfera minera y a pesar de llevar más de 150 años analizando dicho fenómeno, todavía es poco entendido. Este nuevo modelo que presenta el autor combina la mecánica de fractura, la dinámica de los gases y la mecánica de rocas identificando la condición crítica que desencadena el desprendimiento súbito de gas y los fenómenos más comunes que ocurren previamente al mismo.



Por otra parte, Sheng Xue *et al.* (2011) consideran que un FGD es reconocido por dos procesos: iniciación y desarrollo y que cada uno tiene sus propias características y requiere diferentes aproximaciones en su modelización teniendo en cuenta la deformación y el fallo de la capa de carbón, la adsorción y desorción del gas, así como los flujos del mismo y del agua si la hubiera. Esto requiere el uso de códigos como FLAC3D y COMET3 estableciendo el enlace mediante programas propios en lenguajes FISH y C++.

Merece ser comentado el trabajo de Nie Baisheng *et al.* (2012), que han investigado la influencia de las vibraciones por voladura sobre los FGD en una mina subterránea. La desorción de gas se acelera bajo la acción de las vibraciones y además éstas originan la expansión de fracturas con lo que todo ello agrava el riesgo de FGD. Este trabajo, en el fondo, intenta recomendar una técnica minera donde se amortigüen o eliminen las vibraciones.

2.2 Evaluación de los fenómenos gasodinámicos

Existen numerosos factores que pueden generar o al menos contribuir a la generación de FGD. A continuación se describen de forma resumida las principales características de cada uno de ellos así como su implicación en el proceso.

2.2.1 Composición del gas contenido en el yacimiento de carbón

Generalmente, el carbón adsorbe entre una y dos veces más CO_2 que CH_4 . Diversos estudios han dado como resultado la obtención de isothermas de adsorción intermedias para mezclas de ambos gases, en las que se observa un aumento paulatino del contenido total de gas a medida que aumenta la proporción de CO_2 .

Por tanto, en una capa de carbón a una presión determinada, pueden existir grandes cantidades de CO_2 y los problemas de emisiones pueden hacerse más graves.

Greaves (1993) realizó experimentos de sorción de gas con una mezcla de 75 % de CH_4 y 25 % de CO_2 . Los resultados mostraban una composición final del gas adsorbido a una presión de 7,1 MPa de 28 % de CH_4 y 72 % de CO_2 , lo que supone un contenido de CH_4 de 4 cm^3/g de carbón y 12 cm^3/g de CO_2 , tal y como se muestra en la Figura 2.1 y la Figura 2.2, que corresponden al CH_4 y al CO_2 , respectivamente.



Para comprobar este y otros datos similares de varios autores, con los datos obtenidos a lo largo del presente trabajo se ha construido una isoterma de adsorción de CH_4 para el carbón de la capa Julia del Pozo Sotón, que se describirá con más detalle en apartados posteriores.

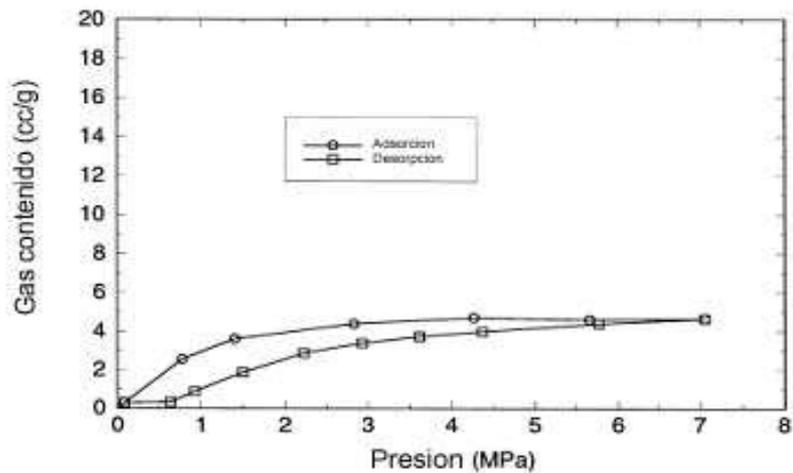


Figura 2.1.- Isoterma de adsorción de CH_4

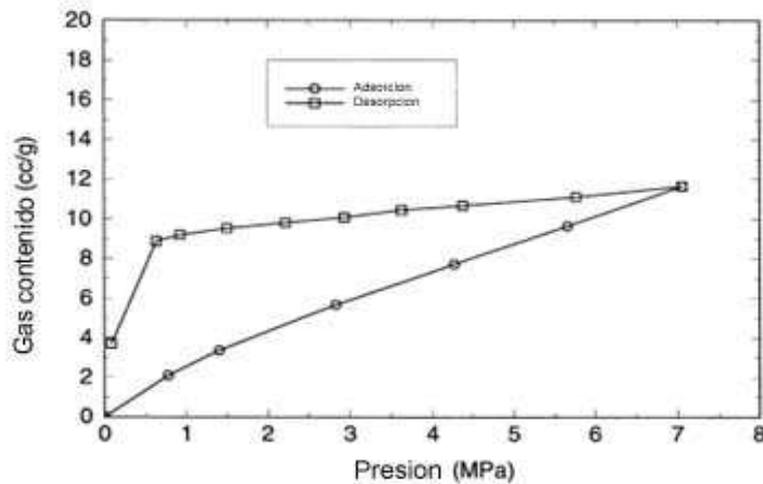
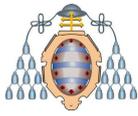


Figura 2.2.- Isoterma de adsorción de CO_2

En los experimentos de Greaves (1993) la desorción posterior dio lugar a los siguientes procesos:

- El CH_4 fue rápidamente emitido por el carbón a medida que la presión bajaba.



- No se produjo una desorción significativa de CO₂ hasta que la presión bajó por debajo de 0,7 MPa.

Estos resultados apoyan la afirmación de que el carbón presenta una gran afinidad por el CO₂, mucho mayor que por el CH₄. La demora en la emisión de CO₂ hasta presiones muy bajas se considera uno de los factores implicados en la generación de FGD en capas de carbón con CO₂. Este hecho depende de cada tipo de carbón, y aunque en general se cumple esta premisa (mayor afinidad del carbón por el CO₂), en el caso del carbón de la capa Julia, la afinidad por ambos gases parece similar, tal y como se verá en apartados posteriores.

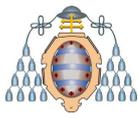
2.2.2 Labores mineras y geología

Los métodos de explotación pueden influir en mayor o menor medida en la generación de FGD. En orden de mayor a menor riesgo Hargraves (1993) realizó la siguiente clasificación de las labores en la mina:

1. Corte transversal de la capa.
2. Avance de galerías en la capa.
3. Avance por tajo largo.
4. Explotación por tajo largo en retirada.
5. Cámaras y pilares.

El corte transversal de la capa supone el mayor riesgo de generación de FGD debido a que las labores avanzan desde un material más competente (hastial) hacia otro más débil (carbón). Al realizar el corte del carbón, la presión de confinamiento de la roca circundante es desequilibrada de forma repentina y, si hay gas en la capa en cantidad suficiente, éste puede ser emitido muy rápidamente.

El avance de galerías en el carbón supone crear condiciones de presión atmosférica en el frente, mientras que pocos metros por delante existen presiones mucho más altas de presión de gas en el carbón virgen. Por tanto, si al avanzar se encuentra cualquier tipo de debilidad o discontinuidad en el carbón, puede producirse un desprendimiento, ya que, de nuevo, la presión de confinamiento se vería repentinamente minimizada.



En cuanto a la influencia de las estructuras geológicas en la generación de FGD, puede decirse que, según Shepherd (1981), las irregularidades en las capas de carbón están frecuentemente asociadas a estos procesos, aunque no es necesario que se trate de grandes estructuras, como fallas, sino que también pueden ser paleocanales, diques o cualquier otro elemento que suponga la existencia de zonas de concentración anómala de tensiones.

De hecho, J. Han *et al.* (2012) han investigado la influencia de las tensiones “in situ”, medidas mediante células de inclusión rígida en el carbón, y la presión del propio gas sobre los FGD ocurridos en la minería subterránea de China, obteniendo conclusiones interesantes respecto a la influencia del tensor de tensiones “in situ”.

2.2.3 Propiedades del carbón que influyen en la sorción de gas

Existen una serie de propiedades que pueden influir en la sorción de un gas por parte del carbón, entre las que destacan las siguientes.

2.2.3.1 Humedad

Según Hargraves (1993), el carbón que se encuentra en el entorno de un FGD normalmente se encuentra seco. Como muestran los datos de las isoterma de la figura siguiente, obtenidas a partir de ensayos realizados con carbones de la Cuenca Central Australiana, para una presión de gas dada, el carbón adsorbe más gas cuando la humedad es baja.

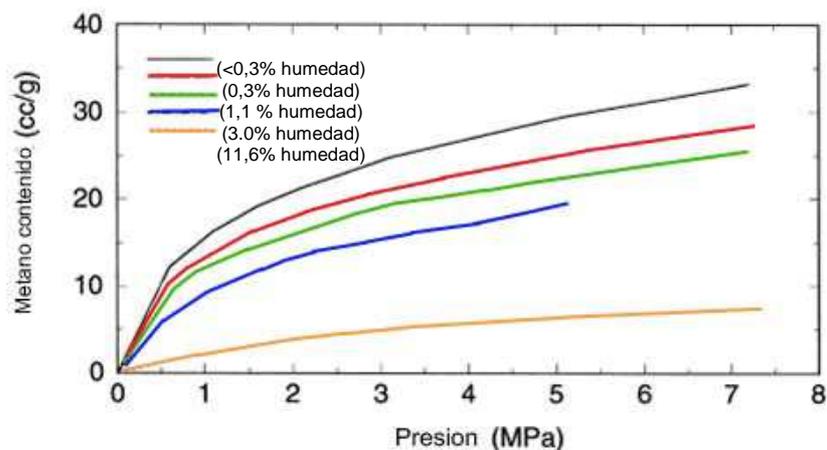
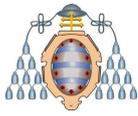


Figura 2.3.- Isoterma de adsorción de metano en carbones australianos con distintas humedades



Como consecuencia, el gas que migra hacia el frente de avance (más seco al estar expuesto al aire) desde el interior de la capa como consecuencia de las labores mineras, puede no llegar a salir y ser readsorbido en la zona inmediatamente por detrás del frente, donde se iría acumulando hasta provocar un FGD.

El gas contenido decrece significativamente cuando la humedad contenida en el carbón aumenta. Sin embargo, si se conoce el contenido en gas del carbón seco, el valor para el carbón húmedo puede ser aproximado usando la fórmula de Ettinger (1984):

$$\frac{Q_{ads}(húmeda)}{Q_{ads}(seca)} = \frac{1}{1 + 0,31w}$$

donde w es la humedad contenida en el carbón en %.

Por otra parte, el contenido en gas del carbón decrece con el incremento de las cenizas puesto que es la materia carbonosa la que adsorbe el metano.

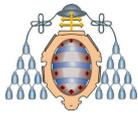
2.2.3.2 Rango y composición del carbón

En general, se considera que los carbones con mayor tendencia a los FGD son los de alto rango (bituminosos, con alto contenido en volátiles). En relación a la composición del carbón se relaciona esta tendencia con su contenido en vitrinita. Varios autores han realizado estudios en diversos yacimientos y han verificado esta tendencia, aunque en muchos casos existían factores adicionales, como presencia de fallas, cuya influencia puede ser decisiva.

Sin embargo, aunque en menor proporción, en los carbones de bajo rango también se pueden producir estos fenómenos, como el que se ha descrito en la mina Valenje, en la antigua Yugoslavia. Chen Shangbin *et al.* (2012) estudian un caso curioso de la influencia del magma para que se produzca un FGD también en un carbón de bajo rango.

2.2.3.3 Resistencia del carbón

Beamish y Crosdale (1998) realizaron varios ensayos de compresión uniaxial con diversos tipos de carbones australianos. Además cada tipo de carbón fue ensayado variando la orientación de los "cleats" para analizar si existía anisotropía en los valores de la resistencia.



Llegaron a la conclusión de que los carbones de alto rango son más frágiles y poseen microfracturas que se propagan con más facilidad que en los carbones de bajo rango. Se trata por tanto de carbones con mayor friabilidad. Si a este hecho se une la cuestión antes comentada, de que pueden almacenar más gas durante más tiempo, la tendencia a sufrir FGD en estos carbones puede llegar a ser muy elevada.

2.3 Estructura física del carbón

A bajas presiones, el carbón presenta una mayor capacidad de almacenamiento de gas que los reservorios convencionales (caliza, arenisca). Esto es así porque el carbón posee una elevada superficie de poros. De hecho, según Littke y Leythaeuser (1993), el carbón presenta tres sistemas de poros:

- Microporos, menores de 50 Å.
- Mesoporos, entre 50 y 500 Å.
- Macroporos, entre 500 Å y 50 micras.

Además existe una red de fracturas, aproximadamente perpendiculares entre sí, denominadas "cleats", diferenciadas en "face cleats" y "butt cleats" (véanse la Figura 2.4 y la Figura 2.5).

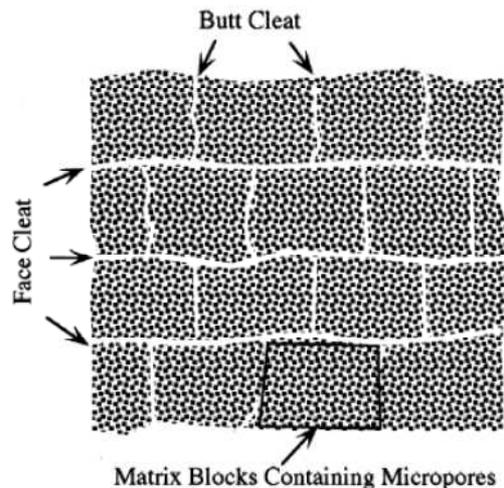
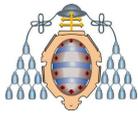


Figura 2.4.- Distribución típica del sistema de macroporos del carbón



Universidad de Oviedo

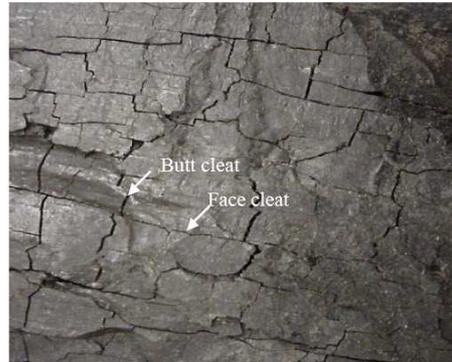


Figura 2.5.- Imagen de lámina delgada de carbón

El mecanismo mediante el cual se forman las “cleats” ha sido ampliamente discutido y, en la actualidad, se admite, a nivel general, que viene dado por la conjunción de tres factores:

- Esfuerzos de tracción intrínsecos del carbón, producidos por la retracción de su estructura.
- Presión de poro, inducida por los hidrocarburos presentes en el carbón.
- Esfuerzos tectónicos, que controlan la geometría de los “cleats”, ya que se asume que los “face cleats” se extienden en la dirección paralela al máximo esfuerzo, mientras que los “butt cleats” lo hacen en la dirección perpendicular.

En los bloques que se forman entre los “cleats” coexisten matriz y micro y meso poros, como se puede ver en el esquema de la figura siguiente (Figura 2.6).

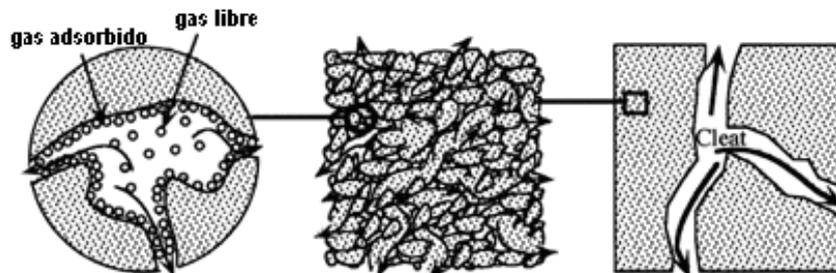
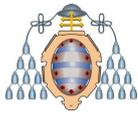


Figura 2.6.- Relación entre los tres sistemas de poros del carbón

Según Murray (1991) el gas se encuentra retenido en estos sistemas de poros de cuatro maneras diferentes:

- Como moléculas adsorbidas dentro de los microporos.
- Atrapado dentro de la porosidad de la matriz (mesoporos).



- Como gas libre.
- Disuelto en el agua freática existente en las fracturas del carbón.

2.4 Sorción del gas por el carbón

El flujo de gas en el carbón es un fenómeno físico mediante el cual el gas puede entrar o salir del carbón (adsorción o desorción) bajo determinadas condiciones de presión. La adsorción describe la penetración, más o menos uniforme, de gases en la estructura molecular del carbón. Los átomos y moléculas pueden unirse entre sí mediante fisisorción o quimisorción.

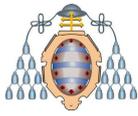
En la fisisorción (adsorción física), existe una débil fuerza de Van der Waals del gas adsorbido hacia la superficie del carbón. Durante este proceso, la identidad química del gas adsorbido permanece intacta y por tanto es un proceso reversible. La quimisorción por el contrario, incorpora el gas a la estructura química del carbón, por lo que resulta irreversible.

Cuanto mayor es la superficie interna de los poros más moléculas pueden quedar atrapadas en ella. En general esto implica que un sólido que sea un buen adsorbente será muy poroso, de manera que su superficie efectiva sea varias veces mayor. Además de esto, la sorción depende de otros factores, como la humedad, la temperatura y el contenido mineral del carbón, así como de la porosidad, especialmente del sistema de microporos, que puede llegar a suponer más del 85 % de la porosidad total.

Otro factor que determina la capacidad de retención de gas por parte del carbón es la profundidad a la que se encuentra el yacimiento, de manera que a mayor profundidad más capacidad de adsorción de gas tiene el carbón. Así, se estima que el 95 % del gas contenido en el carbón se encuentra adsorbido, y solo un pequeño porcentaje (< 5 %) se encuentra libre.

Saghafi (2001) calcula que, de forma aproximada, en un kilogramo de carbón la superficie de los poros mide entre 50.000 y 300.000 m², lo que corresponde a 25 m³ de gas por tonelada de carbón.

Varios autores han utilizado la siguiente fórmula para calcular el volumen de gas libre a partir de la porosidad y de las condiciones de presión y temperatura.



$$C_v = \Phi \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{273}{T}$$

- C_v es el contenido de gas libre (m^3/t).
- Φ es la porosidad (m^3/t).
- P es la presión absoluta de gas (kPa).
- P_0 es la Presión atmosférica (kPa).
- T es la temperatura absoluta del estrato (K).

Los cambios de presión y temperatura, así como las propias labores mineras pueden hacer que parte del gas libre sea adsorbido, así como que parte del gas adsorbido puede ser emitido.

El metano adsorbido en el carbón, a las presiones que existen normalmente en las minas, viene definido por la isoterma de Langmuir. Esta isoterma representa la cantidad de gas que puede contener el carbón a diferentes presiones y temperaturas.

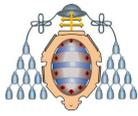
Ogle (1984) y Hargraves (1983) calcularon las isotermas a la misma temperatura para el CO_2 y el metano y concluyeron que el carbón tiene una capacidad mucho mayor para la adsorción del CO_2 que del metano. Otros autores (Harpalani, Mc Pherson, 1986) también calcularon las isotermas para estos y otros gases. A continuación se exponen, de forma resumida, los resultados obtenidos.

2.4.1 Isotermas de adsorción

Una isoterma de adsorción es una curva que relaciona el contenido en gas de un yacimiento de carbón con la presión de gas para una temperatura constante y su ecuación general viene dada por la siguiente expresión.

$$Q_{ads} = A \frac{KP}{1 + KP}$$

- Q_{ads} es la cantidad gas adsorbido (m^3/t).
- P es la presión de gas (Pa).
- A y K son constantes que dependen del tipo de gas, del propio carbón y de la temperatura.



En la Figura 2.7 se muestran las curvas de adsorción de CH_4 , CO_2 y N_2 a diferentes temperaturas calculadas por Boxho (1980).

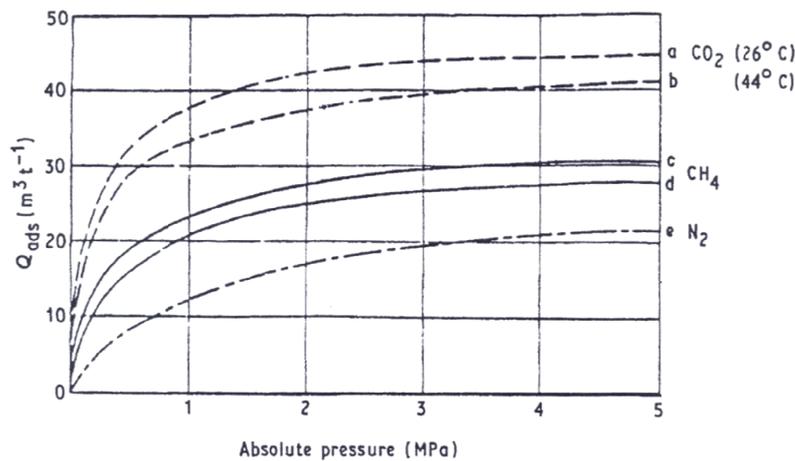
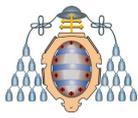


Figura 2.7.- Isotermas de adsorción de CO_2 , CH_4 y N_2

A la vista de la figura anterior pueden deducirse las siguientes conclusiones:

- Para una temperatura dada, el CO_2 es adsorbido más rápidamente que el CH_4 , que a su vez es adsorbido antes que el N_2 , lo que indica que la naturaleza del gas influye enormemente en el proceso de adsorción.
- Para una misma presión de equilibrio, la cantidad de gas adsorbido decrece a medida que aumenta la temperatura.
- La cantidad de gas adsorbido se incrementa con la presión y alcanza el equilibrio para una presión que varía según el tipo de carbón. A esta presión de equilibrio, se completa la formación de una capa mononuclear en la superficie de los poros del carbón y, por tanto, la cantidad de gas adsorbido no varía al disminuir la presión. Sin embargo, si la presión aumenta por encima de un valor crítico, comienza a formarse una segunda capa molecular, lo que implica un nuevo aumento en la cantidad de gas adsorbido. La presión crítica se encuentra, en general, muy por encima de la presión existente en las capas de carbón.



2.4.2 Desorción

La desorción es lo contrario de la adsorción y ocurre cuando la presión de gas en los poros se reduce. Este proceso da como resultado la difusión molecular, la cual continuará hasta una velocidad muy baja, mientras que el gas pueda migrar a través de las fracturas o microfisuras hacia las zonas de baja presión, como el frente de las labores.

El contenido en gas que puede ser desorbido se define como la cantidad de gas disponible para ser emitido cuando la presión de gas de alrededor cae desde el valor que presenta en el carbón virgen hasta la presión atmosférica.

Se han propuesto numerosas ecuaciones para cuantificar la velocidad a la que ocurre la desorción. Una de las más utilizadas es la que aproxima la velocidad considerando una partícula esférica.

$$q(t) = q(\infty) \left[1 - \exp\left(\frac{-4\pi^2 Dt}{d^2}\right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

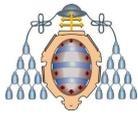
donde:

- $q(t)$: cantidad acumulada de gas emitido en tiempo, t , después de que haya sido reducida la presión de gas ambiente de repente a presión atmosférica.
- $q(\infty)$: cantidad total de gas que puede ser emitido en un tiempo infinito a la presión atmosférica.
- t : tiempo (s).
- d : diámetro de la partícula equivalente (cm) = $6 \times \text{volumen/superficie}$.
- D : coeficiente de difusión, cm^2s^{-1} . El coeficiente de difusión, D , no es una constante absoluta para un gas dado sino que varía con la temperatura y la presión de gas. Los valores calculados para el metano en carbón bituminoso son del orden de $10^{-10} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ a temperatura ambiente.

Otra ecuación empírica empleada en el Reino Unido es la propuesta por Airey (1976).

$$q(t) = q(\infty) \left(1 - \exp\left[-(t/t_0)^n\right] \right)$$

donde:



- t_0 : tiempo de desorción del 63% de gas.
- El índice n , se indica como variable desde 0,3 para carbón bituminoso a 0,5 para antracita.

Una simplificación de esta ecuación para las fases iniciales de desorción es la siguiente:

$$q(t) = q(\infty)kt^n$$

donde k es una constante.

Para caracterizar un carbón mediante las anteriores relaciones, debería conocerse la cantidad total de gas, $q(\infty)$, y la cantidad acumulada de gas desorbido, $q(t)$, en tiempo t , para así poder determinar las diferentes constantes.

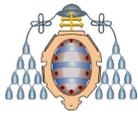
2.5 Contenido de gas en el carbón

Fuchang Hao (2011) defiende que el parámetro crítico para el FGD en un panel de carbón en una mina subterránea es el contenido de gas en capa y ha estudiado en detalle los sondeos de drenaje necesarios, definiendo la longitud y tiempo necesarios para mitigar el FGD. Su investigación se basa en un modelo matemático que tiene en cuenta el rango y la capacidad de absorción del carbón.

El gas contenido en un yacimiento de carbón se encuentra en condiciones diferentes a cuando se localiza en otro tipo de reservorios, debido a la propia naturaleza del carbón. Yee (1993), describe el gas del carbón como una fase condensada, cerca de un estado cuasi-líquido debido a la adsorción física.

Debido a que el mecanismo de almacenamiento del gas en el carbón no se parece al de otras rocas almacén, no es posible aplicar los métodos comunes utilizados en la industria para la determinación del contenido en gas, por lo que diversos autores han ido desarrollando métodos de aplicación exclusiva al carbón.

Los métodos más usuales de determinación del contenido en gas del carbón subdividen el contenido total de gas de una muestra en tres partes: gas perdido, gas desorbido y gas residual. La cantidad de cada uno de estos tipos de gas es normalmente definida mediante diferentes métodos.



Esta metodología y sus procedimientos asociados inducen en muchos casos a errores, debido a que muchos de los métodos utilizados para la determinación de cada parte del gas total no son comparables entre sí. Mavor y Pratt (1996), Mc Lennan (1995) y Mavor (1994) indican cuales son los posibles errores asociados con estas medidas.

El gas perdido es la porción del gas total que se escapa de la muestra durante la extracción y manipulación antes del sellado. Los volúmenes de gas perdido no pueden ser medidos directamente, por lo que deben ser estimados a partir del resto de volúmenes de otros tipos de gas. Puesto que el gas perdido es una cantidad estimada, generalmente se considera que supone la menor parte del contenido total de gas.

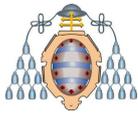
Obviamente, cuanto menos tiempo lleve el proceso de extracción y sellado de la muestra, menor es el gas perdido, aunque también influyen otros parámetros, como la humedad del carbón y el volumen de gas libre en el yacimiento del que se extrae la muestra.

Una vez que la muestra ha sido sellada, el gas desorbido se acumula y puede ser medido directamente mediante diversos métodos. El más preciso es el desarrollado por Schatzel (1987). Se basa en medir las diferencias de presión que se producen en la probeta a medida que el gas es emitido al exterior para después, aplicando la ley de los gases ideales, determinar el volumen de gas desorbido.

El volumen de gas desorbido de una muestra de carbón va disminuyendo gradualmente con el tiempo. Así, las medidas de gas desorbido se consideran finalizadas según los diversos métodos cuando la tasa de desorción alcanza un valor arbitrario que se considera suficientemente bajo. Este valor puede ser alcanzado tras varios días o meses, en función de la propia estructura del carbón.

En cualquier caso, cuando se alcanza ese valor prefijado de baja desorción, en realidad aún queda una pequeña proporción de gas en la muestra. Tradicionalmente, este gas residual se consideraba “atrapado” en el carbón debido a las bajas velocidades de difusión. Bertard (1970) y Levine (1992) sugirieron que en realidad este gas no depende de la difusión y que en parte representa la porción de gas que permanece en equilibrio a una atmosfera de presión en el interior de la probeta.

La cantidad de gas residual puede ser medida machacando la muestra y midiendo después el volumen de gas emitido del mismo modo que en el caso del gas desorbido.



Análisis de volumen de gas residual realizados por Diamond (1986) en 1.500 muestras de 250 carbones diferentes de E.E.U.U. muestran que en carbones de bajo rango el volumen de gas residual supone entre el 40 y 50 % del gas total, mientras que en carbones bituminosos de alto rango apenas representa el 10 %.

2.6 Métodos para la determinación del contenido en gas del carbón

2.6.1 Métodos directos

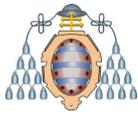
El contenido en gas de una muestra de carbón puede ser determinado de varias maneras diferentes. Estas técnicas pueden dividirse en técnicas de machaqueo rápido y métodos de determinación de la desorción a largo plazo.

Las técnicas de machaqueo suelen utilizarse para comprobar de forma regular el contenido en gas del carbón en el frente de trabajo, ya que el resultado se obtiene en el plazo de pocos días. Son por tanto técnicas apropiadas para la aplicación en minería, aunque tienen el inconveniente de que imposibilitan la determinación del contenido en gas desorbido y residual, así como el tiempo de desorción. Estas variables son fundamentales en la creación de modelos de análisis de yacimientos con gas.

2.6.2 Métodos indirectos

El contenido en gas puede ser estimado de forma indirecta mediante datos de isothermas de adsorción (Kim, 1977) o mediante otras curvas estimadas empíricamente que representan los contenidos en gas medido frente a otras variables medibles, tales como la profundidad a la que se encuentra el carbón o el rango del carbón (Diamond, 1976; Mc Fall, 1986).

Las isothermas de sorción obtenidas de ensayos de laboratorio describen cuantitativamente la relación entre metano adsorbido y variación de presión a una temperatura constante, y proporcionan una medida de la máxima sorción de metano o capacidad de almacenamiento de la muestra de carbón. Por tanto, el contenido en metano estimado mediante estas isothermas de sorción no da necesariamente lugar a un



resultado preciso de los contenidos de gas “in situ”. Puesto que ninguna capa de carbón se encuentra completamente saturada, especialmente aquellas de poca profundidad, los métodos basados en isotermas tienden a sobreestimar el contenido en metano.

Otros métodos indirectos se basan en la testificación geofísica con wireline. Los datos obtenidos a partir de esta técnica son correlacionados con el rango del carbón y la profundidad para estimar el contenido en gas del carbón.

2.7 Flujo de gas en el carbón

El metano contenido en los poros del carbón es capaz de ser emitido si existe un gradiente de presión. Cuando la presión de la capa de carbón disminuye por efecto de las labores mineras, el metano comienza a ser desorbido y migra desde los microporos a los mesoporos de la matriz del carbón y finalmente hacia los “cleats”.

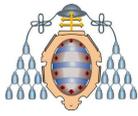
El modelo más reciente de flujo de gas en el carbón ha sido enunciado por Li, Ogawa y Shimada (2003). Según este modelo, existen tres categorías de flujo a través de la matriz carbonosa, que vienen determinadas por las características del carbón en cuanto a las deformaciones.

Así, consideran que existen carbones “normales”, “con deformación frágil” y “con deformación dúctil”.

En carbones normales, el gas desorbe desde las superficies internas de los microporos a la matriz carbonosa mediante difusión y desde allí hacia los “cleats”, donde alcanza un régimen laminar.

Los carbones cataclásticos (con deformación frágil), presentan interconectados los poros y “cleats” muy continuos. Esto hace que estén divididos en multitud de bloques de pequeño tamaño, a los que el gas llega rápidamente mediante flujo laminar.

Los carbones miloníticos (con deformación dúctil) se localizan en puntos estructurales concretos, como zonas de elevado buzamiento y en pequeños pliegues divergentes. En estos carbones, las fisuras están muy comprimidas, lo que significa que tienen menos capacidad de transporte del gas y baja conectividad y por tanto suelen presentar acumulaciones puntuales de gas que pueden llegar a provocar FGD.



2.8 Efecto de las propiedades del carbón en el almacenamiento de gas

Hay multitud de factores que influyen en la capacidad de almacenamiento de gas por parte del carbón, tales como el rango del carbón, la temperatura, la composición del gas y la profundidad de las labores mineras.

2.8.1 Variaciones de la matriz del carbón

La estructura macroscópica del carbón se hincha y se encoge cuando se almacena o expulsa gas, ya sea en forma libre o adsorbida. El cambio que se produce en la estructura del carbón depende especialmente del tipo de gas y de la presión a la que se encuentra dicho gas.

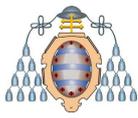
Estos cambios no quedan restringidos a la matriz del carbón, sino que también afectan a los “cleats” y otras fracturas, por lo que tienen una profunda influencia en la permeabilidad y porosidad del carbón.

A lo largo de los últimos cien años ininidad de autores han estudiado los cambios que se producen en la matriz del carbón y sus consecuencias. A continuación se resumen los aspectos más interesantes de todos estos análisis.

Stefanska (1990) llevó a cabo ensayos de inyección de gases (CH_4 y CO_2) a diferentes presiones, comprendidas entre 0,5 y 5 MPa, y observó que la sorción de gas por parte del carbón no sólo venía determinada por los cambios en la matriz carbonosa, sino también por el porcentaje de humedad y la madurez del carbón.

Este autor, junto con otros compañeros, estudiaron en 1994 el hinchamiento de la matriz carbonosa debido a la sorción de metano a presiones de 0,5 y 4,5 MPa y a una temperatura constante de 298 K. Demostraron que la estructura del carbón experimenta una expansión como resultado de la sorción de gas y que, además, este es un proceso determinante en la elección del método de explotación más adecuado de cara a minimizar el riesgo de FGD.

Seidle y Huitt (1995) midieron la retracción de la matriz carbonosa en relación a la desorción y la variación de permeabilidad del carbón. Llegaron a la conclusión de que esta retracción de la estructura dependía más del tipo de gas que de su presión.



Observaron cómo al introducir diferentes gases la deformación volumétrica variaba. Uno de los resultados más importantes del estudio fue que el CO_2 , en algunos carbones, produce una deformación volumétrica del carbón mucho mayor que el metano, siendo este fenómeno la base de todos los estudios actuales de secuestro de CO_2 .

Siguiendo esta línea de investigación, St. George y Barakat (2001) demostraron cómo afecta la desorción de gas a la estructura del carbón y al esfuerzo efectivo. El estudio se realizó con varios gases: CO_2 , CH_4 , N_2 y He. Observaron que en los carbones ensayados el hinchamiento debido a la sorción de CO_2 era doce veces mayor que el debido al N_2 y ocho veces mayor que el debido al CH_4 . Así mismo, el hinchamiento producido por el He era prácticamente imperceptible. Estos resultados no se pueden extrapolar directamente a otros carbones.

En el apartado 2.9 se incluyen una serie de ejemplos y resultados de ensayos reales relacionados con la deformación del carbón.

2.8.2 Variación de la porosidad

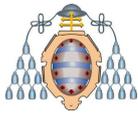
Actualmente existen dos modelos que intentan describir cómo el hinchamiento y retracción de la matriz carbonosa pueden causar cambios profundos en la porosidad y consecuentemente en la permeabilidad de las capas de carbón con gas y en la posterior recuperación de dicho gas.

2.8.2.1 Modelo API (Sawyer, Paul y Schraufnagel, 1990)

El modelo, que expresa la variación de la porosidad del carbón debida al hinchamiento y retracción, viene definido por la siguiente expresión:

$$\Phi = \Phi_i \cdot [1 + c_p \cdot (P - P_i)] - c_m \cdot (1 - \Phi_i) \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{\Delta C_i} \right) \cdot (C - C_i)$$

- Φ , es la porosidad del sistema, en fracción decimal.
- Φ_i es la porosidad inicial del sistema, en fracción decimal.
- c_p es la compresibilidad volumétrica de los poros, en Pa^{-1}
- P es la presión de gas de la capa, en Pa.
- P_i es la presión de gas inicial, en Pa.
- c_m es la compresibilidad por retracción de la matriz carbonosa, en Pa^{-1} .



- ΔP_i es el cambio máximo de presión a partir de la desorción inicial, en Pa.
- ΔC_i es la máxima variación de concentración a partir de la desorción inicial. (adimensional).
- C es la concentración de gas en la capa (adimensional).
- C_i es la concentración inicial de gas en la capa (adimensional).

2.8.2.2 Modelo de Palmer y Mansoori (1996)

Este modelo describe la dependencia de la porosidad respecto a la deformabilidad mecánica y la presión de poro en la capa de carbón. Este modelo para la retracción de la matriz carbonosa está basado en deformaciones inducidas y en las propiedades mecánicas del carbón, y viene dado por la siguiente expresión:

$$\Phi = \Phi_i + A_m \cdot (P - P_i) + C_0 \cdot \left[\frac{K}{M} - 1 \right] \cdot (C - C_i)$$

- M es el módulo de deformación confinado, en Pa.
- K es el módulo de Bulk, en Pa.
- C_0 es la constante de deformación volumétrica de Langmuir (adimensional).
- El término A_m se calcula a partir de la siguiente expresión:

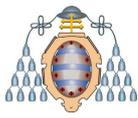
$$A_m = \frac{1}{M} - \left[\frac{K}{M} + f - 1 \right] \cdot \gamma$$

- f es la capacidad de expansión térmica de los granos.
- γ es la compresibilidad de los granos en Pa^{-1} .

2.8.2.3 Combinación de ambos modelos (Pekot y Reeves, 2003)

Igualando el valor de Φ en ambos modelos, éstos pueden combinarse entre sí mediante la siguiente expresión:

$$\Phi_i \cdot \left[1 + c_p \cdot (P - P_i) \right] - c_m \cdot (1 - \Phi_i) \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{\Delta C_i} \right) \cdot (C - C_i) = \Phi_i + A_m \cdot (P - P_i) + C_0 \cdot \left[\frac{K}{M} - 1 \right] \cdot (C - C_i)$$



Si la compresibilidad de los granos γ es pequeña y $\left[\frac{K}{M} + f - 1 \right]$ es despreciable, entonces $A_m = \frac{1}{M}$

La compresibilidad volumétrica de los poros, c_p , se calcula a partir de la ecuación:

$$c_p = \frac{1}{\Phi_i M}$$

Simplificando la expresión inicial se tiene que finalmente el modelo combinado viene dado por la siguiente ecuación:

$$-c_m (1 - \Phi_i) \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{\Delta C_i} \right) = C_0 \left[\frac{K}{M} - 1 \right]$$

Este modelo está basado en cambios en la concentración de gas y apunta como los cambios en permeabilidad debidos a la retracción de la matriz y a los esfuerzos internos afectan al proceso de desgasificación.

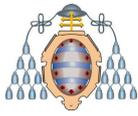
2.8.3 Permeabilidad del carbón

La permeabilidad es una propiedad física que puede ser definida como la resistencia de un medio sólido al paso de un fluido cuando se ve sometido a un gradiente de presión. La permeabilidad es uno de los parámetros más importantes para el éxito o fracaso de los proyectos ECBM (Enhanced Coal Bed Methane Recovery) y en general para el control de las emisiones de gas en las labores mineras.

La permeabilidad a lo largo de una capa de carbón no suele ser constante, ya que existen múltiples factores que pueden afectarla.

Según Neuzil (1994) y (Wang) (2000) su magnitud puede variar entre 10 y 23 m² en función del tipo de roca y de las condiciones del entorno.

Diversas rocas sedimentarias presentan una fuerte anisotropía en relación a la permeabilidad. Por otra parte, la permeabilidad se ve también muy influenciada por la existencia de fracturas y discontinuidades.



Resulta muy complicado estimar la permeabilidad a partir de otras propiedades físicas, como porosidad y tamaño de grano, debido a la complejidad de las relaciones entre estos parámetros.

Las medidas de permeabilidad en laboratorio bajo elevadas condiciones de presión de confinamiento son una posible forma de predecir el comportamiento de la permeabilidad a grandes profundidades. Respecto a estos métodos se ha argumentado que la permeabilidad al gas cambia con los cambios de presión de poro, aunque el esfuerzo efectivo permanezca constante, y que además la permeabilidad al gas es relativamente mayor que la permeabilidad al agua. Estos problemas pueden estar relacionados con la dependencia de la presión de poro de la permeabilidad, definida por el efecto Klinkenberg.

En 1997, Harpalani y Chen estudiaron la desgasificación del carbón y su impacto en la estructura y permeabilidad del mismo. En base a los resultados obtenidos, propusieron una relación entre la permeabilidad y los cambios producidos en la estructura del carbón que viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta k = \alpha_0 \cdot \frac{\Delta V_m}{V_m}$$

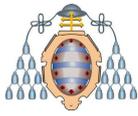
- Δk es el cambio en la permeabilidad.
- α_0 es una constante que depende del tipo de carbón y sus características.
- $\frac{\Delta V_m}{V_m}$ es el cambio de volumen del carbón.

Así mismo, estos autores también definieron una relación entre la deformación volumétrica y la cantidad de gas desorbido:

$$\beta V_{\text{des}} = \frac{\Delta V_m}{V_m}$$

donde V_{des} es el volumen de gas desorbido y β es una constante relacionada con el tipo de gas. Las conclusiones de esta investigación son las siguientes:

- Cuando la presión de gas disminuye, la permeabilidad aumenta notablemente.



- La disminución de la presión de gas hace que el esfuerzo efectivo aumente, lo que tiende a reducir la permeabilidad, pero la retracción de la matriz carbonosa limita esta reducción.
- Los cambios de permeabilidad debidos a la retracción de la matriz carbonosa dependen de la deformación volumétrica, según la Figura 2.8.

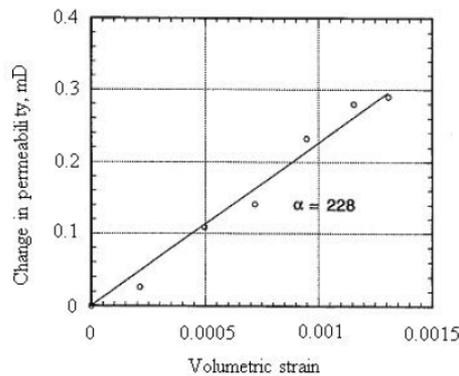


Figura 2.8.- Relación entre permeabilidad y deformación volumétrica

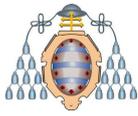
2.8.3.1 Efecto Klinkenberg

La permeabilidad intrínseca representa la movilidad de un fluido en un material poroso y únicamente está relacionada con la geometría de los poros de la roca, es decir, es independiente de las propiedades del fluido. Por tanto, la permeabilidad intrínseca medida con cualquier gas como fluido en ensayos de laboratorio debería ser la misma que la medida con cualquier otro fluido. Sin embargo, lo que comúnmente se denomina “permeabilidad” depende tanto del medio poroso como del fluido, y su relación con la permeabilidad intrínseca viene dada por la siguiente expresión.

$$K = \frac{k}{\eta} \cdot \rho g$$

donde:

- K es la permeabilidad (conductividad hidráulica) en m/s,
- k es la permeabilidad intrínseca, en m²,
- η es la viscosidad del fluido, en Pa·s,
- ρ es la densidad del fluido, en kg/m³ y
- g es la aceleración de la gravedad, en m/s².



Sin embargo, en 1941 Klinkenberg descubrió que la permeabilidad de un medio poroso al gas es relativamente mayor que al agua e interpretó este fenómeno como debido a la existencia de un flujo de deslizamiento entre las moléculas de gas y las paredes del sólido. Las moléculas de gas colisionan entre sí y con las paredes de los poros a medida que atraviesan el medio poroso. Cuando el radio del poro se aproxima mucho al paso medio libre de las moléculas de gas, las colisiones aumentan. Por tanto, este flujo adicional debido al flujo de gas en las paredes del sólido hace que aumente la velocidad de flujo. Este fenómeno se denomina “Efecto Klinkenberg” y analíticamente viene dado por la siguiente expresión.

$$k_g = k_l(1 + 4cl) = k_l \left(1 + \frac{b}{P} \right)$$

- k_g es la permeabilidad al gas (m^2).
- k_l es la permeabilidad al líquido (m^2).
- l es el paso medio libre de las moléculas de gas (m).
- c es una constante.
- P es la presión de poro (Pa).
- b es el factor de deslizamiento de Klinkenberg (Pa).

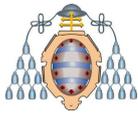
De forma general, el efecto Klinkenberg define la dependencia existente entre la permeabilidad del medio poroso al gas y la presión de gas en dicho medio. Además del efecto Klinkenberg, en la disminución de la permeabilidad con la presión influye el hinchamiento de los granos de carbón, que reduce el volumen de conductos disponible para el flujo

2.8.3.2 Estado tensional

Numerosos autores han constatado en las últimas décadas la gran influencia que ejerce el estado tensional “in situ” en la permeabilidad del carbón.

En numerosos ensayos realizados en el laboratorio se ha podido comprobar cómo la permeabilidad de un carbón concreto depende de la presión de confinamiento.

Diversos autores, como Xue y Thomas (1991) investigaron la variación de la permeabilidad de varios carbones variando tanto la presión de confinamiento como la presión de gas. Demostraron que la permeabilidad del carbón aumenta cuando la presión



de gas disminuye, pero que en estas mismas muestras la permeabilidad descendía entre uno y dos órdenes de magnitud, a medida que se aumentaba la presión de confinamiento de 1 a 15 MPa.

Finalmente, también cabe reseñar los estudios relacionados con la recuperación parcial de permeabilidad al cesar el confinamiento. Varios autores (Harpalani y Mc Pherson en 1984 y Paterson en 1990) llevaron a cabo experimentos en los que sometían a ciclos de carga probetas de carbón y medían su permeabilidad. En ambos casos se observó que el valor de la permeabilidad se recuperaba ligeramente al disminuir el confinamiento.

2.8.3.3 Estructura geológica del carbón

La permeabilidad de las capas de carbón puede verse influenciada por las estructuras geológicas. Generalmente, las zonas donde mejores resultados de desgasificación se obtienen corresponden a áreas con una estructura geológica continua y uniforme. Esto es lógico, ya que teniendo en cuenta que el sistema de “cleats” es un parámetro importante para el valor de la permeabilidad, y que en las zonas estructuralmente complejas estos “cleats” se encuentran dañados y mal comunicados, la permeabilidad en esas zonas es mucho más baja que en otros puntos de la capa.

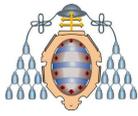
Las capas de carbón poseen una fracturación natural conocida como sistema de “cleats”. Cuanto más anchas y continuas son estas fracturas, mayor es la permeabilidad del carbón. El flujo de agua o gas a través de ellas se considera laminar y puede ser medido mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{10^8 \cdot W^3 \cdot \Delta P}{12\eta L}$$

- Q es la velocidad de flujo, en cm/s.
- W es el ancho de la fractura, en cm.
- $\Delta P/L$ es la diferencia de presión a lo largo de la longitud del canal, en atm/cm.
- η es la viscosidad del fluido, en cp.

Por otra parte, la Ley de Darcy se puede expresar como:

$$Q = \frac{kA\Delta P}{\eta L}$$



Si se combinan ambas expresiones y se despeja k , se tiene la siguiente expresión:

$$k_f = \frac{10^8 \cdot W^3}{12A}$$

- k_f es la permeabilidad de la fractura en Darcy (D).
- W es el ancho de la fractura en cm.
- A es el área de flujo transversal de la fractura en cm^2 .

2.8.3.4 Contenido en agua

En las capas de carbón vírgenes, el agua se suele encontrar rellenando poros y fisuras, y cualquier gas presente está disuelto en el agua o bien adsorbido en la parte interna del carbón. Normalmente, la permeabilidad del carbón al agua aumenta al decrecer la presión. Kissell y Edwards (1975), señalan que la permeabilidad relativa de una capa de carbón aumenta a medida que disminuye el contenido en agua de la capa, ya que existe mayor espacio disponible para que se produzca el flujo de gas.

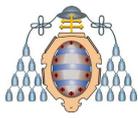
En general, la permeabilidad del carbón disminuye al aumentar el contenido en humedad. La humedad natural disminuye el volumen de poros permeables más de dos veces según Ayruni (1981).

2.9 Influencia del gas en la variación volumétrica del carbón

A continuación se describen y comentan los resultados obtenidos de una serie de ensayos de laboratorio realizados por Sereshki (1995) sobre carbones australianos en los que se analizó el cambio de volumen de probetas de carbón en las que se introducían diferentes gases (CH_4 , CO_2 , CH_4/CO_2 al 50 % y N_2) a diferentes presiones, manteniendo una temperatura constante de 25 °C. Con cada muestra se realizaron ensayos de dos tipos: hinchamiento por adsorción y retracción por desorción.

Las probetas utilizadas tenían un diámetro de 50 mm y una altura de 50 mm, y se hallaban completamente alteradas, al menos en lo que a contenido en gas se refiere.

Con el fin de medir la deformación longitudinal y transversal, en cada muestra se colocaron galgas extensométricas. A partir de los datos de deformación aportados por



dichas galgas se calculó el cambio de volumen después de cada ensayo utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta V}{V} = 2\left(\frac{\Delta r}{r}\right) + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)$$

- h es la altura de la probeta en cm
- r es el radio de la probeta en cm
- V es el volumen de la probeta en cm^3 .

Una vez colocadas las galgas, la probeta se sella a la base del portamuestras y se deja que evacue los posibles restos de gas que pudiera contener, durante 24 h. A continuación se presuriza con un determinado gas hasta 3 MPa. A partir de este punto se van realizando descargas sucesivas de 0,5 MPa. Durante todo el proceso el contenedor de la probeta se encuentra sumergido en agua a 25 °C, pero aislado del líquido mediante fundas de cobre.

2.9.1 Cambios de volumen debido a la adsorción

Para realizar estos ensayos Sereshki parte de cinco probetas de una misma capa de carbón, denominado "Tipo 1" e identificadas como TAB 1, TAB 2 hasta TAB 5. Estas muestras se presurizaron con diferentes gases, tal y como se muestra en las figuras siguientes (Figura 2.9 a Figura 2.12).

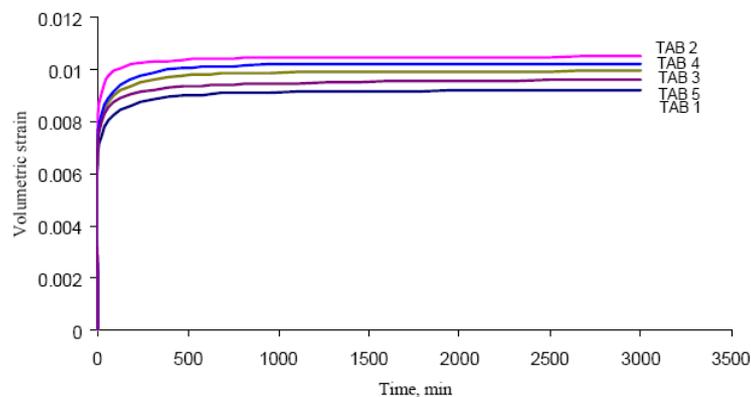


Figura 2.9.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de CO_2

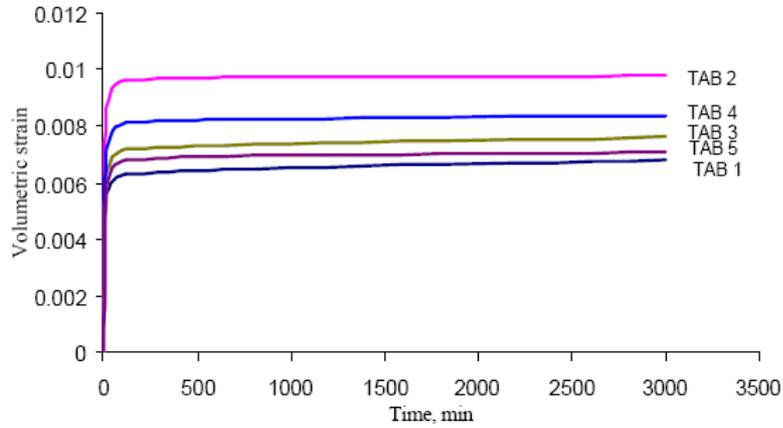
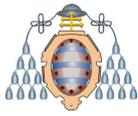


Figura 2.10.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de CH_4

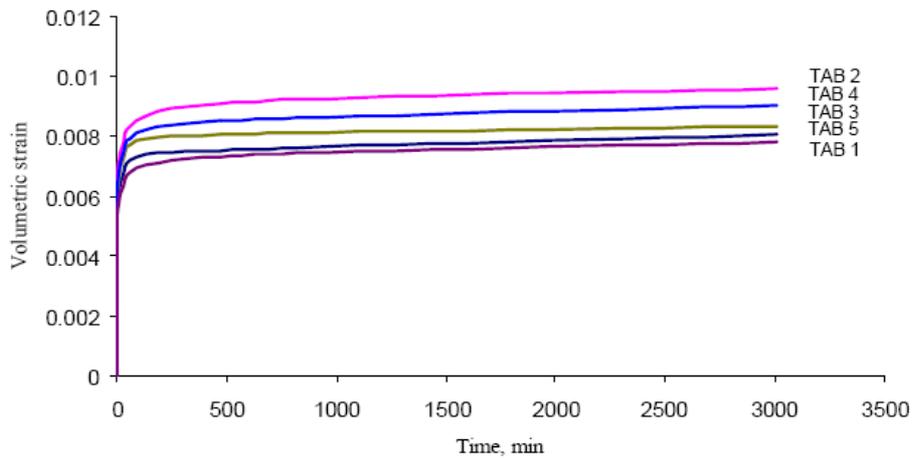


Figura 2.11.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de CO_2/CH_4

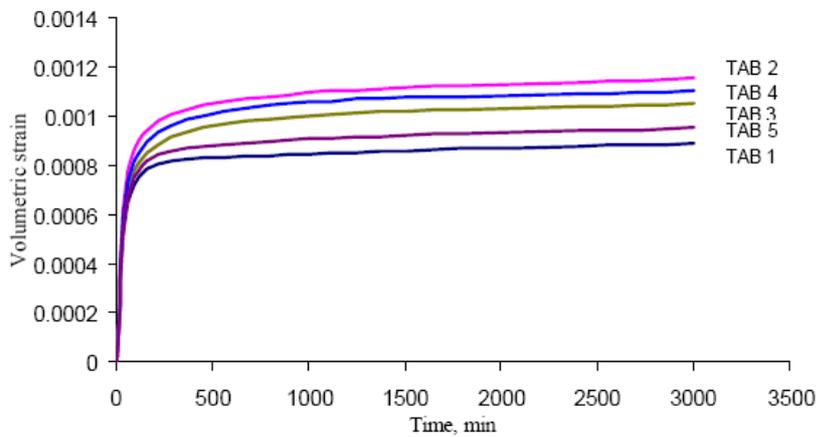
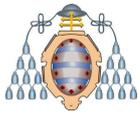


Figura 2.12.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de N_2



A la vista de las gráficas anteriores, lo primero que se observa es que dentro de las cinco probetas ensayadas, que pertenecen al mismo carbón, existen diferencias de deformación de hasta el 20 %. Esto es así porque dentro de una misma capa las propiedades del carbón suelen variar en función de las estructuras geológicas próximas.

A continuación se repitió el proceso para otros tres tipos de carbón ("Tipo 2", "Tipo 3" y "Tipo 4"). En las figuras siguientes (Figura 2.13 a Figura 2.16) se pueden ver los valores promedio de deformación volumétrica para cada gas de los cuatro tipos de carbón.

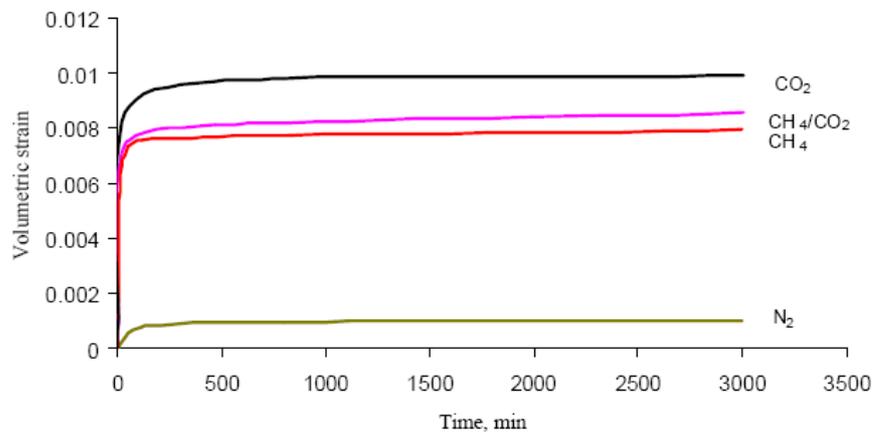


Figura 2.13.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 1" con 3 MPa de diferentes gases

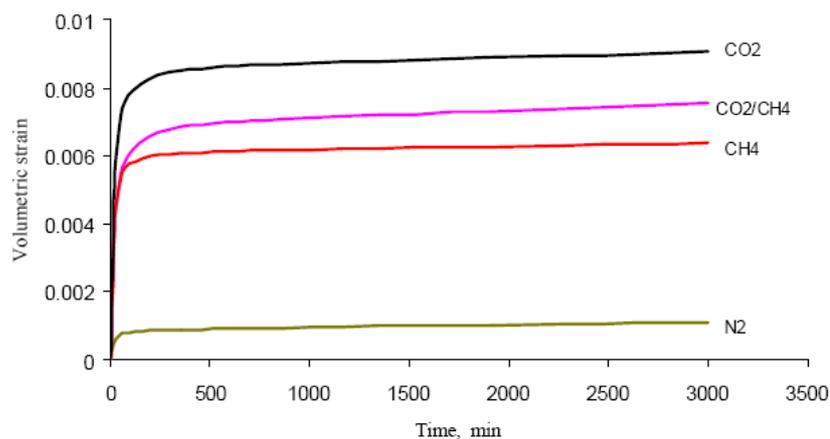


Figura 2.14.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 2" con 3 MPa de diferentes gases

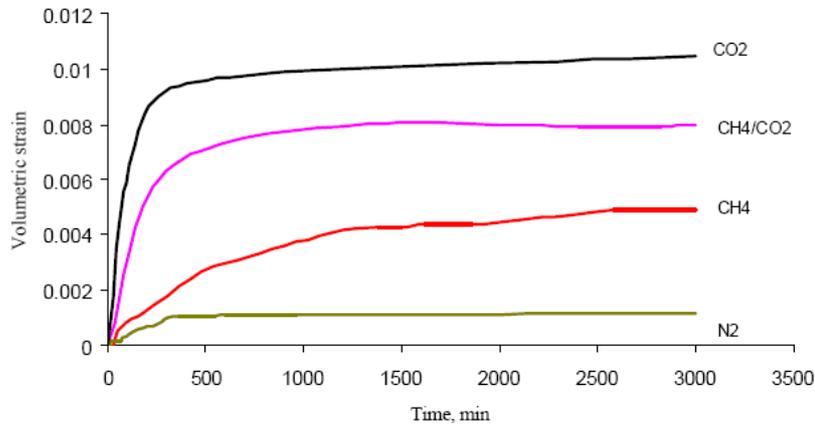
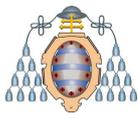


Figura 2.15.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 3" con 3 MPa de diferentes gases

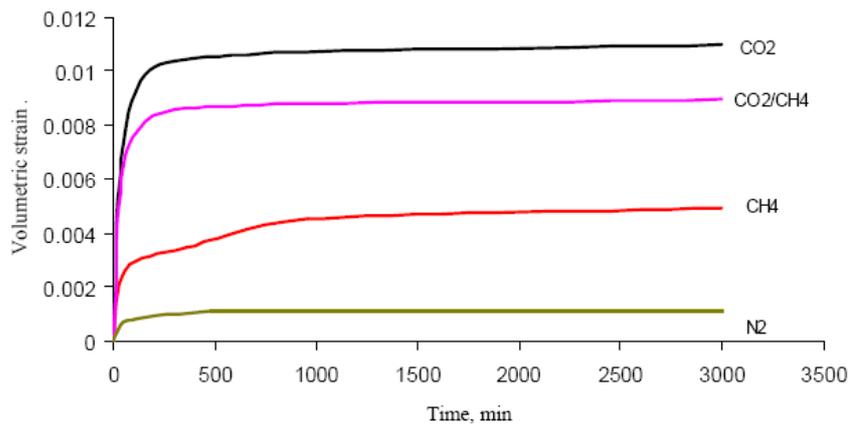
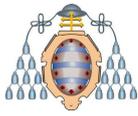


Figura 2.16.- Deformación volumétrica para carbón "Tipo 4" con 3 MPa de diferentes gases

Comparando las curvas de deformación de cada gas, se puede ver que el CO_2 es el que produce mayor expansión volumétrica, y el N_2 el que menos. Esta tendencia es además la misma para todos los otros tipos de carbón ensayados. La baja influencia del N_2 puede ser explicada teniendo en cuenta la baja atracción que existe entre el carbón y las moléculas de N_2 , a pesar de que su tamaño molecular es menor que el de otros gases ensayados y por tanto podría penetrar en poros más pequeños.

El hecho de que el mayor hinchamiento venga producido por el CO_2 , es explicado por algunos autores como Deitz, Carpenter y Arnold (1964) por el hecho de que la adsorción de este gas por el carbón está reforzada respecto al resto de gases por la interacción de la molécula de CO_2 con el O_2 presente en la superficie interna del carbón.



Por otra parte, en todas las gráficas se observa que el 90 % del aumento de volumen del carbón tiene lugar durante los primeros 300 minutos del ensayo, lo que parece implicar un hinchamiento inicial debido al paso del gas hacia los “cleats” y los poros de mayor tamaño, a los que accede de forma más o menos rápida.

Si se comparan los valores de deformación en los diferentes tipos de carbón para cada tipo de gas, se puede ver que la relación entre las deformaciones producidas por cada gas no se mantienen en los diferentes tipos de carbón, de manera que por ejemplo el cambio de volumen por adsorción de CO_2 en el carbón tipo 4 es unas diez veces mayor que el cambio producido por el N_2 , mientras que en el caso del carbón tipo 2 la adsorción de CO_2 produce un hinchamiento veintidós veces mayor que el del N_2 .

Estos resultados ponen de manifiesto que los efectos de la presurización del carbón no solo dependen de las condiciones ambientales y el tipo de gas, sino también de la propia naturaleza del carbón (rango, contenido mineral, humedad, etc.)

2.9.2 Retracción del carbón por desorción

La segunda serie de ensayos consiste en medir la deformación producida por la desorción progresiva desde 3 MPa a 0 a intervalos de 0,5 MPa de cada tipo de gas en cada tipo de carbón.

A modo de ejemplo en la Figura 2.17 se muestran los resultados promedio obtenidos para el carbón tipo 4 con los diferentes gases.

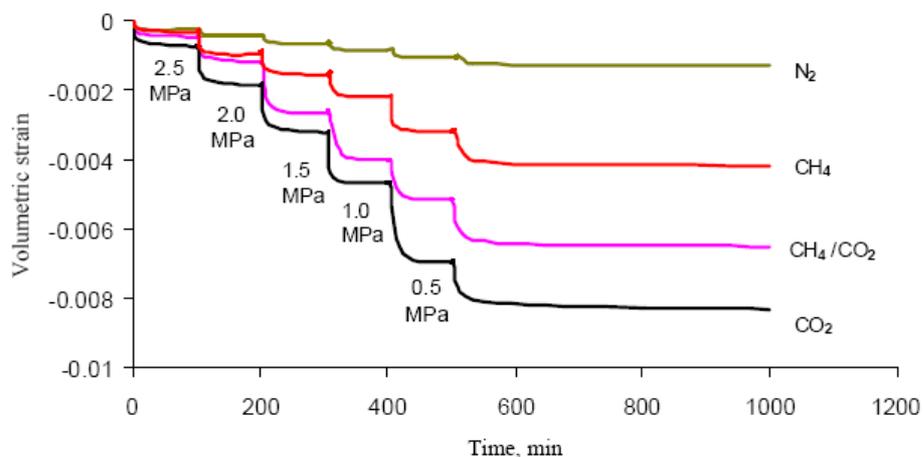
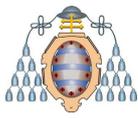


Figura 2.17.- Deformación volumétrica por desorción para carbón "Tipo 4" y diferentes gases



A la vista de esta gráfica queda claro que para cualquier nivel de presión el cambio en volumen es mayor para el CO_2 que para el resto de gases, seguido de la mezcla CO_2/CH_4 , CH_4 y N_2 . Esto es lógico teniendo en cuenta que puesto que el mayor hinchamiento se registraba para el CO_2 , su desorción generará a su vez la mayor relajación de la estructura interna del carbón y por tanto una mayor retracción.

La cantidad y velocidad del cambio en volumen en el mismo periodo de tiempo es mayor para las presiones más bajas. Este fenómeno puede explicarse en base al hecho de que a presiones bajas las microfisuras y poros del carbón dejan de estar comprimidos y se "abren".

El análisis de esta gráfica pone de manifiesto otro aspecto importante, y que es el hecho de que en la desorción de la mezcla CH_4/CO_2 se observa un comportamiento dual.

Inicialmente, la deformación volumétrica de la mezcla es muy similar a la del CH_4 , y posteriormente pasa a comportarse como el CO_2 . Esto sugiere que la desorción del metano es más rápida que la del CO_2 , en los carbones ensayados. Para el análisis cuantitativo del cambio de volumen por desorción se define el coeficiente de retracción (C_m).

$$C_m = \frac{1}{V_m} \left(\frac{\Delta V_m}{\Delta P} \right)$$

- V_m es el volumen de la matriz de carbón, en m^3 .
- ΔV_m es el cambio en volumen, en m^3 .
- ΔP es el cambio de presión, en MPa.
- C_m es el coeficiente de retracción, en MPa^{-1} .

Otra forma más directa de determinar C_m para cada gas es a partir de la pendiente de la gráfica que se genera al representar la deformación volumétrica frente a la presión, tal y como se muestra en la Figura 2.18 para las muestras del carbón "Tipo 4" denominadas NGO1, NGO2, hasta NGO5.

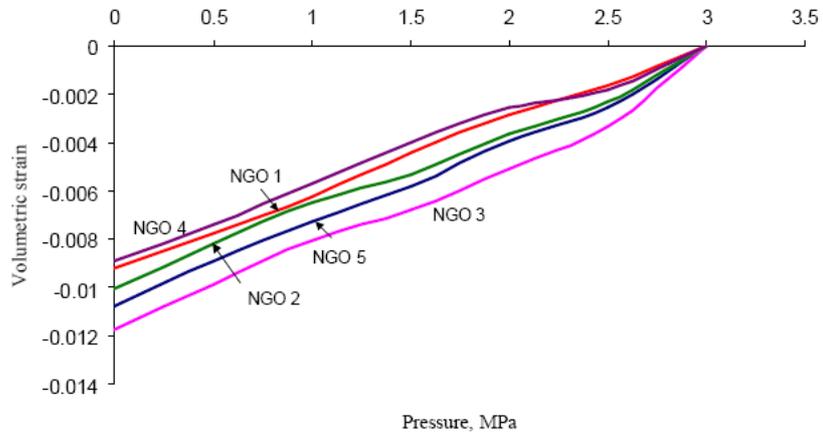
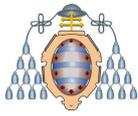
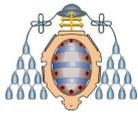


Figura 2.18.- Deformación volumétrica frente a presión de CO₂ para el carbón "Tipo 4"

De acuerdo con lo que se observa en la gráfica, el coeficiente de retracción aumenta al decrecer la presión. Este mismo fenómeno se observa para los otros tipos de gas ensayados, y concuerda además con los datos de otros autores.



3 PREDICCIÓN Y MEDIDAS PREVENTIVAS

Los fenómenos gasodinámicos siempre han sido un problema importante en la minería del carbón a lo largo de su historia, pero es en los últimos años del siglo XX, cuando la frecuencia de los mismos como consecuencia de la profundidad de las explotaciones o el aumento de la mecanización de las mismas, hace que se desarrollen investigaciones rigurosas dirigidas a la comprensión del fenómeno y al establecimiento de medidas de control.

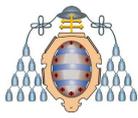
En la actualidad las técnicas preventivas que se vienen aplicando en galerías en carbón con problemas de FGD proporcionan una seguridad muy alta durante el avance de las mismas. Dicho lo anterior también hay que decir que, de forma ocasional, se siguen produciendo incidentes aislados que no se pueden prever. El más reciente se ha producido el pasado 23 de abril de 2012 y su efecto ha sido una pequeña deflagración sin incidencias destacadas.

Las razones de estos fenómenos hay que buscarlas, como ya se ha dicho, en las tensiones, en el gas o en la existencia de tensiones y gas en cantidades importantes y de forma simultánea. Existen numerosos índices que miden la tendencia de un carbón a sufrir desprendimientos instantáneos, aunque hasta el momento ninguno ha podido ser aplicado de forma global, debido a que están basados en datos experimentales de cuencas o yacimientos concretos. A continuación se van a tratar, de forma breve, las líneas de investigación seguidas y que más aplicación han tenido en el tratamiento de las explotaciones mineras de la Cuenca Central Asturiana.

3.1 Principales técnicas preventivas utilizadas

A la hora de definir las técnicas preventivas de posibles fenómenos relacionados con el gas en la mina hay que centrarse en tres de ellas, que suelen utilizarse solas o combinadas entre sí, en función de las características de cada capa y su entorno. Son las siguientes:

- El estudio tensional del terreno
- La inyección de agua
- Los sondeos de distensión-desgasificación



En algunas explotaciones mineras se han ensayado los tratamientos anteriores con buenos resultados aunque la eficacia de los mismos varía de unas explotaciones a otras. En la actualidad también se están utilizando, con relativo éxito, combinaciones de más de un tratamiento como sondeos con inyección de agua y voladura con explosivos, cuya finalidad es conseguir un efecto de distensión.

3.1.1 Estudio del estado tensional del terreno

Una de las líneas de investigación más importantes tiene que ver con el estudio del estado tensional del terreno, buscando en la planificación de la explotación posibles soluciones para la disminución de las tensiones creadas durante el laboreo de las mismas. Es conocida la utilización de capas égidas para favorecer la distensión y el flujo de gas en la capa problemática a partir de una capa cercana más segura.

También resultaron ser de enorme interés, los estudios desarrollados por AITEMIN para la elaboración de modelos de desprendimientos de metano durante la fase de explotación y avance de galerías, en las explotaciones por sutiraje, validados en la práctica minera (II Jornadas Mineras sobre Explotaciones por Sutiraje, Oviedo, 1996).

La conclusión más importante de estos trabajos es que la apertura de huecos, bien sea en la explotación o en el avance de los niveles, crea zonas distendidas en las labores mineras cercanas en las que es posible la desgasificación gradual del macizo (véase la Figura 3.1). El radio de la zona de influencia (Z_i) será aproximadamente seis veces el radio equivalente del hueco.

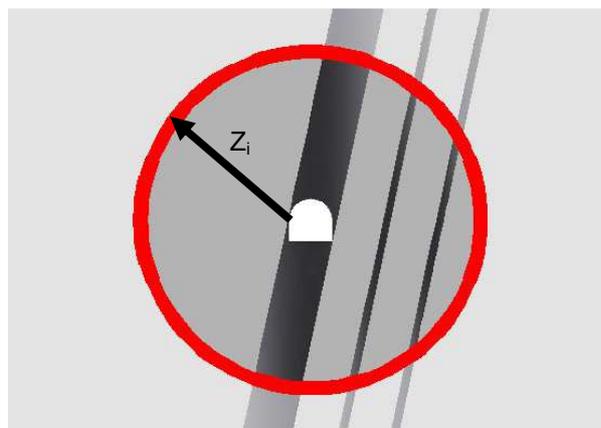
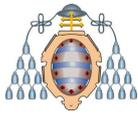


Figura 3.1.- Zona de influencia de una galería o nivel (AITEMIN)



Ligada a esta zona de influencia existe una desgasificación gradual que seguiría una tendencia como la definida en la Figura 3.2, con la siguiente ecuación, en la que “d” representa la distancia al hueco de explotación:

$$\text{Grado desgasificación} = e^{-0,5 \cdot d}$$



Figura 3.2.- Grado de desgasificación para la fase de avance

La ubicación rigurosa de estas zonas resultaría importante para el desarrollo seguro de los trabajos y más aún en el caso de existencia de avances mecanizados, tipo minador, con grandes producciones de carbón y gas.

3.1.2 Inyección de agua

La inyección de agua es un método de control de FGD utilizado sistemáticamente en diversos países. Se cree que al aumentar la humedad, la capacidad del carbón para acumular energía de deformación elástica decrece y aumenta la energía de deformación plástica. A este respecto, Hargraves (1983) apuntaba que este efecto revierte una vez finalizada la inyección, de manera que sus efectos no se prolongan en el tiempo.

La influencia de la inyección de agua puede ser explicada utilizando los resultados de las isotermas de adsorción (véase Figura 3.3).

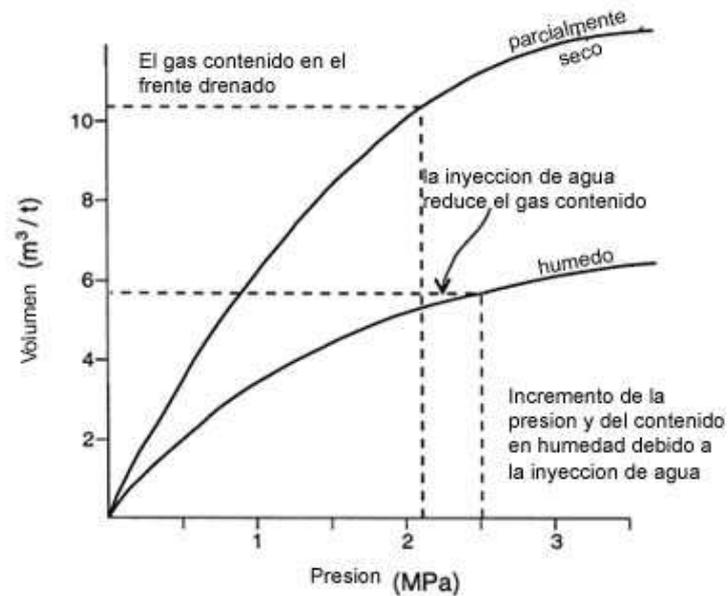
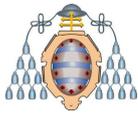


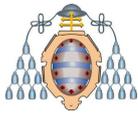
Figura 3.3.- Efecto de la inyección de agua en la capacidad de sorción del carbón

Cuando aumenta la humedad de un carbón sometido a altas presiones, las moléculas de agua comenzarían a competir con las de metano para ocupar los huecos vacíos y las van desplazando, lo que hace que disminuya el contenido en gas.

Una vez que la inyección finaliza el drenaje natural vuelve a producirse, con lo que se produce una pérdida de humedad, de manera que el contenido en gas puede volver a ascender tal y como se muestra en la Figura 3.3.

Fang (2011) estudia, basándose en simulación numérica mediante ANSYS, la influencia de la inyección de agua como elemento atenuador del FGD. Tiene en cuenta diferentes parámetros de inyección como son la presión, tiempo, caudal y profundidades de inyección observando, para cada caso, la evolución de las tensiones y desplazamientos en la capa de carbón.

Cuando la inyección se produce a alta presión se pueden producir fenómenos no deseados, como los desprendimientos instantáneos de agua. A este respecto, Tianhong Yang *et al.* (2011) han estudiado dichos desprendimientos instantáneos de agua derivados de la inyección en frentes de avance, tanto en minería subterránea como en túneles. Este análisis se ha realizado mediante modelización numérica y, para ello, se basan en el mecanismo de fracturación hidráulica. Tienen en cuenta la dependencia entre



flujo y daño de la roca consecuencia de la variación de la presión de poro, analizando la propagación de grietas durante la fracturación hidráulica. Al aumentar la densidad de grietas se incrementa, a su vez, la presión de poro en una zona mayor y de esta forma se puede llegar a producir un desprendimiento instantáneo de agua, con el consiguiente riesgo.

Por su parte, Lu Ting-kan *et al.* (2012) analizan y comparan simulación numérica y trabajos de campo, usando la técnica de inyección de agua a través de una tubería ranurada introducida en un sondeo. Se estudia la influencia de la longitud de inyección sobre las tensiones efectivas internas del carbón, que se reducen hasta un 70% para el caso de la tensión vertical y hasta un 40% para la tensión horizontal. Aprecian que la concentración de gas puede llegar a incrementarse hasta cinco veces como consecuencia de esta inyección.

3.1.3 Desgasificación mediante sondeos

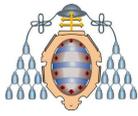
Esta metodología resulta bastante sencilla y barata de llevar a cabo, aunque tiene el problema de que es necesario repetir la operación cada pocos metros de avance. En la mayoría de los casos su eficacia viene determinada por la calidad de la perforación y la longitud alcanzada por ésta.

A modo de ejemplo, destacan los trabajos de Liu Yanwei (2011), que propone, en minas profundas, un drenaje previo de gas basado en sondeos largos de gran diámetro en la capa de carbón previamente a ser explotada en base a ensayos de laboratorio y modelización numérica. Ha realizado una comprobación práctica en seis galerías de avance en carbón, observando que los FGD con este procedimiento preventivo eran más reducidos, incluso cuando existían trastornos geológicos en la capa de carbón.

3.2 Índices de riesgo y protocolos de actuación

Históricamente se han definido una serie de índices evaluadores del riesgo potencial de que se produzca un incidente gasodinámico. Algunos como la concentración de metano en capa o la presión de gas apenas son utilizados hoy en día.

Recientemente Xu Yanpeng *et al.* (2011) han trabajado en la previsión de FGD en el frente de arranque mediante el muestreo, en la posición deseada y en el tiempo que se



estime, a través de un sondeo de 42 mm de diámetro y 10 m de profundidad. La barrena de extracción utilizada llevaría unos huecos de 203 ml para recoger muestras durante la perforación o incluso posteriormente. Las muestras son posteriormente analizadas para obtener diferentes parámetros, como por ejemplo el índice de desorción.

Naj Aziz *et al.* (2011) analizan la disminución de riesgos de FGD en minas australianas introduciendo un umbral límite basado en la velocidad de desorción que permitiría mantener la seguridad en una mina propensa a este tipo de fenómenos. Los autores proponen aplicar la experiencia y conocimiento de los mineros australianos a otras minas en desarrollo, como las chinas. En la misma línea de aprovechamiento del conocimiento y experiencia, aunque mediante el uso de inteligencia computacional, trabaja Fu Hua (2012), que plantea la necesidad de un método rápido y eficaz para detectar FGD en el espacio y en el tiempo.

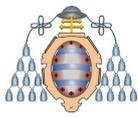
Dziurzyński *et al.* (2011) comentan la similitud entre los FGD y los estallidos de roca ya que ambos son procesos rápidos y violentos que emiten gas y roca en polvo. También en ambos casos se requiere un procedimiento rápido y sencillo para detectar dicho fenómeno, al objeto de poder mantener la seguridad en la mina, evacuando al personal con tiempo suficiente. Los autores han desarrollado un mecanismo tipo sensor que está compuesto de un medidor de concentración de metano, un sensor de presión y un micrófono. Este mecanismo fue probado, con resultados satisfactorios, en una galería en KDbarbara.

También Wu Xiang *et al.* (2011) han investigado para establecer un sistema de índices que permitan controlar un FGD considerando factores tecnológicos, personales y del propio yacimiento.

Los índices más representativos utilizados en España y a nivel europeo se describen a continuación.

3.2.1 Velocidad de desorción

Es el índice más utilizado, junto con la concentración desorbible de metano, para la valoración del riesgo de desprendimientos instantáneos. Existen dos métodos para su cálculo: el isobárico adoptado por la minería alemana polaca y checa en que la desorción se produce en condiciones de presión y temperatura constante y el isocórico empleado



por franceses y españoles en el que la desorción tiene lugar a volumen y temperatura constante. En España su determinación está regulada mediante la Especificación Técnica 0307-2-92 del Ministerio de Industria.

La velocidad de desorción V_1 expresa la cantidad de metano en cm^3 que desprende una muestra de carbón de diez gramos con una granulometría comprendida entre 0,5 y 0,8 mm y en el intervalo de tiempo que va del segundo 35 al 70 a partir de que la muestra ha sido extraída del macizo de carbón. La profundidad a la que se toma la muestra es normalmente de 3 m. Las medidas de V_1 se realizan en el interior de la mina mediante un desorbómetro. El valor crítico, generalmente aceptado, a partir del cual un carbón se considera propenso a los desprendimientos instantáneos es de $2 \text{ cm}^3/10\text{g}$.

El protocolo de actuación, inicialmente seguido en HUNOSA (véase el apartado 6.3.1), una vez medido V_1 , se resume en las siguientes acciones:

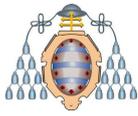
- Si V_1 es mayor de $1,5 \text{ cm}^3/10 \text{ g}/35 \text{ s}$, se inyecta agua al carbón.
- Si V_1 está por debajo $1,5 \text{ cm}^3/10 \text{ g}/35 \text{ s}$ se avanza la labor.

3.2.2 Índice “ g_i ”

Es uno de los procedimientos para la determinación de estas zonas de riesgo desarrollado en la URSS y aplicado con éxito en determinadas explotaciones mineras asturianas. Está basado en la dinámica del desprendimiento de gas mediante la variación relativa del índice “ g_i ” con la profundidad del sondeo.

Es el caudal de gas desprendido en un recipiente de 500 mm de longitud durante un minuto. La variación de la velocidad de desprendimiento de gas presenta un máximo a los 2 ó 3 minutos después de finalizar la perforación. Este valor máximo es el que se denomina “velocidad inicial de desprendimiento de gas”.

Para valorar el riesgo de desprendimiento instantáneo se procede a medir la velocidad inicial a diferentes profundidades con intervalos sucesivos de 0,5 m a partir del frente. El intervalo entre el frente y el primer valor que disminuya respecto al anterior, se denomina zona descargada y en ella se considera que no existe riesgo de desprendimientos instantáneos, siempre que el primer valor que disminuye se encuentre por debajo del $g_{i \text{ cr}}$.



Los valores de $g_{i\ cr}$ en función de la profundidad (H) y del contenido en materias volátiles, se recogen en la Tabla 3.1:

H (m)	% Materias Volátiles					
	0-5	5-7	7-10	10-15	15-30	>30
< 400	13,0	9,0	7,0	5,0	3,5	4,0
400-600	12,0	8,0	6,0	4,0	3,0	3,5
600-800	11,0	7,0	5,0	3,5	2,5	3,0
800-1000	10,5	6,5	4,5	3,0	2,0	2,5
> 1000	10,0	6,0	4,0	2,5	1,5	2,0

Tabla 3.1- Valores de la velocidad inicial de desprendimiento crítica

El avance admisible de las labores es la longitud de la zona de descarga menos la distancia que se toma de seguridad (1,5 m). El avance por ciclo debe ser por tanto inferior a dicho avance admisible.

En la Figura 3.4 se recogen cuatro supuestos que contemplan las situaciones posibles. En el caso A el valor de disminución (a 3,5 m del frente) es superior a $g_{i\ cr}$ por lo que es peligroso realizar labores de avance. La misma valoración se debe hacer para el caso B por ser el avance por ciclo superior al avance admisible. El avance en los casos C y D es seguro. En dicha figura se tiene:

- g_i es la velocidad inicial en l/min
- $g_{i\ cr}$ es la velocidad inicial crítica (Tabla 3.1)
- l_c es el avance por ciclo de arranque (m)
- l_d es la longitud de la zona descargada (m)
- l_{ex} es la longitud admisible de extracción (m)
- l_s es la distancia de de seguridad (m)

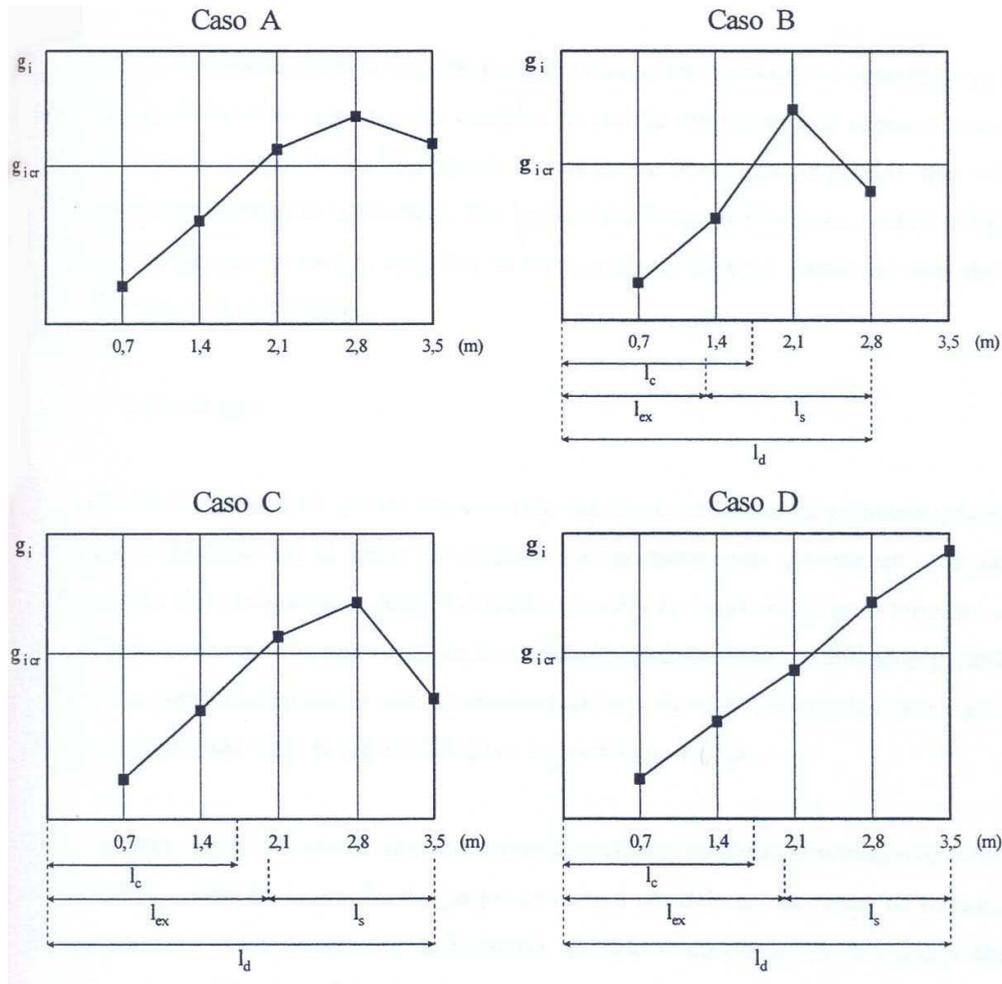
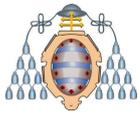
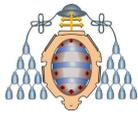


Figura 3.4.- Situaciones posibles

3.2.3 Pruebas de perforación. Test de Jahns

Otro de los procedimientos de detección de tensiones anormales durante el avance de los niveles que también se viene aplicando con éxito y que tienen como base la experiencia alemana está basado en las pruebas de perforación.

Este método ha sido desarrollado fundamentalmente a partir de experiencias desarrolladas en Alemania, Polonia y la antigua Unión Soviética. Está basado en los resultados de un test de perforación mediante sondeos y define la situación como peligrosa si los síntomas de sobrepresión se localizan a una cierta distancia del frente de trabajo. Estos síntomas son tanto que la producción de finos exceda el volumen crítico, como que el apriete del carbón impida continuar la perforación (Braüner, 1994).



Tanto la producción normal de finos como el volumen crítico dependen del diámetro del sondeo y se recogen en la Tabla 3.2, con el criterio utilizado en Alemania, para los diámetros que son habituales en los ensayos de perforación.

Diámetro de perforación, mm	50	98	143
Volumen normal de finos, l/m	2-4	10-20	20-30
Volumen crítico de finos, l/m	>8	>35	>70

Tabla 3.2- Volúmenes de finos para el test de Jahns

Para diámetros superiores, utilizados normalmente en sondeos de distensión, el volumen crítico de finos se establece en 50 l/m (volumen normal 10-20 l/m) para diámetro de 95 mm y 90 l/m (volumen normal 20-30 l/m) para diámetro de 140 mm.

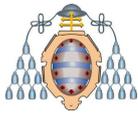
La normativa alemana incluye además como síntomas de sobrepresión y por tanto zona de riesgo los ruidos de fractura (estallidos), los golpes en el varillaje, la desaparición de la resistencia a la perforación e incluso la tendencia a tragar el varillaje y el agarrotamiento del varillaje.

El procedimiento se resume brevemente en los pasos siguientes:

- Se realiza una perforación de 40 a 50 mm de diámetro, se mide el volumen de carbón obtenido en litros por cada metro perforado.
- En el nivel de avance se llevará un mínimo de dos sondeos en las proximidades del techo y muro de la capa con una profundidad superior a 5 metros.
- En zonas próximas a trastornos geológicos se aumenta todo lo posible la profundidad de perforación (hasta 15 a 20 metros).
- Cuando se realiza el sondeo de reconocimiento se considera la profundidad “L” hasta la cual no se ha producido ninguna manifestación.
- Si la potencia de la capa es W se establecen las siguientes igualdades:

□ $L = 3 \cdot W + a_1$

□ $L = 5 + a_2$



- Cuando la longitud “L” es superior a tres veces la potencia de la capa y no inferior a 5 m, se autoriza un avance menor de los valores “a₁” o “a₂”.
- Si no puede conseguirse una cobertura de seguridad conforme a las igualdades anteriores se dará un tratamiento local de desgasificación en el frente, que consistirá en la aplicación de alguna de las siguientes medidas:
 - Sondeos de desgasificación y distensión
 - Inyección de agua
 - Voladura con explosivos

Para continuar el avance, se deben de realizar nuevas pruebas de perforación para valorar el nuevo estado gasodinámico del macizo tratado. A ser posible y para mayor seguridad debe existir un solapamiento entre tratamiento local y pruebas de perforación.

3.2.4 El índice k_t

Ha sido desarrollado en Alemania (Renania, 1987), donde es de aplicación general, disponiendo de equipos que, junto con otros parámetros, miden su valor en el interior de la mina.

Se considera que la desorción de metano en una muestra de carbón responde a la siguiente expresión exponencial:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^{-k_t}$$

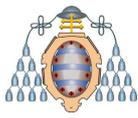
V_2 = Flujo de metano en cm³/min por gramo de carbón en el tiempo t_2

V_1 = Flujo de metano en cm³/min por gramo de carbón en el tiempo t_1

De esta fórmula se obtiene:

$$k_t = \text{tag} \alpha = \frac{\log V_1 - \log V_2}{\log t_2 - \log t_1}$$

El índice k_t es la pendiente de una recta que representa, en escala logarítmica, la evolución en el tiempo del flujo de desorción de metano.



La pendiente de la recta, y en consecuencia el índice k_t , muestra la forma en la que tiene lugar la desorción de metano. Pendientes elevadas se refieren a carbones con una rápida desorción en los momentos iniciales y por tanto propensos a los FGD, mientras que para pendientes bajas una parte importante del metano permanecerá adsorbido durante algún tiempo. El valor crítico de k_t es de 0,75.

La determinación de índice k_t puede realizarse directamente en el frente de trabajo mediante muestras extraídas de un sondeo de suficiente profundidad e introducidas en un desorbómetro. También puede calcularse en el laboratorio con muestras en las que se ha liberado el metano, sometiéndolas a un proceso de adsorción – desorción mediante el cual, en un primer momento, se introduce la muestra en una cámara con metano a 6 bar para, posteriormente, permitir la desorción en un desorbómetro y obtener los valores de la recta característica.

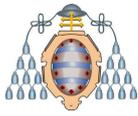
3.2.5 Índice de emisión de gas

Wang y Yang (1987), proponen la siguiente relación entre la friabilidad del carbón y su tendencia a los desprendimientos instantáneos.

$$K = \frac{\Delta_{P_{10}-P_{60}}}{f}$$

- K es el índice de emisión de gas o índice de tendencia a desprendimientos instantáneos (kPa/s).
- $\Delta_{P_{10}-P_{60}}$, tasa de emisión de gas (kPa/s) o índice de Ettinger.
- f , es el coeficiente de resistencia de Protodyakonov.

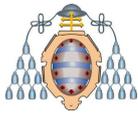
El índice $\Delta_{P_{10}-P_{60}}$, o índice de Ettinger, mide de forma indirecta la fisuración de un carbón, y se define como el incremento de presión, en mm de Hg, generado por la desorción de metano en una muestra de carbón, previamente desgasificada y posteriormente saturada con gas. Para determinar este índice, se toma una muestra de carbón de 3 g y granulometría entre 0,25 y 0,30 mm y se somete al vacío durante una hora y media. A continuación, se le añade He durante 10 minutos y se obtiene la presión de referencia P_0 . A continuación se satura con metano durante hora y media. Se toman lecturas en una cámara de medida de presión pasados 10 s (P_{10}) y 60 s (P_{60}).



El coeficiente de resistencia de Protodyakonov es un índice de la friabilidad del carbón, es decir, de su tendencia a pulverizarse. Cuanto más friable más finos produce y, por tanto, más gas puede liberar. Se determina mediante un ensayo específico consistente en aplicar a una muestra de carbón una energía dinámica (caída de una maza de golpeo sobre la muestra) y determinar posteriormente el incremento de finos experimentado por la muestra. Una forma de estimar este coeficiente es dividir la resistencia a compresión simple de la roca, expresada en MPa, entre 10. Según Cao *et al.* (2001) los valores de este parámetro inferiores a 0,25 indican propensión a FGD.

Los niveles de riesgo marcados por el índice K son los siguientes:

- $K < 15$: el carbón no tiene tendencia a FGD
- K entre 15 y 40: corresponde a un carbón con cierta tendencia a FGD.
- Valores de $K > 40$: el carbón presenta un elevado riesgo de sufrir FGD.



4 SIMULACIÓN DE INYECCIÓN DE GAS EN CARBÓN

Con la finalidad de evaluar el mejor sistema de desgasificación de una capa de carbón, para así garantizar la seguridad de las labores, se ha llevado a cabo una simulación de un proceso de inyección de CO₂ a diversas presiones en el seno de un sondeo realizado en una capa de carbón.

La simulación se ha realizado mediante métodos numéricos, en concreto diferencias finitas, cuyos cálculos implementa la aplicación informática FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua). Los principios básicos de este programa se describen a continuación.

4.1 Principios básicos del programa FLAC-2D

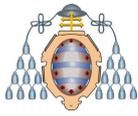
Partiendo de la geometría del modelo, de las propiedades de las litologías presentes y de las condiciones de la explotación, los métodos de análisis numéricos son capaces de simular, en un tiempo razonable, los fenómenos de redistribución de tensiones que se producen en el terreno cuando se altera su equilibrio con acciones externas. Del mismo modo, como resultado de todo ello, los programas facilitan la información correspondiente, tanto gráfica como numérica, de aquellos parámetros que en cada caso se consideren oportunos.

Estos métodos se basan en la descomposición geométrica de los elementos a modelizar en pequeñas unidades denominadas teselas o zonas, a las que se asigna una serie de propiedades y modelos de comportamiento, que se definen a través de un sistema de ecuaciones. Es este sistema de ecuaciones el que se resuelve mediante métodos numéricos, bien sean diferencias finitas o elementos finitos.

4.1.1 Geometría del modelo

En primer lugar es necesario definir la geometría a modelizar. En el caso de una excavación subterránea este concepto incluye tanto a la propia excavación como al terreno circundante que pueda verse afectado por ella, con sus diferentes estratos.

El terreno se descompone entonces en una serie de elementos de menor dimensión que se denominan teselas y que en una modelización bidimensional serán



cuadriláteros. Este proceso, denominado mallado, puede resultar bastante complejo, ya que la malla debe resultar lo más regular posible, y al mismo tiempo el tamaño de las teselas debe adecuarse a la geometría global del modelo.

Cuanto más pequeñas sean las teselas más fácil resulta regularizar la malla y más precisos los resultados obtenidos, aunque se necesita más tiempo para que se desarrollen los cálculos. Por ello la densidad del mallado se suele regular en un mismo modelo, haciéndola mayor (teselas más pequeñas) en las zonas de más interés, como puede ser el entorno más próximo de la excavación, y reduciéndola a medida que se alejan de ella.

Cada tesela constituye lo que se denomina una zona, y los vértices que la delimitan se llaman nodos. En función de su posición en el modelo, un mismo nodo puede formar parte de hasta cuatro zonas diferentes (en un modelo 2D). Los elementos de mallado no pueden superponerse ni solaparse parcialmente.

4.1.2 Modelo constitutivo

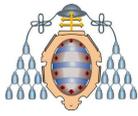
Define el comportamiento elásto-plástico y el criterio de fallo, que seguirán las diferentes zonas del mallado. Aunque existen muchos más, aquí se resumen los criterios utilizados en este caso:

- Plástico Mohr-Coulomb o Hoek con cohesión y fricción variables en función de la tensión: Es el modelo más utilizado para representar la rotura por esfuerzos cortantes en suelos y rocas.
- Anulación: La anulación de una zona significa que no está sometida a ningún tipo de tensión ni fuerza (como puede ser la gravedad). Es, por tanto, el tipo de comportamiento que se aplicaría a una zona excavada.

Además, cualquiera de estos modelos mecánicos puede combinarse con cálculos de flujo de agua o gas a través del terreno.

4.1.3 Propiedades del terreno

En función del modelo constitutivo que se selecciona para cada zona del mallado, se necesitan definir una serie de parámetros resistentes.



En el caso del criterio plástico de Mohr-Coulomb estos parámetros son: cohesión, fricción y resistencia a tracción.

Además es necesario definir las propiedades de las deformaciones de cada zona, en concreto el módulo de Bulk (K) y el de cizalla (G).

Las propiedades asignadas se determinan a partir de:

- Ensayos tenso-deformacionales.
- Ensayos de laboratorio.
- Análisis de la diaclasación.

Con todo ello, y atendiendo a la clasificación geomecánica de Bieniawski, se determina el índice RMR del macizo, a partir del cual se obtiene el módulo de Bulk, módulo cortante, cohesión y fricción. Este módulo también puede estimarse con ensayos presiométricos.

4.1.4 Condiciones de contorno

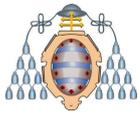
La definición de las condiciones de contorno del problema numérico permite trabajar con modelos de dimensiones reducidas que imitan el comportamiento real de un macizo rocoso indefinido.

Con las condiciones de contorno se fijan o limitan, fundamentalmente, los desplazamientos de los nodos situados en los límites del modelo. Por ejemplo, los nodos situados en su base tienen su desplazamiento impedido en las direcciones del espacio, ya que en caso contrario se tendría que el conjunto de la malla, situada en el espacio y sometida a la gravedad se caería indefinidamente.

Estas condiciones de contorno condicionan, de manera indirecta, las dimensiones de los modelos con los que se trabaja, ya que si estas son demasiado pequeñas, la restricción de movimiento en los límites del modelo puede afectar a nodos más interiores.

4.1.5 Fases de explotación

En general, los modelos que simulan una explotación, bien sea subterránea o a cielo abierto, presentan varias etapas de cálculo, que pretenden simular las distintas fases en las que será efectuada la obra. Así por ejemplo, es común comenzar con la



excavación y sostenimiento de una galería en avance que, en fases posteriores, se excava la parte superior por sutiraje. Esta posibilidad de fragmentar el análisis de estabilidad, no sólo mejora los resultados de la modelización de forma visual, sino que permite establecer, al menos de forma teórica, en qué punto del desarrollo de la explotación ésta deja de ser estable.

4.1.6 Descripción del proceso de cálculo

Una vez definida la geometría del problema, el criterio de rotura y las propiedades de los materiales, ya se está en disposición de iniciar el proceso de cálculo. Se describe a continuación dicho proceso para el caso de un modelo bidimensional.

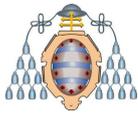
A cada zona se le asigna un estado de tensiones, definido en principio por la presión litostática (eje OY) y las tensiones horizontales de confinamiento (eje OX). Además pueden intervenir presiones de poro o sobrecargas externas. Este proceso se denomina “inicialización de tensiones”.

A cada nodo se le asignarán las fuerzas que actúan directamente sobre él, por formar parte de una o más zonas o por estar sometido a cargas externas.

A causa de estas fuerzas, el nodo se desplazará en las direcciones del espacio en función de los módulos de deformación que se le hayan asignado. Sin embargo, este movimiento se ve restringido por el hecho de tener más zonas alrededor, lo que origina la aparición de nuevas tensiones, y por tanto nuevos desplazamientos.

Así se desarrolla un proceso iterativo en el que se recalculan y reajustan sucesivamente los desplazamientos de los nodos, las tensiones en cada zona, y las fuerzas actuantes en los nodos. Este proceso se prolonga hasta que se alcanza un equilibrio numérico, que representa la estabilidad del sistema, y que viene dado por el reajuste de fuerzas en los nodos entre dos iteraciones consecutivas (balance de fuerzas).

Cuando no existe diferencia entre las fuerzas aplicadas en un nodo entre dos iteraciones, se alcanza su estabilidad y el desplazamiento resultante para el nodo en esa etapa de cálculo será el real. Sin embargo, esta situación no se da nunca, y lo que se obtiene es la convergencia hacia unos determinados valores, que se aceptan como válidos a partir de un valor de precisión marcado sobre la mencionada diferencia entre fuerzas en dos etapas sucesivas.



Si este equilibrio numérico no llegase a alcanzarse se tendría un indicador de inestabilidad, ya que los desplazamientos en el nodo no convergen hacia un valor finito, sino que crecen indefinidamente.

4.2 Descripción del modelo

El modelo numérico que se ha implementado es un modelo bidimensional que simula un corte horizontal del conjunto del macizo en cuyo seno se encuentra la capa de carbón. Se trata de un modelo sencillo en cuanto a materiales, ya que únicamente se tiene en cuenta la existencia de los hastiales (modelizados de forma idéntica entre sí) y de una capa de carbón de elevado buzamiento, tal y como frecuentemente aparecen en la Cuenca Central Asturiana. En la Figura 4.1 se muestra el esquema de partida del modelo

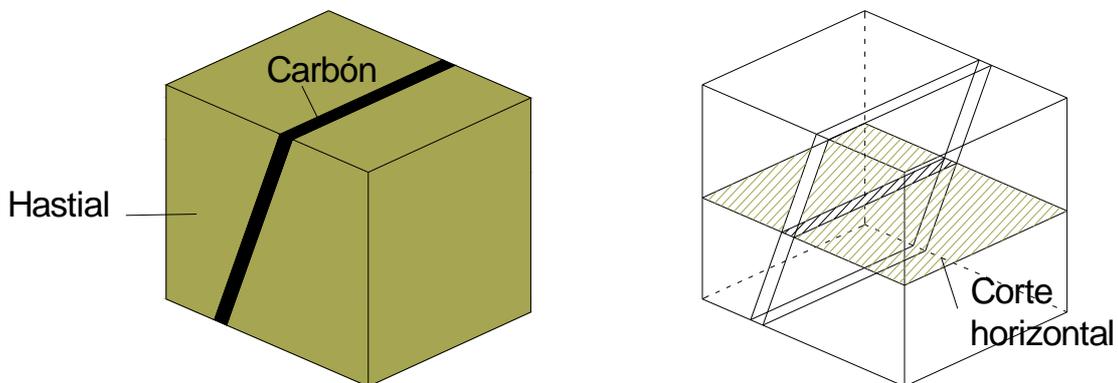


Figura 4.1.- Esquema inicial del modelo

Sin embargo, para mejorar este modelo se ha recurrido a trabajar con un modelo axisimétrico, que simula una de las infinitas secciones de la galería. Para que el modelo reproduzca de la forma más precisa posible las condiciones de esa zona de la explotación, tanto en el borde superior y derecho, así como en la dirección perpendicular al plano del modelo se le han aplicado las presiones horizontales y verticales que corresponderían a una zona situada a unos 1000 m de profundidad, que es el recubrimiento medio que presentan muchas de las explotaciones de carbón en Asturias. En la Figura 4.2 se muestran la geometría y dimensiones del modelo.

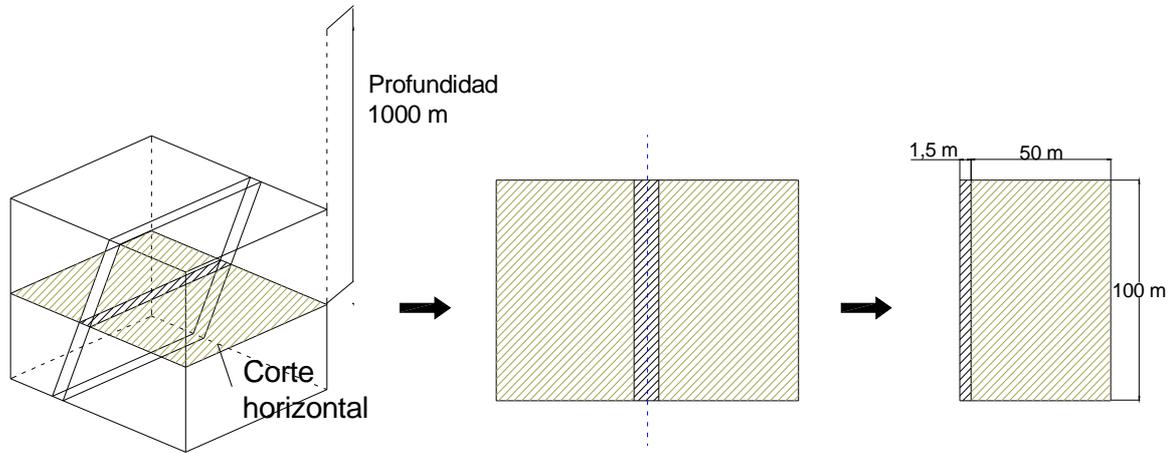
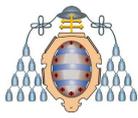


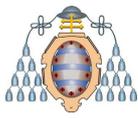
Figura 4.2.- Geometría y dimensiones del modelo

Por otra parte, para la estimación de las propiedades geomecánicas de los materiales, se ha realizado una amplia recopilación de datos, tanto de bibliografía de diversos autores como de resultados de proyectos anteriores de análisis de explotaciones de carbón. En base a toda esta información recabada se han definido las propiedades indicadas en la Tabla 4.1 para hastiales y carbón.

<i>PROPIEDADES</i>	<i>Hastiales</i>	<i>Carbón</i>
Densidad (kg/m ³)	2500	1800
Módulo de Bulk (K) (GPa)	24	2,1
Módulo de cortante (G) (GPa)	11	1
Cohesión (MPa)	6,6	1,5
Fricción (°)	34	34
Resistencia a tracción (MPa)	6	1,5

Tabla 4.1.- Propiedades mecánicas de los materiales modelizados

En cuanto a las propiedades relacionadas con el gas, puesto que son variables en función de la presión de inyección y del fluido utilizado para inyectar, en los apartados correspondientes se indicarán las propiedades consideradas en cada caso. Todos los datos relacionados con el gas inyectado, especialmente la permeabilidad han sido obtenidos a partir de ensayos de permeabilidad realizados en laboratorio, así como de información bibliográfica de numerosos autores (Airey, Barker-Read, Radchenko y Duracan entre otros).



Una vez definidas la geometría y propiedades básicas del modelo, a continuación se describen las fases de cálculo simuladas:

1. En primer lugar, tras generar la geometría y aplicar propiedades y presiones se deja que el modelo estabilice, es decir, que se produzca un reajuste inicial de tensiones que constituirá el estado tensional inicial en la zona modelizada.
2. A continuación, se simula el avance de 50 m de la una galería en carbón del ancho de la capa. Esta galería es sostenida, tal y como se realiza en las labores reales, para evitar que el hueco abierto se cierre. La geometría del modelo en esta fase sería la mostrada en la Figura 4.3.

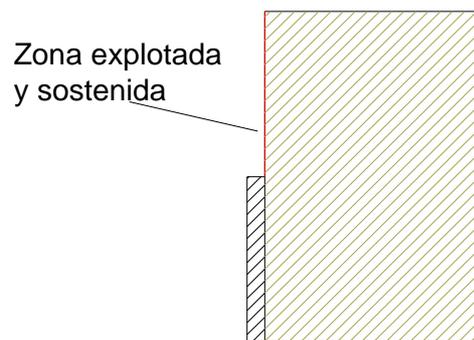


Figura 4.3.- Geometría del modelo tras el avance de la galería en carbón

3. En la siguiente fase de cálculo se perfora un sondeo en el frente sobre el eje de la galería de carbón. Este sondeo puede tener un diámetro y longitud variable. Inmediatamente después de ser abierto, el sondeo es sostenido, para simular la entubación que se le colocaría en la realidad.

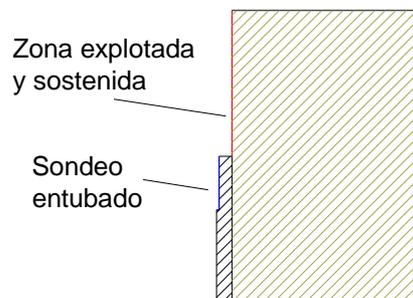
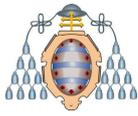


Figura 4.4.- Geometría del modelo tras la perforación del sondeo en el frente



- Finalmente, en los últimos metros del sondeo perforado se aplica una presión de gas de diversa magnitud, y se calcula como circula por la capa y los hastiales, y especialmente, qué zona se ve afectada por la inyección, que es en definitiva la zona que queda distendida. Para realizar la simulación se define un tiempo de inyección, que puede variarse, para evaluar si la fracturación de carbón y los hastiales requiere la aplicación de una presión de gas prolongada o bien es un fenómeno instantáneo o cuasi-instantáneo.

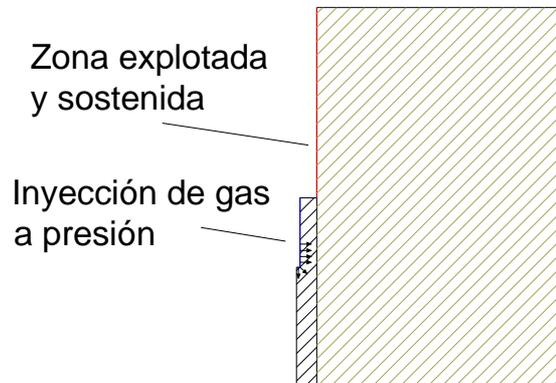
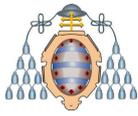


Figura 4.5.- Esquema del modelo en la fase de inyección

A partir de este modelo general, se han calculado diversos casos, denominados en adelante "modelos generales", variando tanto la presión de inyección como la permeabilidad de los materiales, el fluido inyectado y la longitud del sondeo.

Además de estos modelos generales, se ha modelizado también el efecto de la distensión de la capa de carbón mediante una técnica de inyección de CO₂ comercializada bajo la denominación "CARDOX".

Finalmente, ante la posibilidad de que el carbón pueda presentar una permeabilidad variable a lo largo de la capa, se ha analizado la eficacia de un mismo tipo de inyección para permeabilidades de diferentes órdenes de magnitud.



4.3 Influencia de la longitud de sondeo y la presión de inyección

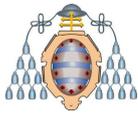
A continuación se describen los resultados obtenidos de cada uno de los modelos de inyección analizados. Desde el punto de vista del objetivo de este trabajo conducente a tesis doctoral, que no es otro que la evaluación de la metodología de operación más adecuada para una óptima distensión y desgasificación del carbón, los aspectos más interesantes de cada modelo son tanto la zona afectada por la inyección a lo largo de la capa, como la posible afección a los hastiales, que debe intentar minimizarse por motivos de seguridad.

En la Tabla 4.2 se recogen las variables consideradas en cada uno de los casos analizados. Como puede verse, se han considerado sondeos de 5 m, 7,5 m y 10 m de longitud. Ha de tenerse en cuenta que la permeabilidad de una roca (hastiales o carbón) depende del fluido inyectado y de la presión a la que se inyecte, razón por la cual, en base a ensayos efectuados previamente en laboratorio, se han supuesto distintas permeabilidades en los modelos recogidos en la tabla.

<i>Modelo</i>	<i>Gas</i>	<i>Presión inyección (MPa)</i>	<i>Permeabilidad hastiales (mD)</i>	<i>Permeabilidad carbón (mD)</i>	<i>Longitud sondeo (m)</i>
1	CO ₂	100	0,002	0,02	10
2	CO ₂	50	0,0046	0,046	10
3	CO ₂	10	0,0002	0,002	10
4	CO ₂	100	0,002	0,02	7,5
5	CO ₂	50	0,0046	0,046	7,5
6	CO ₂	10	0,0002	0,002	7,5
7	CO ₂	100	0,002	0,02	5
8	CO ₂	50	0,0046	0,046	5
9	CO ₂	10	0,0002	0,002	5

Tabla 4.2- Características de los modelos analizados

Además, hay que señalar que, en todos los casos, se ha simulado que la inyección se prolongaba durante aproximadamente una hora.



4.3.1 Sondeos de 10 m de longitud

Para una longitud total de perforación de 10 m se han considerado presiones de inyección entre 10 y 100 MPa.

4.3.1.1 Modelo 1: Presión de inyección 100 MPa

Cuando se procede a inyectar CO_2 a una presión de 100 MPa en un sondeo de 10 m de longitud, prácticamente todo el carbón situado entre el frente y el final del sondeo se ve afectado, lo que favorece notablemente la desgasificación de toda esa zona. Incluso 2 m por delante del final de sondeo el carbón se ve también afectado, de manera que en total la longitud distendida sería de 12 m, tal y como se muestra en la Figura 4.6 que representa el estado plástico del modelo, es decir, los procesos de deformación que ha experimentado cada zona. En la parte inferior y derecha de la figura se indican las dimensiones del modelo en metros.

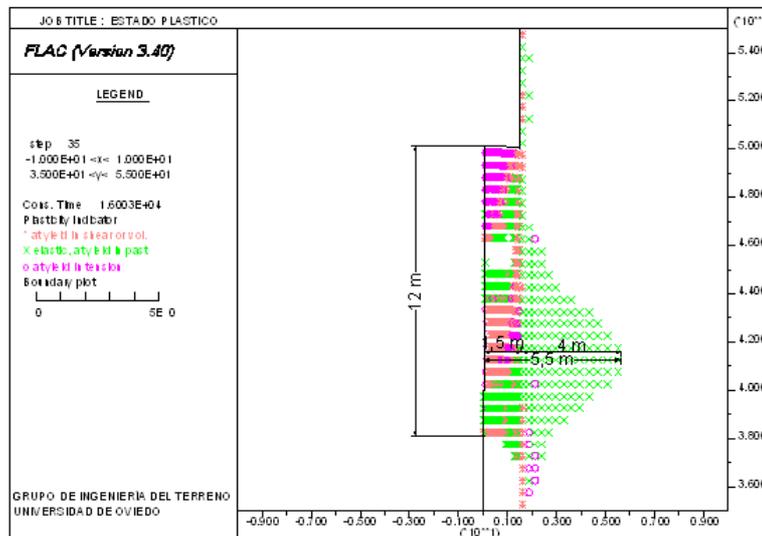
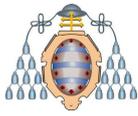


Figura 4.6.- Estado plástico del modelo tras la inyección

Sin embargo, en esa misma figura también se observa que la zona de hastial se ha visto dañada en la parte situada al final del sondeo (y teniendo en cuenta el tipo de modelo, también del techo), de manera que la zona afectada (altura fracturada) alcanza hasta 4 m de ancho.



4.3.1.2 Modelo 2: Presión de inyección 50 MPa

Cuando la presión de inyección se reduce a la mitad (50 MPa), manteniendo igual el resto de variables, la zona plastificada varía sensiblemente con respecto al caso anterior. Así, como se muestra en la Figura 4.7, entre la zona afectada por la propia inyección, que tiene una longitud de unos 4 m, y la zona distendida por efecto del avance de la galería, de unos 2,5 m por detrás del frente, existe una zona intermedia en la que el carbón permanece intacto.

Además, aunque en menor proporción que en el caso de 100 MPa, los hastiales también se ven parcialmente dañados en la parte donde se realiza la inyección, siendo el radio afectado de unos 2 m.

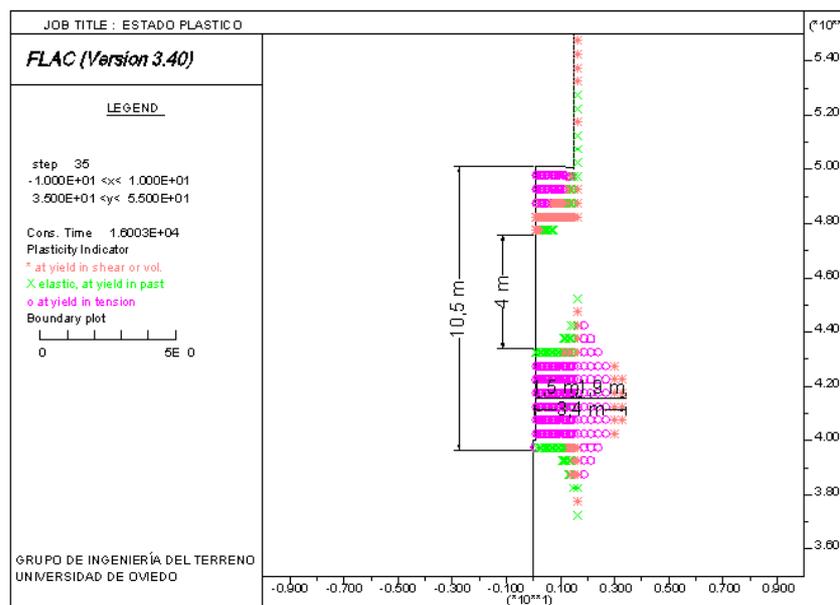


Figura 4.7.- Estado plástico del modelo tras la inyección

4.3.1.3 Modelo 3: Presión de inyección 10 MPa

En la Figura 4.8 se puede observar que en este caso la zona distendida por la inyección a 10 MPa de presión de CO₂, es de apenas 3 m de longitud, por lo que existe una gran zona intacta intermedia. Dada la baja presión de inyección, en este caso no se han visto en absoluto afectados los hastiales (ni en su caso el techo).

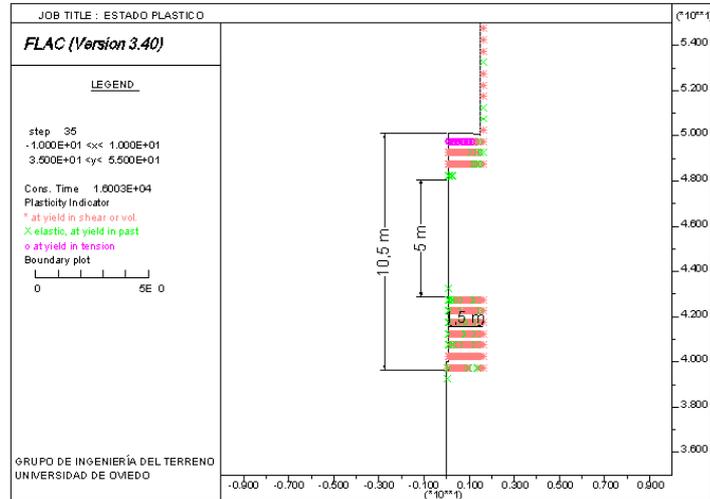
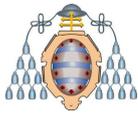


Figura 4.8.- Estado plástico del modelo tras la inyección

4.3.2 Sondeos de 7,5 m de longitud

Análogamente al apartado anterior, se ha comprobado el efecto de la inyección a 10, 50 y 100 MPa en un sondeo de 7,5 m.

4.3.2.1 Modelo 4: Presión de inyección 100 MPa

Al disminuir la longitud del sondeo donde se realiza la inyección, disminuye lógicamente la zona de carbón afectada, que en este caso es continua desde el frente hasta un metro más allá del final del sondeo, por lo que presenta una longitud total de 8,5 m, tal y como se puede ver en la Figura 4.9.

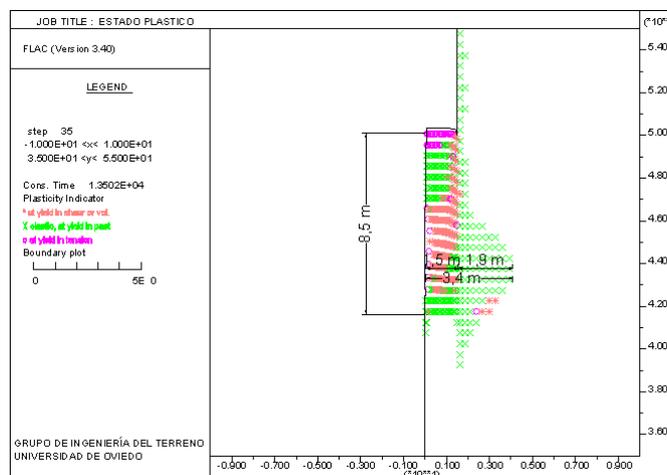
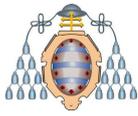


Figura 4.9.- Estado plástico del modelo tras la inyección



De nuevo se observa que en la zona de la inyección también se encuentran parcialmente distendidos los hastiales, unos 2 m a cada lado de la capa.

4.3.2.2 Modelo 5: Presión de inyección 50 MPa

Este modelo es muy similar al anterior, ya que la zona distendida del carbón es continua desde el frente hasta el final del sondeo, con una longitud total de 8,5 m, mientras que los hastiales (y el techo) también se ven algo afectados, unos 1,5 m en torno a la capa, como se puede ver en la Figura 4.10.

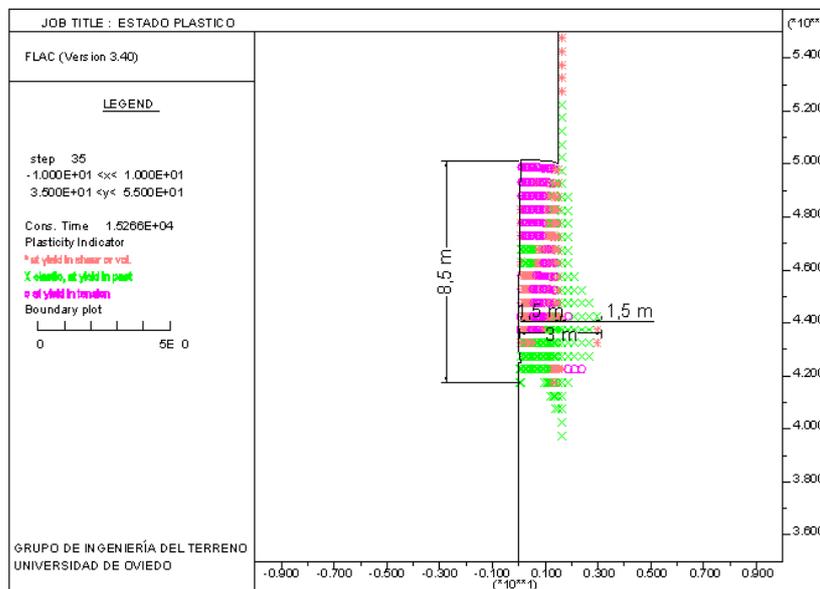


Figura 4.10.- Estado plástico del modelo tras la inyección

4.3.2.3 Modelo 6: Presión de inyección 10 MPa

En este caso la zona distendida en el carbón no es continua, sino que entre los 2,5 m dañados por el propio avance y los 2 últimos metros del sondeo, distendidos por la inyección, existe una zona intermedia de 3,5 m de longitud prácticamente intacta. Por otra parte, debido a la baja intensidad de la presión de inyección los hastiales no se ven afectados (véase Figura 4.11).

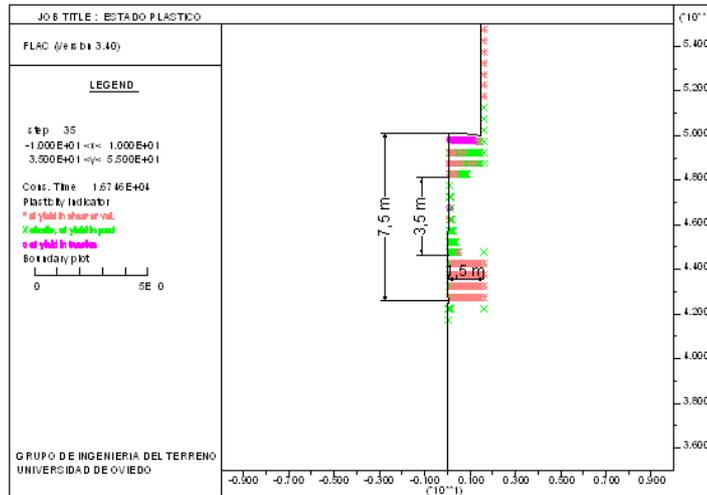
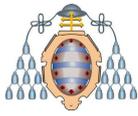


Figura 4.11.- Estado plástico del modelo tras la inyección

4.3.3 Sondeos de 5 m de longitud

Por último, se ha comprobado el efecto de las diferentes presiones de inyección en un sondeo de tan sólo 5 m de longitud.

4.3.3.1 Modelo 7: Presión de inyección 100 MPa

Cuando el sondeo es de 5 m de longitud y se inyecta CO₂ a una presión de 100 MPa, la zona distendida es continua, aunque de escasa longitud (unos 6 m). Se produce también una cierta distensión de los hastiales y el techo de 1 m de longitud (Figura 4.12).

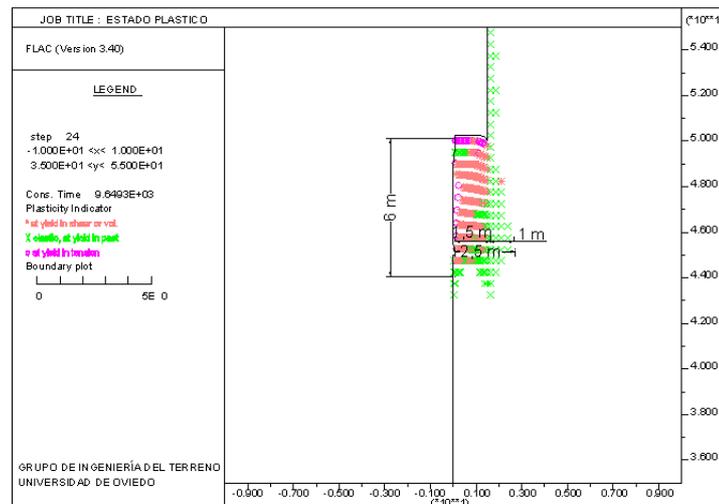
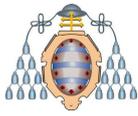


Figura 4.12.- Estado plástico del modelo tras la inyección



4.3.3.2 Modelo 8: Presión de inyección 50MPa

Al inyectar la mitad de presión (50 MPa), el resultado es prácticamente el mismo que en el caso anterior, tal y como se muestra en la Figura 4.13

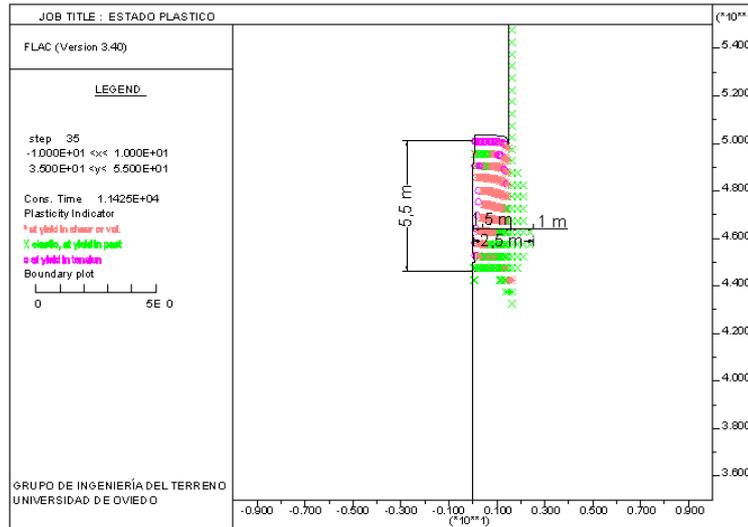


Figura 4.13.- Estado plástico del modelo tras la inyección

4.3.3.3 Modelo 9: Presión de inyección 10 MPa

Debido a la escasa longitud del sondeo y a la baja presión de inyección, la zona distendida prácticamente se limita a los 2,5 m situados inmediatamente por detrás del frente, como se puede ver en la Figura 4.14.

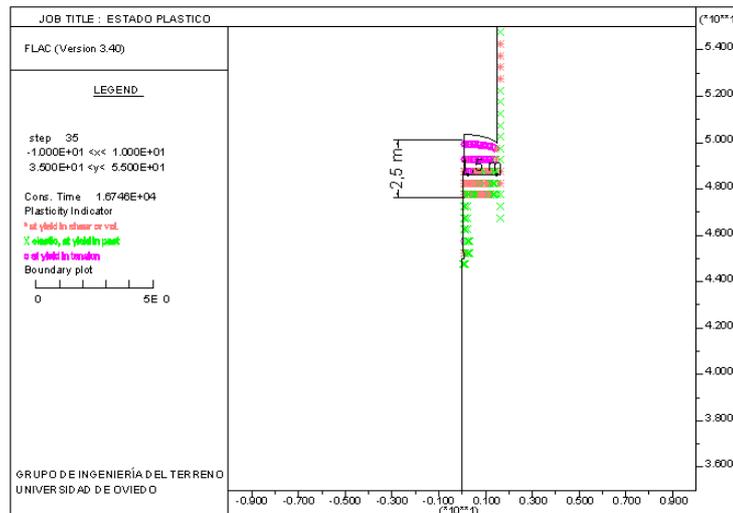
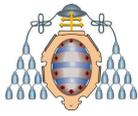


Figura 4.14.- Estado plástico del modelo tras la inyección



4.3.4 Comparación de los diferentes modelos

Una vez descritos los resultados de los modelos analizados, a continuación se realiza una comparativa entre todos ellos, para definir las opciones más favorables.

Para llevar a cabo esta comparativa, en primer lugar se ha realizado una división atendiendo a la longitud del sondeo de inyección. Dentro de cada uno de estos grupos, que corresponden al sondeo de 10 m, al de 7,5 m y al de 5 m, se ha representado la presión de inyección (en abscisas) frente a la longitud afectada, la longitud sana intermedia y la distancia dañada en hastiales o techo. En la Figura 4.15 se pueden ver qué zonas se engloban dentro de estas denominaciones.

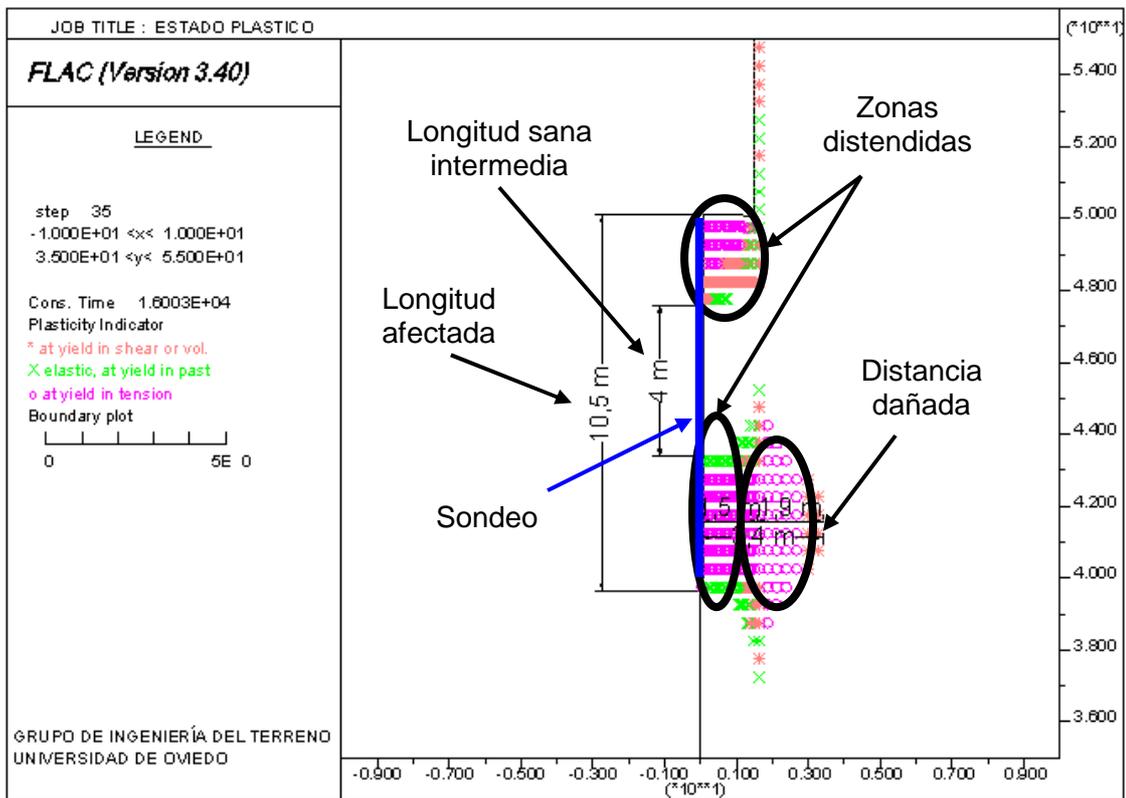
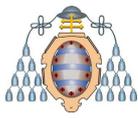


Figura 4.15.- Zonas definidas para el análisis de los modelos de inyección

Un método de inyección resulta más adecuado cuanto mayor sea la longitud de la zona distendida y menores sean la zona sana intermedia y la distancia dañada. La existencia de la zona sana intermedia supone la posible acumulación de gas por detrás del frente y la distancia dañada implica que tanto los hastiales de la capa como la corona de la galería pueden fracturarse.



En el caso de los modelos realizados con un sondeo de 10 m de longitud, cuya gráfica comparativa se muestra en la Figura 4.16, ninguno presenta unas condiciones óptimas, ya que en todos existe o bien una zona sana intermedia o una zona de hastiales y corona dañados demasiado extensas.

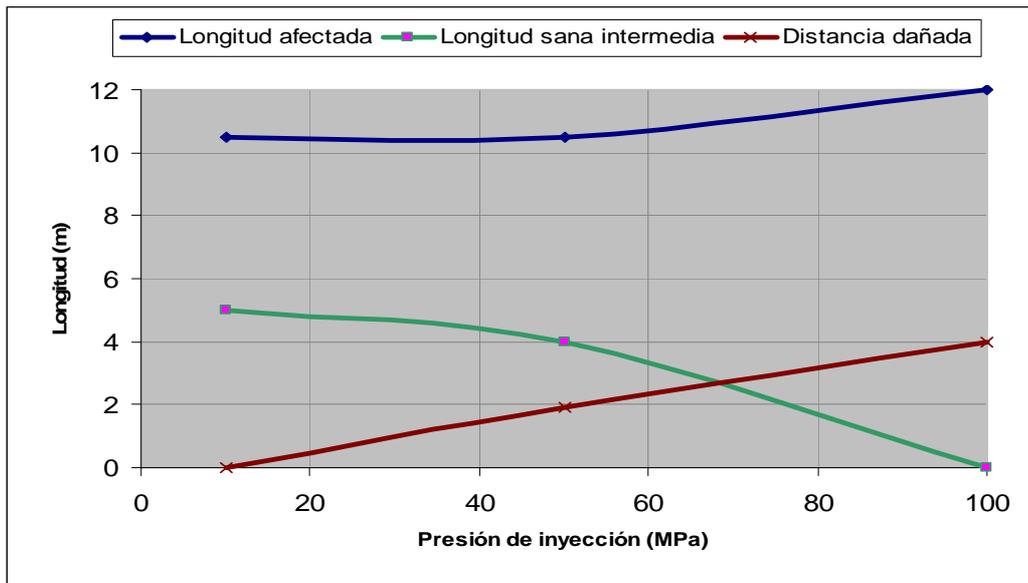


Figura 4.16.- Comparativa de los modelos con sondeo de 10 m de longitud

La mejor opción, en este caso será trabajar a bajas presiones para minimizar el daño a techo y hastiales y realizar trabajos complementarios para relajar la longitud sana intermedia. Estos trabajos pueden ser tanto sondeos de distensión como tratamientos de inyección sistemáticos que garanticen que dicha zona intermedia no fracturada en el proceso de inyección actual ya lo haya sido en un proceso de inyección previo, en avances anteriores.

En el caso de los procesos de inyección con sondeos de 7,5 m, ocurre algo parecido al caso anterior (véase Figura 4.17), aunque no de forma tan marcada. Se podría trabajar a presiones intermedias, del orden de 50 MPa, que aumentan la longitud distendida y eliminan la zona sana intermedia, si bien generan daños a techo y hastiales del orden de 1,5 m de espesor (que pueden ser asumibles en determinadas circunstancias). La inyección a baja presión podría utilizarse con tratamientos complementarios de distensión de la zona intermedia.

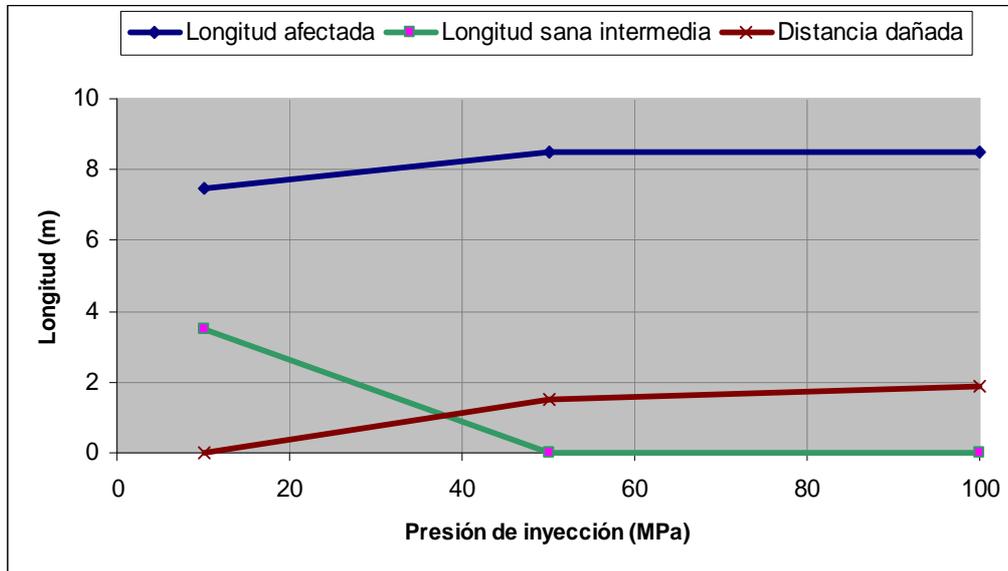
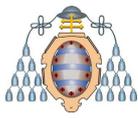


Figura 4.17.- Comparativa de los modelos con sondeo de 7,5 m de longitud

Cuando el sondeo mide 5 m, la distancia dañada en techo y hastiales disminuye sensiblemente con respecto a los casos anteriores, e incluso se tienen inyecciones que cumplen los requisitos indicados, tal y como se puede ver en la Figura 4.18.

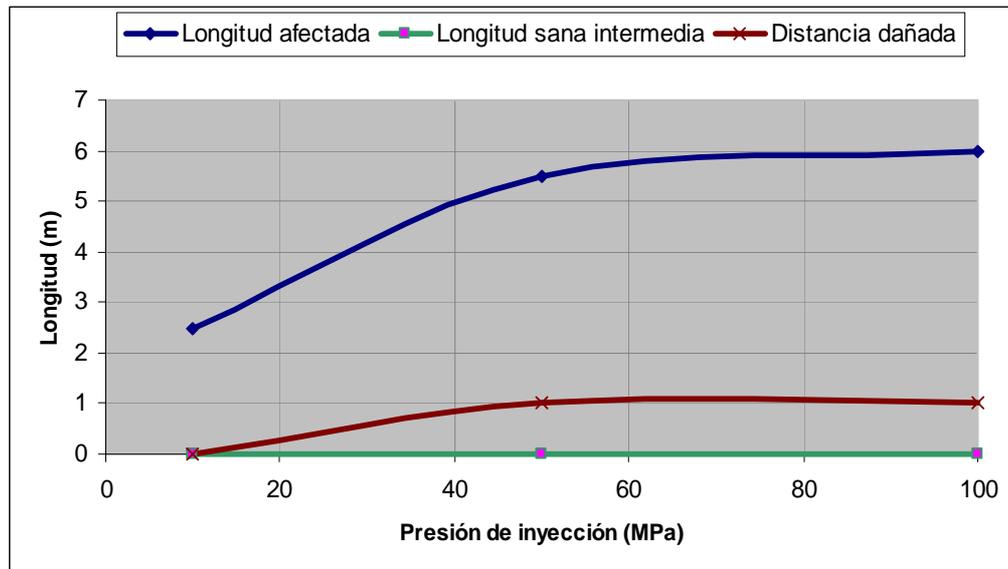
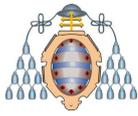


Figura 4.18.- Comparativa de los modelos con sondeo de 5 m de longitud

Si se inyecta a una presión de 10 MPa, la zona afectada y la distendida coinciden (2,5 m de longitud), lo que implica que no existe zona sana intermedia, y además no se



llega a dañar los hastiales y la corona. Sin embargo, dada la escasa entidad de la zona distendida, este modelo no sería viable desde un punto de vista económico y operativo, ya que supondría un gran retraso para las labores. La inyección a 50 ó 100 MPa supone aumentar la longitud distendida a unos 6 m, lo que la hace mejor desde el punto de vista productivo, con una profundidad de afección a los hastiales y techo del orden de 1 m.

4.3.5 Simulación CARDOX

Además de la sistemática de inyección tradicional (no explosiva), también se ha modelizado el efecto que tendría en la capa de carbón y su entorno la utilización de un método de fracturación explosivo, comercializado bajo la denominación “CARDOX”.

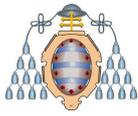
Consiste en la colocación en el interior de los sondeos de inyección de una cánula con un reactivo químico que produce de forma instantánea una gran descarga de CO_2 , que agrieta y fisura el material circundante.

Las cánulas utilizadas para este sistema constan de varios elementos, que se pueden observar en el esquema de la Figura 4.19 y se describen a continuación:



Figura 4.19.- Esquema de una cánula CARDOX

- La cabeza de activación es la parte que se conecta a una fuente externa de baja tensión que desencadena la reacción química.
- El cartucho de reactivo químico, está en contacto con la cabeza de activación.
- Este cartucho se encuentra conectado con una carcasa, dentro de la cual se encuentra el CO_2 líquido, previamente introducido por una unidad de recarga.
- Al final del depósito de CO_2 líquido, hay un sistema de seguridad que evita que cuando se desencadena la reacción química el CO_2 salga a menor presión de la requerida. Cuando se alcanza la presión adecuada, que se puede modificar



mediante este dispositivo, el disco de ruptura se rompe y permite la salida a alta presión del CO₂ ya en estado gaseoso.

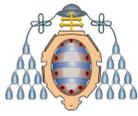
La metodología de este sistema es la siguiente. Una vez perforados los sondeos de inyección, se introduce en cada uno de ellos una o más cánulas CARDOX. Cada una de estas cánulas se conecta a un activador de baja tensión y al pasar un impulso desde éste a la cánula cargada, el fusible eléctrico inicia una rápida reacción en el reactivo químico, transformando el CO₂ líquido en gas, lo que incrementa su volumen inicial unas seiscientas veces. Durante este proceso, se alcanza una presión suficiente dentro de la cánula como para romper el disco de ruptura, de manera que se libera una gran masa de CO₂ que fractura el carbón circundante y desplaza al CH₄ preexistente.

En la Figura 4.20 se muestran las características de cada uno de los tubos de CARDOX comercializados. También se indican los usos recomendados para cada caso.

Tipo de Tubo	B20		B37		F57		F57-L				C74	
Diámetro Nominal (mm)	45		45		54		54				65	
Longitud (mm)	686		1118		1246		1753				1093	
Peso	5.45		8.18		12.73		20				16.82	
Carga CO ₂ (kg)	0.29		0.60		0.88		1.25				1.25	
Presión de Ruptura (ton/in ²)	12	15	12	15	8	12	15	17.5	12	15	8	12
Presión de Ruptura (kg/cm ²)	1900	2360	1900	2360	1260	1900	2360	2760	1900	2360	1260	1900
Grosor disco (mm)	2,8	3,6	2,8	3,6	2,4	3,6	4,4	5,2	3,6	4,4	3,2	4,8
Reactivo Químico	D45	D62.5	D62.5	D77.5	D50	D77.5	D100	D115	D115	D115	D120	D145
Tamaño de Broca (mm)			51		57		57				76	

Tubo B20	Tubo B37	Tubo F57	Tubo F57-L	Tubo C74
Rotura Secundaria de hormigón o roca. Sección fina de hormigón.	Mina de Carbón/Mena. Rotura Secundaria de hormigón o roca. Silo, horno, masa de hormigón. Sección fina de hormigón.	Mina de Carbón/Mena. Cantera, Excavaciones de Túneles y Zanjas. Excavación de roca a gran escala. Hormigón Masa/Reforzado.	(Tubo F57 Alargado) Mina de Carbón. Cantera.	Silo, horno. Roca porosa, roca con fisuras. Hormigón masa.

Figura 4.20.- Características de los tubos CARDOX y sus aplicaciones



En este estudio se ha modelizado el tubo F57-L, ya que según las indicaciones del fabricante es adecuado para minas de carbón y además es el de mayor longitud, lo cual favorece que la zona distendida sea más amplia. Este tubo puede utilizarse con diferentes presiones de ruptura, por lo que en los modelos se han simulado la máxima (276 MPa) y la mínima (190 MPa).

Si bien existen modelos CARDOX que trabajan a menores presiones, su comportamiento será similar al de los modelos ya analizados para presiones de 10, 50 y 100 MPa, por lo que se ha preferido simular presiones más altas con el fin de obtener información en un rango más amplio.

En la Figura 4.21 y la Figura 4.22, se muestran los resultados obtenidos utilizando un sondeo de 10 m.

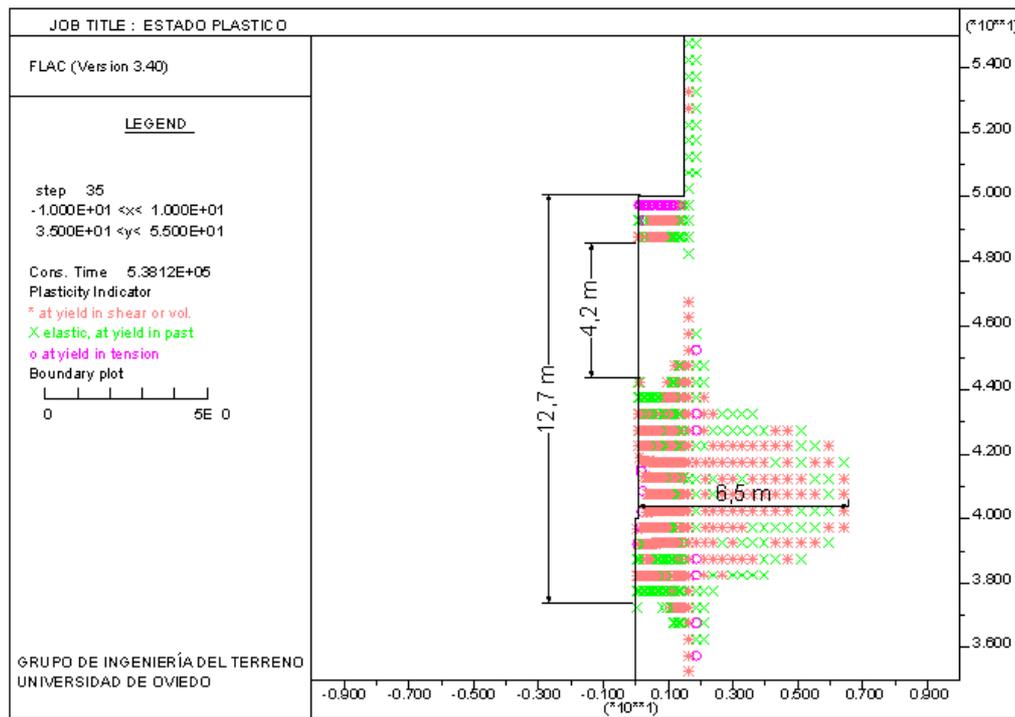


Figura 4.21.- Estado plástico con sondeo de 10 m, presión de inyección de 190 MPa

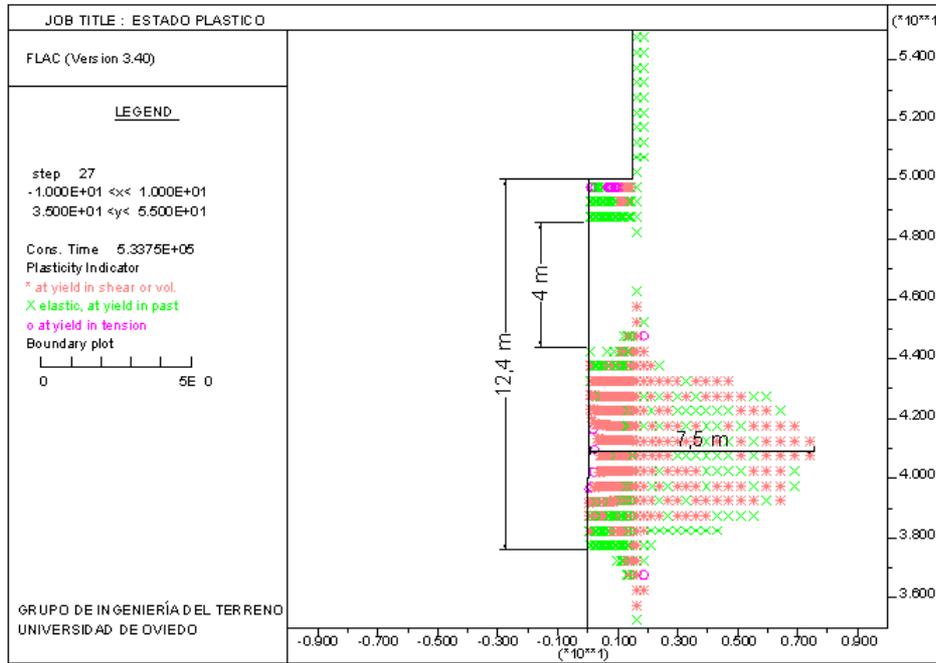
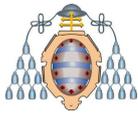


Figura 4.22.- Estado plástico con sondeo de 10 m, presión de inyección de 276 MPa

En la Figura 4.23 y la Figura 4.24 se muestran los resultados obtenidos utilizando un sondeo de 7,5 m.

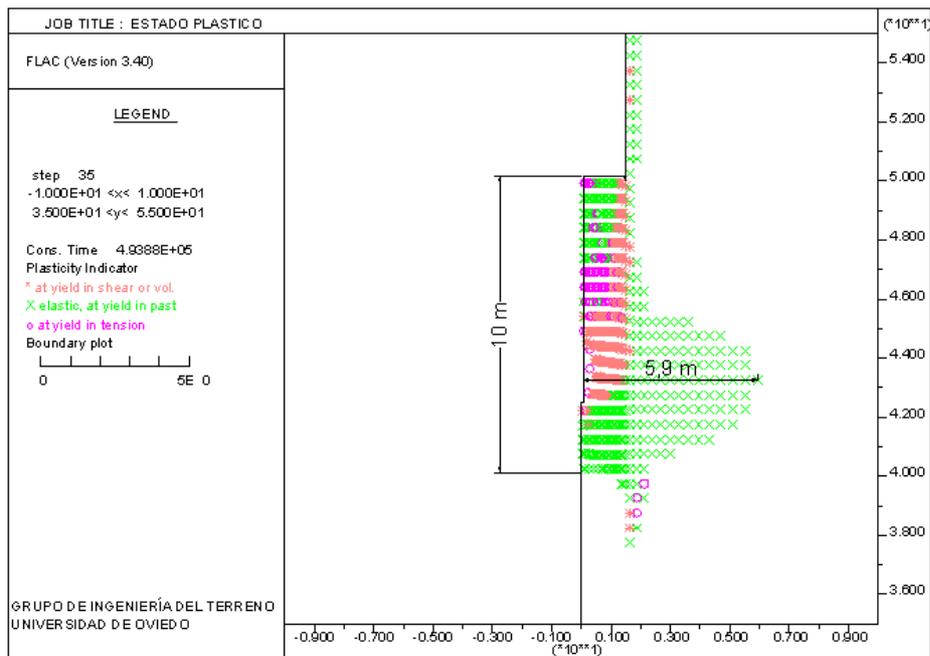


Figura 4.23.- Estado plástico con sondeo de 7,5 m, presión de inyección de 190 MPa

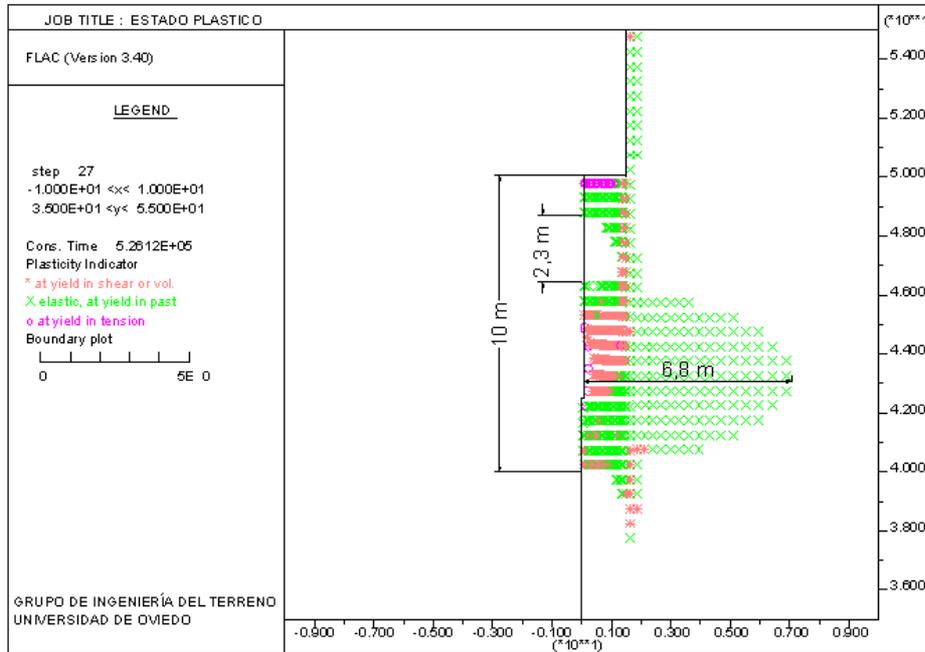
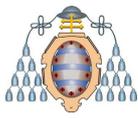
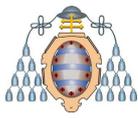


Figura 4.24.- Estado plástico con sondeo de 7,5 m, presión de inyección de 276 MPa

Para los sondeos de 10 m de largo, existe una zona sana intermedia del orden de 4 m, resultando una afección a los hastiales y techo de entre 5 y 6 m. La diferencia de comportamiento respecto a los resultados obtenidos para una presión de 100 MPa (la zona sana intermedia era inexistente) radican en el tiempo de inyección. En las simulaciones CARDOX la inyección es prácticamente instantánea, mientras que en las simulaciones anteriores la inyección se prolongaba durante una hora.

Para los sondeos de 7,5 m de longitud e inferiores el tiempo de inyección ya no resulta crítico, pues desaparece la zona sana intermedia incluso para inyecciones cuasi-instantáneas (véase la Figura 4.25 y la Figura 4.24). En este supuesto, si bien la zona distendida es adecuada, la zona dañada en hastiales y techo sigue siendo excesiva, ya que supera los 4 m.

Estos resultados ponen de manifiesto que las presiones de inyección resultan excesivas, ya que si bien se produce una zona distendida muy amplia, también se genera un daño importante en los hastiales y la corona, de como mínimo 6 m de longitud.



Con la finalidad de intentar buscar una presión óptima de inyección con el sistema CARDOX, se ha calculado un modelo con un sondeo de 7,5 m de longitud y una presión de inyección de 78 MPa. En la Figura 4.25 se muestra el resultado obtenido.

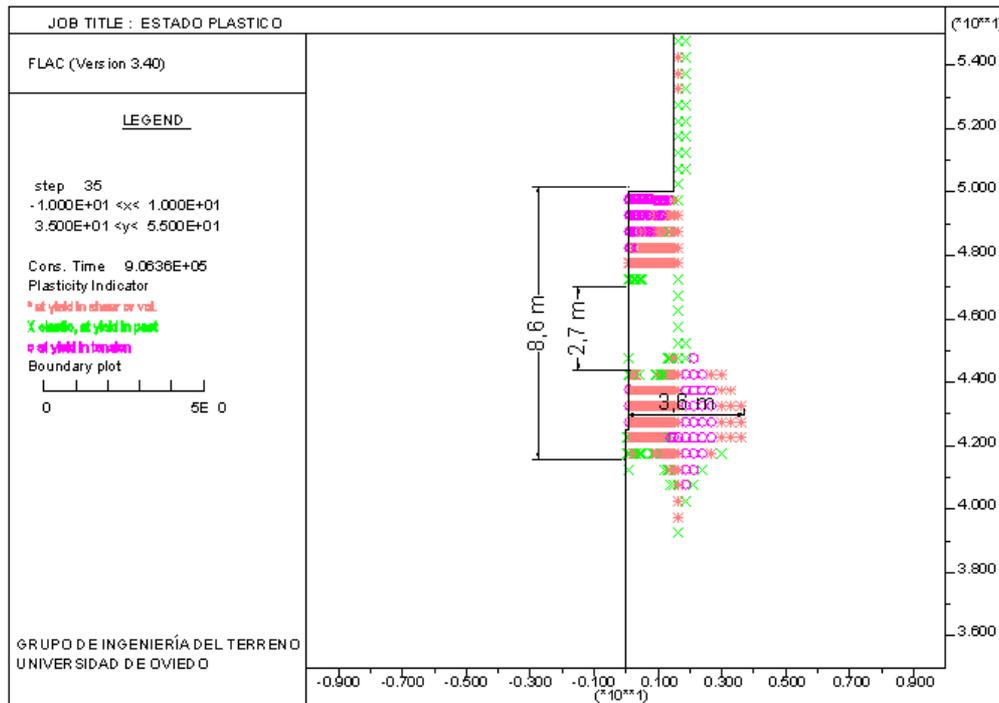
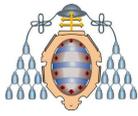


Figura 4.25.- Estado plástico con sondeo de 7,5 m y presión de inyección de 78 MPa

Como se puede ver, disminuye notablemente la zona de afectación en hastiales y solera, pero aparece una zona sana intermedia de casi 3 m de longitud. Por tanto, parece que tampoco ésta sería una inyección óptima, ya que la baja presión de inyección minimiza el daño en el entorno de la galería de avance, pero también hace que parte del carbón quede intacto. Esta cuestión debería subsanarse mediante algunas de las técnicas ya mencionadas, o incluso disminuyendo la longitud del sondeo de inyección.

Una conclusión importante que se obtiene de este modelo es el hecho de que si bien el tiempo de inyección no es una variable crítica para presiones muy altas, si influye sobremanera cuando la presión de inyección es baja. Así, si se compara el resultado de este último modelo con el del modelo 5, del apartado 4.3.2.2, en el que la presión de inyección era incluso menor (50 MPa), se observa que en el modelo 5 no existe zona sana intermedia. Esto es debido a que, a pesar de que ambos modelos presentan unas características geométricas muy similares y una presión de inyección entre 50 y 80 MPa,



difieren notablemente en el tiempo de inyección, que en el caso del sistema CARDOX es prácticamente instantáneo y en el modelo 5 de aproximadamente una hora.

4.4 Influencia de la permeabilidad del carbón

Otra cuestión que se ha analizado en este trabajo es la variación de las longitudes distendidas por la inyección en función de la permeabilidad del carbón inyectado.

En este apartado se va a comprobar cómo las zonas afectadas por la inyección pueden depender de la permeabilidad, lo que resulta de especial importancia porque dicho parámetro varía a lo largo de la capa, ya que depende del estado tensional del carbón.

El análisis del comportamiento con diferentes permeabilidades también permite aproximar los resultados que se obtendrían si la inyección se realizase con otros fluidos, a los que el carbón resulta permeable, pero en diferente medida que al CO₂.

El estudio se ha llevado a cabo para un sondeo de 10 m de longitud y una presión de inyección de 100 MPa, pudiendo extrapolarse sus resultados a otras longitudes y presiones.

Las permeabilidades que se han considerado han sido de 0,0002 mD, 0,002 mD, 0,02 mD y 0,2 mD. Se ha comprobado cómo para esta longitud de sondeo y presión de inyección, a partir de estos dos últimos valores de permeabilidad no se apreciaron cambios significativos.

A continuación se describen los resultados de los modelos descritos.

4.4.1 Permeabilidad 0,0002 mD/ sondeo 10 m/100 MPa

En estas condiciones, se comprueba en la Figura 4.26 como la longitud afectada por la inyección es de 10,9 m, si bien existe una zona sana intermedia entre la zona de inyección y el frente de avance de 4,6 m. Esta zona debería ser tratada con sondeos de distensión o programas de inyección sistemática, para conseguir una distensión completa. La zona dañada en hastiales y techo es de unos 2,3 m.

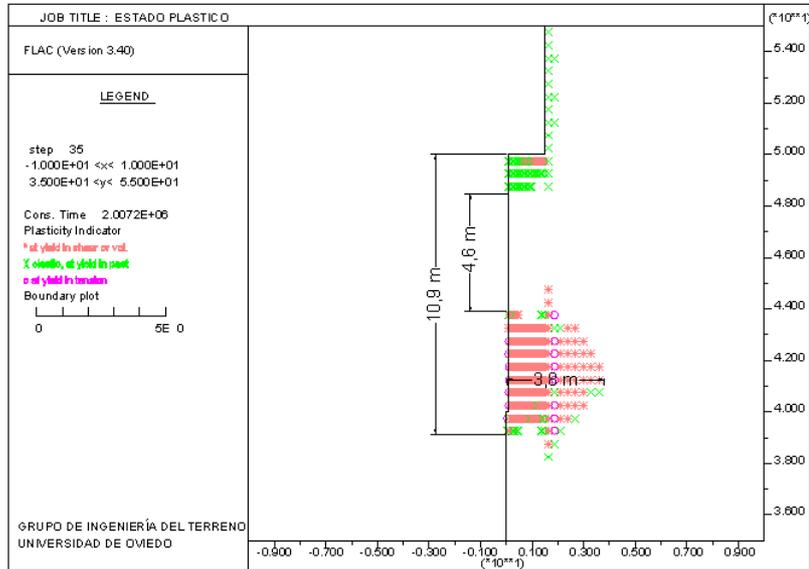
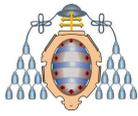


Figura 4.26.- Estado plástico del modelo con permeabilidad 0,0002 mD

4.4.2 Permeabilidad 0,002 mD/ sondeo 10 m/100 MPa

Cuando la permeabilidad del carbón aumenta diez veces respecto al caso anterior se observa como la longitud afectada es de 12 m (véase la Figura 4.27). En este caso toda esta longitud se encuentra distendida, ya que no aparece zona sana intermedia.

Como inconveniente se tiene que la zona dañada de hastiales crece hasta 4 m.

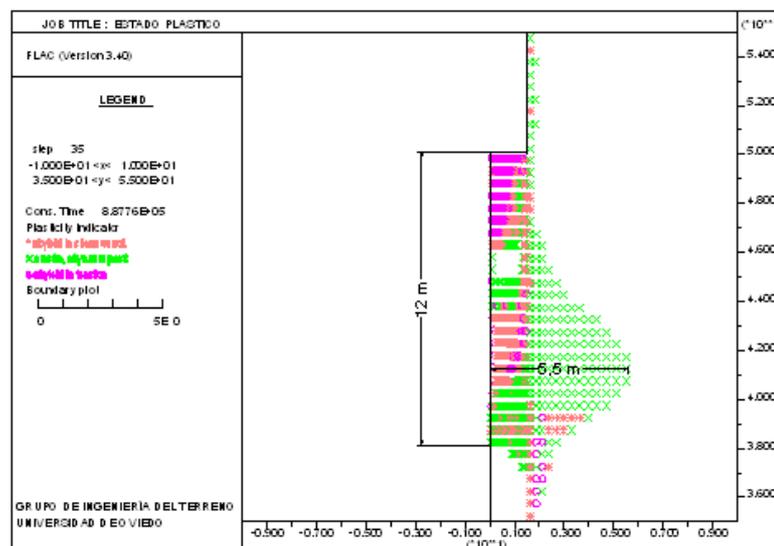
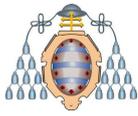


Figura 4.27.- Estado plástico del modelo con permeabilidad 0,002 mD



4.4.3 Permeabilidad 0,02 mD/ sondeo 10 m/100 MPa

A la vista de la Figura 4.28 se puede comprobar que se han obtenido resultados muy similares a los descritos con una permeabilidad 10 veces inferior.

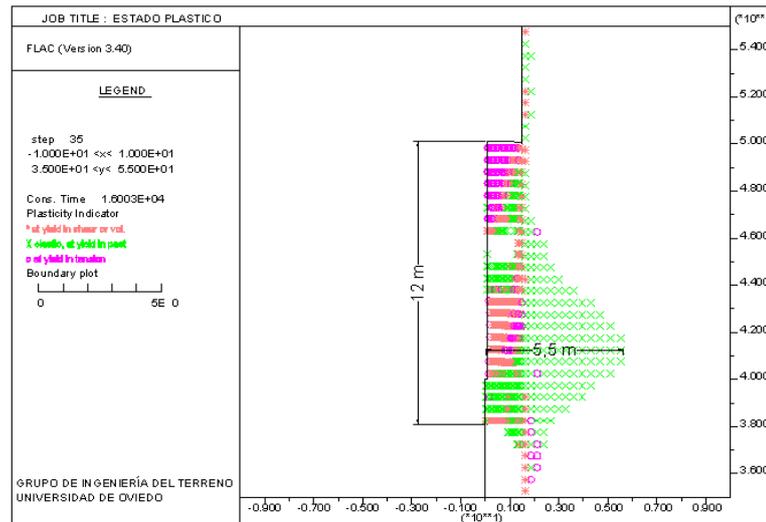


Figura 4.28.- Estado plástico del modelo con permeabilidad 0,02 mD

4.4.4 Permeabilidad 0,2 mD/ sondeo 10 m/100 MPa

Se comprueba, analizando la Figura 4.29 como los resultados obtenidos con este modelo son similares a los correspondientes a permeabilidades de 0,02 y 0,002 mD.

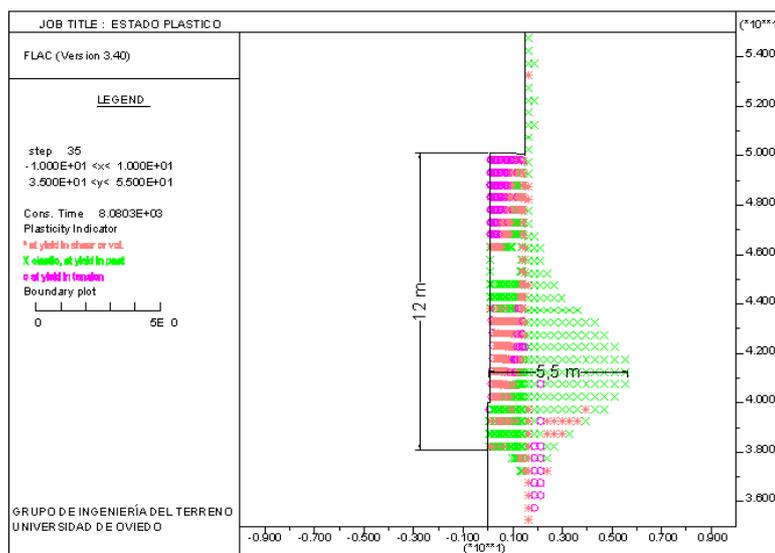
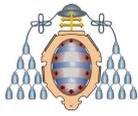


Figura 4.29.- Estado plástico del modelo con permeabilidad 0,2 mD



4.4.5 Comparativa de permeabilidades

En la Figura 4.30 se presentan las longitudes afectadas, longitud sana intermedia y distancia dañada en techo y hastiales para diferentes permeabilidades del carbón, en sondeos de inyección de 10 m de longitud, inyectando a una presión de 100 MPa.

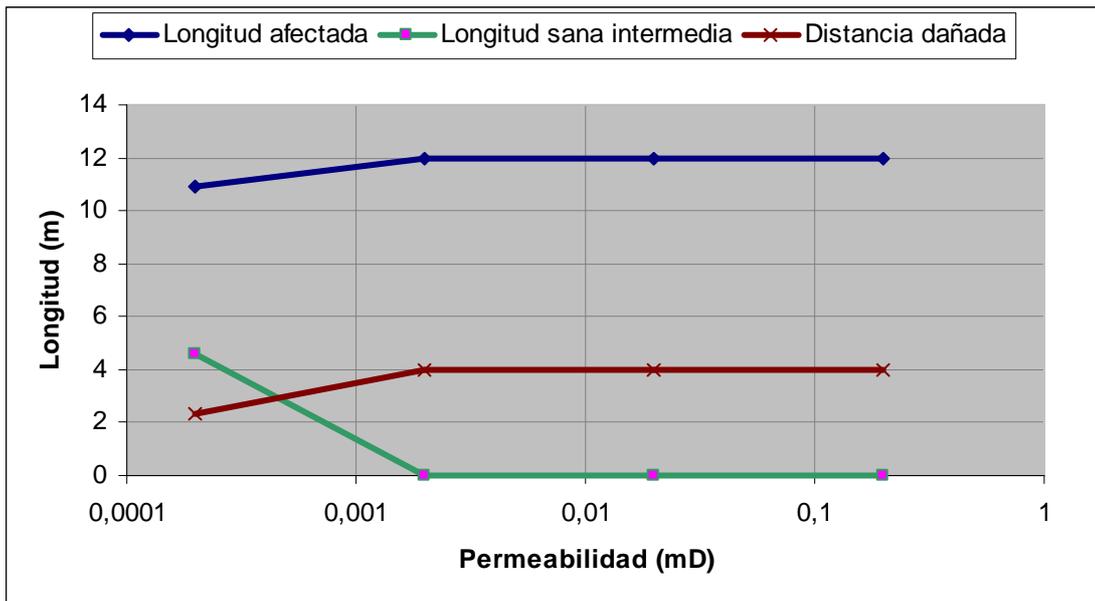
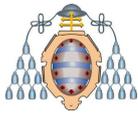


Figura 4.30.- Comparativa del comportamiento para diferentes permeabilidades

En este caso se observa cómo al disminuir la permeabilidad del carbón, por debajo de 0,001 mD, disminuye la longitud en avance afectada por el tratamiento, aumenta la zona sana intermedia y también disminuye la zona dañada en hastiales y techo por la inyección. Este efecto sería el de una inyección con un fluido ante el que el carbón fuera menos permeable (por ejemplo agua) en las mismas condiciones de longitud de sondeo y presión de inyección.

Las tendencias descritas serán similares para otras longitudes de sondeo y otras presiones de inyección. Al crecer la permeabilidad por encima de 0,02 mD apenas se aprecian cambios de comportamiento.



5 ENSAYOS DE INYECCIÓN DE CO₂

El carbón es un mineral de naturaleza friable capaz de reordenar su matriz carbonosa y sufrir una deformación significativa. Así, cuando un gas viaja por el interior de su estructura a una determinada presión, las partículas del carbón son susceptibles de recolocarse para dejar paso al flujo de gas, generándose nuevas vías de paso y modificando la permeabilidad del carbón. Esta variación resulta particularmente importante en explotaciones mineras con presencia de metano, donde la desgasificación de la capa en las zonas de trabajo es fundamental para mejorar su seguridad.

El método de inyección de CO₂ a presión en capas de carbón para abrir vías de circulación en la matriz carbonosa y mejorar la posterior emisión del metano es similar al conocido como ECBM (Enhanced Coal-Bed Methane recovery), aunque en este caso no se pretende el aprovechamiento del metano extraído, sino simplemente la mejora de la seguridad de las labores mineras.

En este caso, se ha inyectado CO₂ en el carbón, con el fin de variar su permeabilidad. Se ha usado el método PYROC, habitualmente utilizado para excavar roca, consiste en una rápida inyección de CO₂ a alta presión que provoca su fracturación.

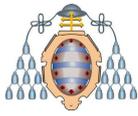
Las investigaciones llevadas a cabo hasta el momento se han centrado en la realización de ensayos de laboratorio, para pasar luego a media escala, con muestras de carbón de 1 m³, y finalizar con ensayos a escala real, en una capa de carbón en una explotación minera.

5.1 ENSAYOS DE LABORATORIO A MEDIA ESCALA

Con la idea de simular una inyección de CO₂ en una capa de carbón, se partió de una muestra que se pudiera considerar como representativa, para reproducir en el laboratorio, con la mayor fiabilidad posible, las condiciones reales.

Después de analizar varias alternativas, pensando en el avance de un nivel, se fabricó una caja de hierro de 1 m³ de capacidad y se rellenoó con carbón.

Como en un nivel de explotación la capa de carbón tiene una cara libre, la caja de ensayo se dejó libre en su cara superior.



Como el objetivo de estos ensayos era estudiar la variación de la permeabilidad del carbón con la inyección de CO₂, se realizaron tres pruebas en la muestra:

1. Inyección de metano, para estudiar la permeabilidad del carbón “intacto”.
2. Inyección de CO₂, con el sistema PYROC, para fracturar el carbón.
3. Inyección de metano, para estudiar la nueva permeabilidad del carbón y compararla con la que presentaba antes de la fracturación.

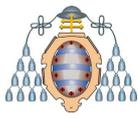
El carbón de la muestra a analizar, desfragmentado en el propio proceso de arranque y extracción desde la capa, fue tratado con una pequeña proporción de cemento (3%) para darle una cierta consistencia. En la Figura 5.1 se puede ver la muestra durante su preparación.



Figura 5.1.- Muestra de carbón

Tal y como se puede observar en la Figura 5.1, en el frente libre de la caja se han realizado varios sondeos con tubería de cobre. Éstos simulan sondeos dados en capa en el frente de avance y son usados para llevar a cabo la inyección y el control de la presión de gas.

Los sondeos se conectan por medio de mangueras con un circuito desde donde se realiza la inyección y el control del gas con sensores de caudal y de presión. La información tomada por los sensores, convertida por una tarjeta de adquisición de datos, es registrada en un ordenador para su posterior tratamiento y análisis.



A continuación, en la Figura 5.2 se pueden ver los componentes del ensayo.

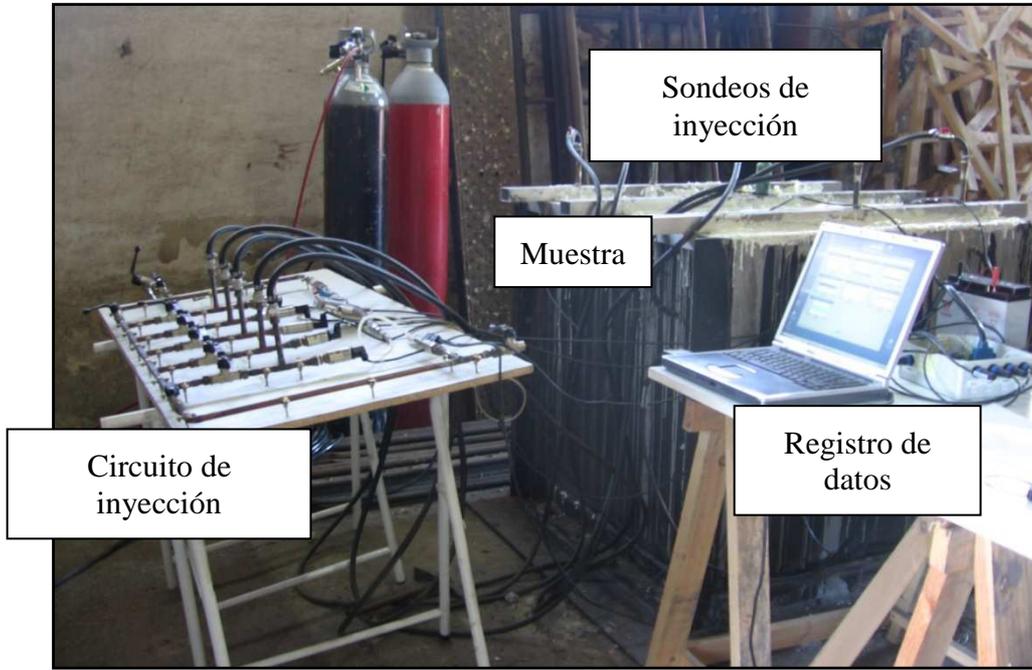
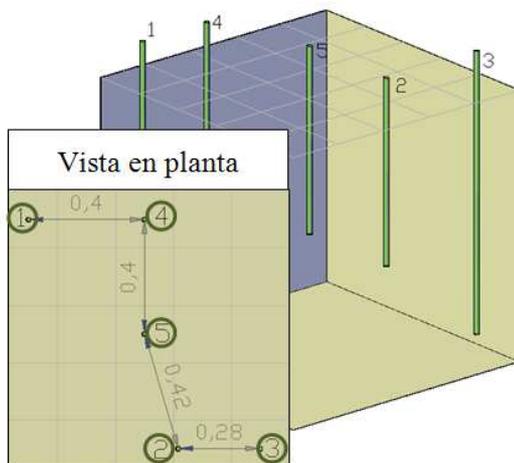


Figura 5.2.- Componentes del ensayo

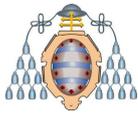
5.1.1 La inyección y el control de gas

Para reproducir la inyección de gas en una capa de carbón a través de una cánula de gas en un sondeo se han situado cinco tubos de cobre en la caja a distintas profundidades, tal y como se muestra en la Figura 5.3.



SONDEO	PROFUNDIDAD EN CARBÓN (m)
1	0,10
2	0,45
3	0,80
4	0,27
5	0,45

Figura 5.3.- Distribución de los sondeos



Cada sondeo se une por medio de una manguera con un sensor de presión. Los sensores de presión se han dispuesto en un circuito de tuberías. Este circuito permite realizar tanto el control de la presión de los sondeos como la carga y la descarga de gas en los mismos. Así mismo este circuito lleva acoplado un caudalímetro con el que se puede medir y controlar el caudal de gas de entrada y de salida en los sondeos.

En la Figura 5.4 puede verse el circuito de inyección y control del gas.

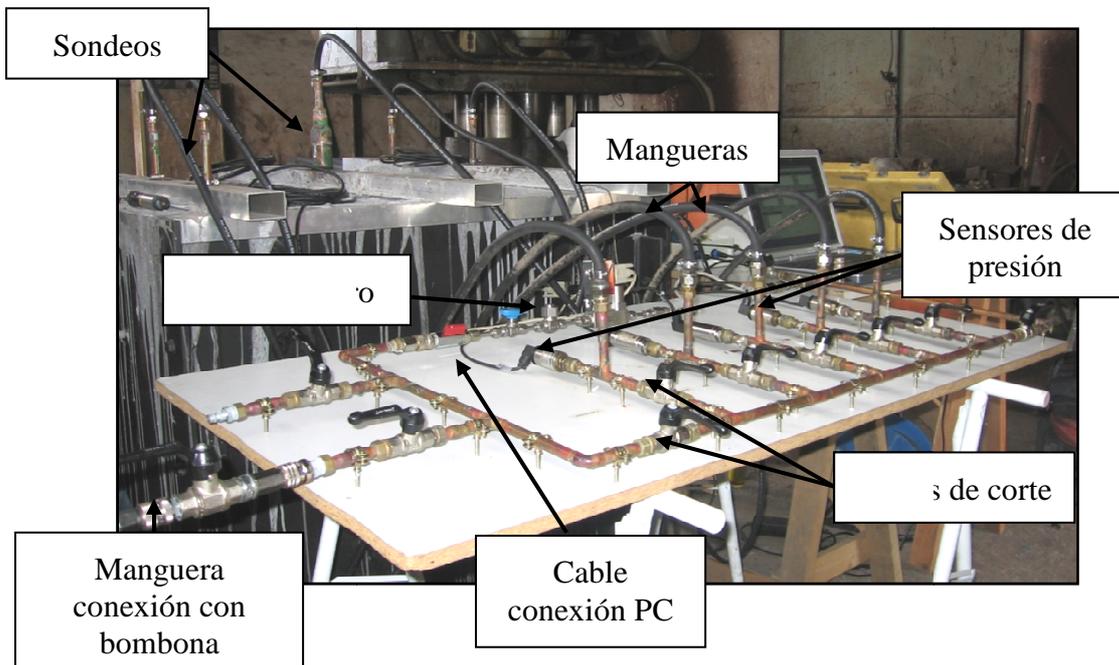


Figura 5.4.- Circuito de inyección y control de gas

5.1.2 Captación de datos

Los parámetros del ensayo son controlados de forma continua por sensores eléctricos que transforman la señal física a medir (presión o caudal) en una señal eléctrica analógica. Esta señal analógica se envía a una tarjeta de adquisición de datos, alimentada por una batería eléctrica, que la transforma en digital. Finalmente, gracias a un software especialmente desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Terreno para los ensayos de inyección de gas, la señal digital es leída por un ordenador donde, bajo un entorno Windows, se muestra al usuario expresada como magnitud física (kPa o mg/s).

En la Figura 5.5 se muestran los componentes del equipo que forman parte en la captación de datos en un ensayo.

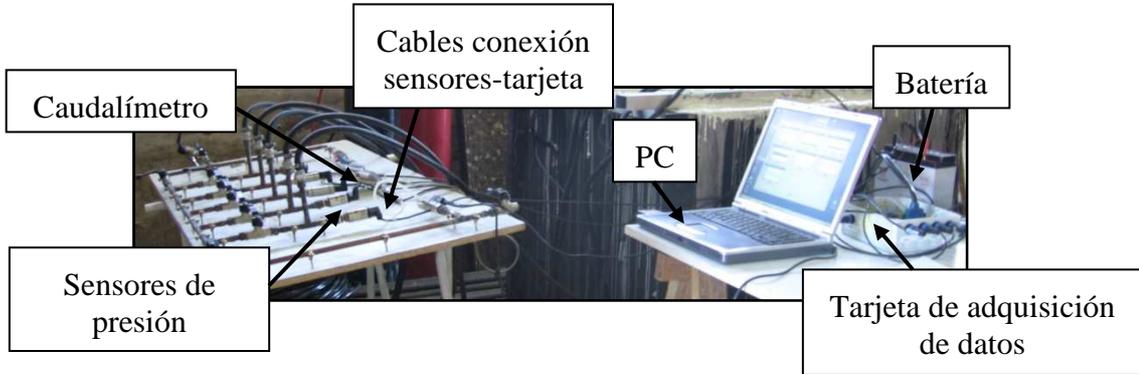
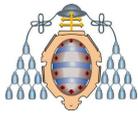


Figura 5.5.- Captación de datos

5.1.3 Mejora de la permeabilidad

Buscando mejorar la permeabilidad del carbón se ha realizado un ensayo de inyección de CO₂ a alta presión con el sistema PYROC. Para ver los efectos provocados en la permeabilidad del carbón debidos a esta inyección de gas se ha realizado el mismo ensayo de inyección de metano dos veces: una antes y otra después de la fracturación del carbón, lo que ha permitido comparar el comportamiento del gas en carbón “intacto” y en carbón “fracturado”.

5.1.3.1 Inyección de CH₄

La primera parte del estudio comenzó con la inyección de metano en la muestra de carbón “intacta” por uno de los sondeos. En el esquema tridimensional de la Figura 5.6 se muestran las longitudes del recorrido del gas desde el sondeo de inyección, S2, a los sondeos de control.

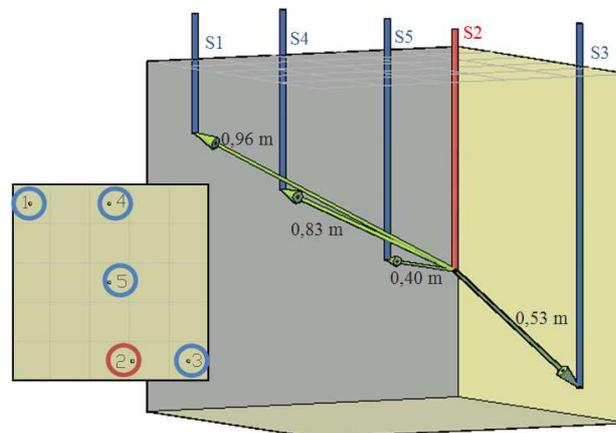
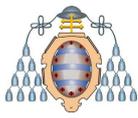


Figura 5.6.- Inyección de metano



Tal y como se puede observar el sondeo más cercano a S2 es el S5, seguido del S3, S4 y S1. Nótese que el sondeo S2 y el S5 están a la misma profundidad, el S3 está más profundo que el S2 y los otros dos (S4 y S1) más superficiales.

Se puede ver en la Figura 5.7 cómo evoluciona la presión de gas en cada uno de los sensores a medida que se va inyectando metano en la muestra. Se ha dibujado con una línea azul claro los valores del caudalímetro en la inyección de gas. Tal y como se puede observar, la carga se comienza con valores bajos de caudal y cuando la presión en el sensor del sondeo de inyección está más o menos estabilizada se aumenta el caudal de entrada de gas hasta que la presión vuelve a estabilizarse a un nuevo valor (mayor que el primero), hasta alcanzar una presión de 260 kPa. Estabilizada la presión en este valor se inicia el proceso de descarga.

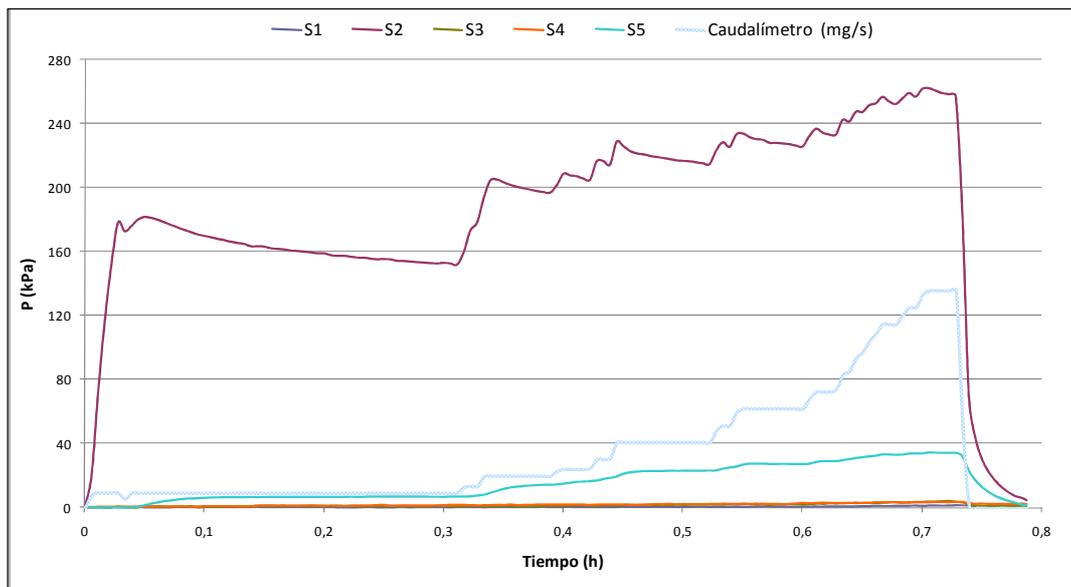


Figura 5.7.- Ensayo de inyección de metano

Si se analiza la evolución de las presiones en los sondeos S1, S3, S4 y S5 (véase Figura 5.8) se puede observar que es el sondeo S5 el que más aprecia la variación de la presión, seguido de S3, S4 y S1, lo que concuerda con las distancias a las que están situados los sondeos de control, es decir, se nota más la variación de la presión en los sondeos más cercanos y menos en los más alejados.

Por otra parte, a medida que aumenta el caudal de entrada más se aprecia el aumento de presión en los sondeos de control, sobre todo en el S5.

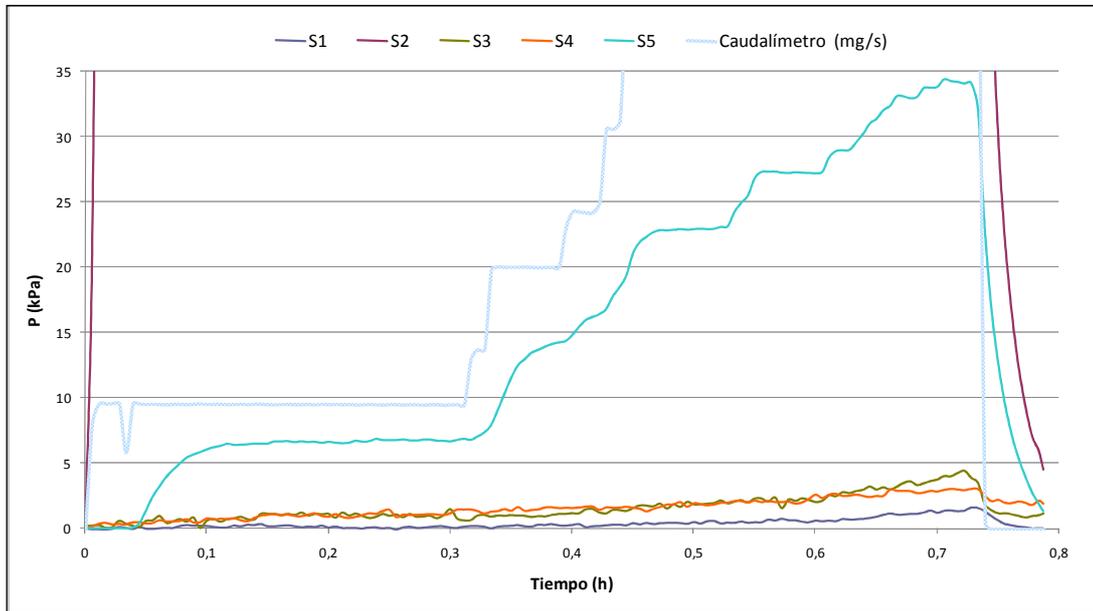
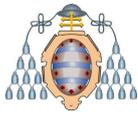


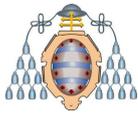
Figura 5.8.- Detalle del ensayo de inyección con aumento del caudal

Tras este ensayo se ha calibrado la permeabilidad de la muestra en función de la presión de gas. Para ello se ha simulado mediante un modelo bidimensional (FLAC-2D) la descarga de gas que se produce en cada uno de los sondeos de control (S1, S3, S4 y S5) tras finalizar la inyección de CH₄ en el sondeo S2. Puesto que cada una de las descargas se produce desde valores de presión diferentes, este análisis permite conocer la relación presión/permeabilidad en este ensayo y comparar sus resultados con los obtenidos en muestras de laboratorio a pequeña escala para este mismo gas.

Al igual que en el caso del ensayo “in situ”, a partir del modelo se obtienen gráficas presión-tiempo que pueden ser comparadas con la real, de manera que al variar las propiedades del carbón simulado (permeabilidad, porosidad) se obtenga una gráfica lo más parecida posible a ésta.

El modelo generado consta de una malla con las dimensiones de la muestra y de un punto de medida de la presión de gas que simula el sondeo analizado en cada caso. Cabe señalar que el modelo considera únicamente cálculos gasodinámicos, ya que el comportamiento mecánico no tiene importancia en este caso.

El ensayo comienza al introducir de forma instantánea gas a una presión determinada que varía según el ensayo, y que se corresponde con la máxima registrada



en cada sondeo. Así por ejemplo, cuando se calibra la descarga del sondeo S5 se inyecta una presión de unos 32 kPa, que es el valor más alto medido en ese sondeo.

Después se libera la presión en la zona donde se localiza el sondeo analizado, con lo que se produce la descarga hasta llegar a una presión de gas cero.

A continuación se describen los resultados obtenidos en la calibración de cada descarga, ordenados según la presión alcanzada en cada sondeo (véase Tabla 5.1). Además, como ya se comentó, también se ha analizado la descarga del propio sondeo de inyección (S2).

	S1	S4	S3	S5	S2
Presión durante la carga (kPa)	1,6	3	4,2	32	257

Tabla 5.1.- Presión de gas máxima en cada sondeo

En la Figura 5.9 se muestra a modo de ejemplo la gráfica real de la descarga del sondeo S1 y la gráfica de calibración, obtenida del modelo. Se puede comprobar cómo ambas son muy similares, por lo que la permeabilidad introducida en el modelo para la simulación se aproxima notablemente a la real.

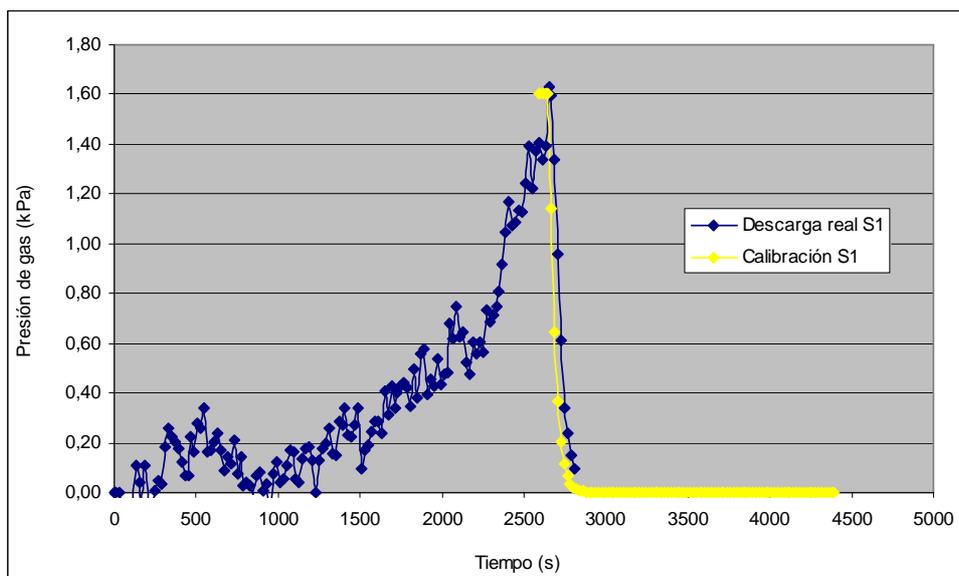
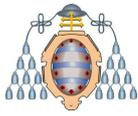


Figura 5.9.- Comparativa descarga real en S1 y gráfica de calibración del modelo



Siguiendo esta misma metodología se ha calibrado la permeabilidad para todos los sondeos. En la Tabla 5.2 se recogen los resultados de permeabilidad de dichas calibraciones.

	S1	S4	S3	S5	S2
Permeabilidad calibrada (mD)	7350	735	525	31.5	9.5
Presión durante la carga (kPa)	1,6	3	4,2	32	257

Tabla 5.2.- Presión de gas máxima registrada en cada sondeo

Si se representan los datos de presión máxima en cada sondeo y permeabilidad recogidos en la Tabla 5.2, se obtiene una gráfica como la de la Figura 5.10

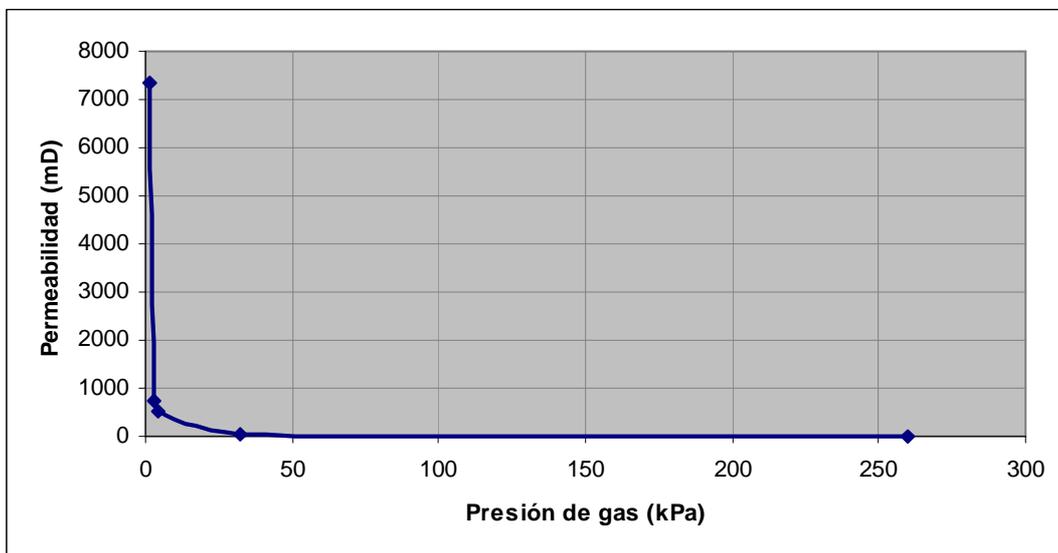


Figura 5.10.- Resultados de calibración de permeabilidad con CH₄

En la Figura 5.11 se puede ver dicha curva en escala logarítmica y con la función de ajuste que determina esta correlación.

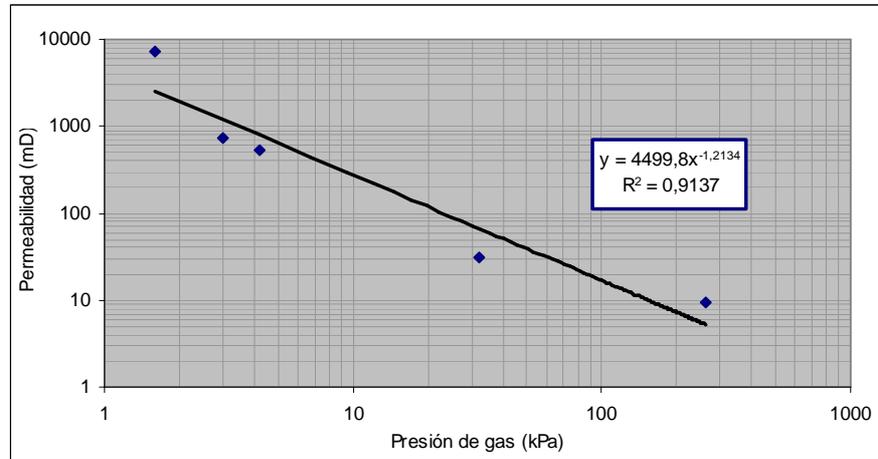


Figura 5.11.- Representación del ajuste de la curva presión de gas-permeabilidad para CH₄

La relación que existe en este caso entre la presión a la que se realiza la calibración y la permeabilidad obtenida es del mismo tipo que la observada en el ensayo “in situ” y en los ensayos de laboratorio a pequeña escala.

Si se comparan los resultados obtenidos de la calibración de este ensayo a gran escala con los obtenidos de los ensayos iniciales de laboratorio a pequeña escala con CH₄ (véase Figura 5.12) se observa que entre ambas curvas existe una muy buena correlación, si bien los ensayos de laboratorio a pequeña escala muestran una permeabilidad ligeramente superior a los de gran escala, lo cual es lógico ya que equivale a un ensayo en carbón con confinamiento.

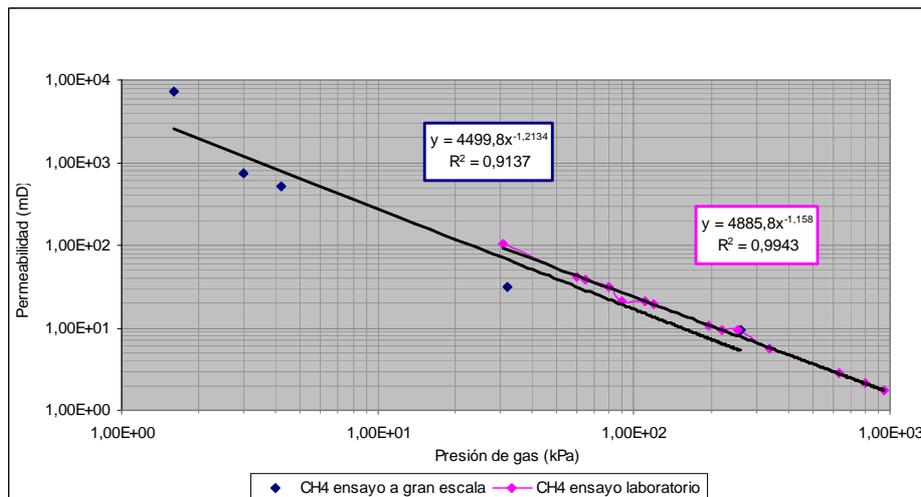
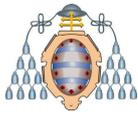


Figura 5.12.- Resultados de permeabilidad en ensayos a gran escala y laboratorio con CH₄



5.1.4 Fracturación de la roca por alta presión de gas

Con el objeto de conseguir una mejora en la permeabilidad del carbón se ha procedido a fracturar la muestra con gas a alta presión. Para ello en el sondeo central de la muestra –S5- se ha introducido un dispositivo PYROC generador de presión de gas.

El sistema PYROC consiste en una mezcla productora de gas contenida en el interior de un cartucho de cartón cuya iniciación se realiza con un inflamador eléctrico, accionado por un explosor convencional. Tras su deflagración, la mezcla genera gases no combustibles, principalmente CO₂, que se expanden a una velocidad de detonación muy baja (aproximadamente 40 m/s frente a más de 6000 m/s de algunos explosivos convencionales) dentro de un espacio confinado, como un barreno en la roca, haciendo que se agriete el material.

Tratando de reproducir las condiciones reales de una capa de carbón en mina, se ha inyectado metano a la muestra por tres de los cuatro sondeos efectivos previa iniciación del producto.

En la Figura 5.13 se muestra el sistema de iniciación utilizado, cargado con 50 g de mezcla, y su situación en el sondeo central antes de colocar el retacado.



Figura 5.13.- Sistema de presión de gas direccional

A continuación en la Figura 5.14 se muestra la secuencia de la detonación (antes, durante y después) del sistema PYROC. Tal y como se puede observar no se aprecia ninguna diferencia, puesto que éste es un método de fragmentación de la roca poco agresivo que, por otra parte, no produce ni humos ni grandes ruidos.

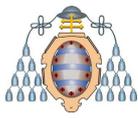


Figura 5.14.- Secuencia de la detonación PYROC

5.1.5 Inyección de CH₄ tras la fracturación de la roca

Tras efectuar el ensayo de fracturación del carbón y con el objeto de evaluar la nueva permeabilidad inducida en la muestra de carbón se ha inyectado nuevamente metano, tratando de reproducir el primer ensayo, anterior a la detonación del sistema PYROC.

A continuación en la Figura 5.15 se muestra el ensayo de inyección realizado tras la fracturación de la roca. Al igual que en el primer ensayo se ha inyectado gas por el sondeo S2 con caudales crecientes.

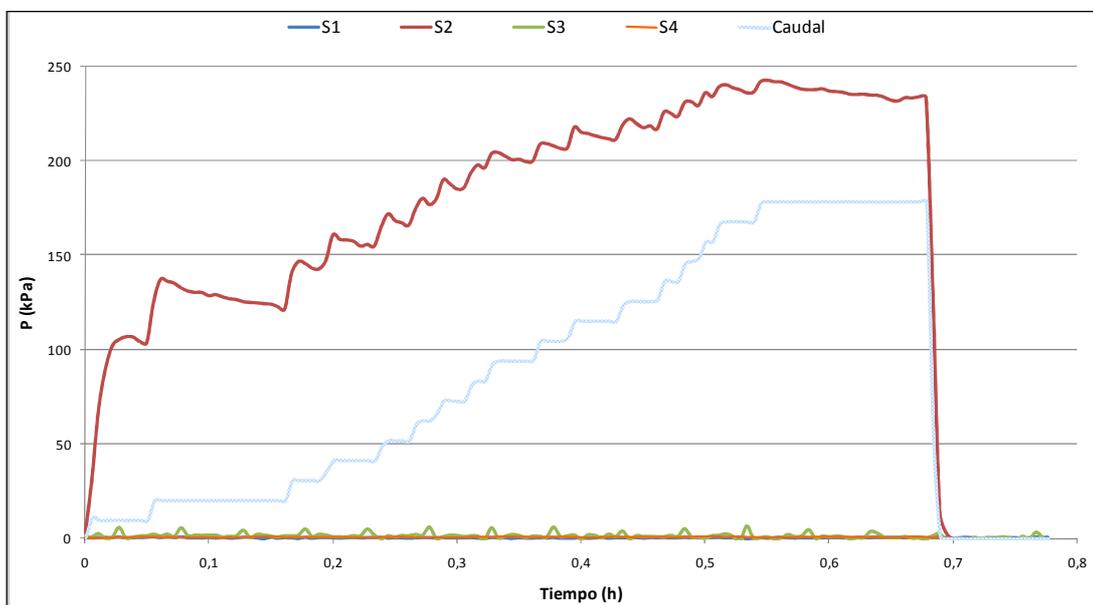
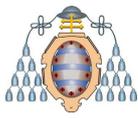


Figura 5.15.- Inyección de CH₄ tras el ensayo de fracturación del carbón



Nótese que en este ensayo no se ha utilizado el sensor de presión del sondeo S5 (central), ya que este sondeo quedó inutilizado tras la iniciación del dispositivo generador de alta presión.

La variación en las presiones de los sondeos de control, tal y como se puede observar con más detalle en la Figura 5.16, es prácticamente inapreciable, a diferencia de lo ocurrido en el primer ensayo donde todos los sensores, en mayor o menor medida, habían aumentado la presión.

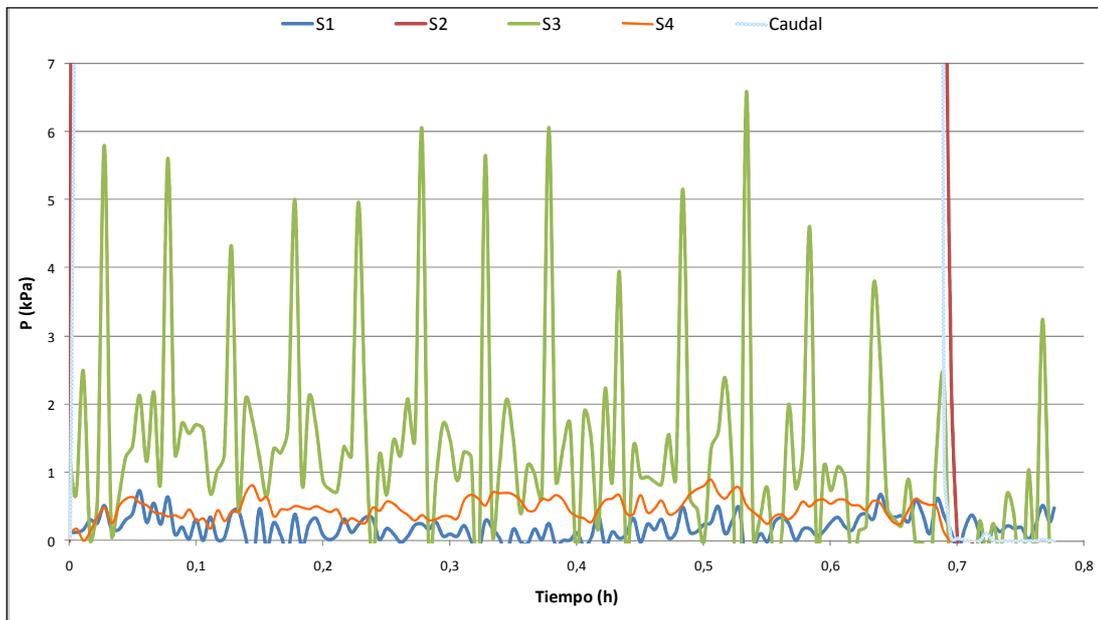


Figura 5.16.- Bajas presiones en la inyección de CH₄ tras el ensayo de fracturación

A partir de las dos pruebas de inyección de metano ejecutadas bajo las mismas premisas, una antes y otra después del ensayo de fracturación de la muestra de carbón con el sistema PYROC, se puede comparar el comportamiento del gas en la muestra intacta y alterada.

Superponiendo las gráficas de los sensores del sondeo de inyección en ensayos realizados antes y después de fracturar el carbón se obtiene la Figura 5.17. Tal y como se puede observar los valores de la presión son muy similares en ambos ensayos, no así los valores del caudal, que tuvieron que ser aumentados en el segundo ensayo para igualar las presiones de gas alcanzadas en el sondeo de inyección del primer ensayo (260 kPa).

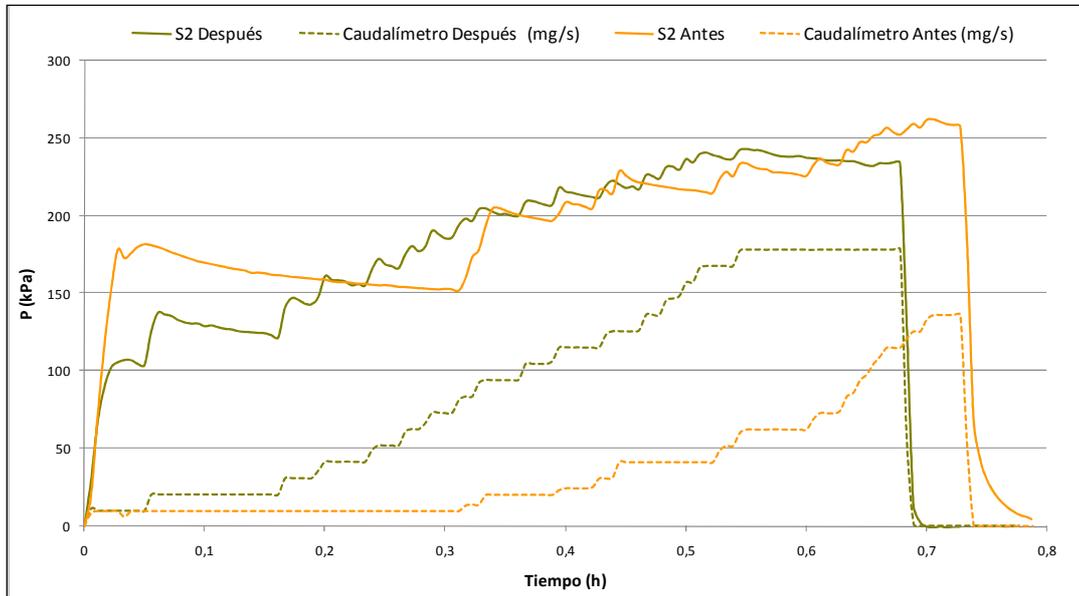
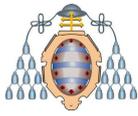


Figura 5.17.- Ensayo de inyección de CH₄ antes y después del ensayo de fracturación

En el primer ensayo el caudal medio introducido es considerablemente menor que el introducido en el segundo y, por tanto, también la cantidad de gas. Así, mientras en el segundo ensayo se metieron un total de 230 g, en el primero sólo se llegaron a introducir 100 g (76 g a igualdad de tiempos de inyección), es decir, menos de la mitad.

Puesto que para alcanzar la misma presión de estabilización hay que introducir más gas en el segundo ensayo que en el primero, el gas se ha de estar repartiendo en más volumen, con lo que el volumen de huecos tiene que ser mayor. Dicho de otra forma, como el volumen de huecos es mayor, para un mismo caudal de entrada, la presión de equilibrio será menor.

Si se comparan las gráficas del inicio de las cargas de los dos ensayos se puede observar este efecto (véase la Figura 5.18). Y así, mientras que con un caudal de entrada de 10 mg/s antes de la fracturación de la roca la presión se estabilizaba en 175 kPa después no pasa de 110 kPa, haciéndose necesario aumentar el caudal de entrada para obtener una presión mayor. Este mayor caudal de inyección en el segundo ensayo para alcanzar las presiones del primero es necesario a lo largo de todo el ensayo.

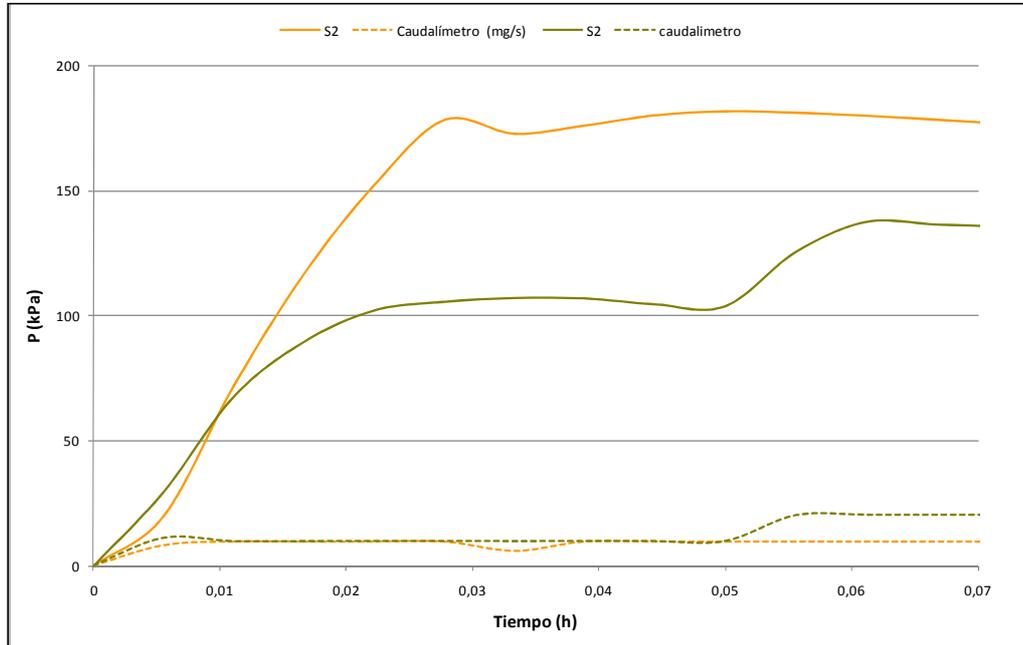
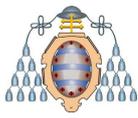


Figura 5.18.- Detalle comparativo de las cargas antes y después del ensayo de fracturación

Por su parte, si comparamos gráficas de ambos ensayos en el momento del cese de la inyección de gas (Figura 5.19) se aprecia que el gas se reparte más rápidamente tras el ensayo de fracturación del carbón, ya que el descenso de presión se produce en menos tiempo, lo que indica que tiene más facilidad para moverse.

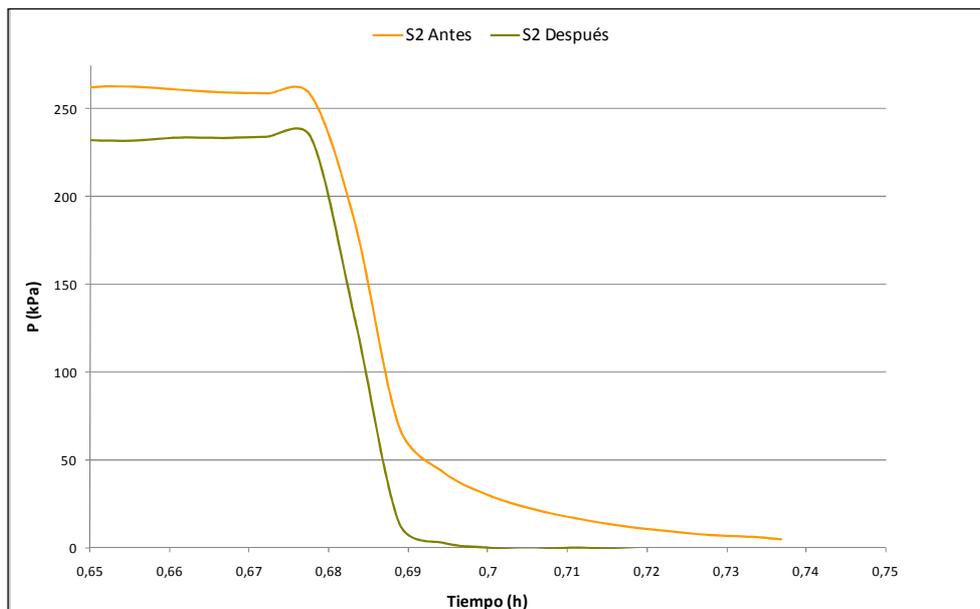
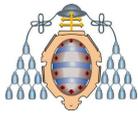


Figura 5.19.- Cese de la inyección de gas antes y después del ensayo de fracturación



Por tanto, el hecho de que tras el ensayo de fracturación para alcanzar la misma presión de gas en el sondeo de inyección sea necesario introducir más gas, que los sensores de control no aumentan la presión al inyectar gas y que el descenso de presión tras el cese de la inyección sea más rápido viene a indicar que se han abierto nuevas vías de circulación para el gas, dicho de otra forma: se ha mejorado la permeabilidad del carbón mediante el ensayo de fracturación por inyección de CO₂ a alta presión.

Para calibrar la permeabilidad de este nuevo ensayo a gran escala y comprobar si se han producido variaciones respecto al ensayo realizado antes de la fracturación se ha seguido la misma metodología que la descrita en el apartado 5.1.3.1, es decir, se ha simulado mediante un modelo la descarga del sondeo S2, y se ha comparado la gráfica presión-tiempo obtenida con la real. La coincidencia entre ambas supone que el valor de la permeabilidad introducido en el modelo es muy similar al real.

En la Figura 5.20 se puede ver la comparativa entre la descarga de S2 real y la obtenida del modelo. La correlación entre ambas es muy buena, por lo que puede decirse que el valor de permeabilidad utilizado para conseguir mediante la simulación numérica esta curva también se corresponde con el real.

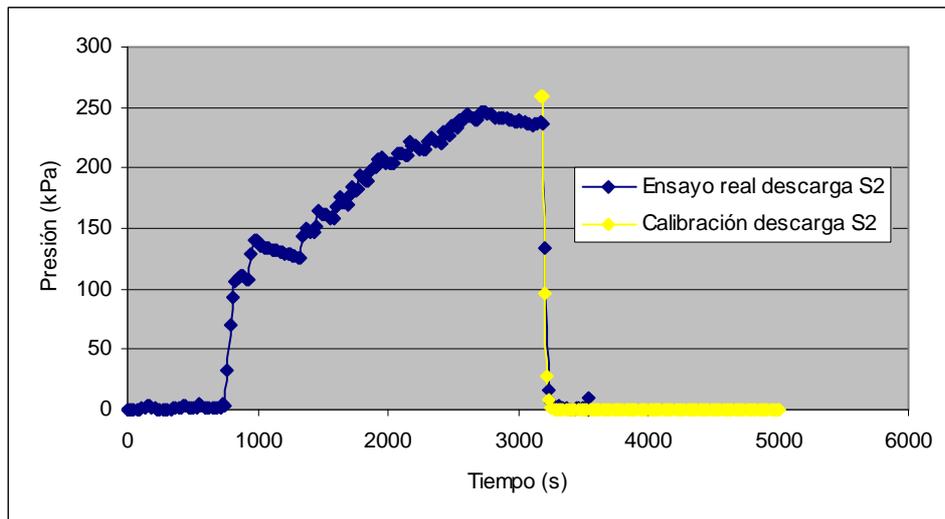
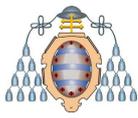


Figura 5.20.- Comparativa ensayo real-calibración mediante modelo de la descarga de S2

El valor de la permeabilidad calibrado en esta descarga de S2 es de 31 mD para una presión de partida de unos 250 kPa. Si se compara este valor de permeabilidad con el obtenido en el ensayo realizado antes de la inyección a presión de CO₂ mediante el



método PYROC (apartado 3.3.2) para una presión de partida muy similar, que era de 9,5 mD, se puede observar que la permeabilidad ha aumentado del orden de 3 veces, lo que implica que el método de desgasificación empleado resulta interesante.

5.2 ENSAYOS “IN SITU”

La idea inicial era realizar este experimento “in situ”, en la capa de carbón, pero por falta de operatividad ello no pudo ser llevado a cabo. Esta prueba fue sustituida por un ensayo “in situ” con aire comprimido a media presión (710 kPa) para ver el comportamiento del gas en capa.

Para ello, se han realizado ensayos de carga y descarga de aire comprimido en la capa Julia del Pozo Sotón, propiedad de la empresa HUNOSA, situado en el concejo de San Martín del Rey Aurelio. La zona de estudio se corresponde con el nivel 2.5.

5.2.1 Marco geológico

La capa Julia, perteneciente al paquete María Luisa, se enmarca dentro de la Cuenca Carbonífera Central y más concretamente en la unidad Caudal-Nalón. Esta unidad se divide en cuatro tramos productivos (Primer, Segundo, Tercer y Cuarto Tramo Productivo) suprayacentes a un conjunto conocido como Carbonífero Improductivo. En la Figura 5.21 se muestra la geología en superficie de la zona de estudio, como se puede observar perteneciente al Tercer Tramo Productivo.

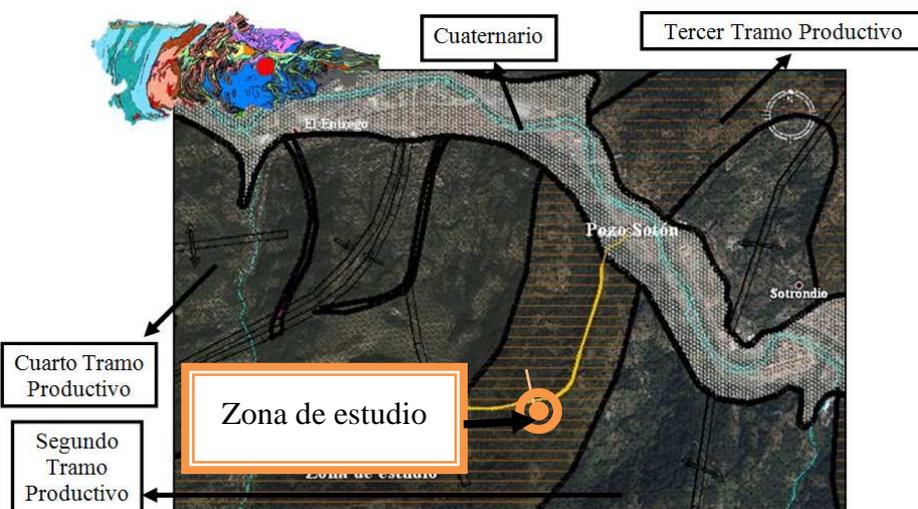
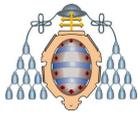


Figura 5.21.- Zona de estudio



5.2.2 Descripción del ensayo

Para llevar a cabo el ensayo de inyección de gas en una capa de carbón “in situ” se han usado dos sondeos realizados en la propia capa, en cada uno de los cuales se ha dispuesto una cánula de gas.

Una cánula de gas es un dispositivo diseñado por el Grupo de Ingeniería del Terreno que está formado básicamente por una tubería de cobre cuyo extremo inferior, que se situará en la capa de carbón, se encuentra ranurado y su extremo superior se conecta con un manómetro de forma que se pueda medir la presión de gas en la capa de carbón.

El espacio anular entre la cánula de gas y las paredes del sondeo es debidamente sellado para evitar que el gas salga por él.

En la Figura 5.22 se representa una cánula de gas instalada en la solera de un nivel de explotación.

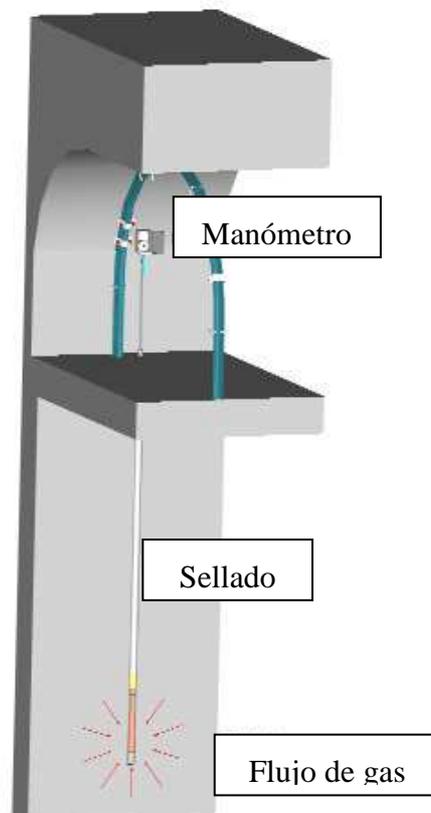
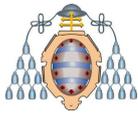


Figura 5.22.- Cánula de gas



Las cánulas de gas pueden ser empleadas para medir la presión del gas en la capa pero también para inyectar gas en la misma. Así se han usado dos cánulas de gas, realizándose la inyección por una de ellas y midiendo la presión en la otra. En la Figura 5.23 se esquematiza la situación de las cánulas de gas usadas en el ensayo en una vista en alzado.

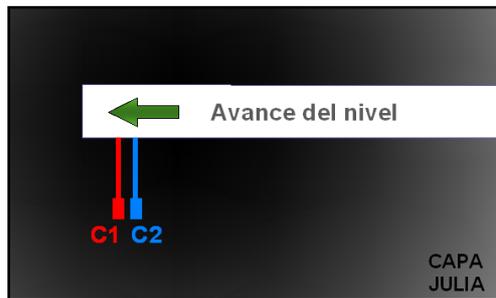


Figura 5.23.- Disposición de las cánulas de gas

A continuación, en la Tabla 5.3, se muestran sus características.

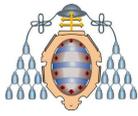
	C1	C2
Situación-Tarea	80-81	79
Longitud del sondeo (m)	10	4
Inclinación (°)	61	-
Profundidad (m)	4,5	3,0
Función	Inyección	Control

Tabla 5.3.- Parámetros de las cánulas de gas

Nótese que la cánula C1 está inclinada según el buzamiento de la capa mientras que la C2 es vertical.

5.2.3 Inyección y descarga de gas

Los ensayos “in situ” consistieron en la inyección de aire comprimido a una presión constante de 710 kPa y posterior descarga del gas por la cánula C1, observando los valores de presión en la cánula C2 durante todo el proceso.



La inyección de gas duró una hora y media. La distancia medida en la capa de carbón entre el punto de inyección y el punto de control era de 3 m. En la Figura 5.24 se muestra un esquema tridimensional del viaje que el gas hizo entre la cánula de inyección y la de control.

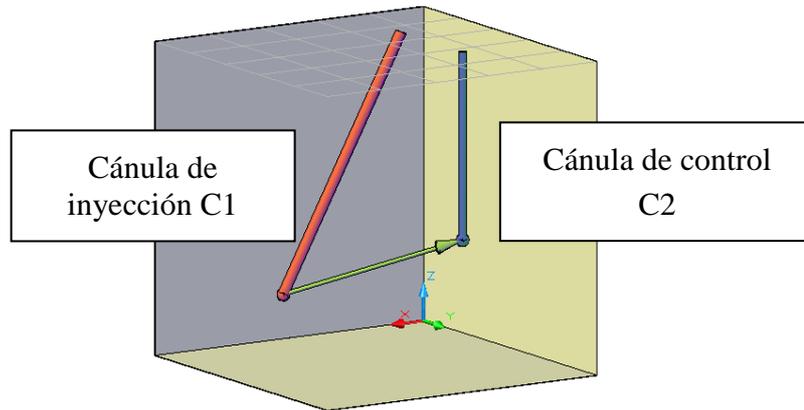


Figura 5.24.- Ensayo de inyección de gas "in situ"

Téngase en cuenta que cuando el carbón está comprimido, como disminuyen los huecos del carbón, el gas tarda en viajar entre los puntos de control porque no encuentra una vía por la que la circulación sea fácil y se ralentizan los procesos de almacenamiento del gas.

A continuación, en la Figura 5.25, se muestra la evolución de la presión en el sondeo C2, durante la inyección de gas en C1.

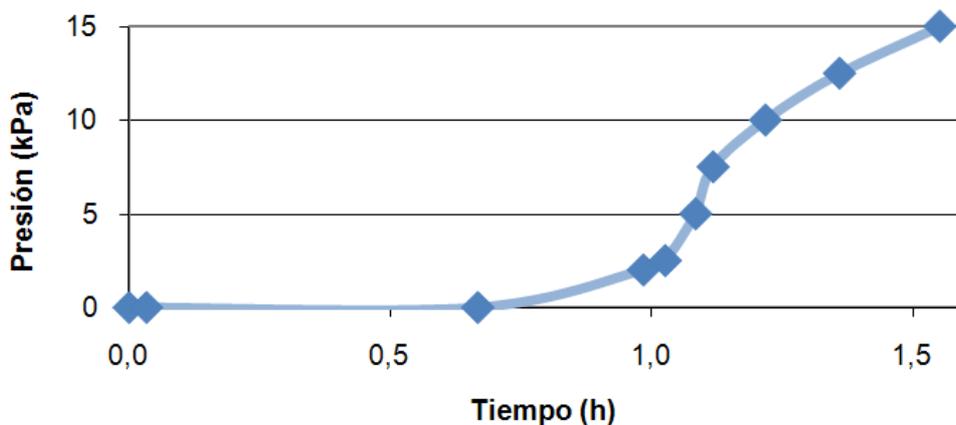
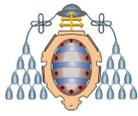


Figura 5.25.- Presión en la cánula de control durante la inyección de gas



Tal y como se puede observar, hasta aproximadamente las 0,7 h (40 minutos) de haber comenzado la carga de gas no se comienza a notar la presión en el punto de control, registrando el primer valor medible a la hora de comenzar el ensayo. Media hora más tarde la presión era de 15 kPa y con una tendencia ascendente. En este punto se concluye la inyección de gas.

Téngase en cuenta que el aire comprimido está constituido por un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y un 1% de otros gases. Por su alto contenido en nitrógeno éste gas no presentará demasiada adsorción por el carbón.

Del análisis de los ensayos realizados con el toma muestras en el laboratorio se pudo concluir que, en una matriz de carbón, el nitrógeno presenta mayores valores de permeabilidad que el CO₂.

Teniendo en cuenta la mayor permeabilidad del nitrógeno y su menor grado de adsorción por el carbón que el CO₂, bajo las mismas condiciones, cabría esperar una menor presión en la cánula C2 de inyectarse CO₂ en lugar de aire comprimido.

Una vez se ha finalizado la inyección de gas por la cánula C1 se abre su llave de paso, de forma que el gas del sondeo tiende salir de forma inmediata, disminuyendo la presión de forma exponencial tal y como se muestra en la Figura 5.26. La presión es nula tras 40 minutos de comenzar la descarga.

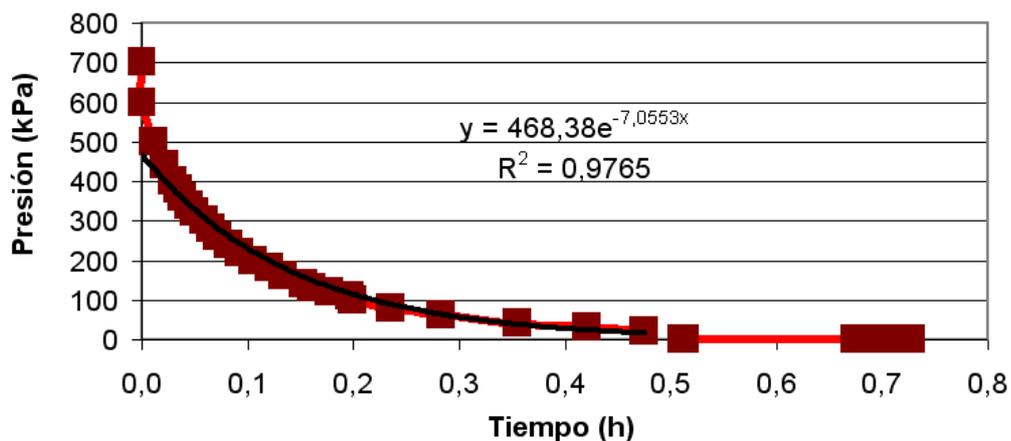
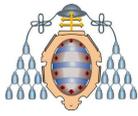


Figura 5.26.- Presión del sondeo de inyección después de cesar la inyección

Este descenso de presión que en C1 se aprecia de forma inmediata al finalizar la carga y comenzar la descarga, no se aprecia al mismo tiempo en C2. En este sondeo, tal



y como se muestra en la Figura 5.27, inicialmente la presión permanece constante en 15 kPa, comenzando a disminuir a los seis minutos tras haber comenzado la descarga en C1. A partir de este momento y durante 38 minutos, se produce un descenso más o menos lineal de la presión de gas en la cánula C2 hasta que se hace nula. Cuando no hay presión en ninguno de los dos sondeos se da por finalizado el ensayo.

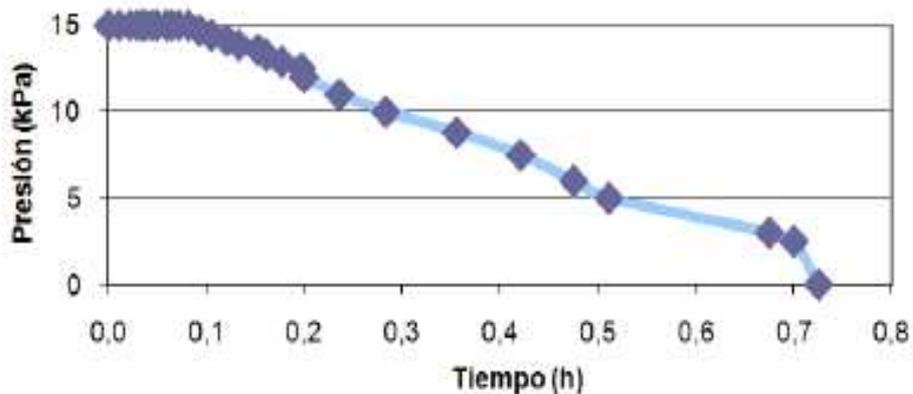


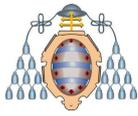
Figura 5.27.- Presión en la cánula de control después de cesar la inyección

5.2.4 Obtención de la permeabilidad en el ensayo “in situ”

Aunque el ensayo “in situ” realizado aporta gran cantidad de información relacionada con las características del carbón como medio poroso, no es posible extraer de forma directa de esta prueba el valor de la permeabilidad del carbón al fluido introducido, en este caso aire comprimido.

Por esta razón se ha creado un modelo numérico que simula el ensayo realizado en la realidad. A partir de dicho modelo se obtienen gráficas de carga y descarga de las cánulas como las obtenidas en el ensayo real. El que las gráficas del modelo se asemejen más o menos a las del ensayo “in situ” depende del valor de la permeabilidad introducido de partida en el modelo. Cuanto más se parezcan las gráficas reales y las modelizadas entre sí mejor será el ajuste entre la permeabilidad real y la definida en la simulación.

El modelo creado es bidimensional, y representa un corte transversal de los sondeos de inyección y de medida (cánulas C1 y C2 respectivamente), tal y como se muestra en la Figura 5.28. Una peculiaridad importante de este modelo es el modo en el



que ha sido calibrada la permeabilidad. Se sabe que la permeabilidad del carbón frente a un mismo gas varía sensiblemente en función de la presión de dicho gas.

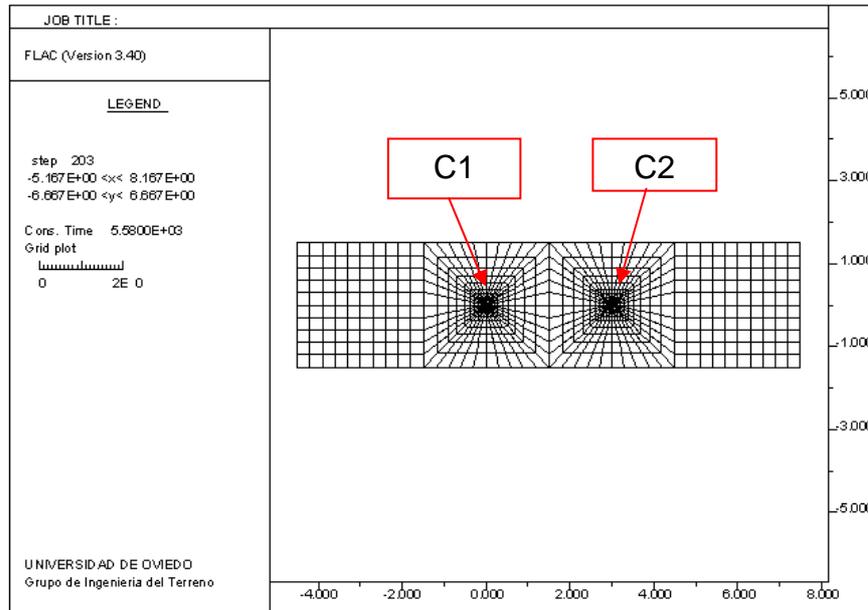


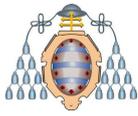
Figura 5.28.- Malla del modelo creado para simulación del ensayo “in situ”

Así pues, en la simulación de un ensayo “in situ”, esta cuestión debe ser tenida en cuenta, ya que la permeabilidad en la zona entre cánulas irá disminuyendo a medida que se vaya produciendo un aumento de presión en la cánula de medida.

Para calcular como va a ser esta variación, se parte de una constante α , que viene dada por el producto de la presión inicial de inyección (unos 700 kPa) y la permeabilidad inicial, que es el dato que se introduce en el modelo para ir realizando tanteos por comparación con el ensayo real.

El valor de la permeabilidad en cada zona del modelo viene entonces dado por el valor de α dividido entre la presión de gas que se haya alcanzado en esa zona concreta como consecuencia del flujo del gas a través del carbón. El proceso de simulación seguido consta de varias etapas:

- Inicialmente, puesto que los sondeos se encuentran abiertos desde hace tiempo, se considera que el entorno de la zona de ensayo se encuentra desgasificado, es decir, con presión atmosférica.



- En primer lugar se procede a inyectar en la cánula C1 (izquierda del modelo) una presión de aire de 700 kPa (véase Figura 5.29), que va fluyendo a lo largo del modelo. De esta forma se calibra la carga de la cánula C2, que debe alcanzar en un tiempo determinado una presión de 15 kPa.

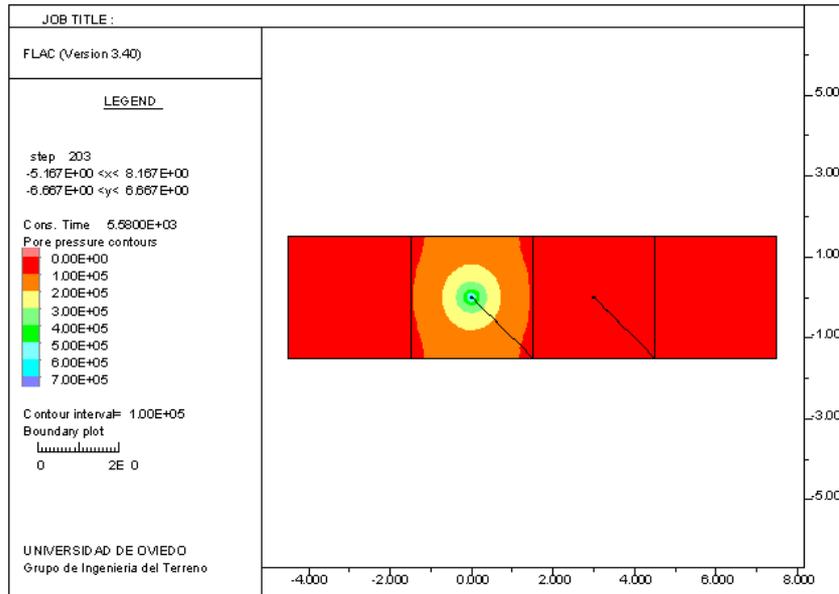


Figura 5.29.- Presión inicial en C1

- Llegados a ese punto, se procede a simular la descarga de la cánula C1, haciendo que las zonas del modelo que corresponden a dicha cánula se encuentren a presión atmosférica, es decir, “abriendo” la cánula, y posteriormente se calibra la descarga en la cánula C2.

Así pues se ha conseguido calibrar la variación de permeabilidad que se produce en el ensayo “in situ” a partir de las gráficas de carga y descarga de la cánula C2, recogidas en la Figura 5.30 y la Figura 5.31 respectivamente.

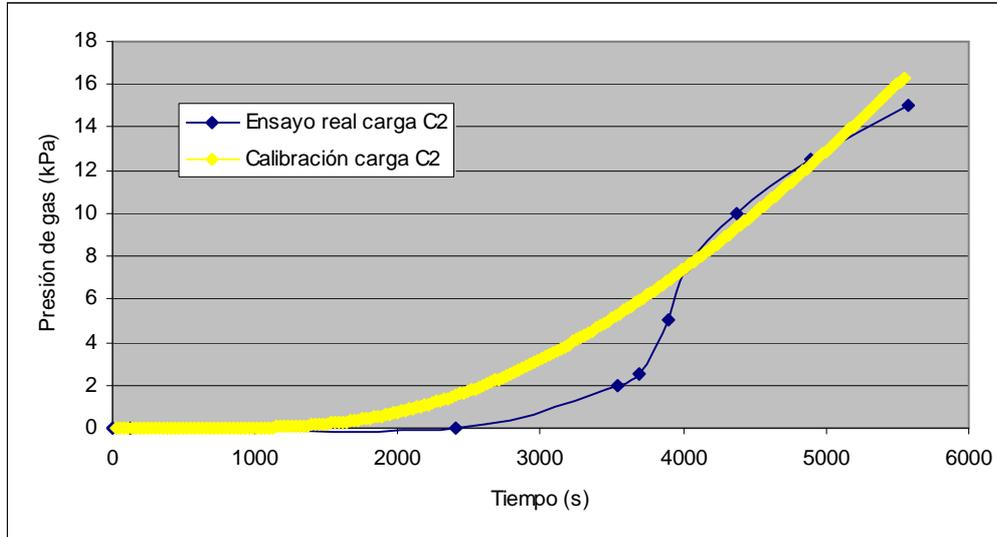
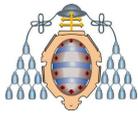


Figura 5.30.- Comparación carga C2 real y modelo

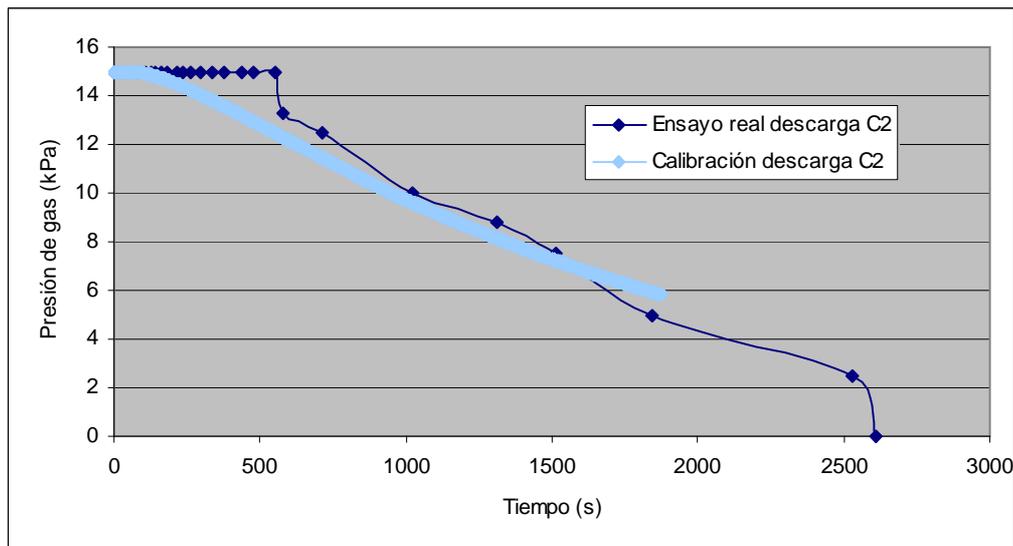


Figura 5.31.- Comparación descarga C2 real y modelo

Tras finalizar la carga y la descarga se ha extraído del modelo la permeabilidad y presión existente en cada zona entre ambas cánulas. De esta forma se cuenta con numerosos pares de presión-permeabilidad que permiten estudiar si existe una correlación clara entre ambos parámetros.

Los resultados de permeabilidad en función de la presión obtenidos a partir de la calibración anterior se muestran en la Figura 5.32, en la que se han representado tanto los datos extraídos de la carga como los de la descarga y la función de ajuste.

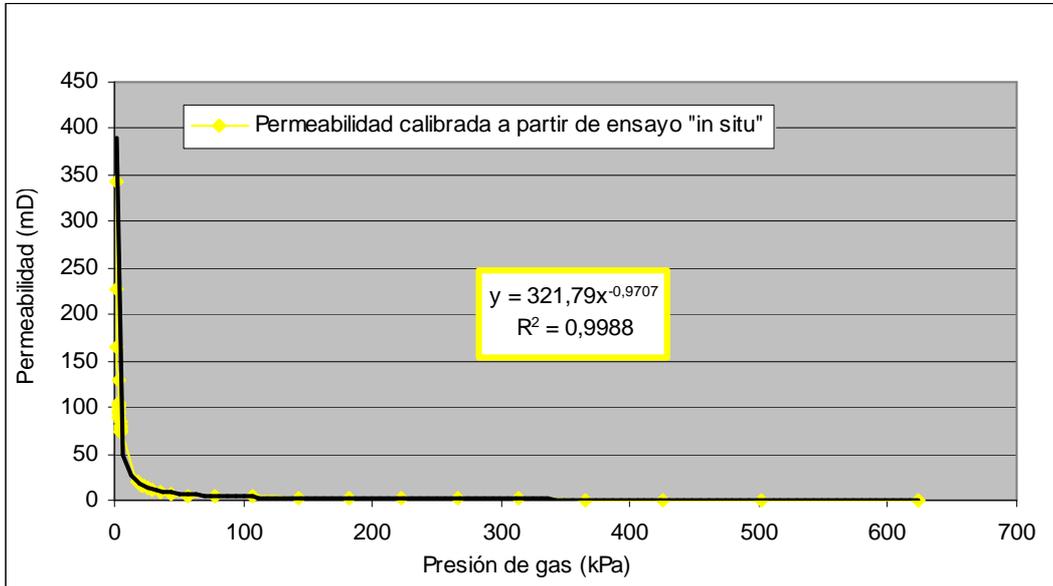
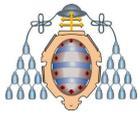


Figura 5.32.- Ecuación de ajuste de la relación permeabilidad calibrada-presión en el ensayo

En la Figura 5.33 se muestra la misma función de ajuste representada en escala logarítmica, para una mejor visualización.

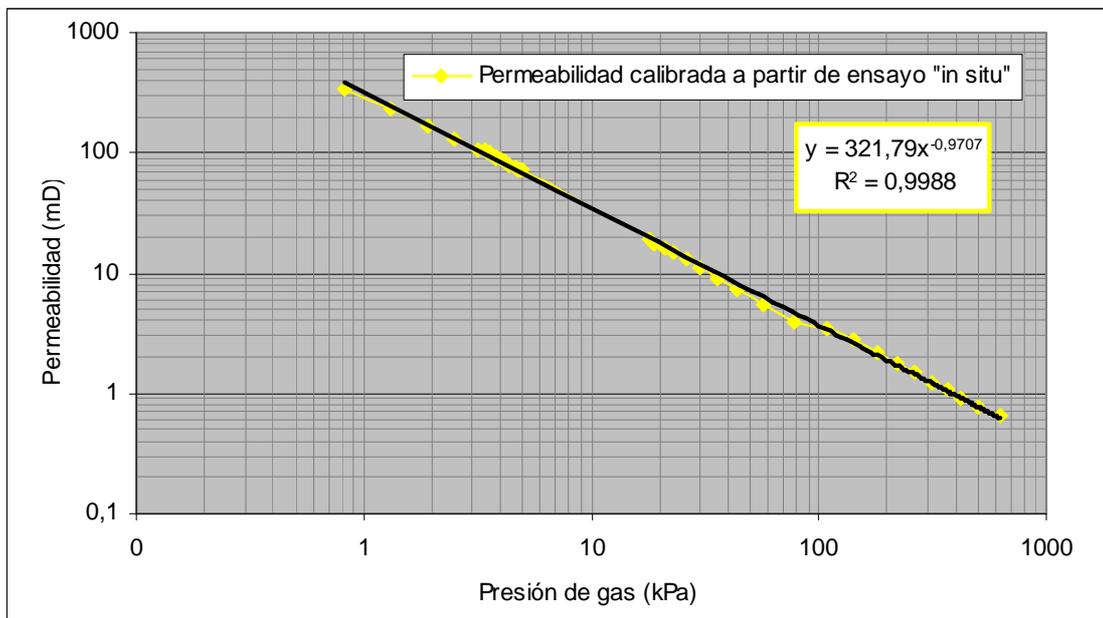
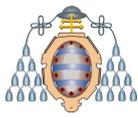


Figura 5.33.- Representación del ajuste de la curva presión de gas-permeabilidad en el ensayo



A la vista de los resultados indicados en las figuras anteriores, no cabe duda de que existe una clara relación entre la presión a la que se realiza la calibración y la permeabilidad obtenida, de manera que a menor presión mayor permeabilidad y viceversa. Además, no se trata de una relación lineal, sino de tipo potencial.

Esta calibración sigue por tanto la tendencia observada en los ensayos de laboratorio a pequeña escala, aunque los valores de permeabilidad para una misma presión de gas son menores en este ensayo realizado "in situ".

Para comprobar este punto se ha comparado esta curva presión-permeabilidad del ensayo en mina con aire comprimido con la obtenida para el gas N₂ (el más parecido al aire de los utilizados) con presión axial de 1 MPa. En la Figura 5.34 se pueden ver ambas curvas en escala logarítmica.

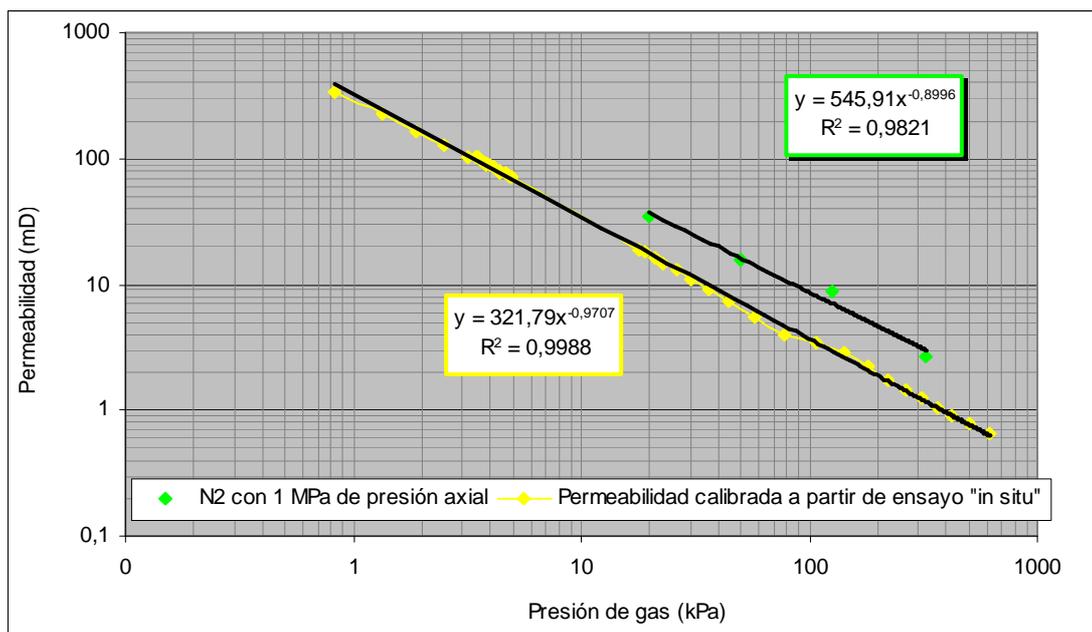
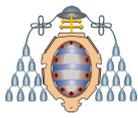


Figura 5.34.- Curva presión-permeabilidad (aire comprimido y N₂) con presión axial de 1 MPa

Observando ambas gráficas queda claro que la tendencia de la relación presión-permeabilidad en ambos casos es muy similar, puesto que las curvas son casi paralelas.

Sin embargo, aunque la tendencia es la misma la permeabilidad es mucho menor en el caso del ensayo en mina que en los de laboratorio con presión axial. Este fenómeno viene dado por el hecho de que el carbón ensayado en la mina se encuentra sometido a



una gran tensión de confinamiento (al menos mayor de 1 MPa), que hace que su porosidad y por extensión su permeabilidad disminuyan.

Si los datos se comparan ahora con los resultados del ensayo a gran escala en el que se perseguía la fracturación del carbón para aumentar su permeabilidad (véase el apartado 5.1), tal y como se muestra en la Figura 5.35, se puede apreciar que aunque la tendencia de las tres curvas es muy similar (son prácticamente paralelas entre sí), la permeabilidad del ensayo en mina es notablemente inferior a la registrada en los otros casos. La explicación de este fenómeno, como ya se comentó anteriormente, viene dada por el hecho de que en el ensayo “in situ” el carbón se encuentra sometido a una mayor presión de confinamiento, que hace que sus poros, especialmente los de mayor tamaño se encuentren parcialmente cerrados, dificultando el flujo de gas a través de la estructura del carbón. En este caso la comparativa con el ensayo “in situ” se debe considerar solo como orientativa, ya que se han considerado gases distintos (aire comprimido y CH₄).

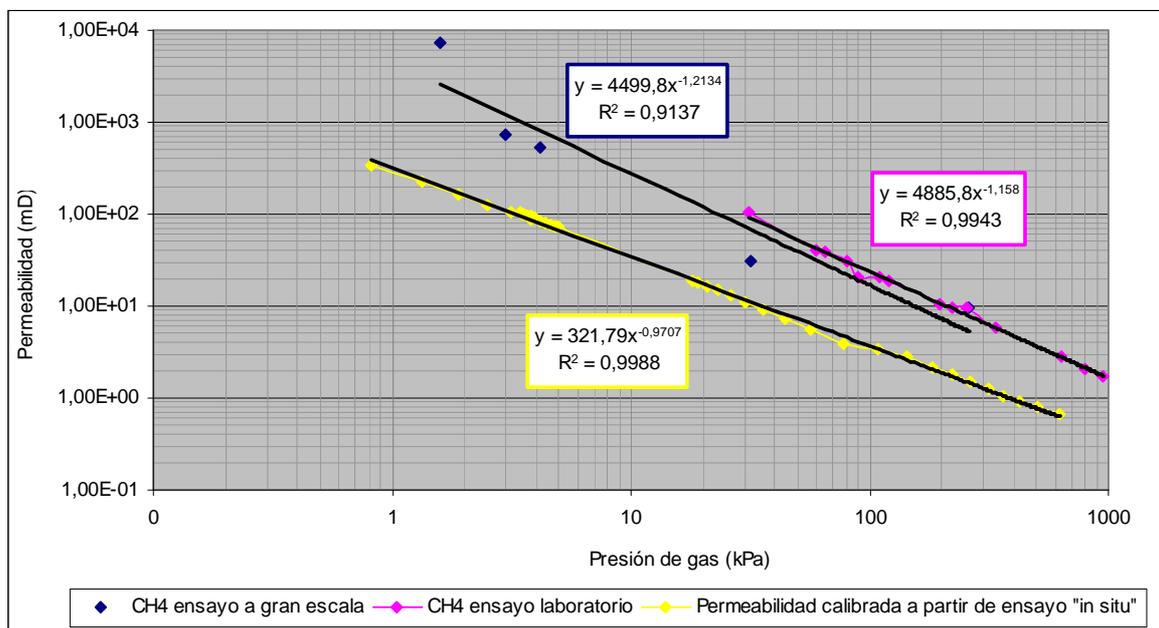
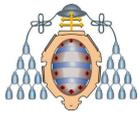


Figura 5.35.- Resultados de permeabilidad en ensayos a gran escala y laboratorio con CH₄



6 TRABAJOS REALIZADOS EN LA MINA

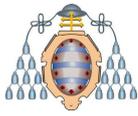
En este apartado se va a exponer el trabajo práctico experimental realizado en diversas explotaciones de la empresa HUNOSA sobre los fenómenos gasodinámicos, en el intervalo 2003 y 2008, así como las conclusiones obtenidas a partir de las siguientes fuentes de datos:

- Estudio de algunos FGD ocurridos durante los últimos años.
- Conjunto de datos de concentración y velocidad de desorción (V_1) registrados, especialmente desde el año 2003 en el que se estableció un régimen regular y más frecuente de toma de datos en las capas especialmente propensas a FGD.
- Resultados de las investigaciones realizadas en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Oviedo en la capa 8ª en los pozos San Nicolás y Montsacro y en la capa Julia del pozo Sotón.
- Investigaciones particulares llevadas a cabo por el departamento de Prevención de FGD, con la ayuda de los pozos donde se realizaron.

El desarrollo del trabajo se divide en tres apartados:

1. Comprensión del comportamiento de las dos fuentes principales de riesgo de FGD que son las tensiones del terreno y la presión de gas, así como la combinación de ambas.
2. Presentación de algunos ejemplos tanto de medidas de concentraciones y velocidades de desorción como de FGD y su explicación.
3. Descripción de algunos sistemas de prevención así como un breve resumen sobre su modo de actuar. La respuesta a algunos interrogantes que presentan los sistemas de prevención aún está pendiente, pero se exponen unas primeras ideas que ayudan a mejorar la prevención.

La dificultad de la prevención de los FGD se debe a la gran heterogeneidad del carbón y al gran número de variables que intervienen. Este gran número de variables ha hecho que tradicionalmente fueran considerados imprevisibles.



6.1 Modelo de comportamiento de las rocas

Antes de conocer cómo se altera el equilibrio al iniciar una explotación hay que ver cómo se comporta una roca cuando se somete a un estado tensional.

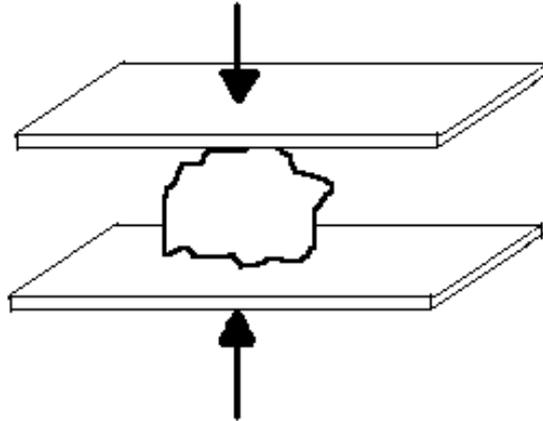


Figura 6.1.- Estado tensional

Si se somete a una roca a un esfuerzo de compresión simple con intensidad creciente se produce inicialmente una deformación elástica hasta que acaba rompiendo al alcanzar un límite de rotura.

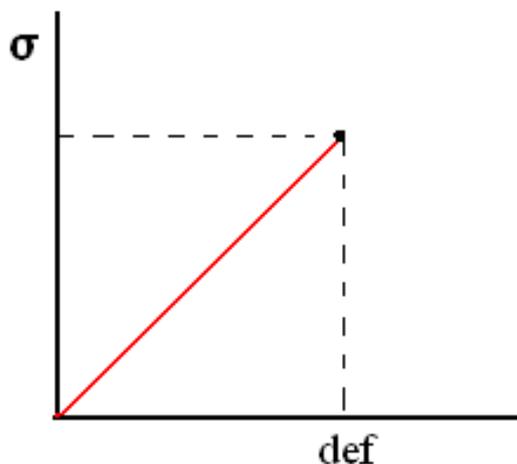


Figura 6.2.- Comportamiento elástico

Sin embargo las rocas en el terreno no están libres, están confinadas entre sus adyacentes. Esta situación se estudia en el ensayo de compresión triaxial que consiste en confinar la roca en dos direcciones y ejercer presión sobre la tercera:

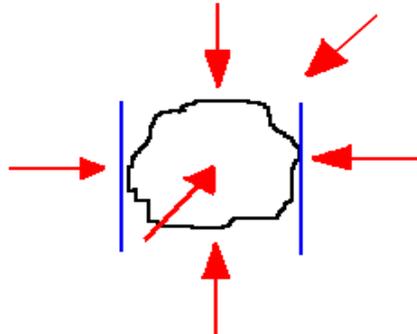
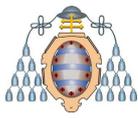


Figura 6.3.- Compresión triaxial

En este caso se observan dos hechos:

1. La roca aguanta mucho más antes de romperse.
2. Después de romper la roca se sigue deformando, según un comportamiento más o menos plástico y lo que es especialmente importante es que sigue resistiendo carga. Se dice entonces que el comportamiento es “elastoplástico”.

En la Figura 6.4 se pueden observar los resultados de tres ensayos triaxiales para el carbón de la capa Julia del Pozo Sotón, con distinto confinamiento en el que se observa perfectamente este tipo de comportamiento.

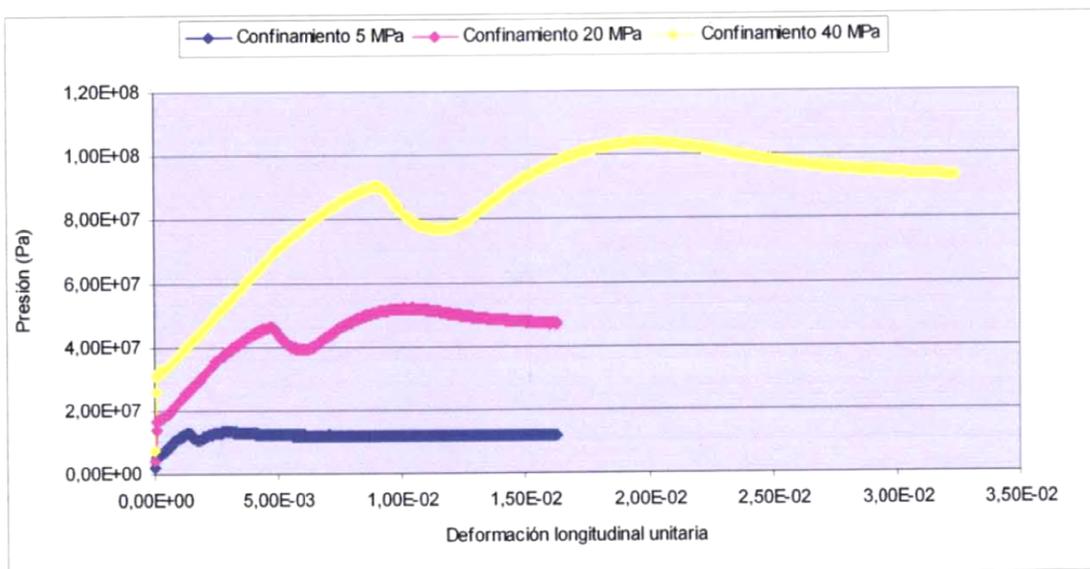
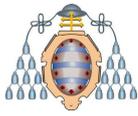


Figura 6.4.- Ensayos triaxiales con diferentes confinamientos



Para simplificar se puede asimilar a un comportamiento elastoplástico perfecto en el que hay una parte elástica con una relación lineal entre tensión y deformación, seguida de una parte plástica en la que la tensión se mantiene constante para cualquier deformación. La Figura 6.5 muestra un comportamiento elastoplástico perfecto.

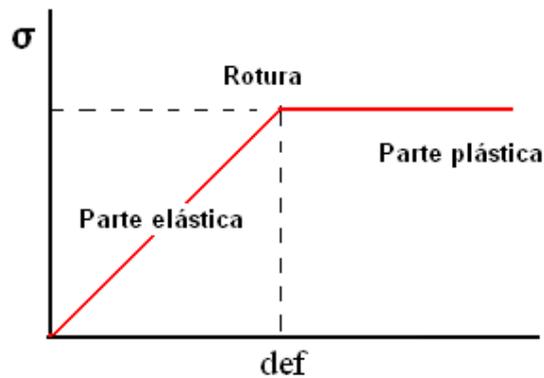
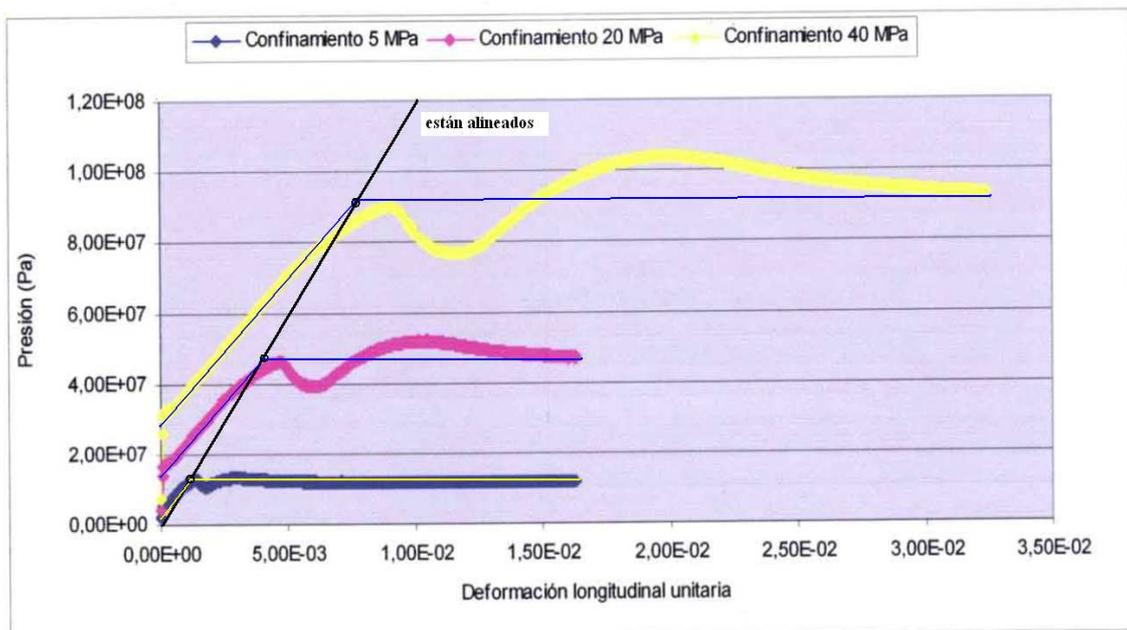


Figura 6.5.- Comportamiento elastoplástico

Superponiendo al ejemplo de la capa Julia se puede determinar los parámetros para su modelo elastoplástico.



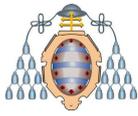


Figura 6.6.- Ensayos triaxiales con diferentes confinamientos, Capa Julia

Se observa que la inclinación de la parte elástica es paralela en los tres ensayos de confinamiento. Además, cuando el confinamiento aumenta, también aumenta la carga que resiste el carbón antes de romper, después de pasar al comportamiento plástico.

- Puntos clave para la tensión de confinamiento de 40 MPa.
 - Carga de rotura, inicio de la plasticidad 92,88 MPa
 - Carga de inicio de deformación: 29,77 MPa
 - Deformación de rotura, pérdida del comportamiento elástico $7,977 \times 10^{-3}$
 - Módulo de Young:

$$E = \frac{92,88 \times 10^6 - 29,77 \times 10^6}{7,977 \times 10^{-3}} = 8,16 \text{ GPa}$$

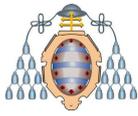
- Puntos clave para la tensión de confinamiento de 20 MPa.
 - Carga de rotura: 47,11 MPa
 - Considerando igual E, las líneas de comportamiento elástico son paralelas
 - Deformación de rotura $3,932 \times 10^{-3}$
 - Carga de inicio de deformación (a partir del E):

$$8,16 \text{ GPa} = \frac{47,11 \times 10^6 - X}{3,932 \times 10^{-3}} \Rightarrow X = 15,0 \text{ MPa}$$

- Puntos clave para la tensión de confinamiento de 5 MPa
 - Carga de rotura: 12 MPa
 - Deformación de rotura: $7,865 \times 10^{-4}$
 - Carga de inicio de deformación:

$$8,16 \text{ GPa} = \frac{12 \times 10^6 - X}{7,865 \times 10^{-4}} \Rightarrow X = 5,8 \text{ MPa}$$

A partir de estos valores se pueden sacar las siguientes relaciones:



- Recta de Mohr en tensiones principales

$$\sigma_y = 2,3096 \cdot \sigma_h + 0,6209 \quad [\text{MPa}] \quad K=2,3096$$

La recta de Mohr expresa el aguante elástico de la capa de carbón (carga de inicio de fluencia) en función del confinamiento. Si no hay confinamiento la carga de rotura sería 0,62 MPa, es decir, la resistencia a compresión simple.

- Recta de equilibrio, representa los estados tensionales tridimensionales de equilibrio previos al inicio de cualquier deformación. Serán los valores de corte de las curvas de los tres ensayos triaxiales con el eje de ordenadas (véase la Figura 6.5):

$$\sigma_{ye} = 0,75 \cdot \sigma_{he}$$

Esta recta representa el equilibrio inicial del carbón antes de llevar a cabo ningún trabajo en la mina, es decir, la relación inicial que hay entre las presiones perpendicular y paralela a la estratificación del mismo.

6.2 Estado tensional del terreno

En este apartado se verá cual es el estado tensional del terreno y se identificarán algunas causas que dan lugar a regiones sobretensionadas en las que los avances de guías pueden ser peligrosos. Se parte de una simplificación en la que se considera la roca compuesta por un conjunto de bloques ordenados de forma que antes de iniciar cualquier excavación cada bloque tiene un equilibrio entre las fuerzas verticales debidas al peso de la roca que tiene encima y las horizontales o de confinamiento debidas al apoyo sobre los bloques adyacentes, como un ensayo de compresión triaxial. Cuando se inicia una explotación el peso que soportaban los bloques eliminados no desaparece y por tanto debe distribuirse entre el resto de los bloques. Al mismo tiempo, los bloques adyacentes a los eliminados se desequilibran al desaparecer la fuerza de apoyo que ejercían los bloques eliminados, disminuyendo su capacidad de soportar carga. Se puede decir entonces que todo el entorno del hueco excavado se inestabiliza. La Figura 6.7 muestra como sería el equilibrio de fuerzas en el bloque antes y como quedaría el estado de fuerzas de un bloque situado en el hastial de una galería (desaparecería el confinamiento izquierdo y aumentaría la presión vertical).

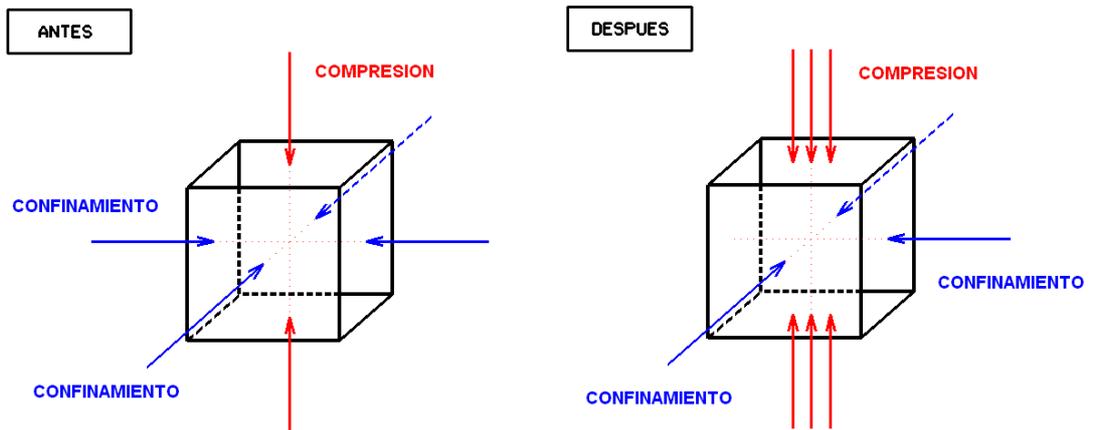
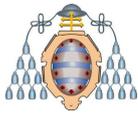
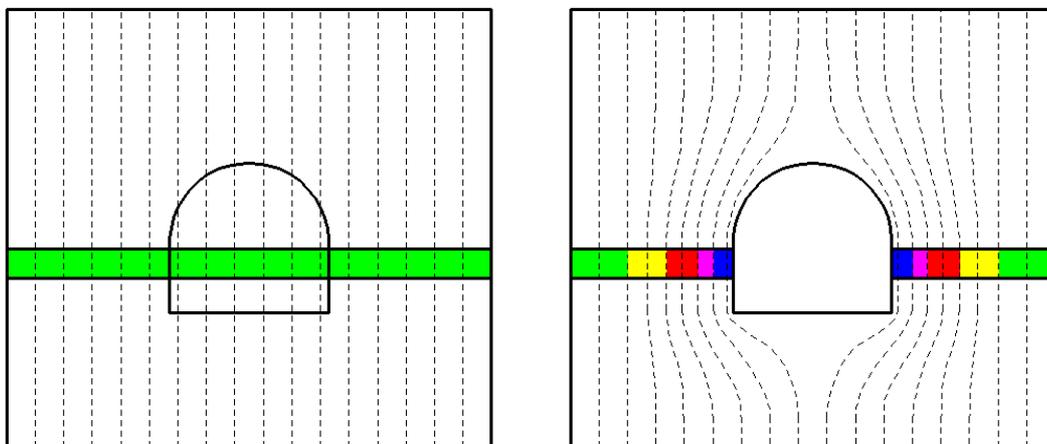


Figura 6.7.- Estado tensional sobre un elemento de roca

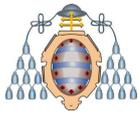
Para entender lo que ocurre al abrir el hueco se parte de una fila de los teóricos bloques que forman el macizo, en concreto (véase la Figura 6.8) la fila perpendicular y horizontal respecto al hastial de la galería. El gráfico de la izquierda muestra el equilibrio de tensiones antes de abrir el hueco y el de la derecha como queda inestabilizado justo después de abrir la galería. Los bloques azules son los más inestables pues ha desaparecido su confinamiento lateral y se ha multiplicado su carga vertical.



Tensiones antes de abrir hueco

Tensiones despues de abrir hueco

Figura 6.8.- Desequilibrio al abrir una galería



Si se mira con más detalle en uno de los hastiales de la galería.

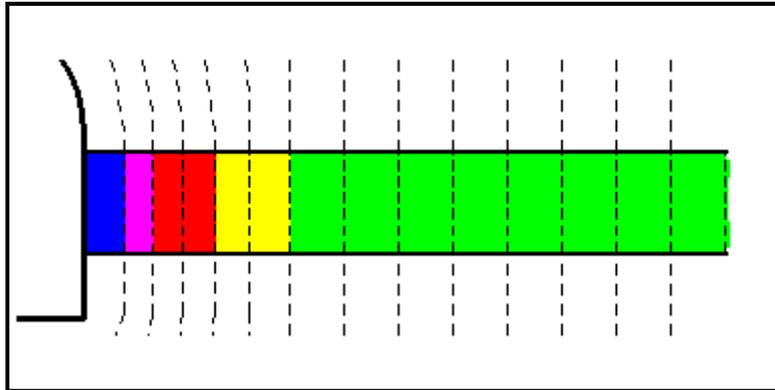


Figura 6.9.- Detalle de carga inicial en un hastial

Se puede ver que los elementos más tensionados son los inmediatamente contiguos al hueco generado. Pero no pueden soportar esta situación, ya que la tensión vertical se ha incrementado mientras que la horizontal se ha reducido a cero, por tanto el elemento se deforma. Al deformarse (elastoplásticamente) deja de soportar carga vertical, pero como ésta no cambia, ya que se debe al peso de la roca que hay encima, lo que hace es desplazarse hacia el elemento adyacente (Figura 6.10)

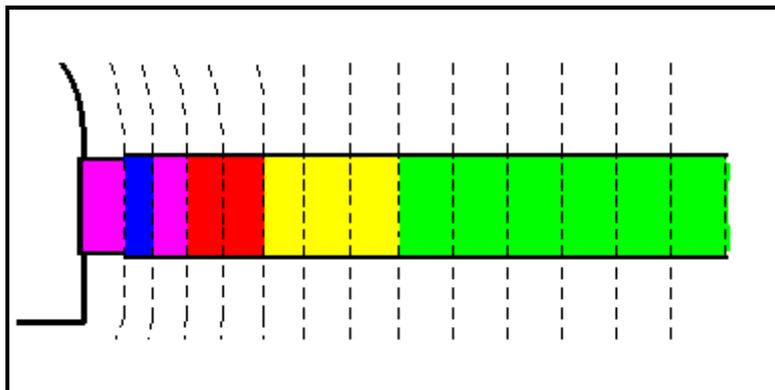


Figura 6.10.- Primera deformación tras abrir una galería

Este estado tensional puede no ser estable, es decir, el elemento de la superficie aún tiende a deformarse así como el inmediato, desplazando parte de la carga que soportan hacia los elementos más profundos. Este proceso continúa, como muestran las siguientes figuras.

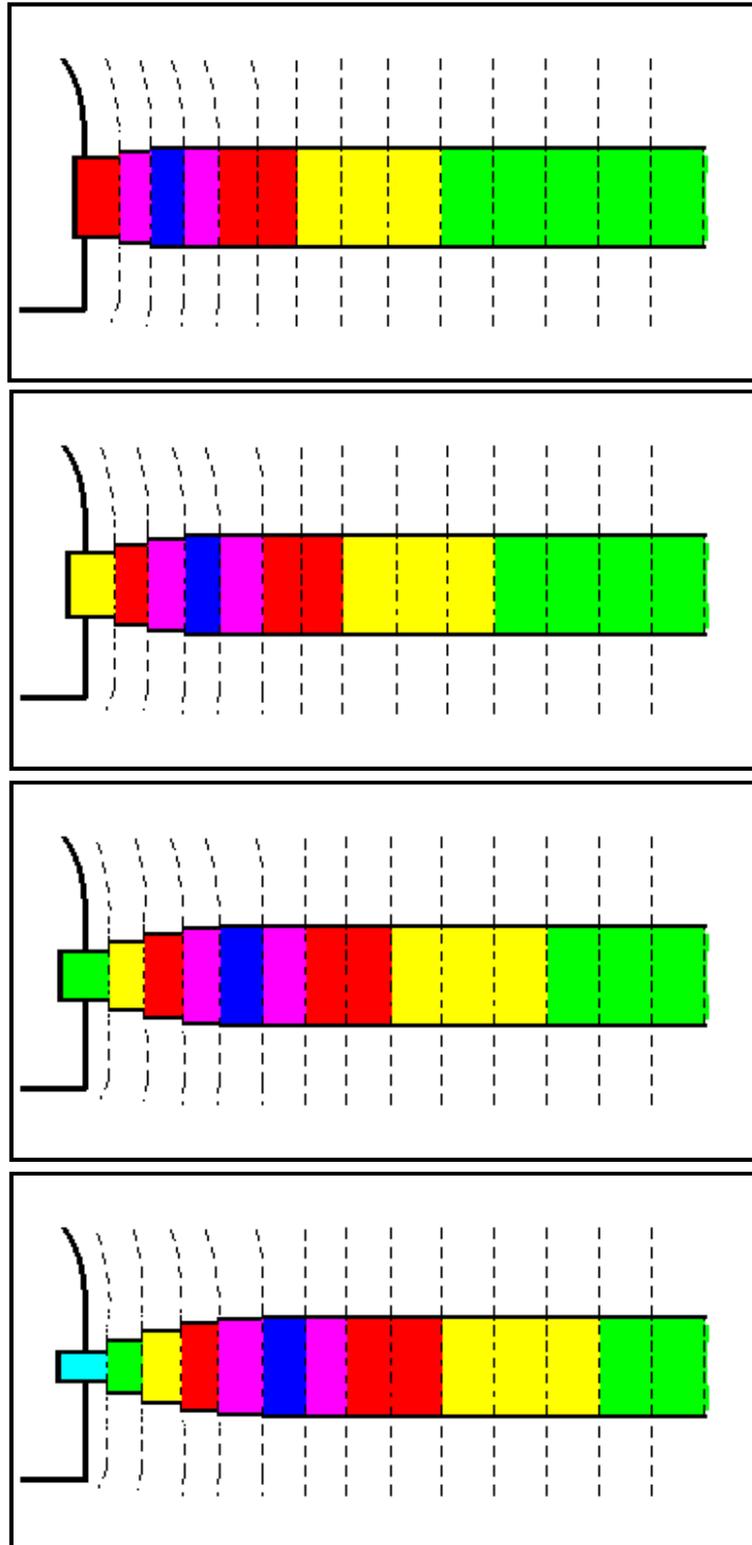
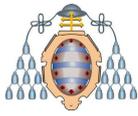
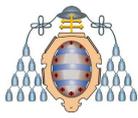


Figura 6.11.- Nuevo estado de equilibrio



En este último caso, el elemento del frente ya se encuentra menos tensionado que antes de abrir el hueco. El proceso puede finalizar de acuerdo con alguna de las situaciones siguientes:

- **Equilibrio estable con deformación elástica.** Este caso es el que se presenta en los túneles de carreteras sin sostenimiento. La deformación continúa hasta que todos los elementos alcanzan un equilibrio y la deformación se detiene. El máximo de sobretensiones suele estar cerca de la superficie libre ya que todos los elementos trabajan en comportamiento elástico. La roca es muy competente o la tensión es muy baja. El comportamiento sería el indicado en la Figura 6.2 (comportamiento elástico).
- **Equilibrio con deformación plástica.** La deformación también se detiene, pero requiere aplicar un sostenimiento que ayude a generar un primer esfuerzo horizontal de confinamiento desde el hueco, que ayude a cada elemento a soportar mayor esfuerzo vertical. Este caso se puede ver en los túneles profundos o bien en las galerías en estéril de las explotaciones en las que, incluso tras años de deformación, el sistema se estabiliza. La Figura 6.5, (comportamiento elastoplástico), muestra el comportamiento de las rocas que suelen requerir sostenimiento para alcanzar el equilibrio.

En la Figura 6.12 se muestra un ejemplo de cálculo para este tipo de equilibrio, con la tensión en sentido tangencial a la galería (denominada σ_1) calculada en una línea horizontal a la derecha de la galería y a media altura con un máximo a unos 2,5 m de la superficie libre. Antes de este valor la roca se ha plastificado (la línea azul muestra el grado de plastificación) y después todavía permanece trabajando con comportamiento elástico. La tensión en sentido radial (σ_3) es el confinamiento al que está sometido cada elemento. En la Figura 6.13 se muestra la distribución de los elementos plastificados (“yielded”). Se puede ver que esta distribución no es regular y se debe a que la propia heterogeneidad de la galería altera el régimen de tensiones dando zonas de rotura preferentes. Se completa la información con la Figura 6.14 y la Figura 6.15 en las que se muestran los valores calculados para las tensiones σ_1 y σ_3 en torno a la galería. Se trata de las tensiones tangenciales y radiales respecto a la geometría del hueco. La tangencial (σ_1) muestra el anillo de sobretensiones que se forma alrededor de la galería.

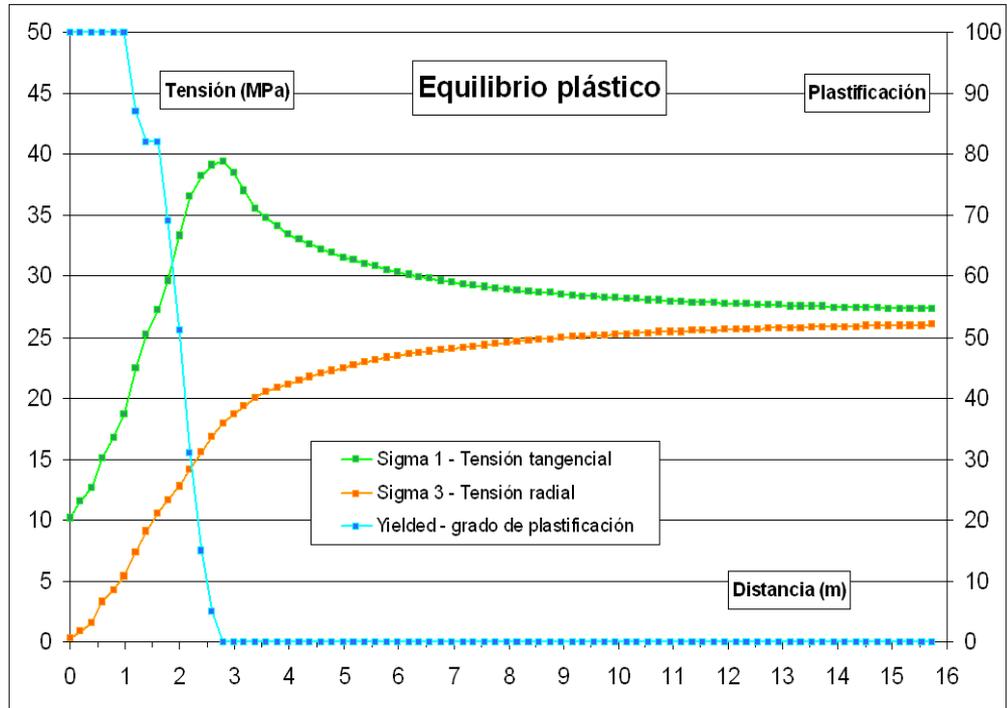
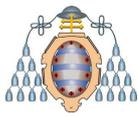


Figura 6.12.- Distribución de tensiones con la distancia a la galería

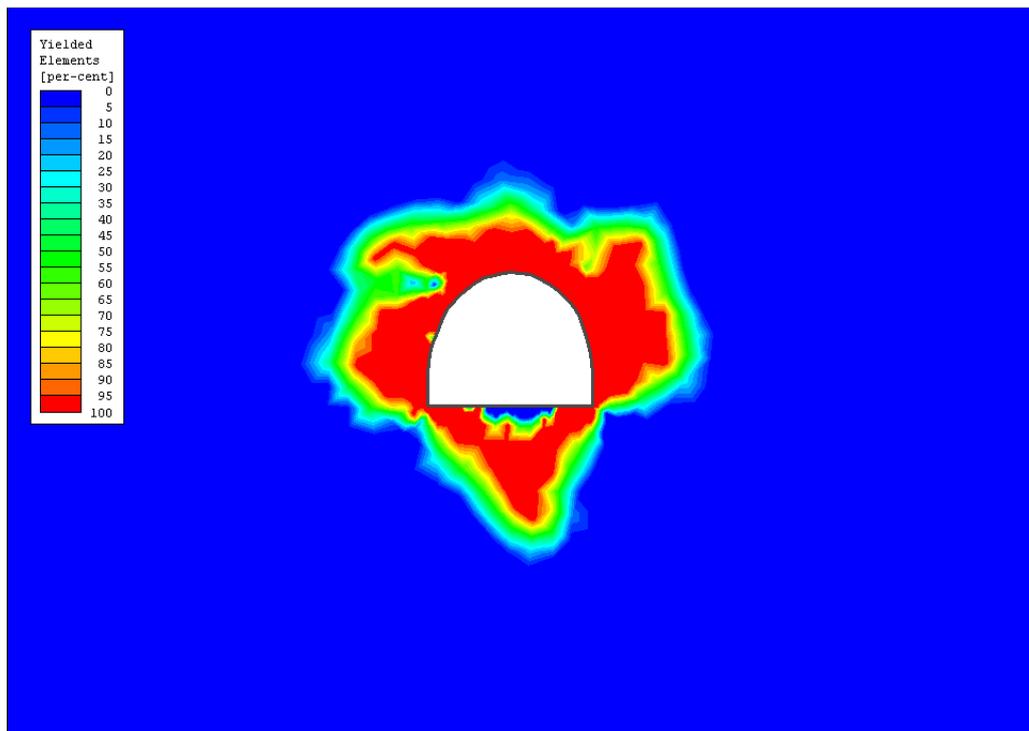


Figura 6.13.- Plastificación

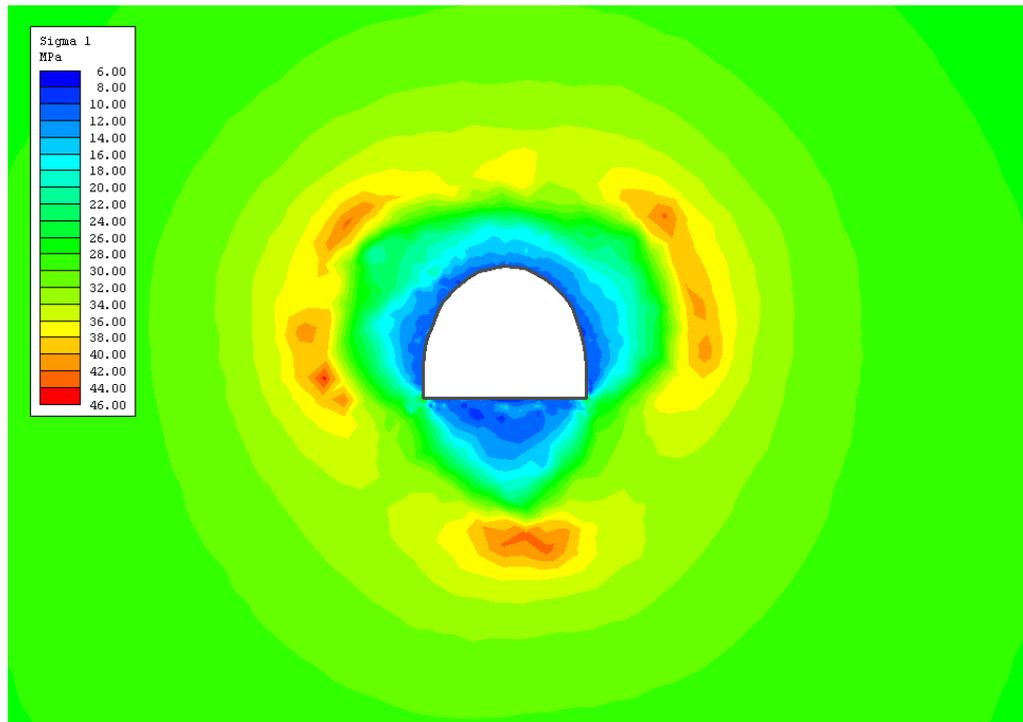
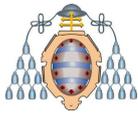


Figura 6.14.- Tensión en la dirección tangencial

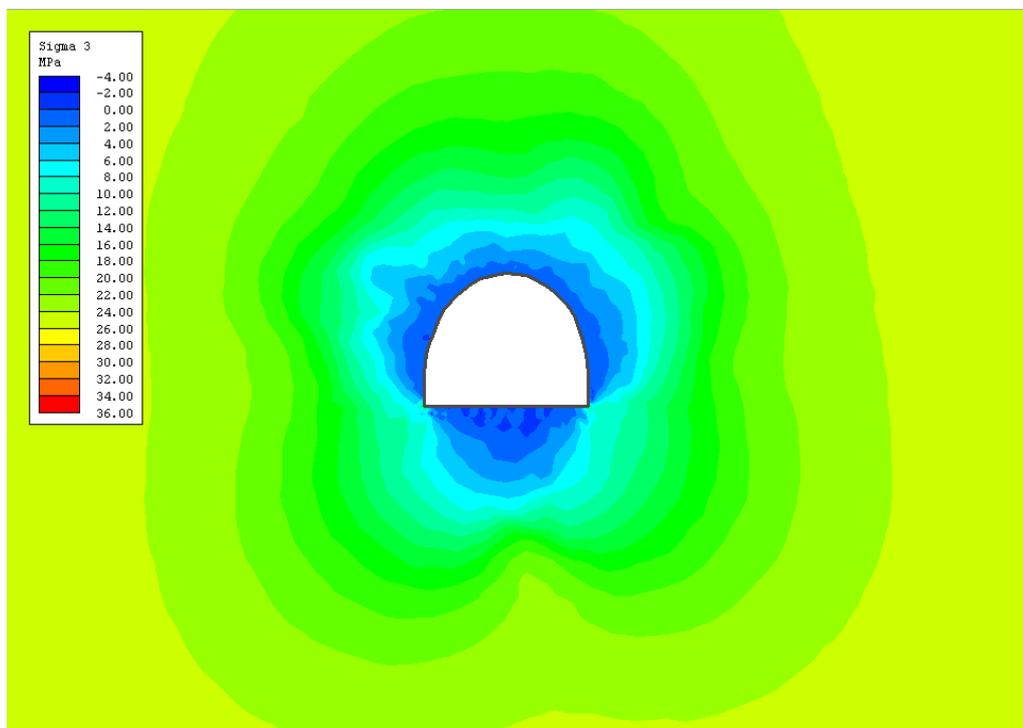
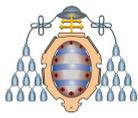


Figura 6.15.- Tensión en la dirección radial



- **No se alcanza el equilibrio.** En este caso la roca es muy poco competente y la deformación causa su rotura de forma que se anula totalmente su capacidad portante. La deformación continuaría indefinidamente hasta que la galería se autorrellenara y el hueco desapareciera. Esta situación se presenta en algunas guías en carbón, en las que el sostenimiento (cuadros metálicos de fricción) busca frenar dicha convergencia el tiempo suficiente para realizar la explotación de forma segura. El sostenimiento necesario para aguantar el equilibrio en este tipo de rocas sería muy fuerte.

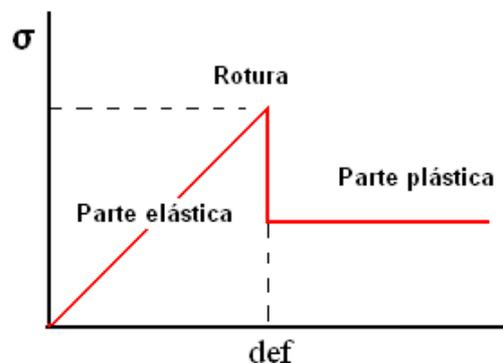
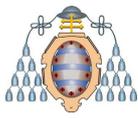


Figura 6.16.- Comportamiento elastoplástico con rotura

En cualquier caso la situación final se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Hay un gradiente de tensiones que parte de cero desde el frente libre hasta un máximo a una distancia, que dependerá del tipo de roca, para después disminuir hasta recuperar el valor natural (Figura 6.12).
2. En torno al hueco creado hay una zona plastificada rota (Figura 6.13).
3. Todos los elementos contribuyen al sostenimiento general aunque hayan sufrido una deformación plástica. La capacidad portante de un elemento aumenta con su confinamiento y cada elemento empuja a su adyacente. Los elementos superficiales, por poca tensión que soporten, hacen que el siguiente soporte un poco más y así sucesivamente.
4. El carbón suele ser más deformable que la roca y por tanto es el que sufre la mayor parte de las deformaciones. Los hastiales “estrujan” el carbón de forma que parte de él se expande hacia el frente de avance y se produce la



convergencia de éstos al mismo tiempo que el carbón interior queda confinado, lo que aumenta su capacidad portante. Esto hace que en la capa de carbón la presión máxima esté más cerca del frente que en el de la roca.

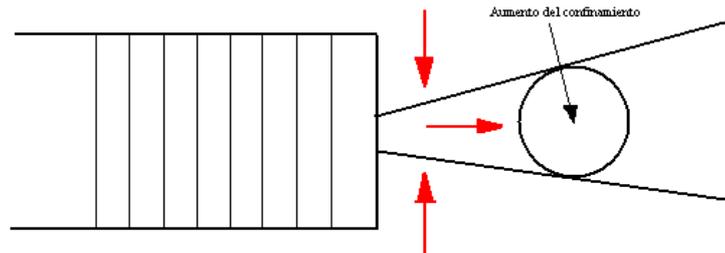


Figura 6.17.- Confinamiento del carbón por deformación de los hastiales

La siguiente imagen (Figura 6.18) muestra un cálculo numérico para dos capas de carbón próximas, donde se puede ver esta situación. Las flechas azules indican esos puntos en los que la presión que aguanta el carbón es mayor que la que aguanta la roca adyacente. Los valores representados son concretamente las presiones verticales, que en el caso de la capa serían las presiones de confinamiento. También se puede observar cómo, en torno a la zona explotada (en blanco), las tensiones se relajan (color verde) y como entre las dos capas hay una aumento de la presión, que es donde se concentran las tensiones que deja de soportar la capa explotada.

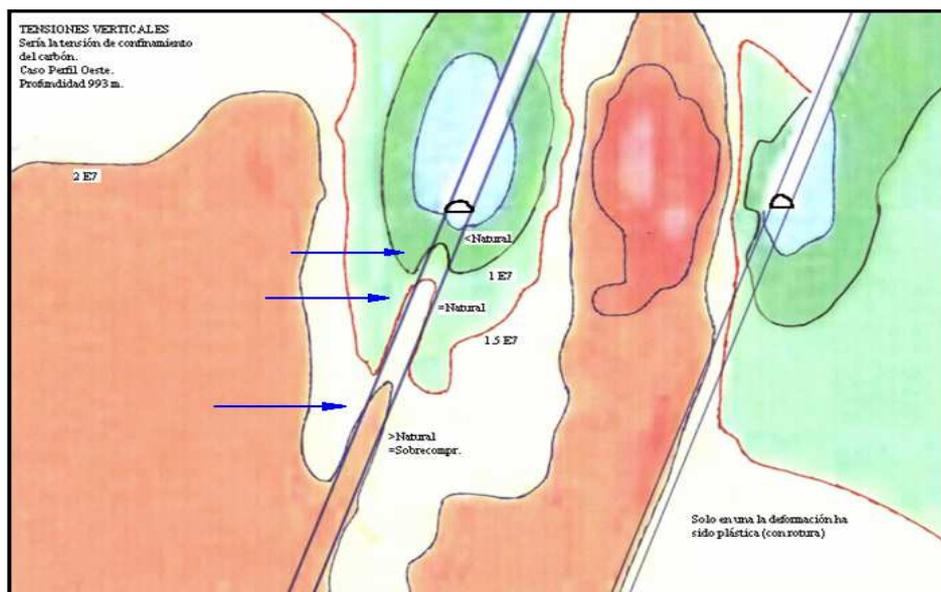
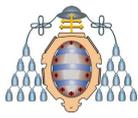


Figura 6.18.- Ejemplo de sobretensión en la capa de carbón



En las siguientes imágenes se ilustran varios ejemplos de este efecto. Así en la Figura 6.19 se muestra el cálculo de las tensiones horizontales para una guía de sección 2UA (9 m²). Los colores hacen referencia a dichos valores: los colores azules muestran la zona relajada, los colores amarillos muestran las zonas comprimidas que, como se observa, se centran en el carbón; mientras que los colores verdes son los cercanos a los valores naturales.

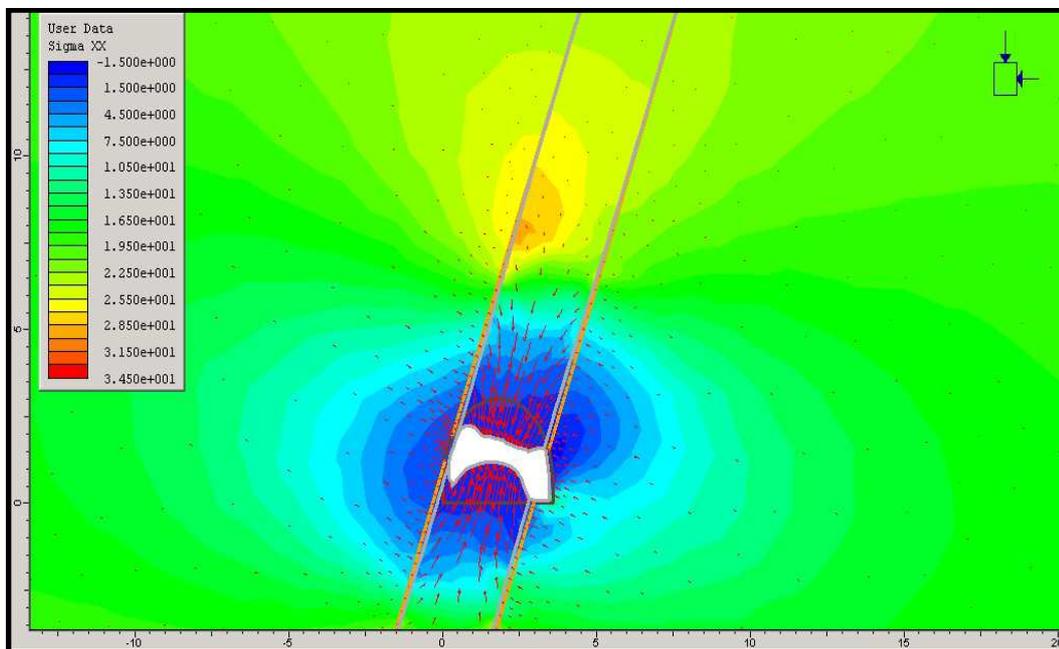


Figura 6.19.- Tensiones horizontales en una guía en 2UA

La línea gris muestra la deformada (en forma exagerada para percibir los detalles) tanto de la galería como de la capa de carbón. La galería se deforma tanto por la solera como por la corona (en este caso el cálculo se ha hecho sin incluir un sostenimiento). La interfase entre el carbón y el hastial se deforma especialmente cerca de la galería. La zona de concentración de tensiones se produce justo cuando la deformación de dicha interfase comienza a anularse (las flechas rojas indican los desplazamientos).

En la Figura 6.20 se muestran las zonas en las que los materiales han pasado a tener comportamiento plástico (en rojo) y los que siguen comportándose elásticamente (azul). También se puede ver que la zona de máxima sobretensión es donde se produce el cambio de comportamiento plástico a elástico.

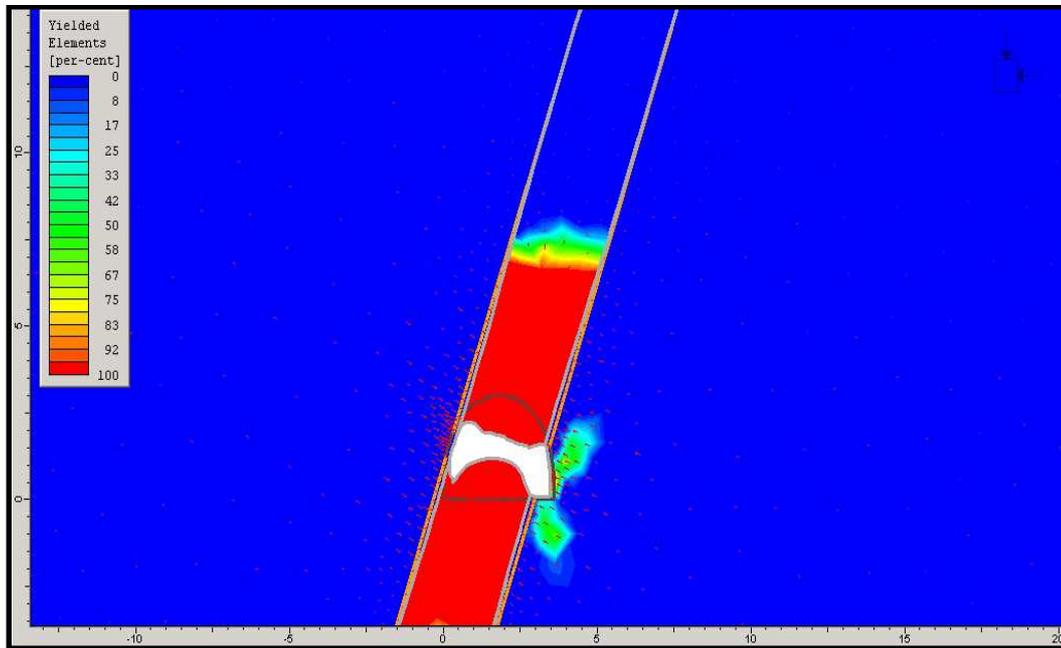
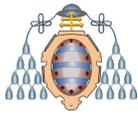


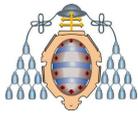
Figura 6.20.- Plastificación en torno a la galería

Cuando se hacen sondeos en capas problemáticas desde el punto de vista de los FGD, hay una cierta profundidad a partir de la cual se produce un gran incremento de la cantidad de *detrit* desprendidos. En unas capas esta distancia suele estar entre 3 y 6m, mientras que en otras está entre 5 y 9m. Una de las explicaciones es que el punto de incremento de *detrit* coincide con el punto en el que el carbón se encuentra trabajando elásticamente y que al acceder por medio de un sondeo se genera una capa libre que da lugar a una rotura acelerada.

6.2.1 Estados tensionales creados por labores de la propia capa

En el apartado anterior se ha descrito la distribución de tensiones que se genera en torno a una labor de preparación, sin embargo en la mina existen otras labores de explotación que también crean huecos y por tanto regiones sobretensionadas; puede ocurrir que en un avance se atravesase una de estas regiones alterándose su propio estado tensional.

Aquí surge la primera variable que influye en el riesgo de FGD, se trata de la carga de rotura de los hastiales. Entre las explotaciones de HUNOSA que se han analizado, aquellas que son propensas a FGD se caracterizan por tener los hastiales con mayor resistencia, así como por falsos techos y muros de escasa envergadura; con ellos



los huecos de sutirado no hunden ni rellenan completamente. En la Tabla 6.1 se observan los valores medios de la carga de rotura de los hastiales de algunas de las capas de carbón. Los valores entre paréntesis muestran el % de las mediciones que superaron el valor de 120 MPa

Capa	Techo inmediato	Techo profundo	Muro inmediato	Muro profundo
Julia	80,77 MPa (15,0%)	114,49 MPa (50,0%)	97,77 MPa (21,7%)	135,42 MPa (77,7%)
Rajola	59,98 MPa (0,0%)	159,47 MPa (100,0%)	52,50 MPa (10,5%)	178,01 MPa (75,0%)
1ª Generala	84,31 MPa (18,1%)	104,01 MPa (27,2%)	94,40 MPa (19,5%)	119,56 MPa (55,5%)
2ª Generala	62,96 MPa (13,3%)	150,17 MPa (50,0%)	71,23 MPa (16,1%)	69,20 MPa (12,0%)
María Luisa	129,92 MPa (36,3%)	138,35 MPa (40,0%)	75,87 MPa (21,4%)	71,36 MPa (0,0%)
C27(Figaredo)	100,70 MPa (25,0%)		73,96 MPa (15,0%)	
Capa 8ª	93,76 MPa (21,4%)	120,80 MPa (42,8%)	104,54 MPa (35,7%)	150,47 MPa (70,0%)
11(S. Nicolás)	87,55 MPa (20,0%)	65,69 MPa (0,0%)	66,69 MPa (12,5%)	118,80 MPa (60,0%)

Tabla 6.1.- Valores medios de la resistencia a compresión simple de los hastiales

La Figura 6.21 muestra de forma intuitiva el campo de tensiones generado por una capa con los hastiales muy competentes en una explotación por sutiraje. Las líneas representan las líneas de fuerza de las presiones horizontales.

Como se puede ver, el hueco creado permanece sin hundir, por lo que la carga que debería apoyarse sobre el carbón extraído se reparte sobre la parte superior e inferior de la explotación, generando sendas regiones de sobretensión. El avance no estaría a presión natural, en el caso del dibujo estaría a una sobretensión máxima (sección de galería dibujada en la parte inferior). Tanto la sobretensión máxima como su ubicación dependerían de las deformaciones relativas de la roca y del carbón.

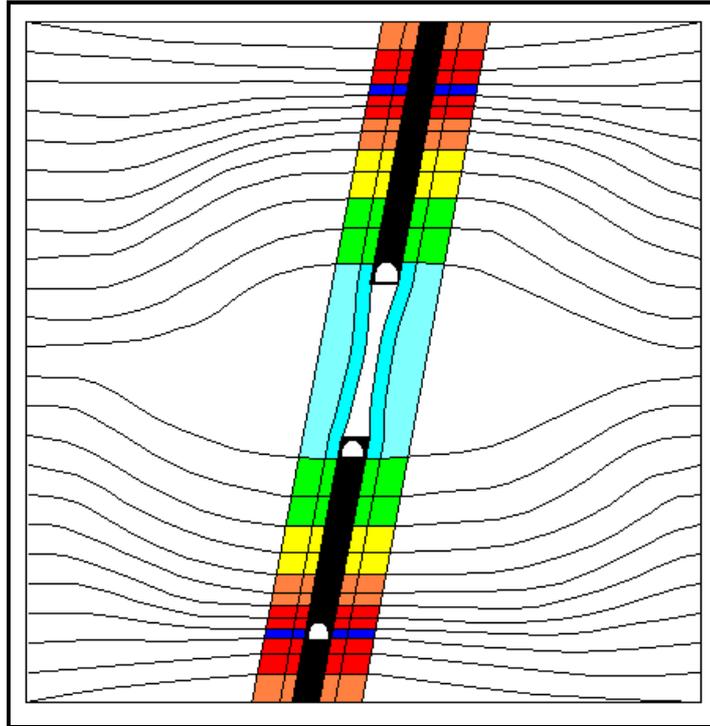
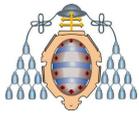


Figura 6.21.- Hastial competente

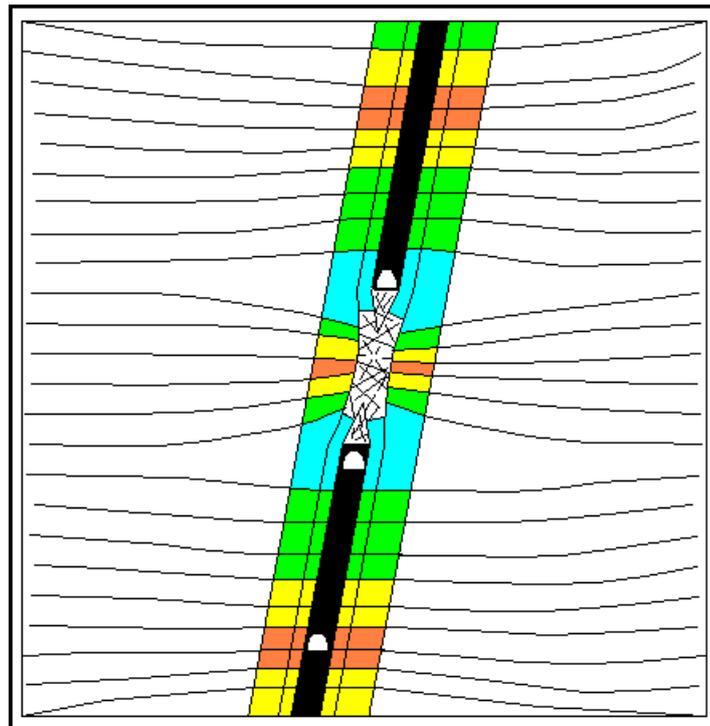
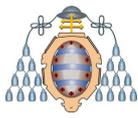


Figura 6.22.- Hastial débil



Si se analiza una explotación con los hastiales poco competentes (Figura 6.22) o con falsos techos que generan buen autorrelleno, tras extraer el carbón, la carga lateral encuentra un nuevo apoyo en el autorrelleno y las presiones se transmiten en menor cantidad hacia las partes superior e inferior de la explotación con lo que la sobrepresión a la que avanza nuestra nueva galería es menor. En las siguientes imágenes se muestran unos ejemplos calculados en los que se intenta comparar hastiales competentes con hastiales no competentes.

La Figura 6.23 y la Figura 6.24 representan la tensión principal mayor, que en torno a la capa tiene dirección perpendicular, calculada para dos explotaciones por sutirado con igual geometría (en blanco se representa el hueco creado) pero hastiales competentes en la primera y blandos en la segunda. La zona de mayor compresión se encuentra más alejada en el ejemplo de hastiales débiles (Figura 6.24).

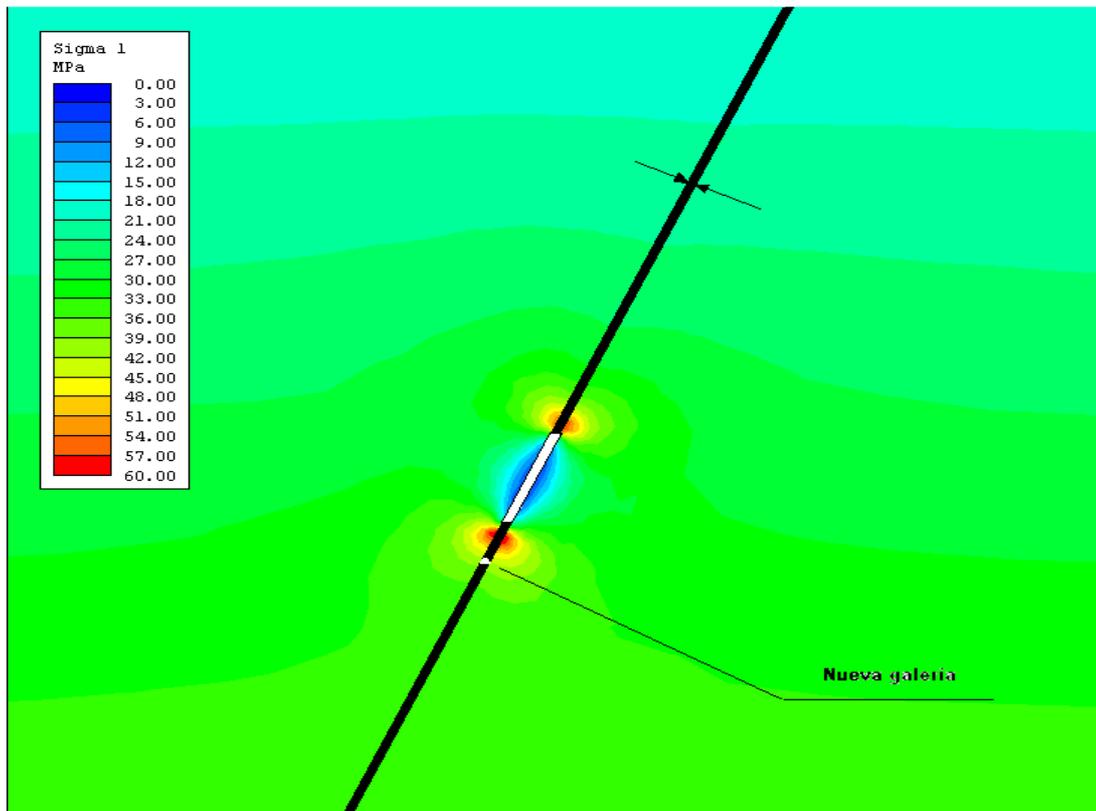
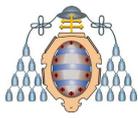


Figura 6.23.- Tensión principal en el caso de una capa con hastiales competentes.



Las zonas azules son las menos presionadas (en la superficie y en las proximidades del hueco) y las zonas amarillas y rojas son las zonas de concentración de tensiones. Las flechas indican la dirección de la tensión. También se indica donde podría avanzarse una nueva galería.

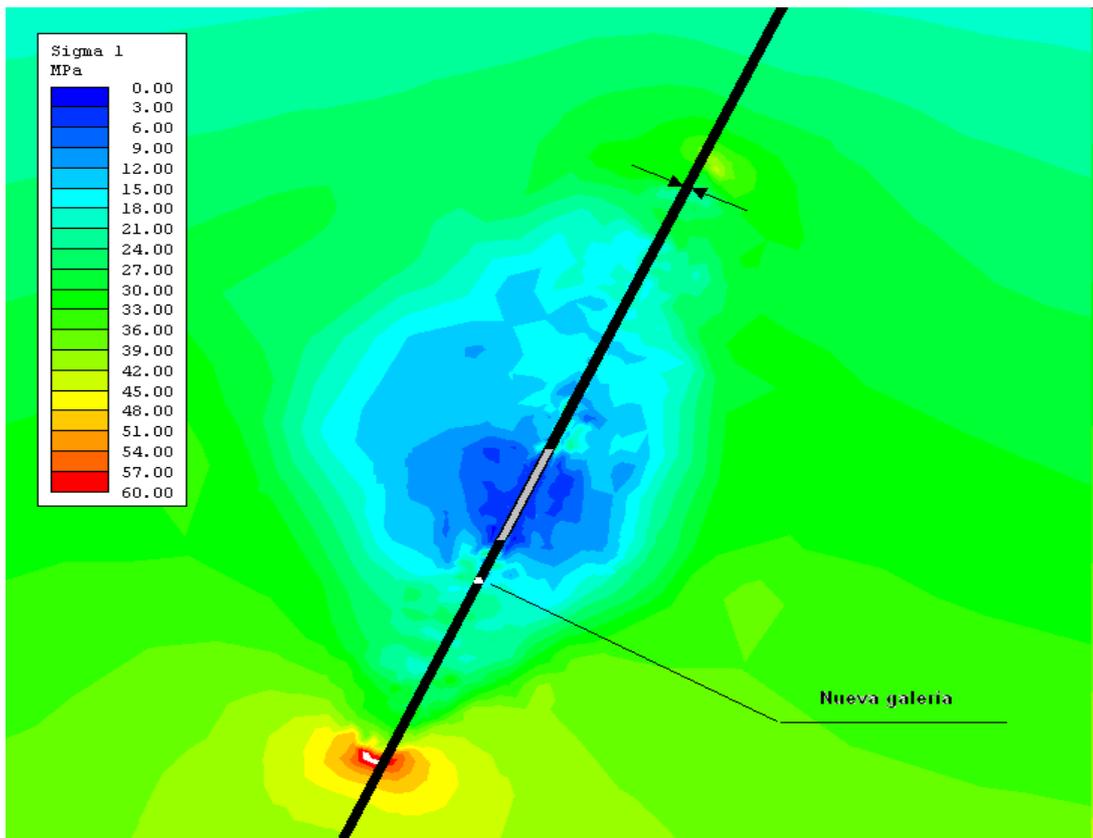


Figura 6.24.- Tensión principal en el caso de una capa con hastiales débiles

El hundimiento se recarga a una presión muy pequeña de 1,6 MPa pero ya es suficiente para que la zona de máxima sobrepresión se aleje de 5 a 172 m y baje de 75 MPa a 60 MPa.

En la Figura 6.25 se representan los valores de estas tensiones sobre una línea media de la capa de carbón descendente desde la solera del hueco creado. También se puede ver que, en el ejemplo de hastiales competentes, no se genera una zona plastificada mientras que en el caso de hastiales débiles dicha zona se extiende hasta unos 170 m (línea azul). Finalmente la línea verde muestra la cota a la que se avanzaría el siguiente nivel si la altura de llave fuera de 30 m. En este caso se observa que el nivel



avanzaría con una diferencia de casi 15 MPa entre los dos ejemplos. Si se compara con la presión natural, que corresponde a la tendencia asintótica de las líneas de presión, se puede ver que en el caso de hastiales competentes el siguiente nivel avanzaría en sobrepresión, mientras que en el caso de hastiales débiles el avance se realizaría a menos presión de la natural, es decir, descomprimido.

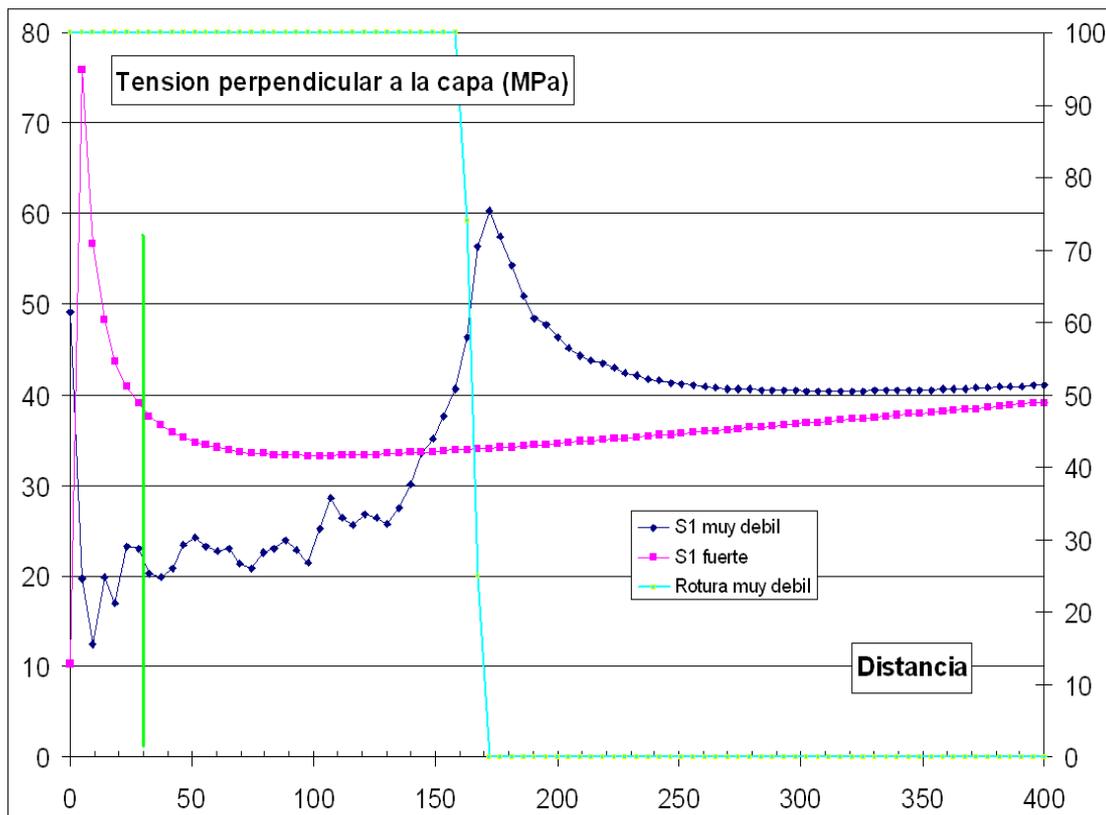
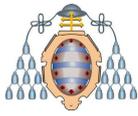


Figura 6.25.- Tensión perpendicular a la capa en profundidad

6.2.2 Estados tensionales creados por labores de otra capa

En el caso representado en la Figura 6.26 los huecos son creados en otra capa. Como siempre cada hueco creado origina zonas de sobretensión que se proyectan en el espacio y que por tanto pueden afectar a otra capa que se encuentre dentro de la región de sobretensiones. Pero en este dibujo también se observa que las explotaciones no solamente generan zonas de sobretensión, sino también zonas distendidas, que se corresponden a las áreas en las que se ha abierto el hueco (en azul) y que de la misma



forma también pueden afectar a las demás capas. Es el efecto de la que se denomina capa égida, que se puede utilizar como medida preventiva frente a los FGD.

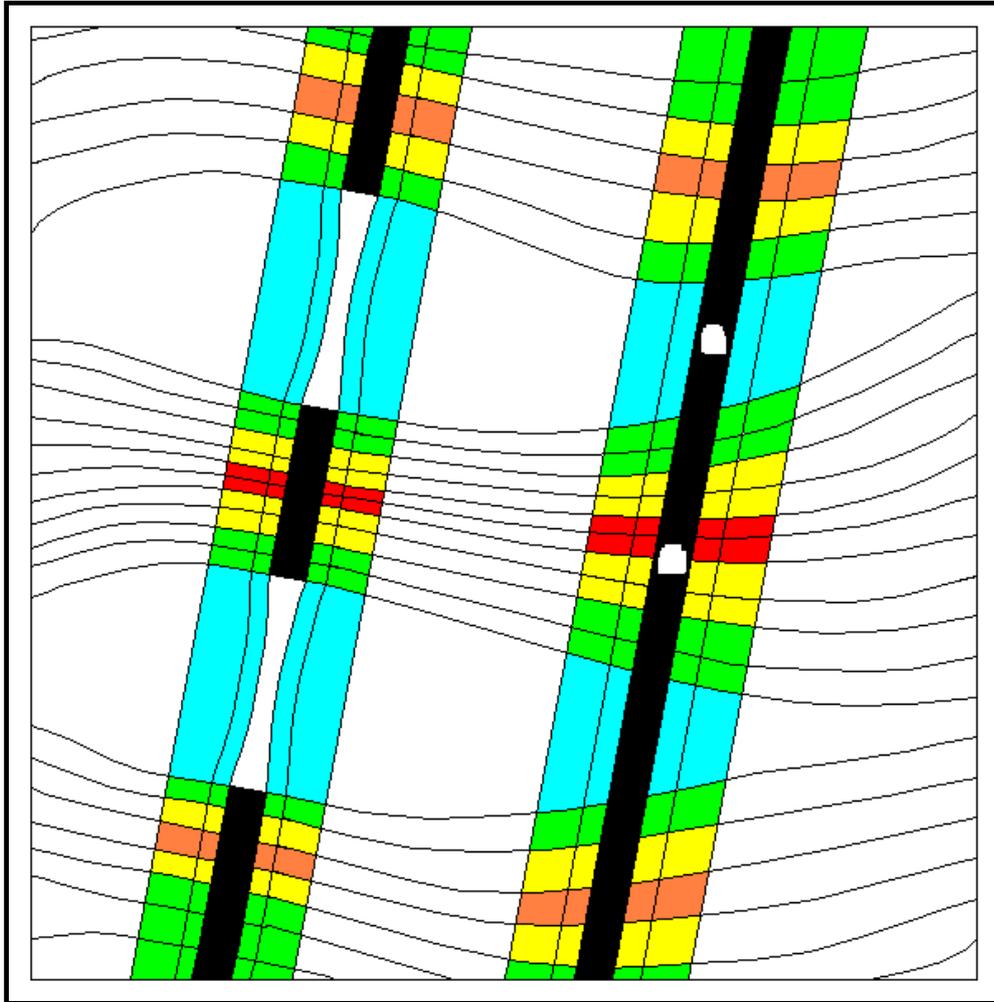
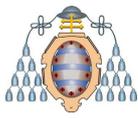


Figura 6.26.- Estados tensionales creados por otras capas

En la Figura 6.27 se muestran las tensiones horizontales para un ejemplo, también calculado mediante el programa PHASES; en él se identifican las distintas zonas sobretensionadas y distensionadas que se producen por efecto de la explotación de una capa adyacente. En negro se muestra la parte no explotada de ambas capas y en blanco la explotada. Se identifican cuatro posibles zonas para realizar un avance en la capa de muro.

- Zona 1. Corresponde a una zona distensionada producida por un sutirado de varios niveles consecutivos. La distensión incluye de lleno la segunda capa (en



azul). A la altura indicada por la línea la presión natural horizontal correspondiente es de 22,3 MPa y a la que queda la capa es de 0,1 MPa.

- Zona 2. Corresponde a una zona de sombra de un macizo sin explotar en la capa égida, en este caso se produce a su alrededor una zona de sobrepresión que eleva la tensión horizontal a la que se realizaría el avance de 26,2 MPa a 29,6 MPa.
- Zona 3. Corresponde a otra zona distensionada, dado que en este caso la altura explotada es menor, su amplitud también es menor y la presión baja de 27,4 MPa a 10,0 MPa.
- Zona 4. Está por debajo de cualquier explotación, concentra toda la carga liberada por los huecos superiores. La sobrepresión ha aumentado de 30,2 MPa a 62,0 MPa (la más elevada). Cualquier labor que se realizase en esta zona tendría el mayor riesgo.

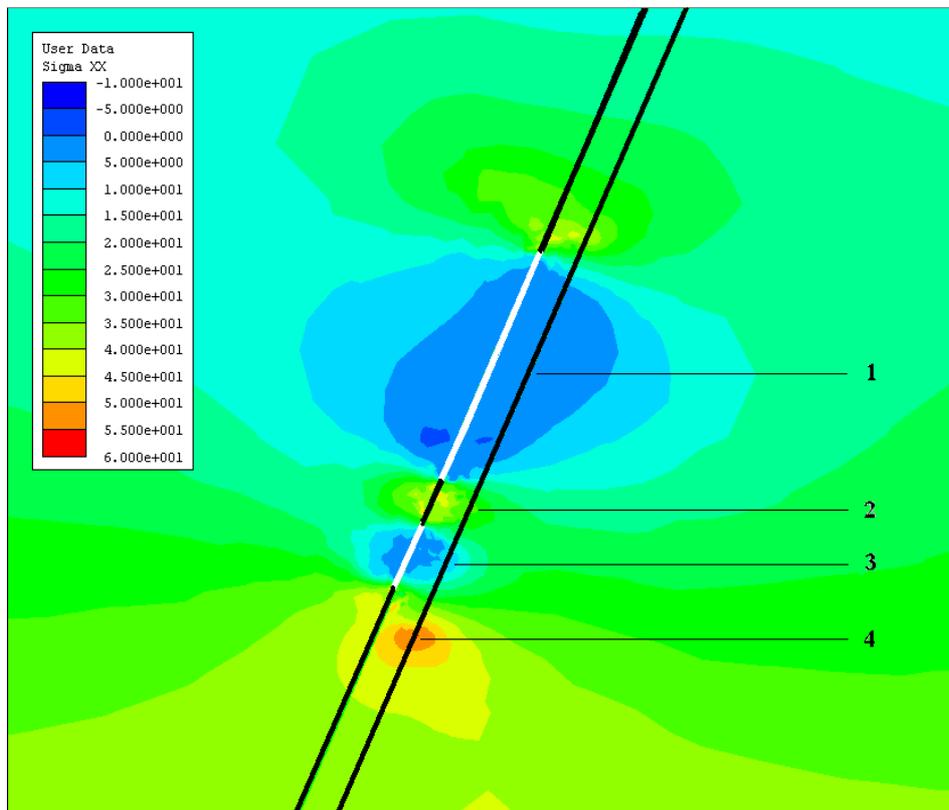


Figura 6.27.- Ejemplo para capa égida y macizo residual



6.2.3 Estados tensionales dinámicos

Las distintas fuentes de sobretensión vistas hasta ahora tienen en común su carácter estático, sin embargo, en una explotación cualquiera, las sobretensiones cambian constantemente debido a la creación continua de hueco y a su hundimiento bien irregular o periódico. En las siguientes imágenes se puede observar, de forma intuitiva, como una explotación puede generar ondas de sobrepresión variables tanto en intensidad como en extensión.

- Fase 1: situación de partida, el panel está aun sin explotar. Las tensiones son naturales y constantes (solamente dependen de la profundidad).

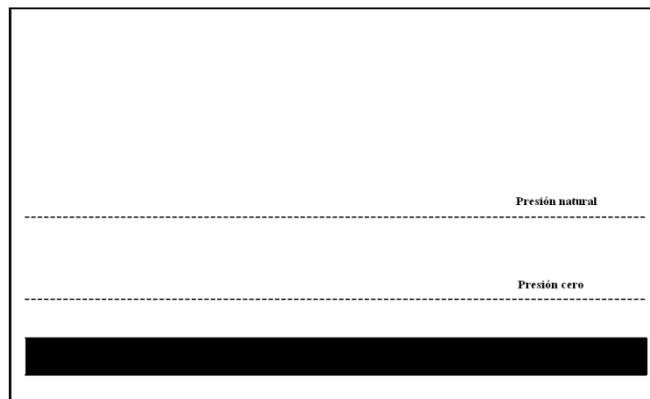


Figura 6.28.- Capa sin explotar

- Fase 2: se inicia la explotación. El hueco inicial no hundirá hasta que su amplitud sea suficientemente grande para que los hastiales no resistan el esfuerzo flector. Desde el primer instante comienzan a generarse zonas sobretensionadas alrededor del hueco abierto.

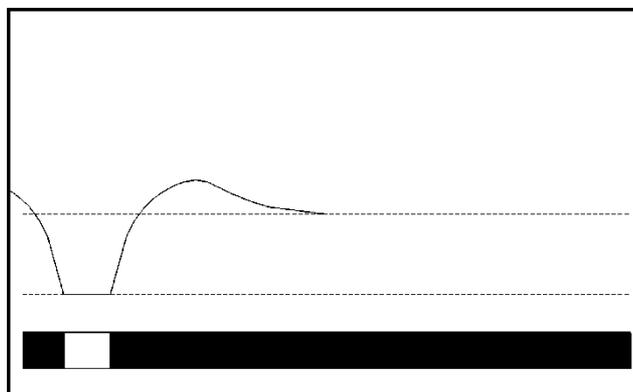
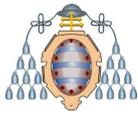


Figura 6.29.- Inicio de la explotación



- Fase 3: continúa la explotación, el hueco aun sin hundir genera sobretensiones mayores tanto en intensidad como en extensión.

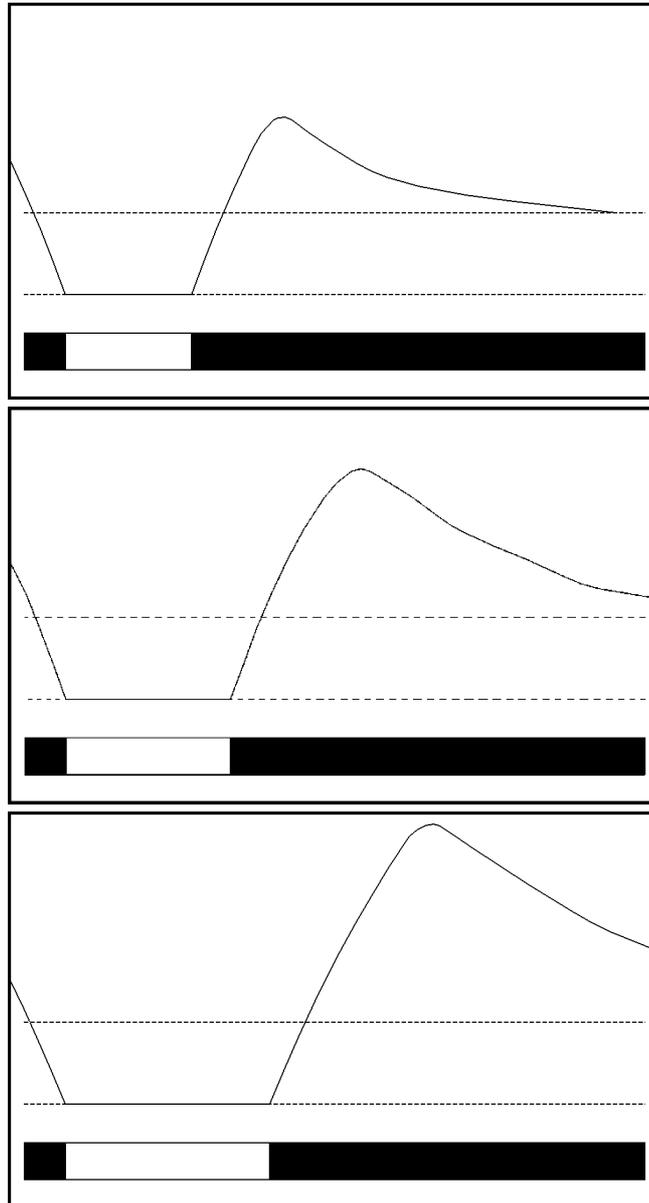


Figura 6.30. Desarrollo de la onda

- Fase 4: el vano creado ya es tan grande que los hastiales acaban hundiéndose con lo que parte del hueco rellenado vuelve a ejercer de apoyo aunque más débil que el carbón original. La sobrepresión creada se reduce mucho.

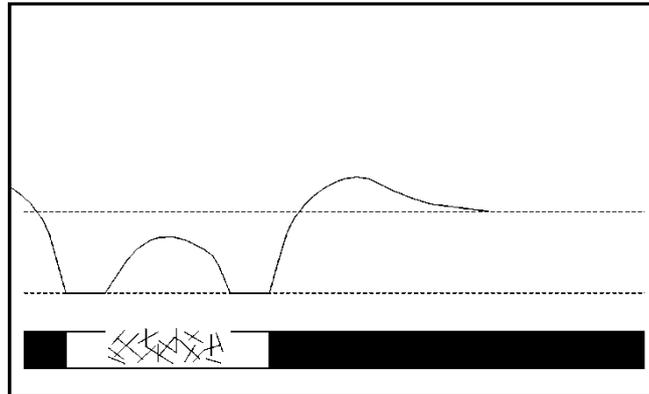
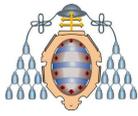


Figura 6.31.- Primer hundimiento

- Fase 5: continúa la explotación y el ciclo comienza de nuevo. Aumento del hueco sin hundir y con ello las sobrepresiones.

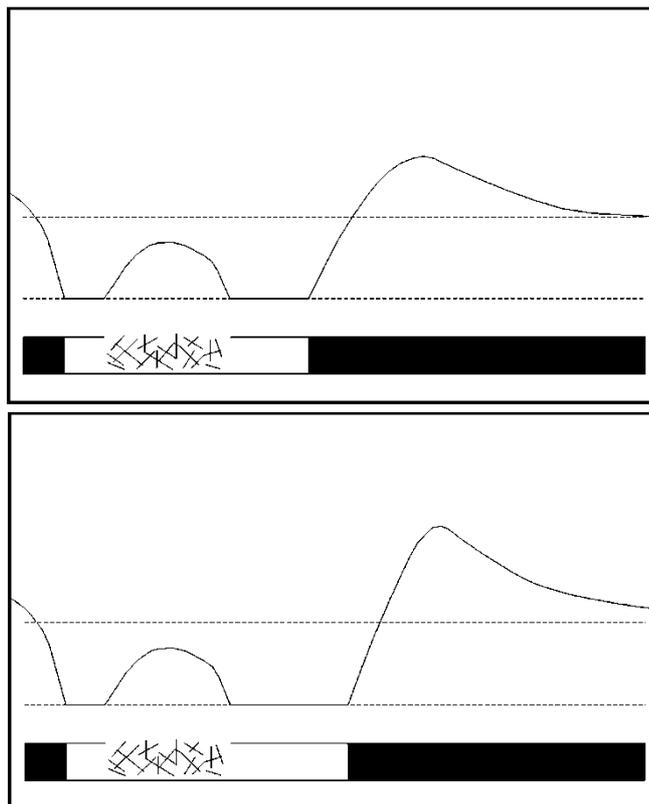


Figura 6.32.- Nuevo ciclo de carga

- Fase 6: en este caso la siguiente rotura se produce a un menor vano, ya que los hastiales ya no están ahora doblemente apoyados.

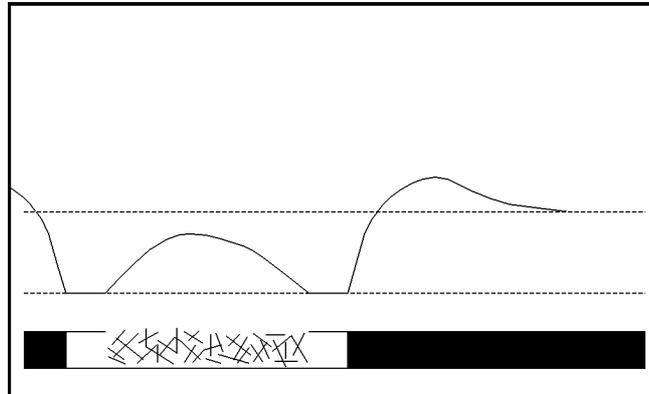
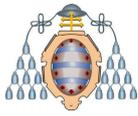


Figura 6.33.- Nuevo hundimiento

En los momentos anteriores al hundimiento las sobrepresiones pueden incrementarse intensa y rápidamente. Algunos FGD se explicarían mediante este comportamiento. Se han colocado algunos sensores que miden la presión que los hastiales ejercen sobre el cuadro metálico, sin embargo no se ha conseguido captar estas posibles ondas porque las medidas realizadas han sido discretas. En la Figura 6.34 se muestra una serie de valores reales medidos en una capa, donde se puede como aumenta la presión a medida que el sutirado se acerca a la célula de presión situada en este caso entre el hastial y el cuadro.

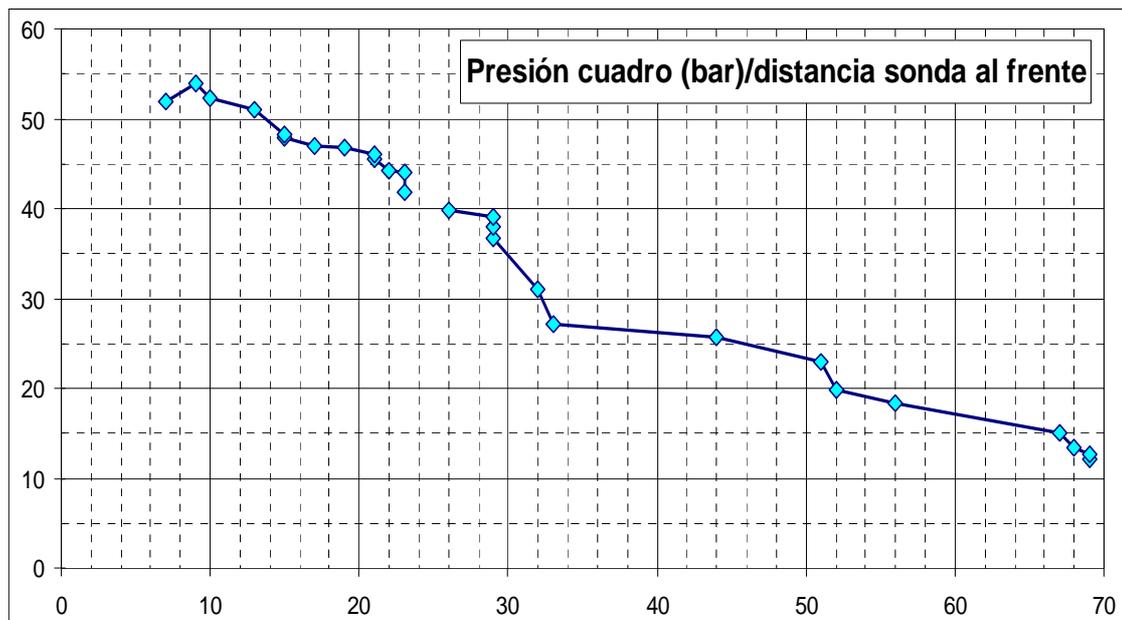
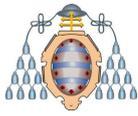


Figura 6.34.- Incremento de presión sobre los cuadros metálicos al acercarse un sutirado



6.2.4 Influencia de los estrechones

La presencia de estrechones en una capa de carbón modifica el estado tensional habitual que hay en torno al frente de avance. La máxima sobretensión se acerca al frente e incrementa de valor, es decir se produce una debilidad por la que puede comenzar un FGD. Utilizando modelos numéricos creados para simular la existencia de estrechones por debajo de la solera se comprende fácilmente esta situación.

En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de cálculo para una galería a varias profundidades diferentes sin estrechón y con un estrechón de 1 m de longitud situado a 3 m de profundidad. En la Figura 6.35 se pueden ver los dos casos para una galería a 400 m de profundidad. La línea rosa corresponde a la situación sin el estrechón. Los valores corresponden a la tensión perpendicular a la capa medida desde la solera de la galería y en profundidad. El estrechón (verde) duplica la sobretensión y hace disminuir la presión a mayor profundidad.

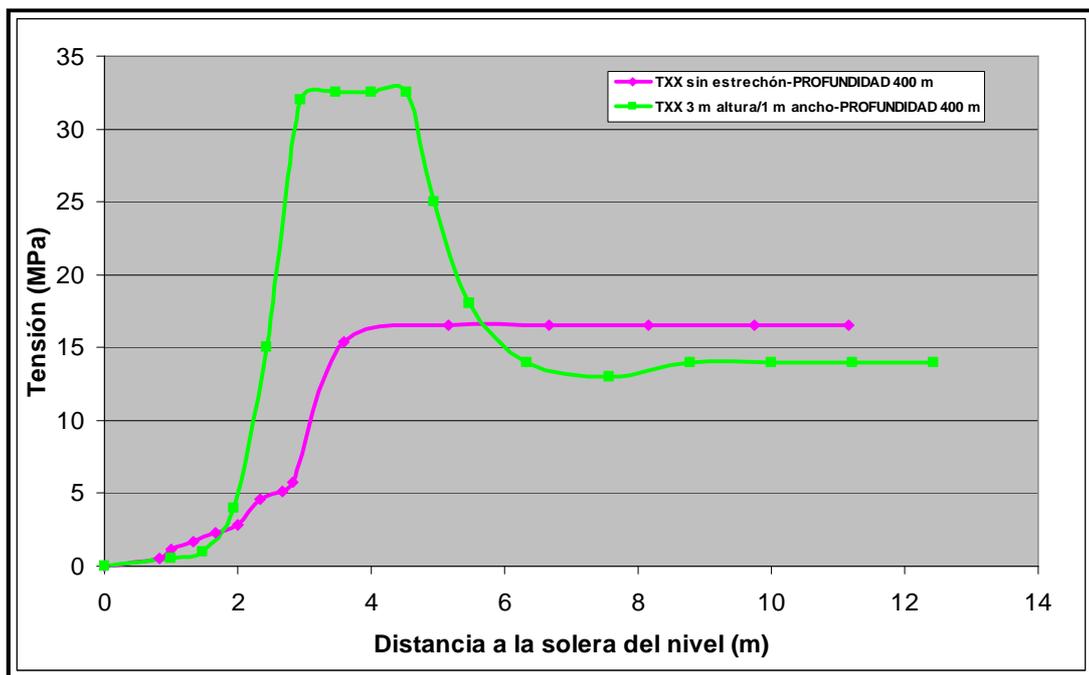


Figura 6.35.- Cálculo de galería a 400 m de profundidad con estrechones

La Figura 6.36 y la Figura 6.37 corresponden a la misma geometría pero a las profundidades de 950 m y 1200 m. El comportamiento es el mismo, es decir el punto estrecho concentra mayores tensiones.

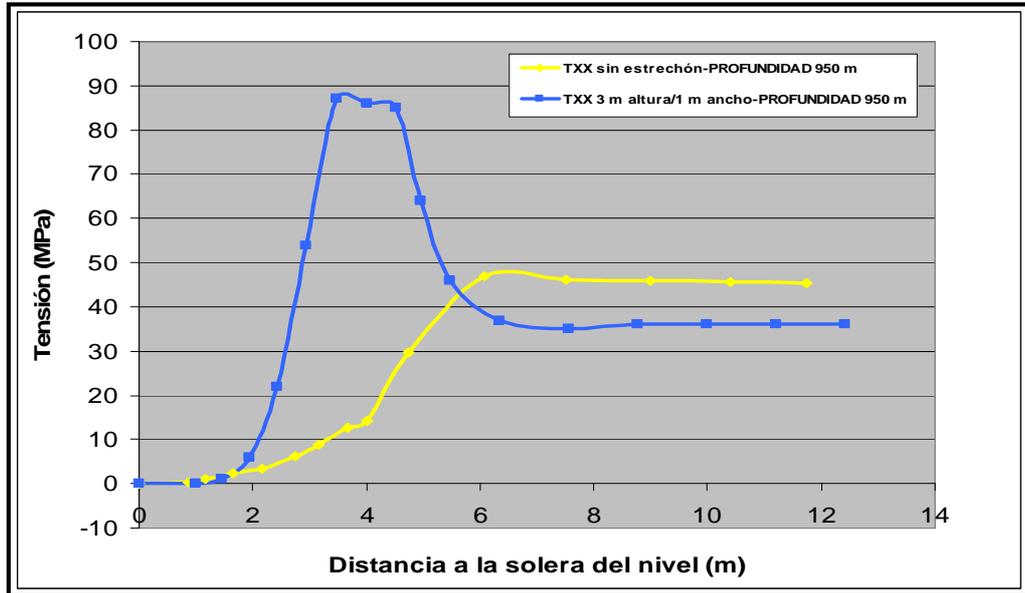
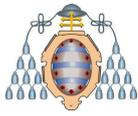


Figura 6.36.- Cálculo de galería a 950 m de profundidad con estrechones

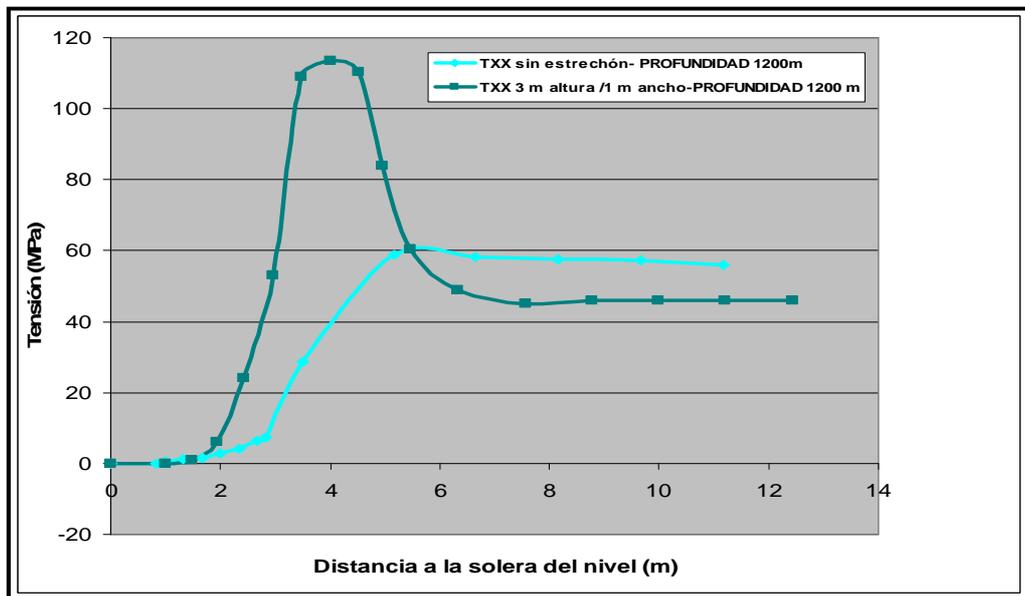


Figura 6.37.- Cálculo de galería a 1.200 m de profundidad con estrechones

A continuación se muestran dos cálculos, uno sin estrechón y otro con estrechón, donde también se aprecia cómo cambian las sobretensiones así como su distribución.

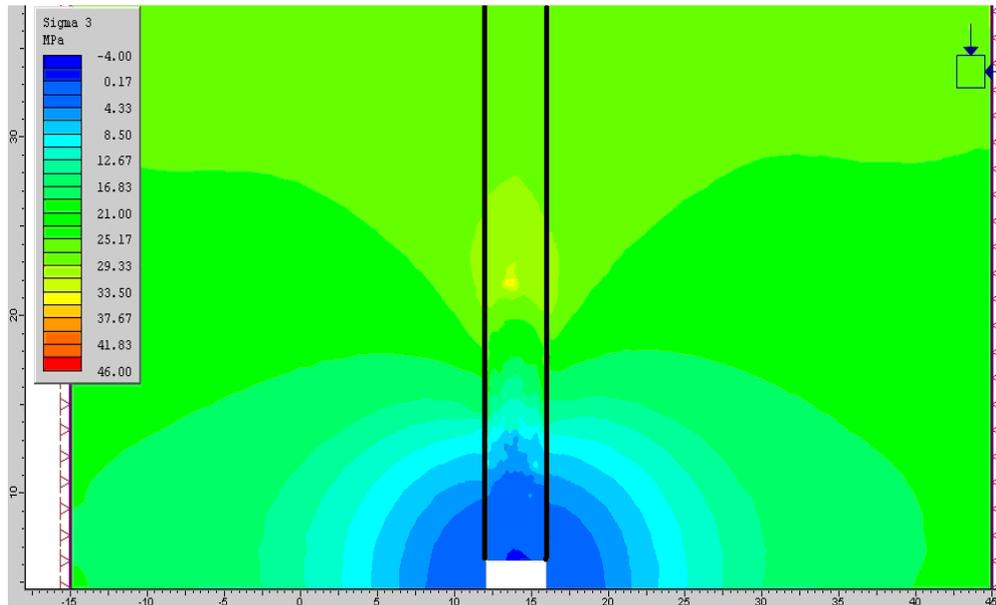
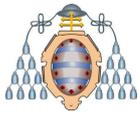


Figura 6.38.- Situación de máxima tensión en una capa sin estrechón

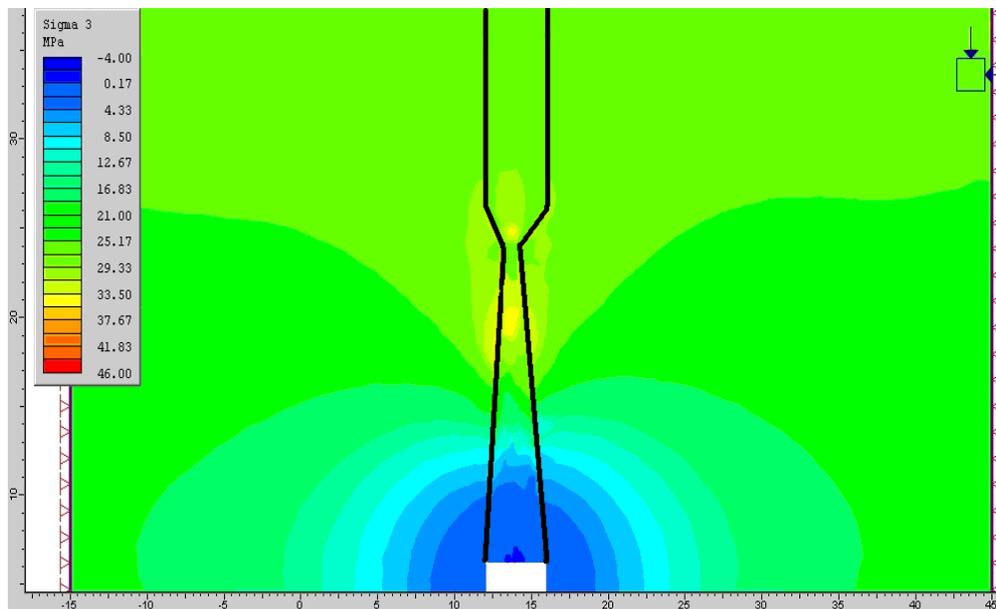
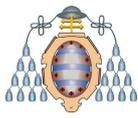


Figura 6.39.- Situación de máxima tensión en una capa con estrechón

Se ve claramente que un estrechón puede ser razón suficiente para generar un FGD ya que puede duplicar la presión natural, aunque dicho FGD tendría menor extensión ya que es menor la zona afectada.



6.3 El gas en el carbón

Una vez descrito el comportamiento del macizo rocoso, desde el punto de vista de las tensiones, hay que ver cómo se encuentra el gas en el carbón y cómo se comporta.

Dentro del carbón hay tres sistemas de poros y una red de fracturas, como se explicó en el Apartado 2.3, donde se almacena el gas.

El metano se encuentra almacenado en el carbón, en una pequeña parte, en estado gaseoso y la mayor parte (puede llegar al 90%) se encuentra adsorbida a la superficie del carbón. Por tanto la cantidad de gas que puede almacenar el carbón no sólo depende de la presión del gas sino también de la superficie específica del carbón.

La curva de adsorción es precisamente la relación entre la presión del gas y su concentración en el carbón. La Figura 6.40 muestra dos curvas de adsorción para una capa real.

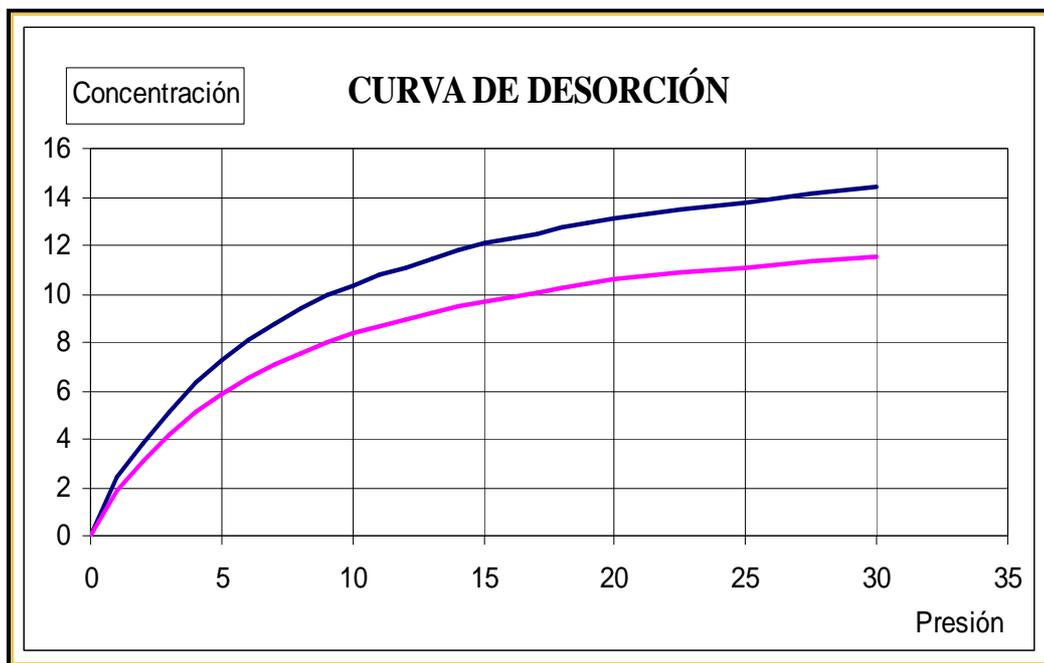
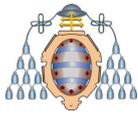


Figura 6.40.- Curva de desorción

Como puede verse, la relación no es lineal, a presiones altas la variación de concentración con la presión disminuye, esto se interpreta como que ya no cabe más gas adsorbido a la superficie. Comparando estas dos curvas se puede ver que, por ejemplo a



una presión de 15 bar, el carbón correspondiente a la curva rosa almacena 10 m³/t de carbón mientras que el correspondiente a la curva azul tiene una capacidad de 12 m³/t. Es decir el carbón representado por la curva azul tiene mayor superficie específica que la otra muestra y por eso tiene mayor capacidad de almacenar gas metano. Esta curva también indica a que presión está el gas a una concentración determinada.

En HUNOSA se mide la cantidad de gas contenida en la capa de forma directa a través de muestras de 10 g de carbón tamizado de granulometría 0,8-2 mm, extraídas de la capa mediante sondeos. En un mismo sondeo se pueden tomar distintas medidas a diferente profundidad.

El procedimiento para la obtención de este parámetro se encuentra regulado por la Especificación Técnica 0308-5-92 en la que se establece la metodología para el cálculo del metano en cada una de las fases siguientes:

1. Medida de Q1: se realiza dentro de la mina y se mide el gas que se desprende durante el sondeo instantáneamente. Para ello se utiliza el desorbómetro.
2. Medida de Q2: una vez medida Q1 la muestra se introduce inmediatamente en un recipiente cerrado herméticamente. Durante su transporte al laboratorio continúa el desprendimiento de gas, que será Q2. Éste es el gas que se encuentra en la fracturación secundaria. Dicha cantidad se determina cuando el recipiente se abre en el laboratorio.
3. Medida de Q3: una vez en el laboratorio y después de medir Q2, la muestra se muele durante un periodo de unos 10 minutos. El gas que se desprende será Q3. Correspondiente a la fracturación y porosidad no comunicadas.

El resultado se expresa en m³ de gas desprendido por tonelada de carbón puro, es decir, libre de cenizas (m³/tp).

La evolución de cada una de estas medidas es muy importante. De hecho, la variación relativa de Q2 está muy relacionado el incremento del riesgo de FDG.



6.3.1 Cinética de desorción

Cuando el carbón se expone al aire libre comienza un flujo de gas desde del seno del mismo impulsado por su propia presión, sin embargo dicho desprendimiento no se produce de forma uniforme ni en el tiempo ni en el espacio. Primero, y de forma rápida, se liberará el contenido en los poros más abiertos y luego, más lentamente, el contenido en los poros más cerrados.

La propensión del macizo de carbón a un FGD se caracteriza, no solamente por su contenido en gas, sino también por índices que evalúan como se desprende.

El índice más utilizado es la velocidad de desorción V_1 , cuya determinación está regulada mediante la Especificación Técnica 0307-2-92 y expresa la cantidad de metano, en cm^3 , que se desprende de una muestra de carbón de 10 g, obtenida a través de un sondeo en la capa, con una granulometría comprendida entre 0,5 y 0,8 mm, en el intervalo de tiempo que va del segundo 35 al 70, a partir de que la muestra haya sido extraída del macizo de carbón. Las medidas se realizan mediante un desorbómetro.

La profundidad a la que, normalmente, se valora el riesgo es de 3 m y el valor crítico, generalmente aceptado, a partir del cual un carbón se considera propenso a FGD es de $2 \text{ cm}^3/10\text{g}/35\text{s}$.

La Figura 6.41 muestra una grafica de una muestra real, con los resultados de la concentración de gas en capa y el índice V_1 , a distintas profundidades.

Velocidad de desorción V_{1p} ($\text{cm}^3/10 \text{ g}/35\text{s}$)

Concentración de gas en capa C (m^3/tp)

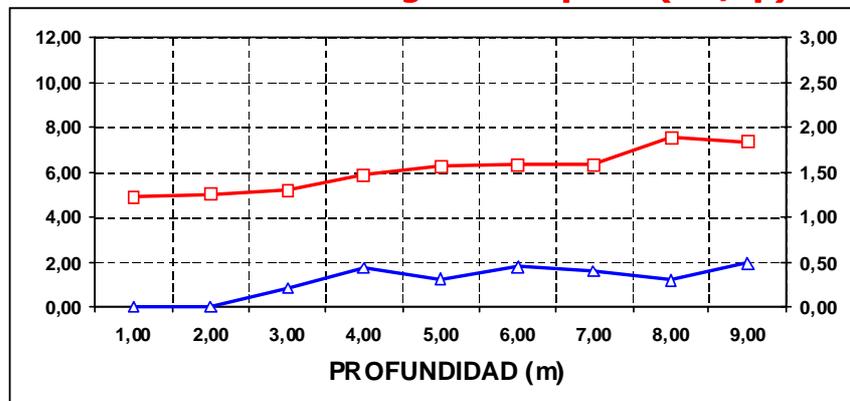
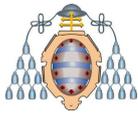


Figura 6.41.- Registro de los índices de riesgo en un sondeo en carbón



6.3.2 Análisis del flujo de gas. Permeabilidad

El carbón se comporta como un medio permeable frente al gas, y por tanto es de aplicación la ley de Darcy, tal como se indicó en el Apto. 2.8.3.3, es decir, se cumple que:

“El flujo másico que atraviesa la unidad de superficie a través de un medio permeable es directamente proporcional a la presión del gas y al gradiente de presiones e indirectamente proporcional a la viscosidad absoluta del gas”.

La constante de proporcionalidad se llama permeabilidad y se mide en unidades de superficie (m^2). Los valores para el carbón son, en general, muy bajos. En mina se han medido valores del orden de $10^{-16} m^2$ en zonas de sobrepresión y valores de $10^{-13} m^2$ en zonas distendidas. En la literatura se han descrito FGD cuando la permeabilidad disminuye de $10^{-17} m^2$.

Con esta ecuación de Darcy y la curva de adsorción se puede construir un modelo de desprendimiento de gas que permita comprender el comportamiento del metano en el carbón. Se resume en los siguientes puntos:

- El desprendimiento de metano calculado disminuye exponencialmente con el tiempo, esto queda patente en el desprendimiento de gas de los sondeos. La Figura 6.42 muestra un ejemplo real en la capa Julia del Pozo Sotón.

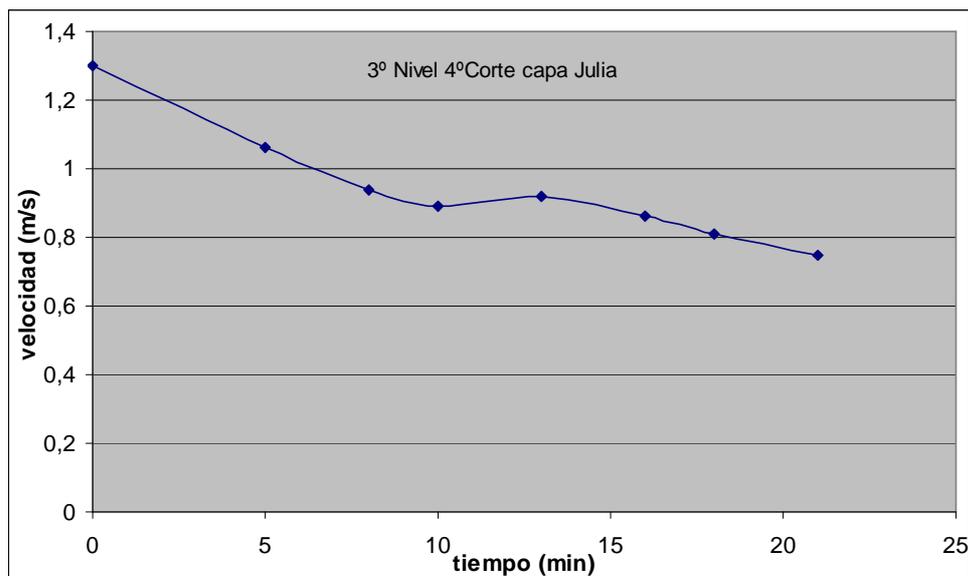
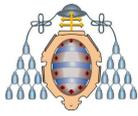


Figura 6.42.- Sondeo realizado en la capa Julia



- A mayor escala, la relación entre el flujo de desprendimiento y el tiempo es hiperbólica en el modelo obtenido a partir de la ecuación de Darcy. En la realidad es ligeramente diferente. Al principio en algunos sondeos se produce un aumento del flujo de gas para volver a descender ya de una forma similar a la calculada. Esta diferencia se debe a que el carbón al perder el gas se contrae con lo que aumenta su permeabilidad. Esto hace que se acelere, ligeramente y de forma temporal, el régimen de desprendimiento de gas.
- Aunque el punto de partida sea la uniformidad de presiones, el desprendimiento de metano seguirá las irregularidades estructurales del carbón de forma que las zonas de porosidad abierta quedarán prácticamente desgasificadas y las zonas de porosidad más cerrada quedarán parcialmente desgasificadas. La altura de llave habitual, en una explotación de subniveles, oscila entre 15 m y 20 m, por lo que cuando se avanza un nivel, parte del gas se habrá fugado por el nivel superior. Este es un concepto importante, ya que cuando la explotación se acerque a zonas de sobretensión, el escape hacia arriba disminuye dando lugar a zonas con mayores concentraciones de metano. En la Figura 6.43 se ilustra este resultado.

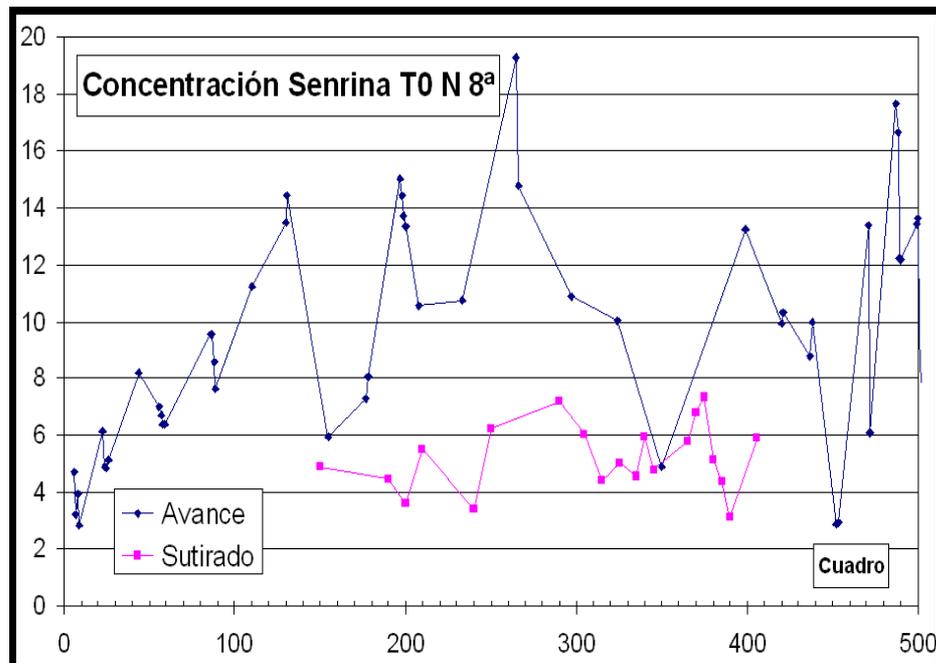
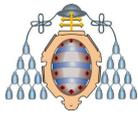


Figura 6.43.- Reducción espontánea de concentraciones en capa Senrina



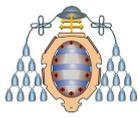
Los valores corresponden a un ciclo completo de avance y sutirado. Durante el avance se observaron las concentraciones habituales de control obteniéndose un valor medio de $9,5\text{m}^3/\text{tp}$. Varios meses después, durante el sutirado, se hicieron sondeos verticales ascendentes y se midieron nuevas concentraciones. En este caso se midieron valores considerablemente menores, del orden de $5,2\text{ m}^3/\text{tp}$, con longitudes de sondeos de hasta 20m.

- Un sondeo que desprenda poco metano no implica necesariamente que la zona esté desgasificada, también puede indicar que tiene una permeabilidad muy baja. Si la capa presenta una resistencia alta y no se produce la rotura durante la perforación, lo cual se puede ver porque se desprenden pocos *detritus* y poco gas, en estos sondeos se pueden encontrar medidas de presiones altas.

6.4 Combinación gas y presiones

Una vez analizado el comportamiento de ambas de forma independiente, se va a estudiar ahora lo que ocurre cuando se combinan. Para ello, se adopta la simplificación de considerar que el equilibrio inestable en el frente de carbón tiene dos partes:

1. La parte más cercana al frente, que es la zona que hace de retención: en ella el carbón está desgasificado y no está sometido a muchas sobretensiones (de hecho está relajado, lo que implica que se ha plastificado). Su estabilidad mecánica es suficiente para hacer de tapón y evitar que el carbón profundo tienda a ceder hacia el frente.
2. La parte más profunda, que es la zona que empuja: en ella las sobretensiones mecánicas ya son importantes al igual que las presiones de gas. En esta zona la capacidad mecánica del carbón no es suficiente para aguantar el equilibrio por sí mismo, por ello necesita la zona de frenado, que, a pesar de estar plastificada y de tener poca resistencia, genera suficiente confinamiento para estabilizar la zona que empuja.



Esta simplificación permite intuir que cualquier efecto que destruya la zona de retención (como una montadura o una voladura) o que incremente las fuerzas en la zona de empuje (como avanzar cerca de una explotación activa) puede dar lugar a un FDG.

Hay, por tanto, dos posibilidades extremas de alcanzar una situación de riesgo, aquélla en la que domina la presión de gas y aquélla en la que domina el estado tensional. Los casos siguientes ilustran la evolución de cada una de ellas.

6.4.1 Caso 1: Incremento del estado tensional de forma moderada

La Figura 6.44 muestra la estructura de la capa de carbón de partida, en la que cada recuadro representa la concentración creciente de gas en profundidad, o lo que es lo mismo, el gradiente de presiones. Los canales entre los recuadros representan las fisuras por las que circula el gas hacia la cara libre (izquierda) y las flechas verticales muestran las tensiones que soporta el carbón.

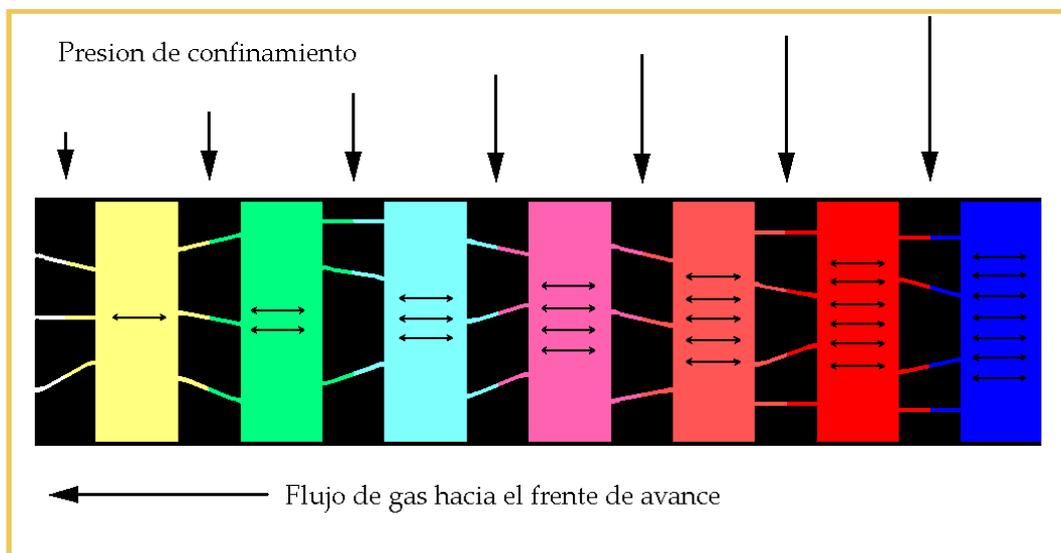


Figura 6.44.- Situación de partida

En la Figura 6.44 se observa que la zona azul y roja (altas presiones de gas y de confinamiento), es decir la zona de empuje, se encuentra alejada del frente. Si ahora se incrementa moderadamente la presión de confinamiento (doble de flechas verticales) (véase la Figura 6.45), el efecto será la reducción de la permeabilidad y por tanto el flujo de gas hacia la cara libre se reducirá.

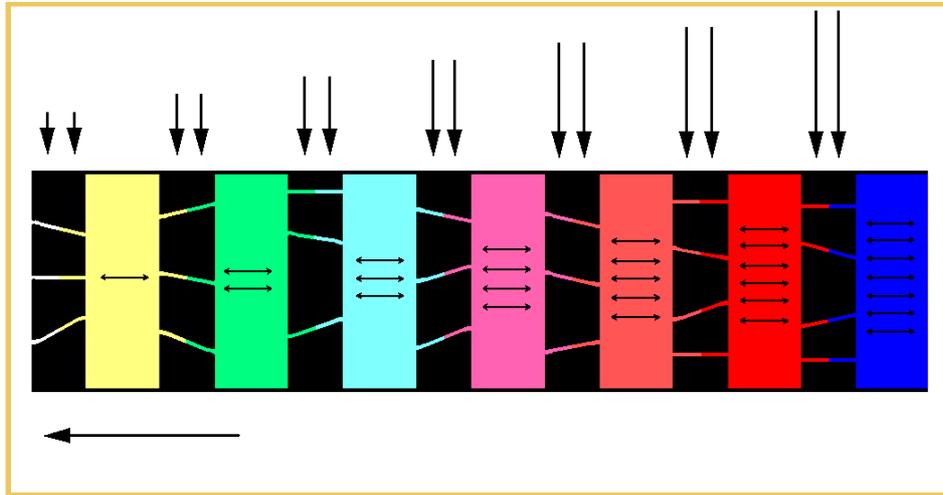
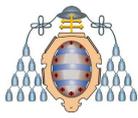


Figura 6.45.- Aumento moderado de tensiones

Este efecto se representa mediante la reducción del número de canales por los que puede circular el gas (véase la Figura 6.46).

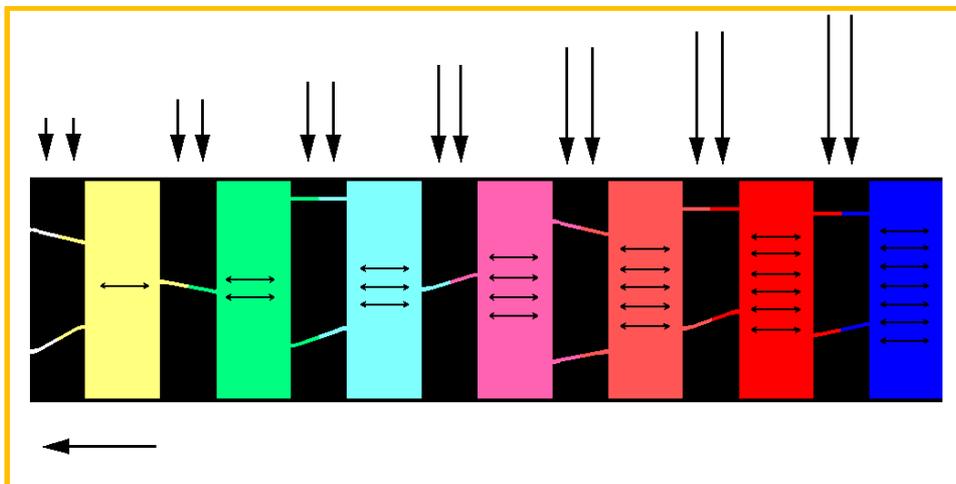
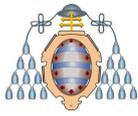


Figura 6.46.- Reducción de permeabilidad

Si el ritmo de avance se mantiene, de un relevo a otro no hay tiempo suficiente para que la presión del gas se relaje, por lo que las zonas de alta presión de metano se van acercando al frente.

Las tres imágenes de la Figura 6.47 muestran este fenómeno en el que se ve que la zona de retención va disminuyendo progresivamente. Si se continúa con el ritmo de avance, llegará un momento en el que la zona de retención se irá haciendo cada vez más pequeña y no será suficiente para mantener el equilibrio y se producirá el FGD.



En este caso, como la principal fuerza impulsora del FGD es la presión del gas, la probabilidad de que se produzca un desprendimiento de metano sería muy grande.

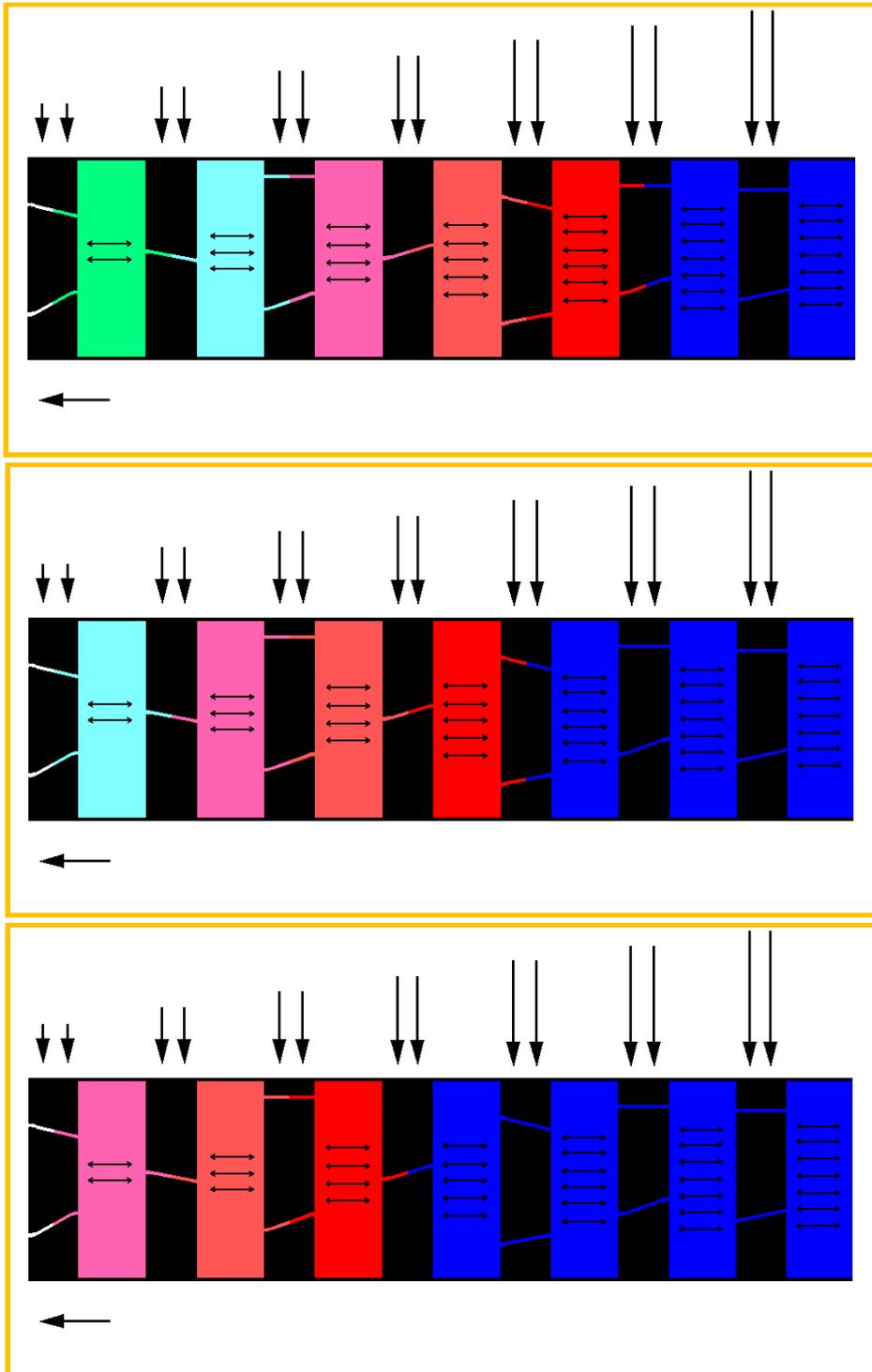
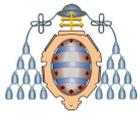


Figura 6.47.- Evolución hacia el FGD



La Figura 6.48, la Figura 6.49 y la Figura 6.50 intentan mostrar cómo sería un FDG de este estilo. La estructura se representa mediante poros donde se almacena el gas (por adsorción) y las fisuras por las que escapa. Habrá, entonces, un importante gradiente de presiones de gas y una baja circulación de metano por las fisuras.

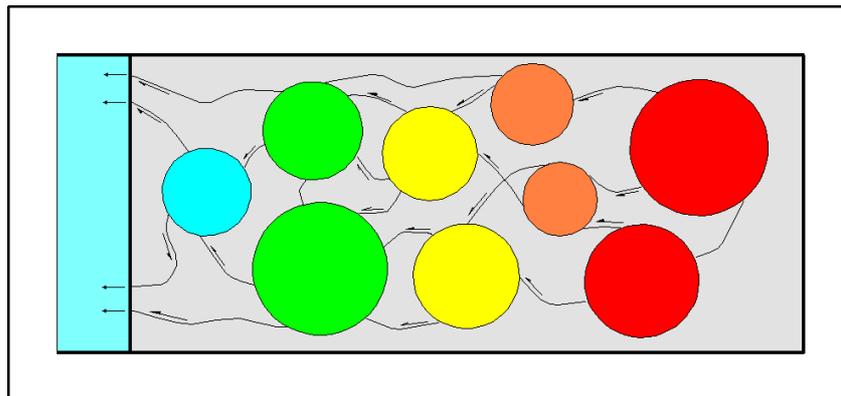


Figura 6.48.- Presión en la zona de retención

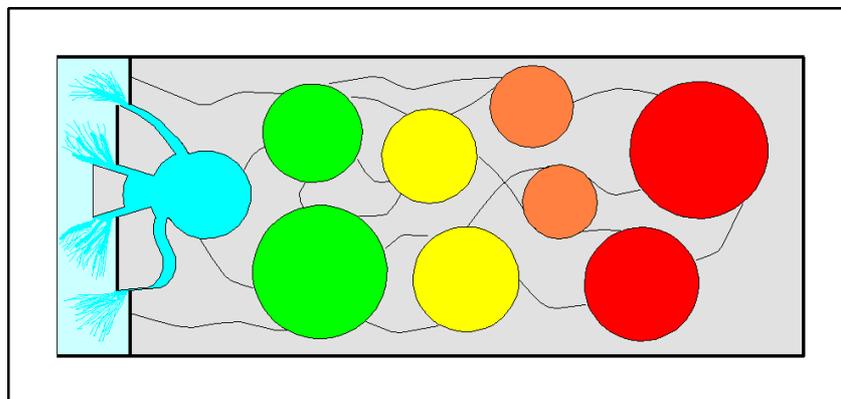


Figura 6.49.- Rotura de zona de retención

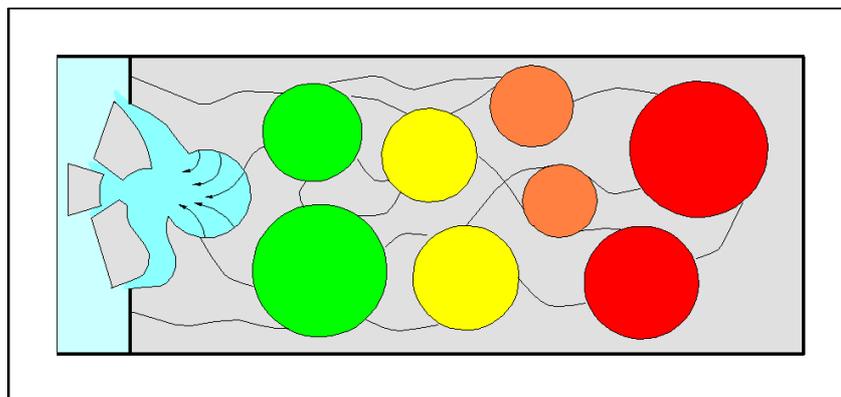
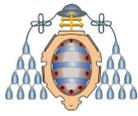


Figura 6.50.- Liberación súbita del gas adsorbido



Puesto que el gas está en su mayor parte adsorbido, al ponerse el poro azul a presión atmosférica se produce una liberación casi instantánea de ese gas que, además, empuja las partículas rotas hacia el exterior.

La situación evoluciona y la estructura de carbón que contiene al poro verde está sometida a una diferencia de presión mayor que la que tenía antes y, por tanto, no la soportará y reventará (véase la Figura 6.51), dejando los poros verdes a la presión atmosférica.

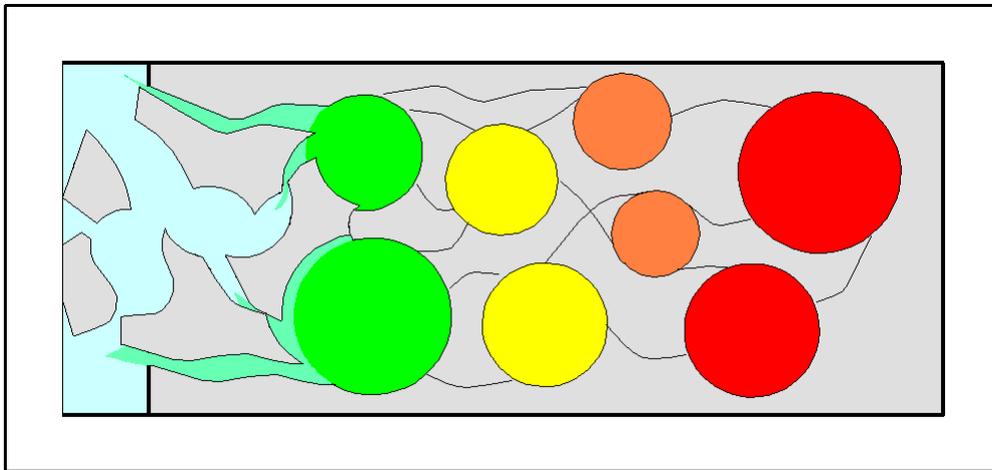


Figura 6.51.- La propia presión de gas rompe la estructura del carbón

De la misma forma, una gran cantidad de metano adsorbido, en este caso mayor, pasará casi instantáneamente a fase gaseosa realizando un transporte neumático de los *detritus* de carbón. En los siguientes pasos (Figura 6.52) la diferencia de presión de gas que tiene que aguantar la estructura es cada vez mayor por lo que el proceso se acelera.

El FGD se detendrá cuando la cantidad de *detritus* desprendida sea tan grande que atasque el proceso, tras lo cual solamente seguirá el desprendimiento de gas. Esta situación genera un *detritus* muy fino, porque la presión de gas es la que destruye la estructura del carbón, y da lugar a gran extensión debido al transporte neumático y la gran cantidad de metano que se evacúa.

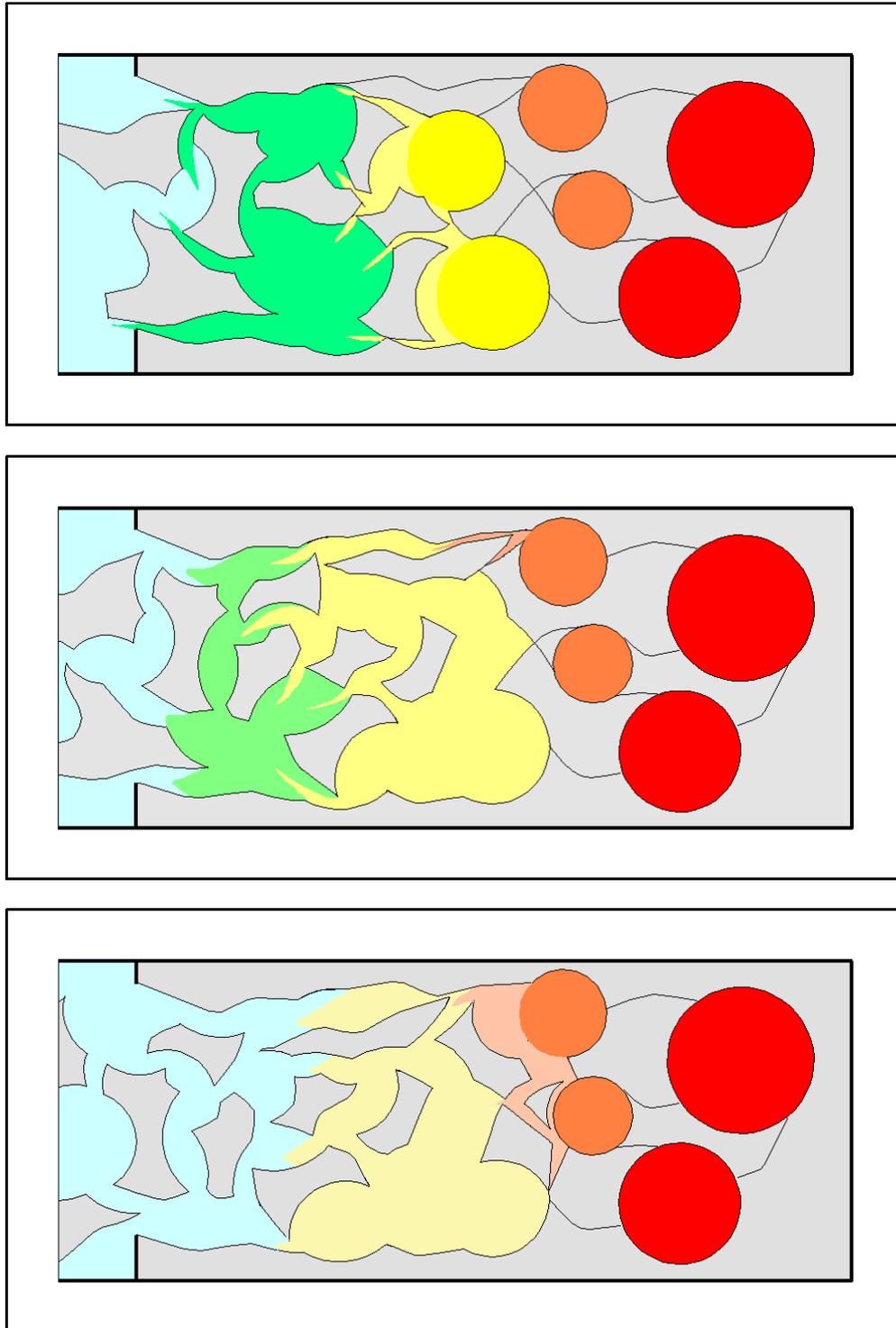
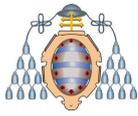
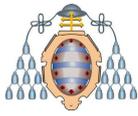


Figura 6.52.- Evolución de un FGD



6.4.2 Caso 2: Incremento del estado tensional de forma importante

En este caso se procede a someter al carbón a un incremento importante de la presión de confinamiento. En las figuras siguientes (Figura 6.53 y Figura 6.54) se ilustra este proceso.

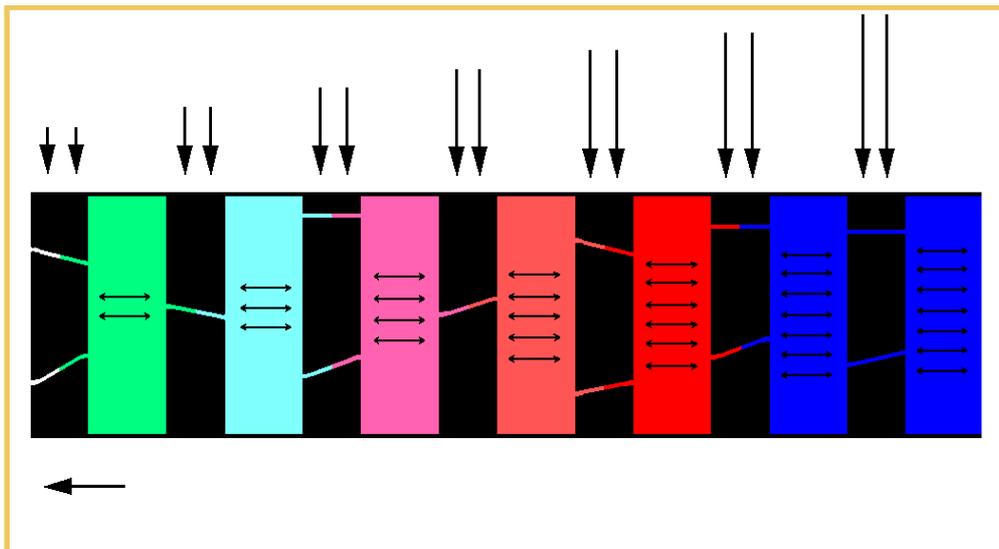


Figura 6.53.- Situación de partida

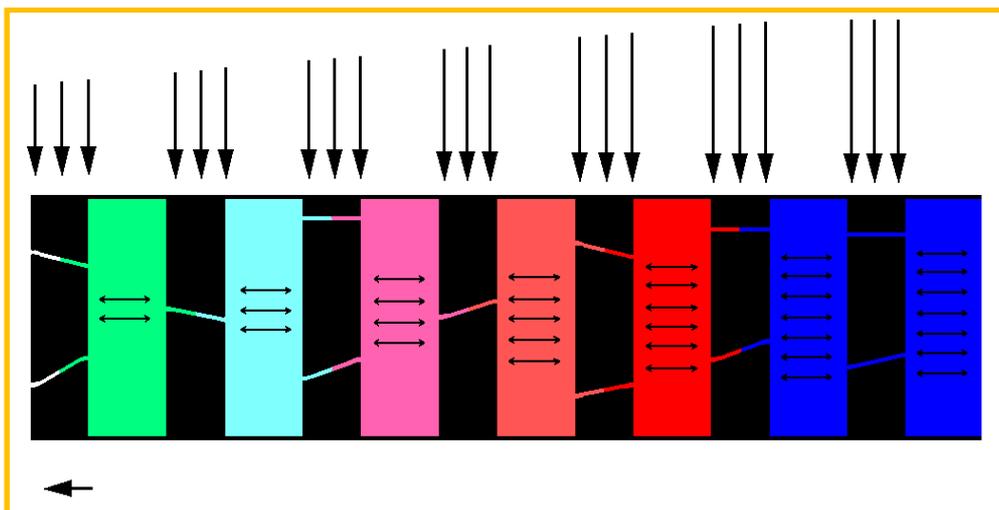
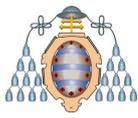


Figura 6.54.- Aumento de las tensiones

Se toma como punto de partida una situación intermedia del caso anterior y el efecto del incremento de presión queda reflejado por grupos de flechas verticales.



En este caso, ya sin dar tiempo a que se produzca un crecimiento importante del gradiente de concentraciones de metano, se produce la rotura mecánica del carbón y la liberación de metano, pero ya en menor cantidad porque no ha dado tiempo a su acumulación en la zona de empuje (Figura 6.55).

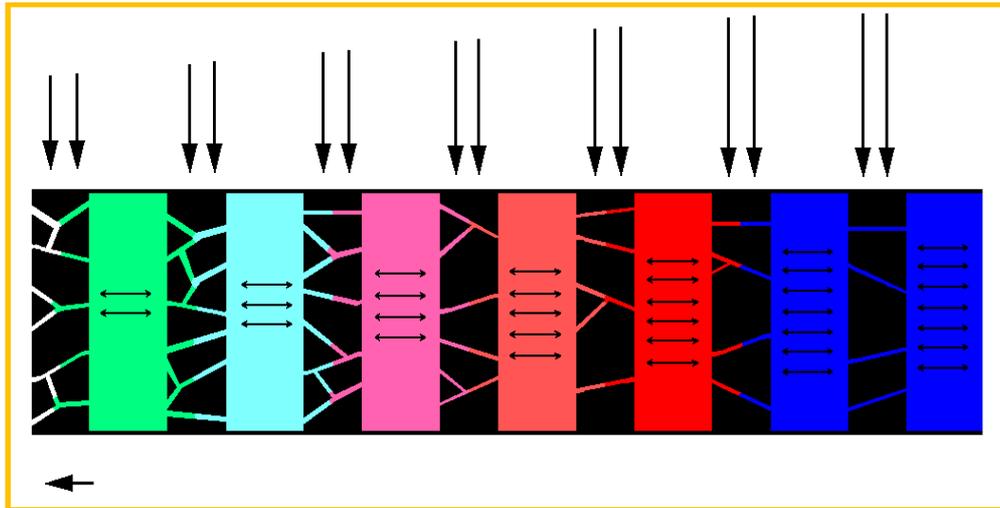


Figura 6.55.- Evolución del FGD

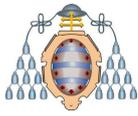
Este tipo de FGD, debido a sobretensiones excesivas, se produce con una pequeña cantidad de carbón movilizado, porque la cantidad de gas desprendido no es suficientemente grande para ejercer un efecto de transporte neumático. La granulometría del carbón desprendido, en este caso, no es tan fina como en el anterior.

6.5 Descripción de las labores objeto de estudio

A continuación se describen los trabajos de seguimiento de las labores en los que se basaron todos los comportamientos descritos anteriormente. Entre ellos, se analizaron algunos FGD, con la idea de explicar lo ocurrido y reafirmar las teorías establecidas.

Su estudio detallado y su análisis en profundidad, han permitido conocer mejor el funcionamiento de las variables que intervienen en los distintos procesos y han servido para introducir nuevos métodos de detección y comprobación de su efectividad, partiendo siempre de experiencias anteriores con la aplicación de viejos métodos conocidos.

Todas estas labores se realizaron en explotaciones por subniveles horizontales, donde el sutiraje de los niveles superiores afectaba al avance de los niveles inferiores.



6.5.1 Avance del 1º Nivel Izquierda de 8ª II del Pozo Montsacro

Este ejemplo servirá para comprobar el efecto de un macizo residual de una capa adyacente (véase la Figura 6.30). Para la explotación de la capa 8ª se utiliza el método de protección de la capa égida, que en este caso es la 7ª, pero para proteger la infraestructura es necesario dejar macizos sin explotar en esta capa, El avance del nivel al que corresponde este ejemplo se ha realizado a través de las sobretensiones creadas por este macizo. Esto se muestra en la Figura 6.56.

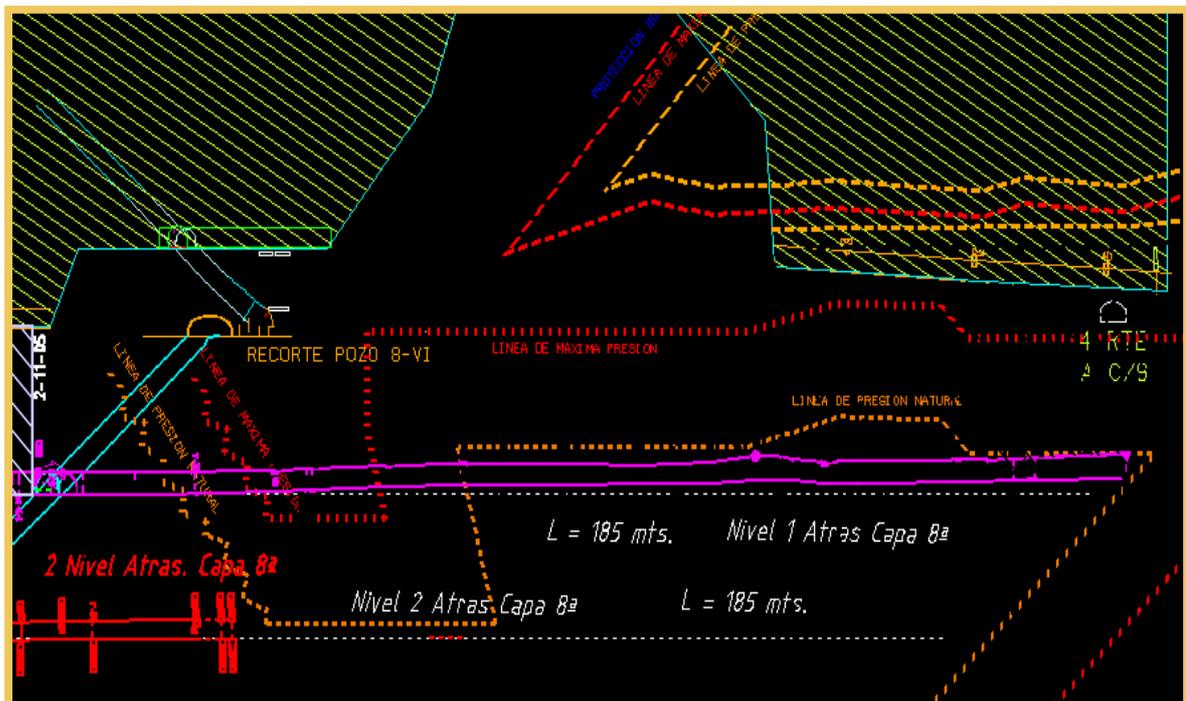
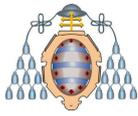


Figura 6.56.- Plano de Labores 1º Nivel Izquierda de 8ª II del Pozo Montsacro

El nivel está representado por las líneas rosa, la línea discontinua roja muestra la proyección del macizo dejado en la capa 7ª sobre la capa 8ª (que coincide con la máxima sobrepresión creada por el macizo de acuerdo a los criterios rusos). Se puede ver que la línea de sobrepresión continúa en la parte superior del dibujo, esto se debe a otras zonas sin explotar de la capa 7ª. La línea naranja muestra el comienzo de la sobretensión, por debajo habría efecto de capa égida.

A continuación se muestra, en la Figura 6.57, el gráfico de concentraciones y velocidad de desorción (V_1) de los metros 6, 7, 8 y 9 (rombos naranjas) de todos los



sondeos realizados durante el avance del nivel. La línea azul resulta de los valores medios de cada grupo consecutivo de seis valores y la línea rosa corresponde a las velocidades de desorción, también de los cuadros finales. En horizontal aparece el cuadro de avance, que marca la posición en el nivel.

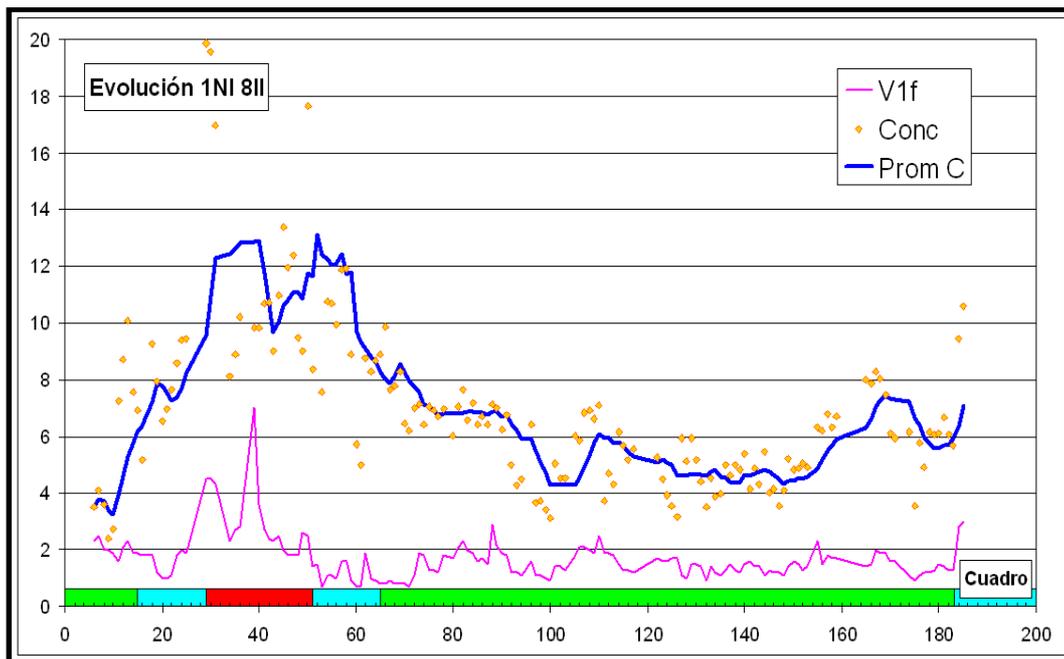
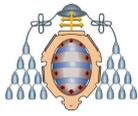


Figura 6.57.- Evolución de la concentración de gas y V_1 (Nivel Izquierda 8ª II – Montsacro)

En la banda inferior se indican las zonas de sobrepresión y distensión calculadas de acuerdo a los criterios rusos. La zona roja corresponde precisamente a la zona de máxima compresión, se observa que en ella es donde se miden las mayores concentraciones. Al contrario, en las zonas verdes donde la capa ya está distendida gracias al efecto de la capa égida, se encuentran las concentraciones menores. En azul quedarían zonas en las que la tensión es aproximadamente la natural.

Agrupando estas zonas se obtienen los siguientes valores de contenido en gas que definen la división entre distintos comportamientos:

- 6,4 m³/t es la que separa la zona distendida de la natural.
- 9,5 m³/t es la que separa la zona natural de la sobretensionada.



Este análisis coincide con el empirismo, puesto que tradicionalmente en HUNOSA se considera que la concentración de $9 \text{ m}^3/\text{t}$ marca el límite de riesgo, y en la literatura se menciona que por debajo de $6 \text{ m}^3/\text{t}$ no se han descrito FGD. Por tanto, en adelante se utilizarán estos valores para identificar las zonas relajadas, naturales y sobretensionadas.

En la Figura 6.58 se comprueba que en las zonas de sobretensión no sólo se producen aumentos de la concentración, sino que también se produce un aumento de la cantidad de la porción de Q2. Al final del nivel también se puede ver que se produce un aumento de la concentración dentro de la zona relajada, pero en este caso el incremento se detecta en el término Q3. Esto se puede explicar por un cambio en la estructura del carbón que disminuya su densidad de fracturación abierta.

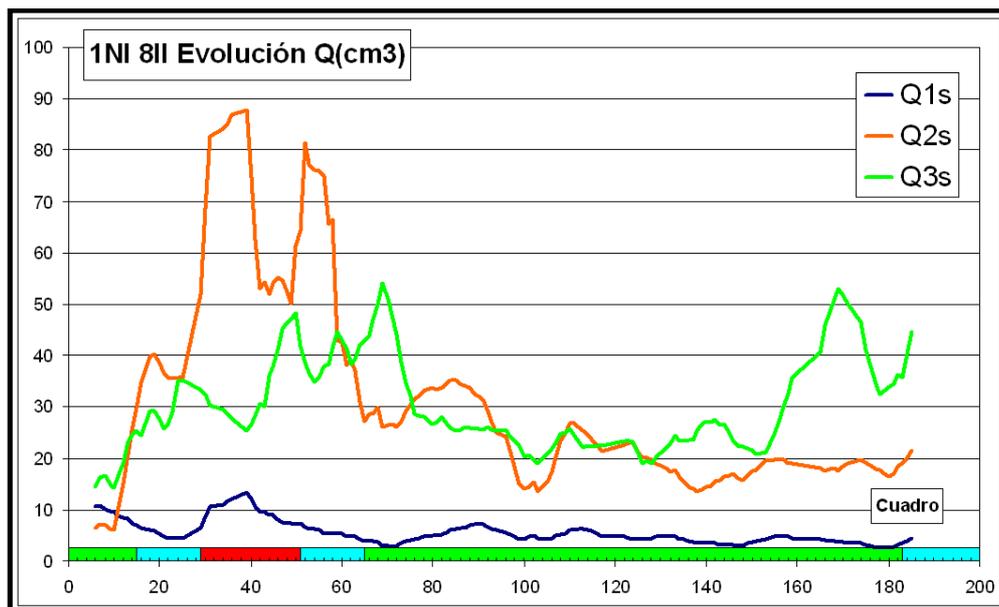
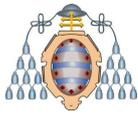


Figura 6.58.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (Nivel Izquierda, 8ª II – Montsacro)

6.5.2 Avance del 2º Nivel Derecha de 8ª II del Pozo Montsacro

Este ejemplo permitirá observar el efecto del cruce entre un avance de la capa 8ª y el sutirado en la capa 7ª, aunque sea en un nivel inferior. En este caso se analiza la Figura 6.59, de concentraciones puntuales.

La línea superior (muy quebrada) indica la concentración. No hay valores por encima de $9,5 \text{ m}^3/\text{t}$ en los primeros 120 cuadros, aunque el avance se realizó en una zona de no distensión, ya que el avance se realizó con la capa 7ª ya sutirada en el mismo



nivel y en el inferior. Concretamente hay dos zonas en las que la concentración indica que el avance se ha realizado aproximadamente bajo la tensión natural. A partir del cuadro 120 el avance sí se ha realizado en situación de distensión, por lo que la concentración se reduce de forma importante.

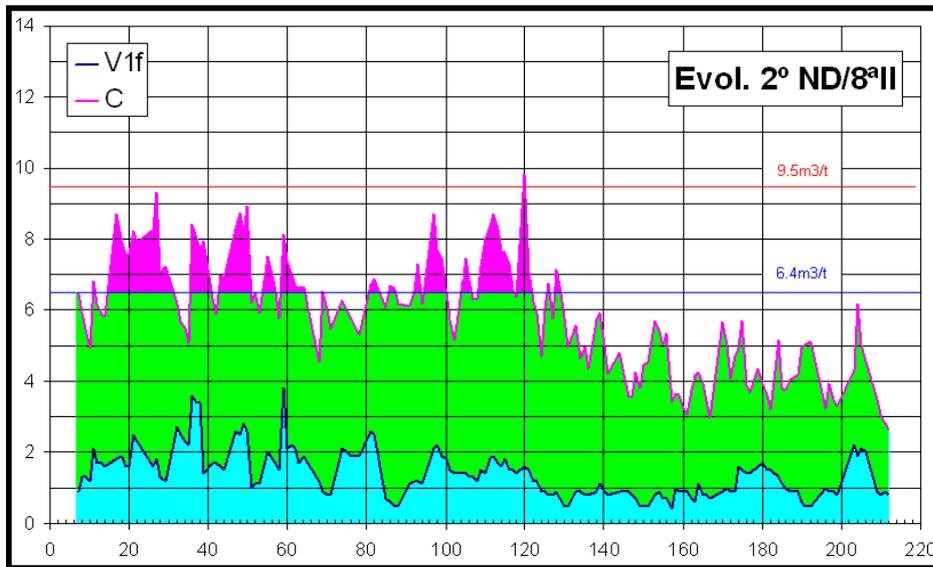


Figura 6.59.- Concentración de gas y V_1 (Nivel Derecha, 8ª II - Montsacro)

En la Figura 6.60 se puede ver que después del cuadro 120 se produce una caída importante del Q2. Antes, tanto el Q1 como el Q2 tenían importantes variaciones.

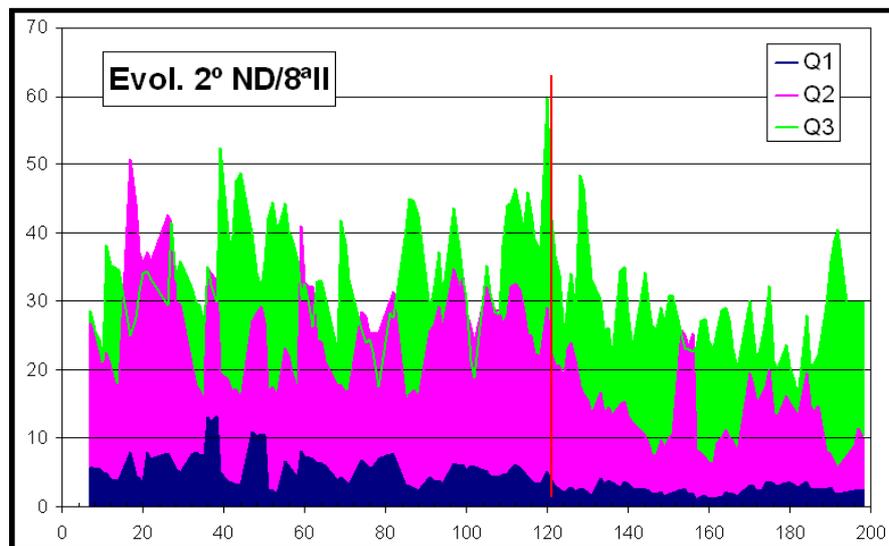
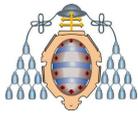


Figura 6.60.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (Nivel Derecha, 8ª II - Montsacro)



La Figura 6.61 muestra la posición relativa de las labores de ambas capas. En la zona no distendida de la izquierda (cuadros 10 a 66) el avance de la capa 8ª está influenciado por el sutirado del nivel 4º izquierda de la capa 7ª, con un desfase máximo de unos 23 metros, pero cuando se acaba el sutirado, la concentración se relaja.

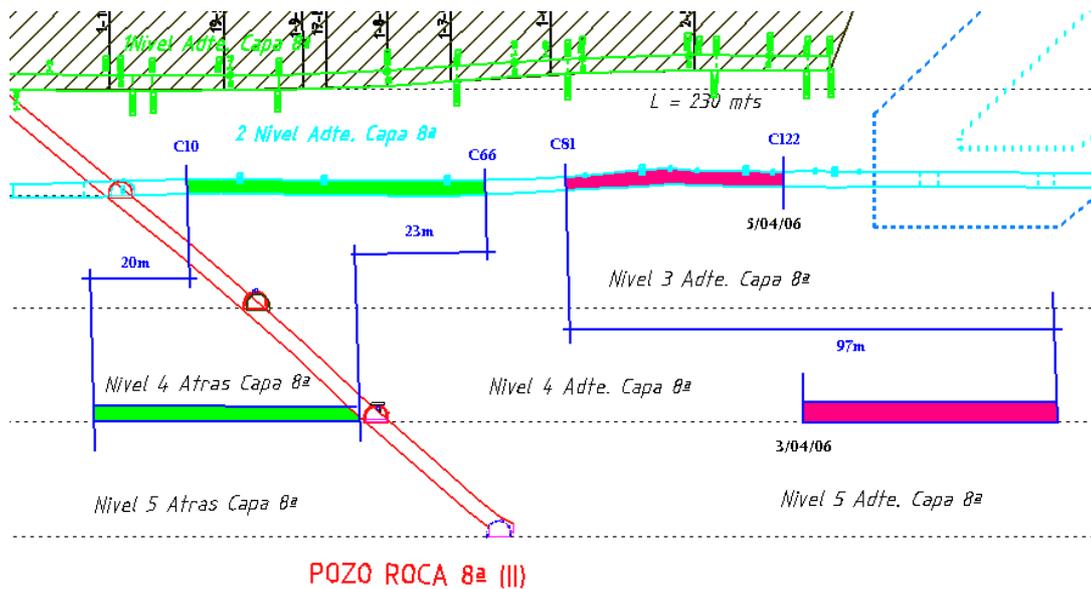


Figura 6.61.- Plano de labores (Nivel Derecha, 8ª II - Montsacro)

En la zona no distendida de la derecha (cuadros 81 a 122) el avance de la capa 8ª se cruza con el sutirado del nivel 4º derecha de la capa 7ª, la influencia comienza a una distancia en horizontal de unos 97m y que cesa justo en el momento que se cruzan. En este caso se puede decir que las ondas de sobrepresión de los sutirados inferiores reducen el efecto de distensión de la capa égida.

6.5.3 Avance del 4º Nivel Derecha de 8ª II del Pozo Montsacro

Este ejemplo permitirá observar el efecto del cruce entre un avance de la capa 8ª y dos sutirados, el del 5º nivel derecha de la capa 7ª y el del 3º nivel derecha de la propia capa. También se podrá observar la influencia de la cercanía del borde del panel de explotación. La Figura 6.62 muestra el gráfico de concentraciones.

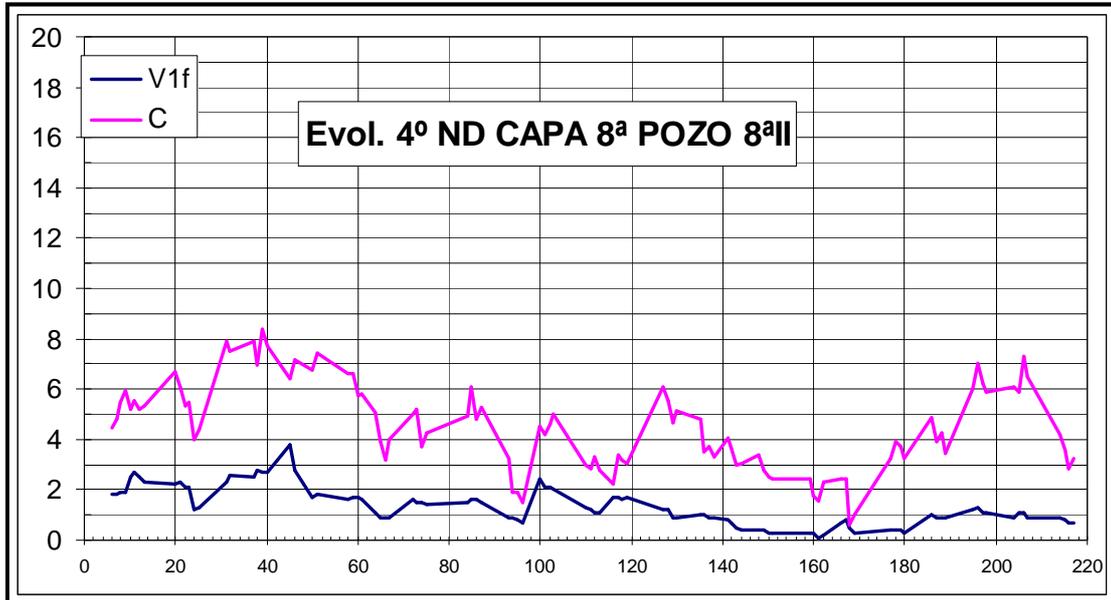
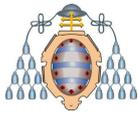


Figura 6.62.- Concentraciones de gas y V_{1f} (4º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro)

La curva superior, de color rosa, indica la concentración y se puede ver que no hay valores por encima de 9 m³/t, es decir, no hay zonas con sobrepresiones. Entre los cuadros 30 y 40 la relajación no es total, ya que corresponde al momento en el que pasa por encima del sutirado del 5 ND de la capa 7ª.

En la Figura 6.63 se representan las concentraciones Q1, Q2 y Q3.

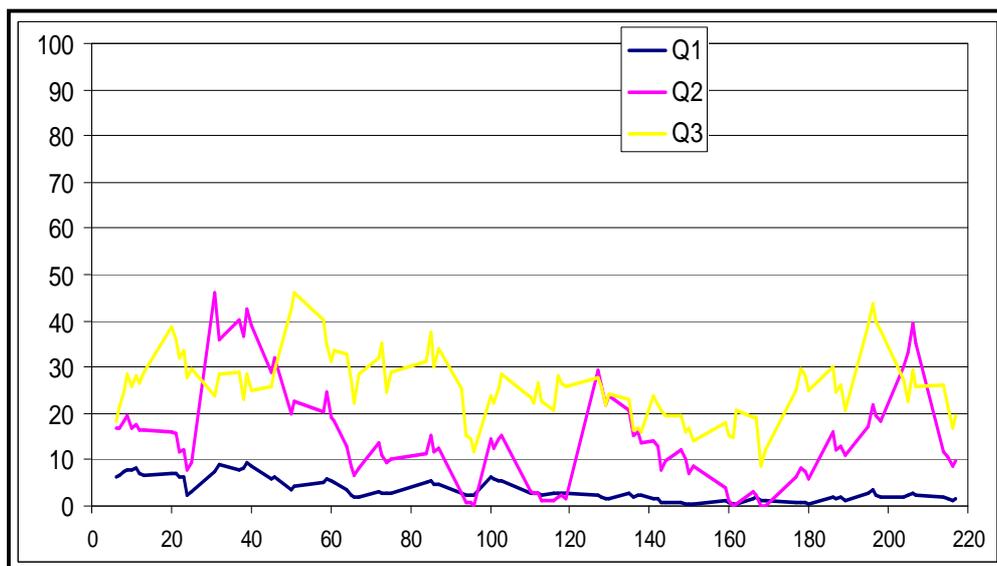
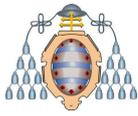


Figura 6.63.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (4º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro)



Se ve que el valor de Q2 aumenta considerablemente al llegar a ese punto justo en el momento del cruce con el sutirado en la 7ª.

Entre los cuadros 120 y 140 hay una zona de subida de Q2 con concentración baja, por lo que existe una ligera compresión. Esta zona coincide con el sutirado de la propia capa en el nivel 3D (véase la Figura 6.64).

A medida que se llega al final del nivel, en torno al cuadro 200, se observa una subida en el valor de Q2. Ésta subida se debe a la onda de sobrepresión del propio borde del panel de explotación que empieza 50 m antes y tiene su máximo unos 30 m después.

Por tanto, las variaciones de concentraciones no sólo dependen de los cambios de Q2 sino también de los de Q3. En general, se puede adelantar que los cambios de Q3 no parecen causar situaciones peligrosas, sino más bien corresponden a cambios en las condiciones del carbón. Cuando aumenta la resistencia, la fisuración es menor.

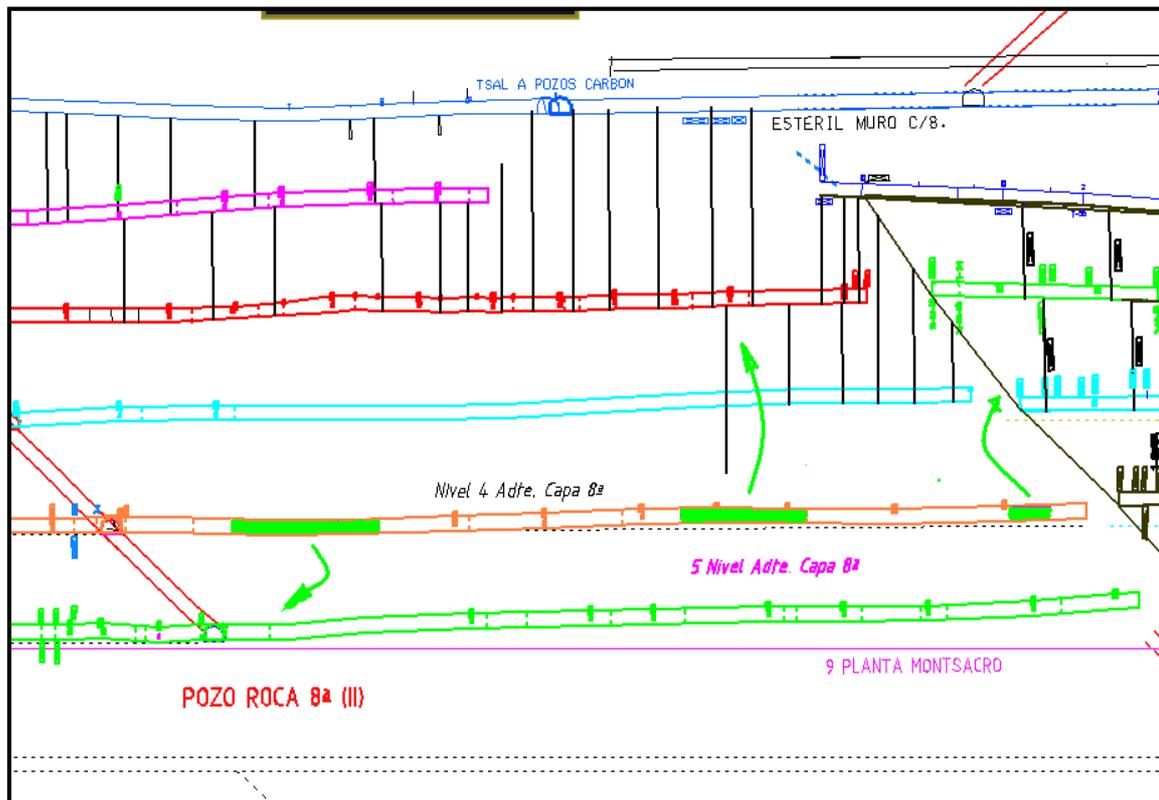
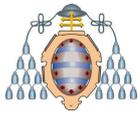


Figura 6.64.- Plano de labores (4º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro)



6.5.4 Avance del 5º Nivel Derecha de 8ª II del Pozo Montsacro

La concentración (Figura 6.65) evoluciona irregularmente a lo largo del nivel y no se estabiliza en una situación de relajación ni alcanza la situación de sobretensión. En este caso no hay capa égida activa, puesto que la última explotada se encuentra al mismo nivel.

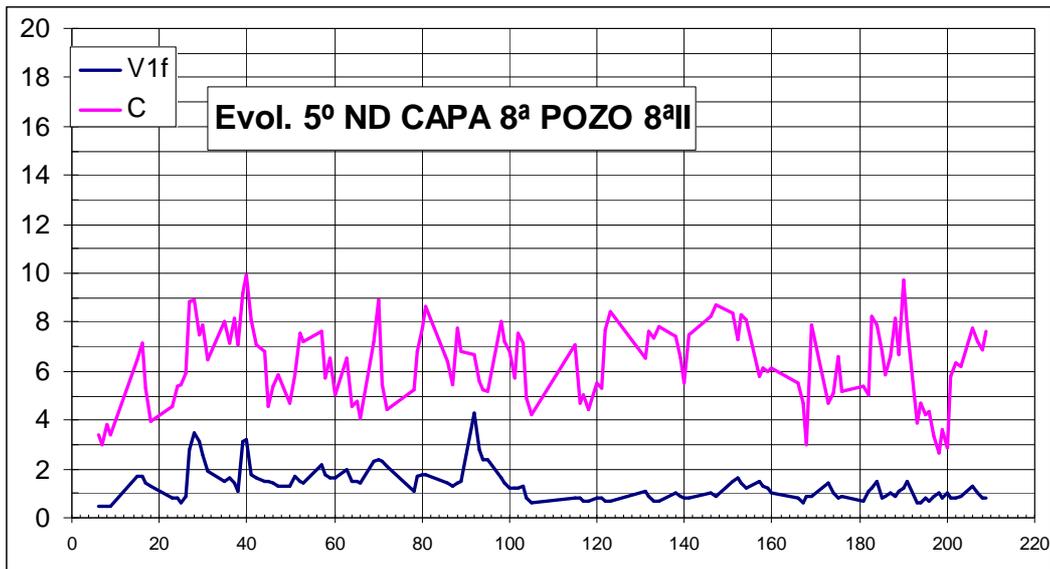


Figura 6.65.- Concentración de gas y V_1 (5º Nivel Derecha, 8ª II - Montsacro)

El 5º nivel derecha avanza cruzándose varias veces con el sutirado de su propia capa, aunque en este caso, contrariamente al anterior, estos cruces no se ven reflejados con claridad en la gráfica de concentración. En la evolución de Q (Figura 6.66) no se observan tendencias claramente definidas.

El comportamiento irregular sin alcanzar valores que indiquen sobrepresiones se explica en el hecho de que la capa égida solamente está explotada al mismo nivel de la explotación, es decir el nivel ha avanzado ligeramente por encima de la línea de presión natural, y por tanto las presiones no están tan relajadas, aunque sí lo suficiente para avanzar con seguridad.

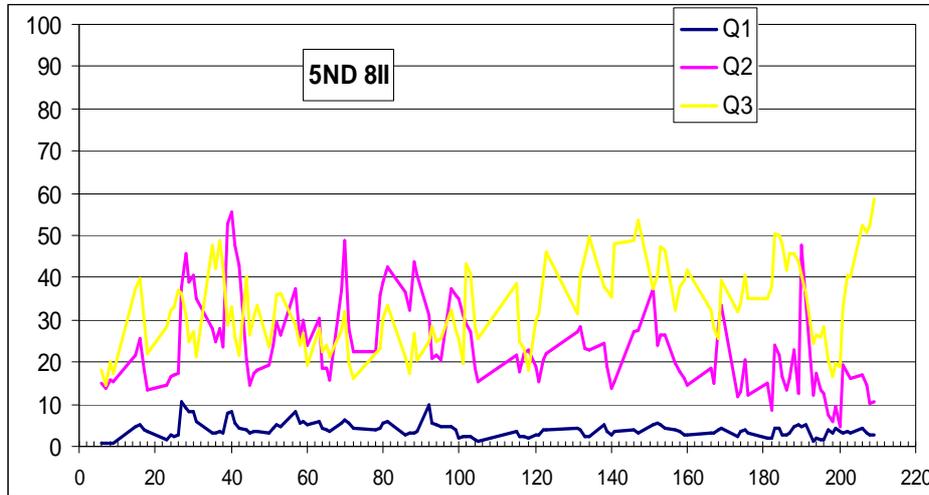
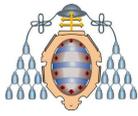


Figura 6.66.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (5º Nivel Derecha, 8ª II – Montsacro)

6.5.5 Avance del Nivel 2.3 Sur de la capa Julia del Pozo Sotón

El avance de este nivel comienza en el mes de Febrero de 2004 y el 14 de Julio se produce un FGD. La Figura 6.67 muestra la situación de los frentes de sutirado en las proximidades del avance. Se ve que justo encima hay un sutirado reciente que con poco más de 30 m de vano tanto en vertical como en horizontal aun estaba sin hundir.

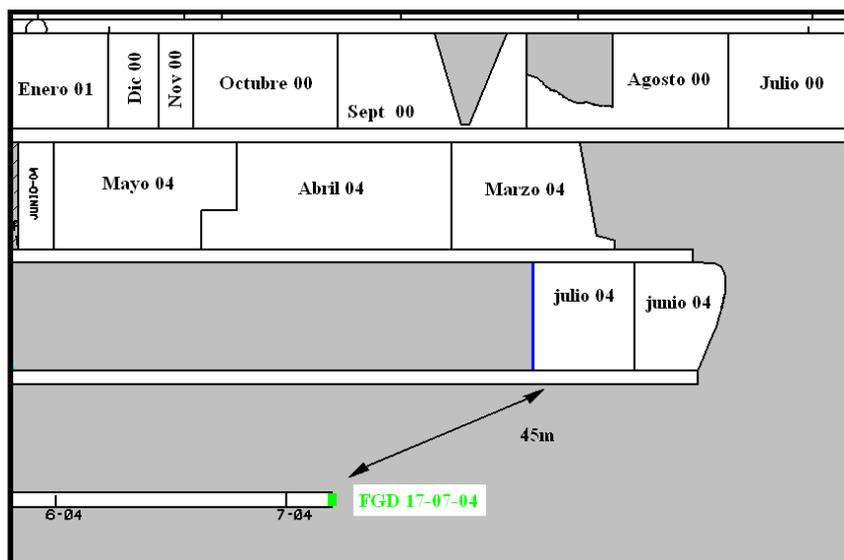
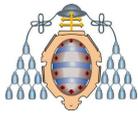


Figura 6.67.- Situación de los frentes de sutiraje y el avance (Nivel 2.3 Sur Julia - Sotón)

Desde los inicios del sutirado se generaban sobretensiones importantes que afectaban al frente de avance, que se encontraba a unos 45 m de distancia. Sin embargo,



también se había visto que los cambios de potencia incrementan la situación de riesgo y la zona en la que se produjo el FGD está ligada a un importante estrechón en la capa (véase la Figura 6.68).

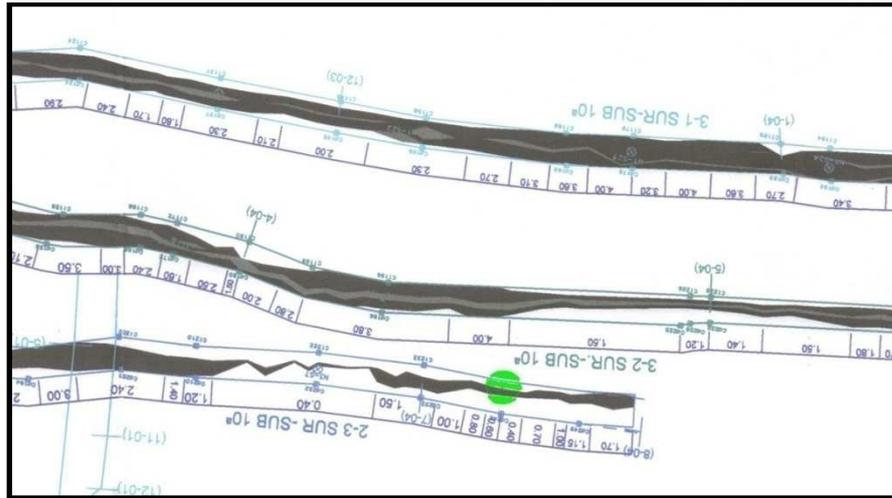


Figura 6.68.- Cambios de potencia en los niveles (Nivel 2.3 Sur Julia - Sotón)

6.5.6 Avance del Nivel 2.4 Sur de la capa Julia del Pozo Sotón

Durante el avance del nivel 2.4 Sur en la explotación de 10ª a Sub 10ª se producen dos FGD: uno el día 21 de Octubre 2004 y otro el día 5 de Enero de 2005. La Figura 6.69 muestra la situación de las labores de sutirado en ambos momentos y la zona que no estaba explotada.

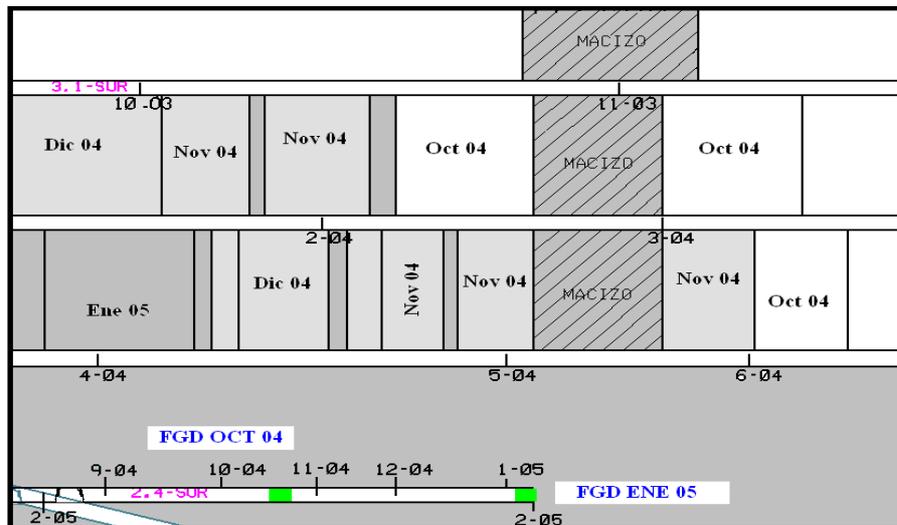
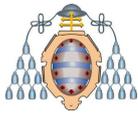


Figura 6.69.- Situación de los sutirajes y el nivel de avance (Nivel 2.4 Sur Julia - Sotón)



Se ve que en ambos casos el avance se estaba realizando bajo dos sutirados y con presencia de macizos dejados para proteger la infraestructura del 3º Corte. En esta situación, en la que también existen huecos, se generan sobretensiones importantes.

De la misma forma, las alteraciones de la potencia, con valores del orden de 0.7m, también contribuyeron a dificultar el avance, como se puede ver en la Figura 6.70.

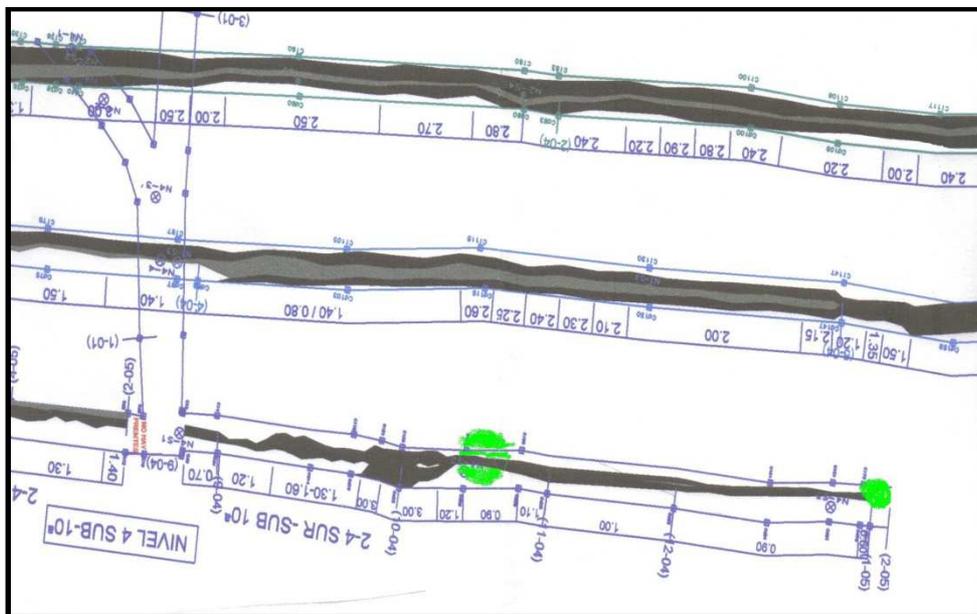


Figura 6.70.- Cambios de potencia en los niveles (Nivel 2.4 Sur Julia - Sotón)

6.5.7 Avance del Nivel 4.1 Norte de la capa Julia del Pozo Sotón

Este es otro ejemplo de un avance bajo una zona que no está completamente hundida. La capa Julia tiene ambos hastiales muy competentes de forma que a veces el hundimiento tarda mucho tiempo en ser total, especialmente cerca de macizos, fallas y trastornos en general. En este caso, se han recopilado una mayor cantidad de datos.

La Figura 6.71 muestra los valores de la concentración y de la velocidad de desorción, medidos en los primeros niveles de las explotaciones del 2º y 3º corte, que se encuentran situadas a la misma profundidad que las del 4º corte. Solamente una zona de unos 100 m en nivel 3.1 Sur ha avanzado con concentraciones consideradas no relajadas, mientras que el resto ha avanzado con concentraciones menores de 6 m³/t. ésta es la concentración que debería tener el 4º corte, que lleva varios años sin explotación y sin ninguna labor activa cercana.

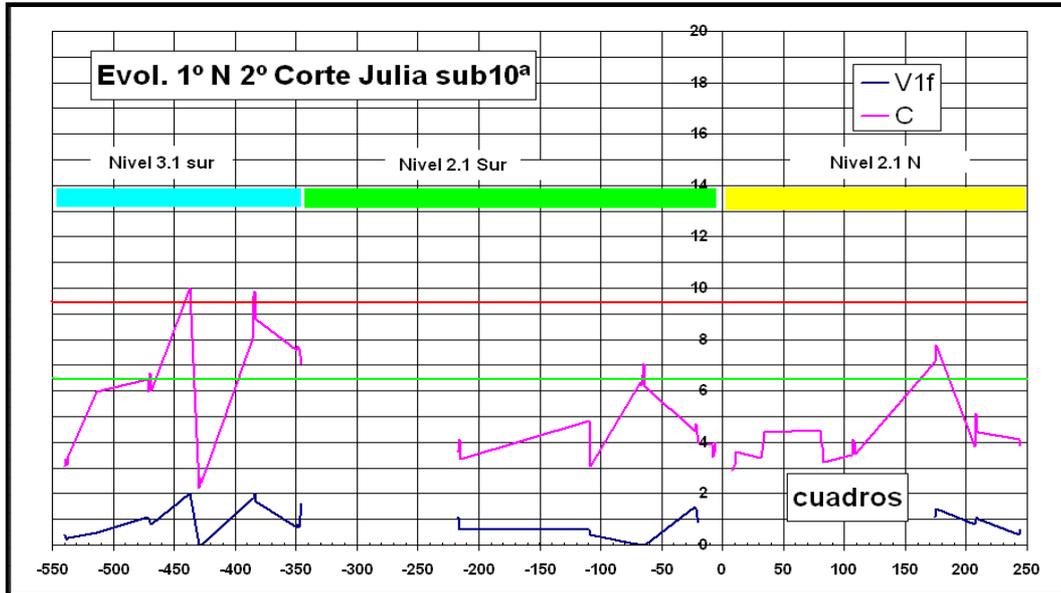
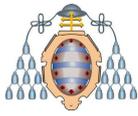


Figura 6.71.- Evolución de la Concentración de gas y V_1 (Nivel 4.1 Norte Julia - Sotón)

En la Figura 6.72 se puede ver cómo la concentración real ha sobrepasado, en gran parte de la longitud del nivel, los valores que se pueden considerar de sobrepresión. Hasta el cuadro 30 la concentración fue relajada y comenzó a subir, superando valores de $10 \text{ m}^3/\text{t}$, hasta el cuadro 190, donde de nuevo volvió a caer a valores todavía más relajados que al comienzo del nivel. Cada color corresponde a uno de los dos sondeos horizontales de control en cada uno de las dos venas de la capa.

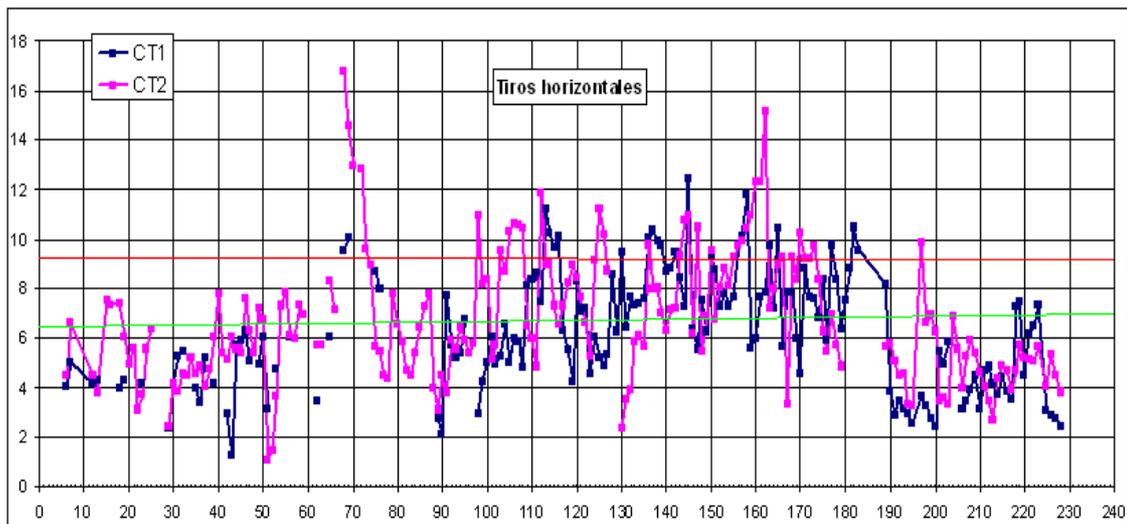
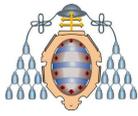


Figura 6.72.- Concentración de gas en las dos venas de carbón (Nivel 4.1 Norte Julia - Sotón)



La evolución de la concentración de gas en capa, en sus distintos apartados, va en esta misma línea. En la Figura 6.73, en uno de los dos sondeos, se observa un incremento notable de Q2, aproximadamente a partir del cuadro 70, y su disminución después del cuadro 180. La conclusión es que el avance se ha realizado bajo una sobretensión no producida por un macizo, ni por un cruce o ninguna otra labor. La causa está relacionada con el hundimiento incompleto de la explotación superior.

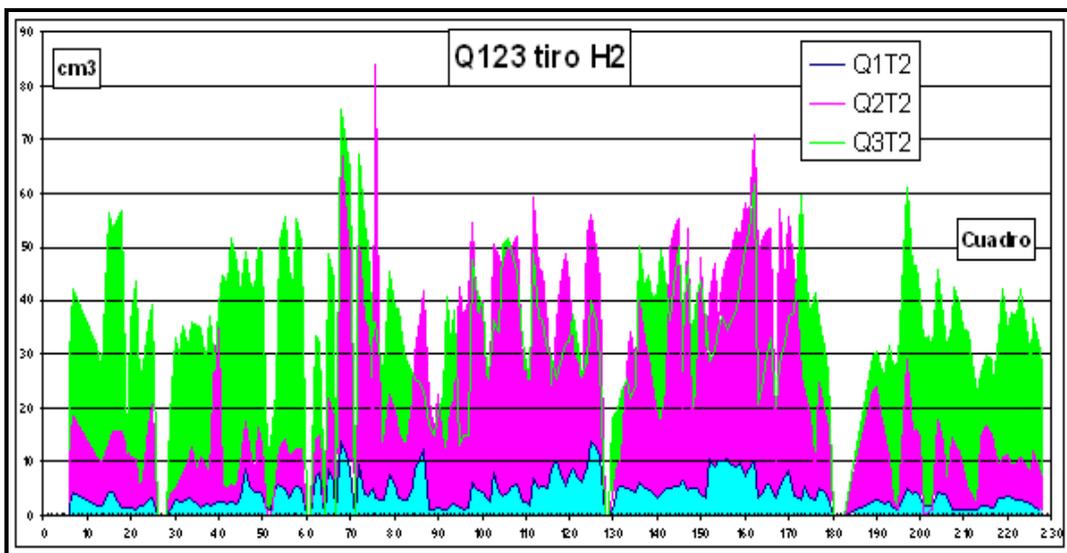


Figura 6.73.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (Nivel 4.1 Norte Julia - Sotón)

Este mismo efecto también se aprecia en los sondeos inclinados ascendentes que se hicieron durante el avance del nivel (Figura 6.74 y Figura 6.75).

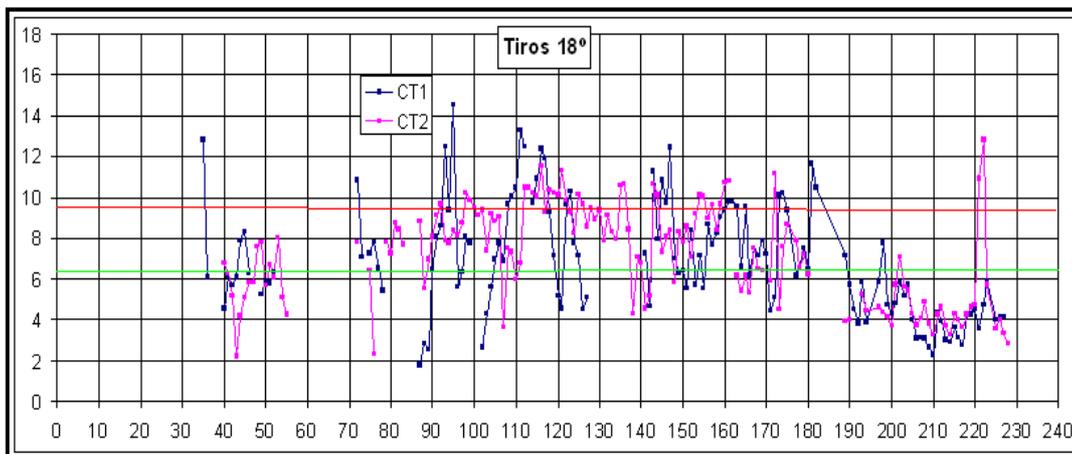


Figura 6.74.- Concentración de gas en las dos venas de carbón (sondeos ascendentes)

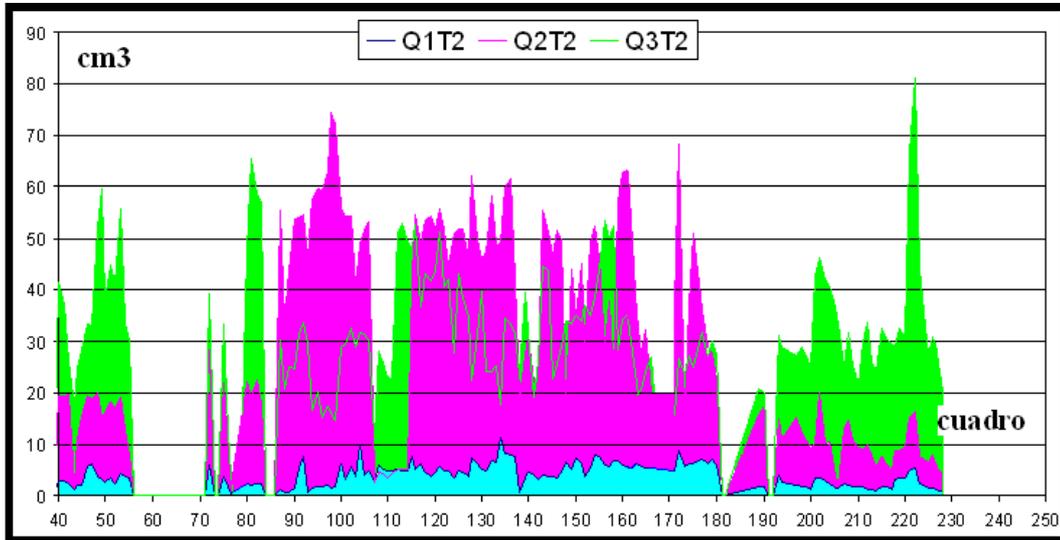
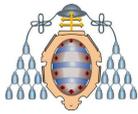


Figura 6.75.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (sondeos ascendentes)

La explotación superior se realizó con una altura de llave de aproximadamente tres niveles y estaba flanqueada por dos fallas. A partir del carbón cargado durante el sutiraje, se puede calcular la altura de carbón que se desprendió. En la Figura 6.76 se representa el hueco que se debía haber hundido.

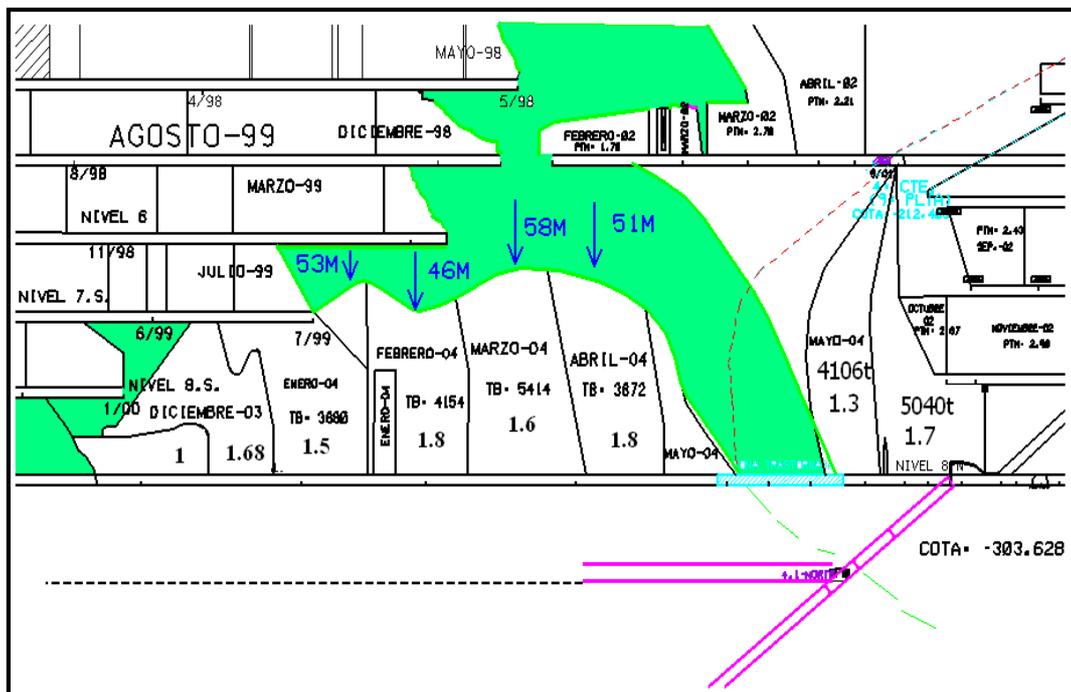
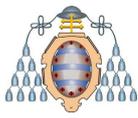


Figura 6.76.- Situación del sutiraje y el avance del nivel (Nivel 4.1 Norte Julia - Sotón)



Se pueden encontrar alturas de hasta 58 m sin hundir. A partir de este estudio, se puede saber que la capa Julia puede aguantar estos huecos sin hundir, especialmente cuando hay un apoyo tanto a la derecha como a la izquierda, por las fallas mencionadas. El avance a partir del cuadro 180, una vez sobrepasada esta situación, se realizó en una zona relajada, razón por la que se aprecia una caída importante de la concentración.

6.5.8 Avance del 1 Nivel Izquierda de la explotación 863 del Pozo San Nicolás

En este ejemplo se aprecia como las sobretensiones fueron tan elevadas que dieron lugar a una gran deformación previa de la zona a avanzar. Como se ha mencionado al hablar de las tensiones, la descarga de dichas tensiones se produce mediante la deformación de la capa de carbón, pero esta deformación, que idealmente se considera de tipo elastoplástico, se trata del hinchamiento de la solera que hay que cuantificar en profundidad. Normalmente se considera que son 10 m los que quedan alterados por el avance de la propia capa. Esta deformación, que en realidad es como una destrucción de la capa de carbón, afecta a la desgasificación del macizo más profundo.

La explotación de la capa 8ª, como ya se ha comentado, se lleva mediante el sistema de protección de capa 7ª que actúa como capa égida. El avance de un nivel se realiza cuando dos niveles de la capa 7ª se encuentran ya sutirados. Las condiciones de avance fueron muy similares a las del primer nivel izquierda de 8II, lo que significa que el nivel debería haber avanzado con concentraciones menores de 6 m³/t y con bajas velocidades de desorción. La gráfica de evolución (Figura 6.77) nos muestra que las condiciones reales estuvieron lejos de las esperables.

En la Figura 6.77 se pueden ver dos zonas claramente diferenciadas. Hasta el cuadro 120 las concentraciones parecen haberse relajado, aunque no por debajo de los 6 m³/t esperados. Al mismo tiempo, las velocidades de desorción que se detectan son muy elevadas, incluso en el avance del nivel llegó a producirse un FGD. Parece que alguna circunstancia haya contrarrestado el efecto relajante de la capa égida y que, además, haya inducido a una mayor fisuración de la capa de carbón y con ello a altas velocidades de desorción.

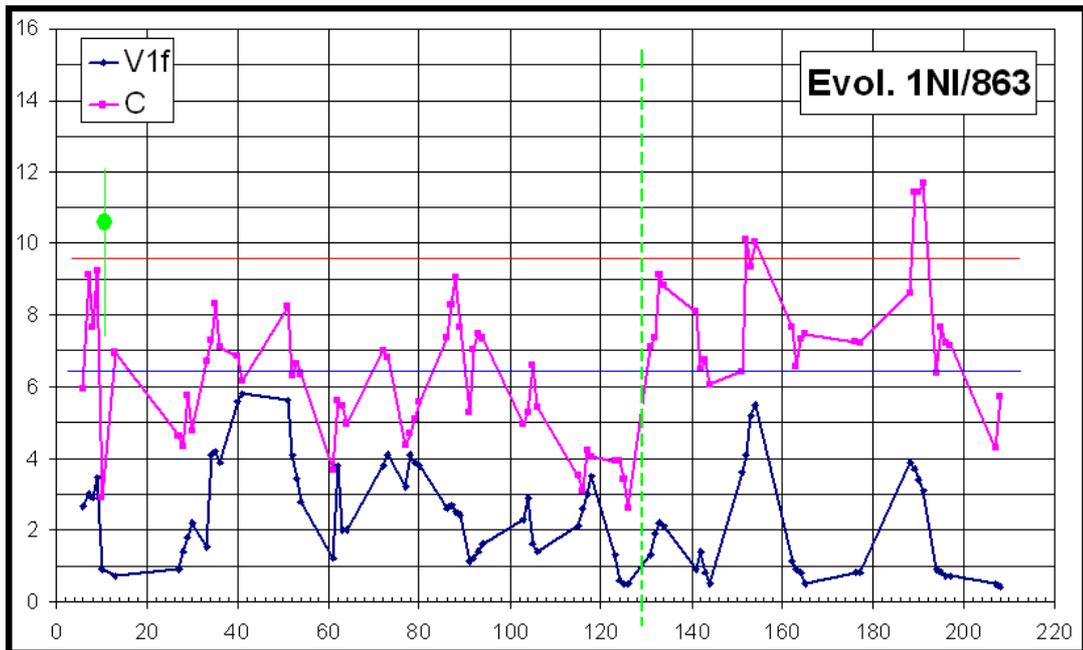
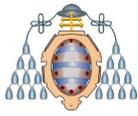


Figura 6.77.- Concentración de gas y V_1 (1 Nivel Izquierda, 863 - San Nicolás)

Al analizar las explotaciones cercanas se observó que había una explotación en la parte superior del 863 (denominada 84) que sufrió varios fuegos y como medida de protección se dejaron algunos macizos, para evitar que el fuego se propagase. Estos macizos hicieron de apoyo dando lugar a un hundimiento incompleto del sutirado. La certeza de la existencia de este hueco se comprobó cuando se declaró un fuego, con posterioridad, en la explotación de los niveles intermedios del 863. En esta ocasión se optó por la extracción controlada del carbón caliente para evitar la propagación del fuego y durante las tareas correspondientes se llegaron a extraer partes de los cuadros metálicos de los niveles intermedios de la explotación del 84, lo que demuestra que el hueco permaneció abierto varios años después.

Al mismo tiempo, la altura de llave, que normalmente es de 21m, en este nivel se redujo a 18 m. El avance se produce con una sobrepresión elevada y el punto de avance más cerca del máximo de las sobrepresiones, lo que da lugar a que el carbón esté muy fisurado y con velocidades de desorción elevadas.

Después del cuadro 120 hay otra zona diferenciada, que coincide con el límite de concesión de San Nicolás y Montsacro. En ella el hueco es menor y la sobrepresión ya no fue suficiente para fisurar el carbón aunque si suficiente para reducir la permeabilidad.



La Figura 6.78 muestra la evolución de la concentración de gas en capa, en sus distintos apartados, donde se pueden ver estas dos zonas diferenciadas.

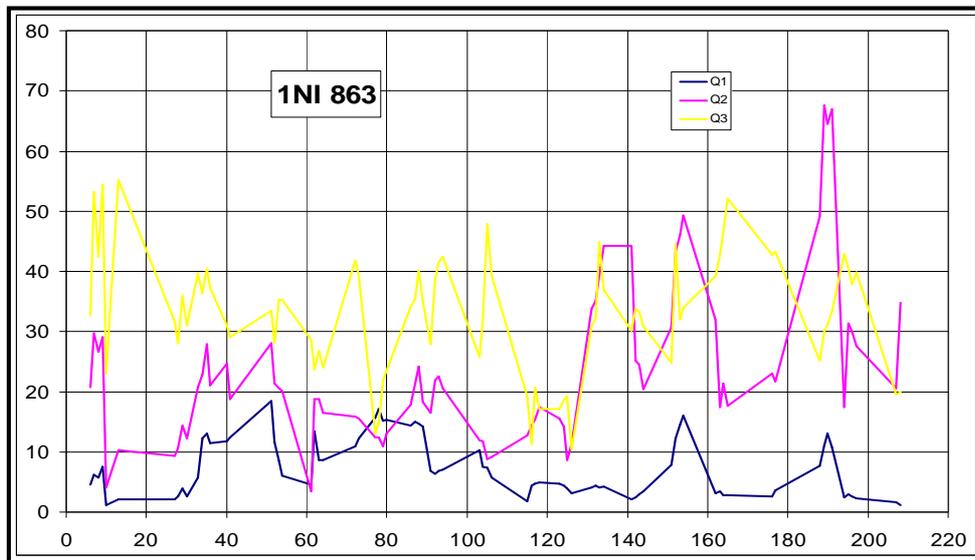


Figura 6.78.- Concentraciones Q1, Q2 y Q3 (1 Nivel Izquierda, 863 - San Nicolás)

La Figura 6.79 muestra la situación de la explotación en proyección vertical, y se pueden ver los distintos macizos de protección y la separación de los pozos.

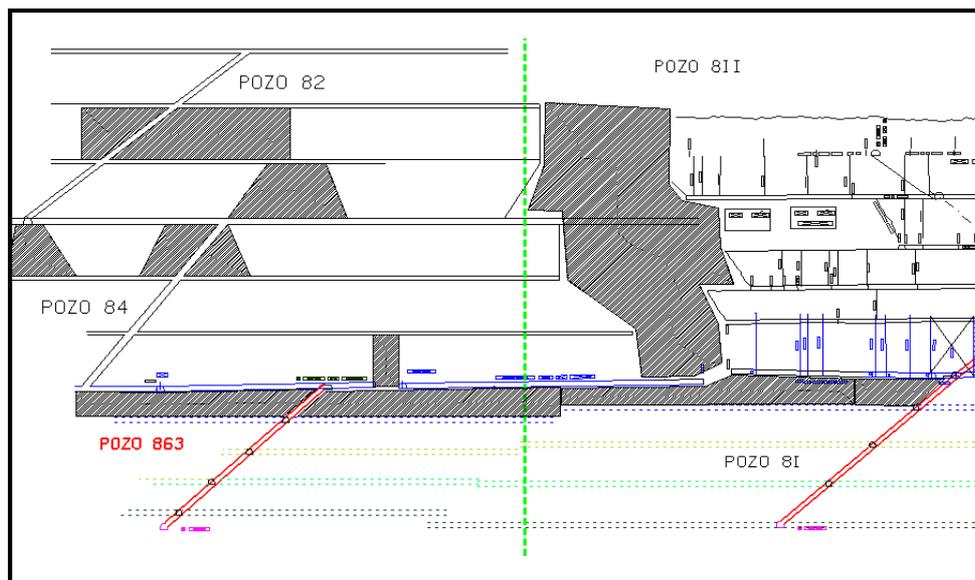
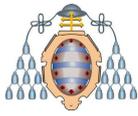


Figura 6.79.- Plano de labores (1 Nivel Izquierda, 863 - San Nicolás)



Por el lado de Pozo Montsacro también se observa este fenómeno, en la explotación de la zona del plano 8^{al}.

En la Figura 6.80 se pretende dar una idea intuitiva de cómo el hundimiento incompleto da lugar a la concentración de tensiones en el nivel inferior a pesar del efecto de capa égida (capa de la izquierda).

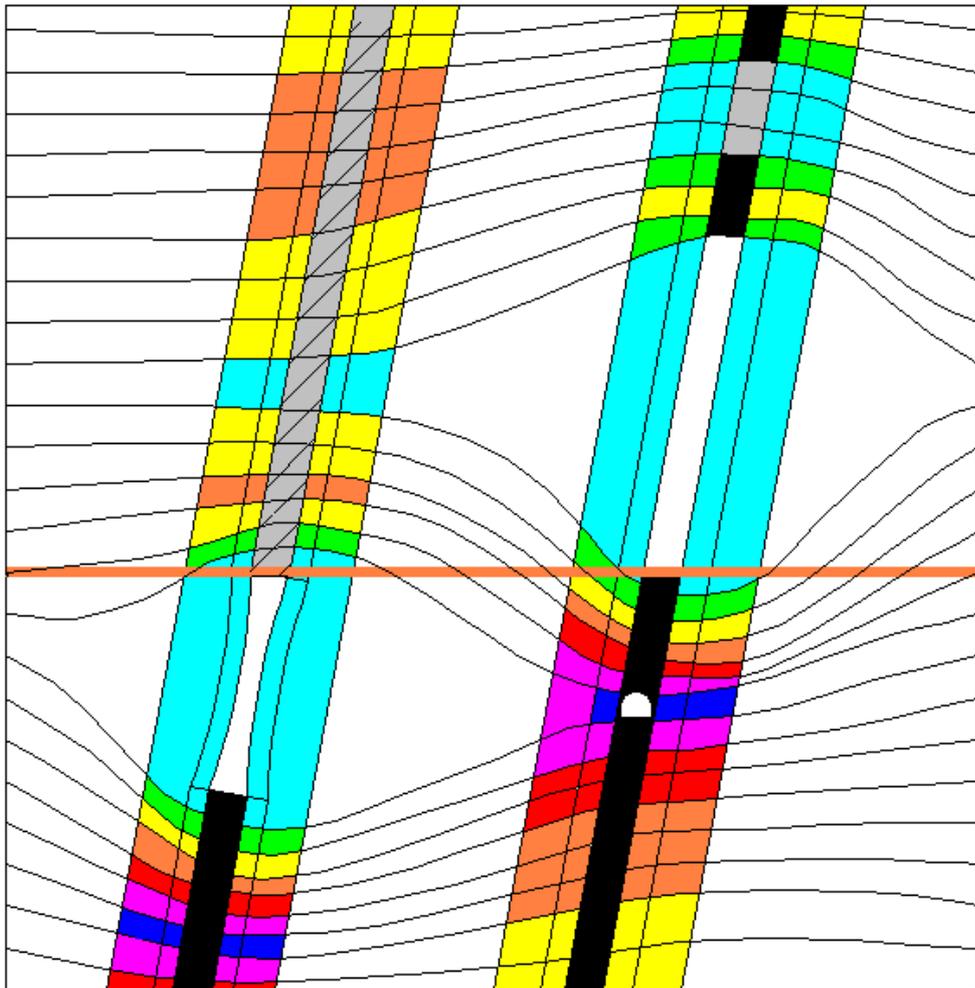
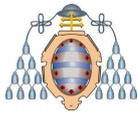


Figura 6.80.- Concentración de tensiones por hundimiento incompleto

6.5.9 Avance del 1 Nivel Derecha de la explotación 863 del Pozo San Nicolás

Este avance tuvo que atravesar una zona de sobrepresión de un macizo dejado en la capa 7^a para proteger el transversal TD, y sufrió cuatro FGD, tres de ellos en la



zona de proyección de dicho macizo (coloquialmente denominada “sombra”) y el cuarto en el cuadro 22.

En la Figura 6.81 se señalan como círculos verdes.

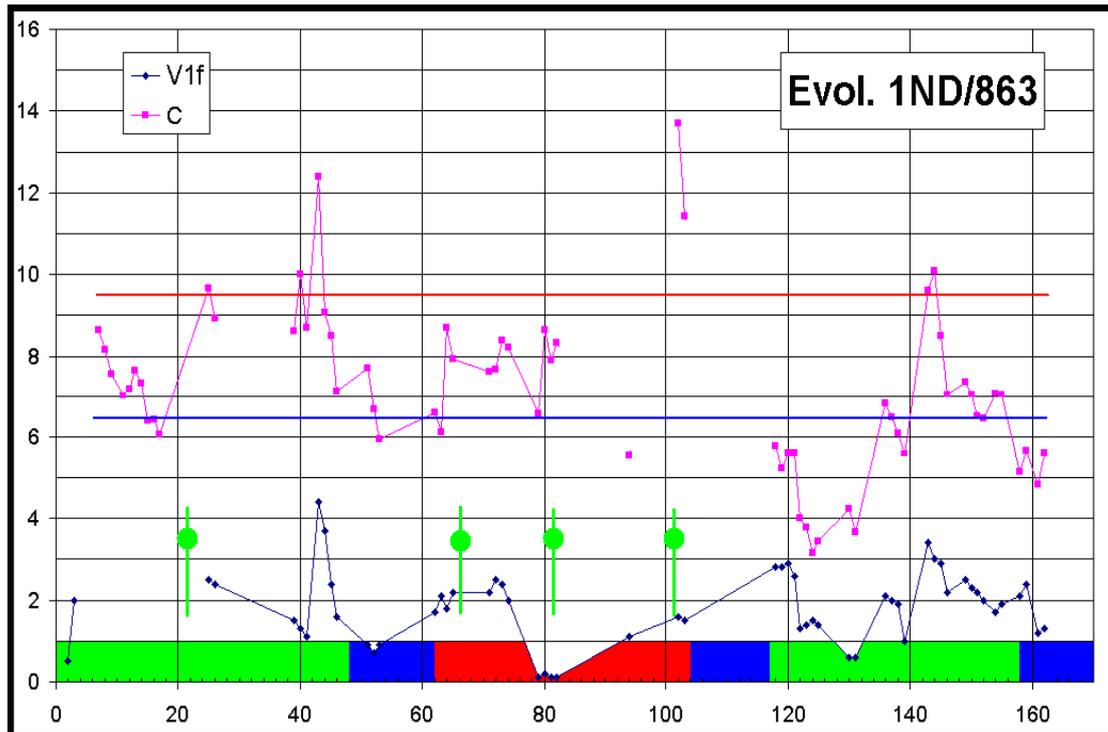


Figura 6.81.- Concentración de gas y V_1 (1 Nivel Derecha, 863 - San Nicolás)

La concentración relajada aparece después del cuadro 120, antes del cuadro 50 estaba explotada la capa égida en el mismo nivel, tras el cuadro 120 también estaba explotado el 2º nivel de la capa 7ª. En este avance, en la zona intermedia la explotación de un nivel en la capa 7ª no fue suficiente para relajar el nivel de la capa 8ª.

También se puede ver que en la zona de sobrepresión (rojo) no aparecen concentraciones elevadas como aparecían en el ejemplo del apartado anterior (8II 1ºNI), lo que se explica porque los FGD dejan una zona de unos 15 a 20 m desgasificada.

En el ejemplo anterior (apartado 6.5.8) se había visto que había un hueco no completamente hundido por encima que generó una sobrepresión en el avance de ambos niveles. Pero en este caso hay una fuente de sobretensión adicional. Se trata del sutirado del 2º nivel izquierda de la capa 7ª, cuya posición se muestra en la Figura 6.82.

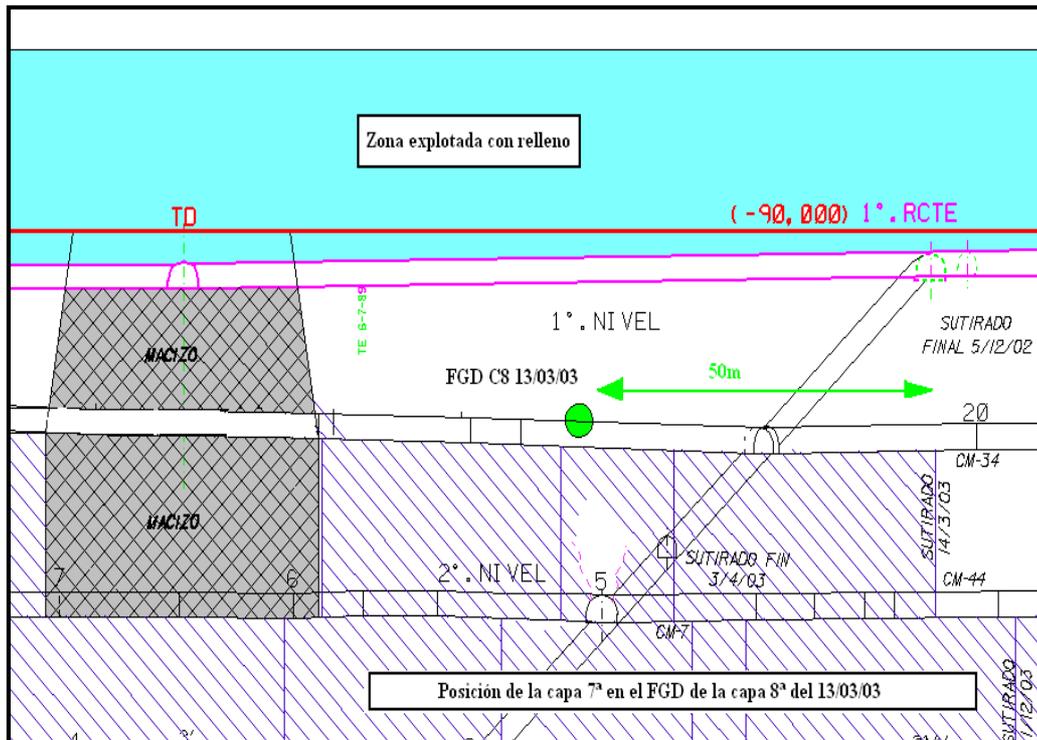
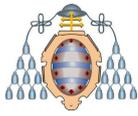


Figura 6.82.- Situación del nivel y labores próximas (1 Nivel Derecha, 863 - San Nicolás)

En los ejemplos anteriores ya se había detectado que los cruces de labores pueden comenzar a afectar a distancias entorno a los 100 m. Este nivel se encontraba a 50 m de distancia de la zona donde se produjo el FGD, es decir, hay varios efectos que se han sumado para generar la situación de riesgo.

Durante la explotación de esta zona, se realizó una investigación más detallada, en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Oviedo (GIT). A las mediciones habituales se añadieron sensores para medir las tensiones en los recortes.

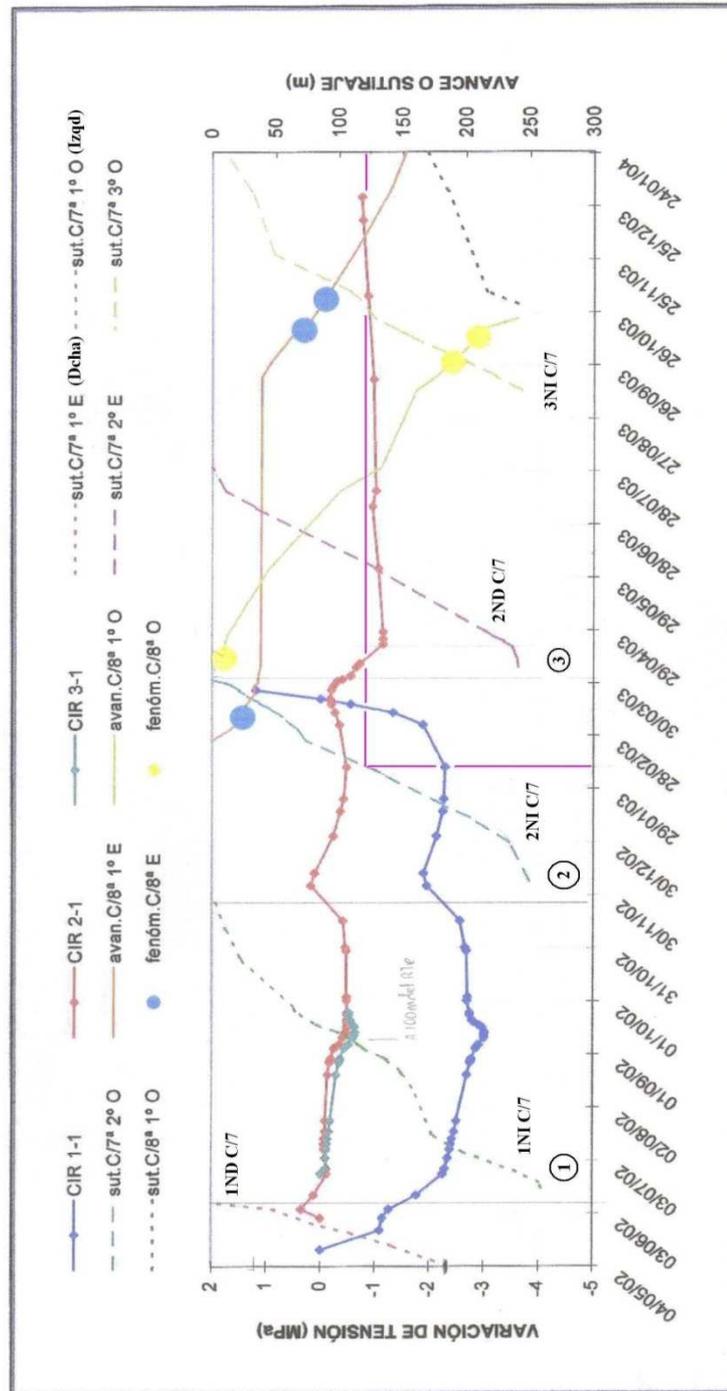
En la figura siguiente se muestran, en líneas continuas, los resultados de dichas mediciones combinados, en líneas discontinuas, con las posiciones de los frentes de sutirado. La línea azul representa la célula de presión situada en el primer recorte. A partir de febrero del 2003 comenzó a detectar notables incrementos de la presión. Esto se produjo, indicado por las coordenadas en azul, precisamente en el momento en el que el frente de sutirado de la explotación del 2NI de la capa 7ª se encontraba a unos 125m de dicha célula.



Medición de tensiones con CIREX en el 863

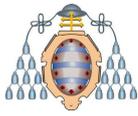
Las cirex están puestas en el fondo del primer recorte con distintos ángulos

- 1 - No tiene porque significar que el sutirado de la 7ª relaja los hastiales, sino que el carbón de la 8ª ceda
- 2 - A unos 125m ya empieza a cargarse
- 3 - La presión se reajusta en un mes



Medidas de tensión de las células instaladas en el pozo 863 de San Nicolás (1º nivel)

Figura 6.83.- Evolución de las tensiones (1 Nivel Derecha, 863 - San Nicolás)



Todas estas fuentes de sobretensión limitaron el efecto relajante de la capa égida haciendo que, incluso fuera de la “sombra” del macizo de la capa 7ª, el nivel se avanzara en condiciones complicadas. A esta situación se unieron las propias limitaciones del sistema de explotación de capa égida. Por una parte, la capa 7ª, en las plantas superiores estaba rellena, por lo que tras varios años se puede considerar que toda la región se ha re-equilibrado. Por otro lado, de acuerdo a los criterios mineros rusos, para que la capa égida comience a tener efecto, la zona explotada debe estar a una distancia que, como mínimo, sea igual al doble de la distancia a la capa que se desea proteger.

De este ejemplo se puede concluir que en el avance del primer nivel derecha del 863 no había suficiente efecto de capa égida hasta que se llegó al cuadro 120, cuando ya había dos niveles sutirados de la capa 7ª.

6.5.10 Avance del Nivel 3 Derecha de 8ª I del Pozo Montsacro

El avance del Nivel 3 Derecha de 8ª I es un ejemplo de varios efectos simultáneos entre los que se encuentra el cruce de la capa consigo misma. En la Figura 6.84 se muestra la variación de la concentración y de la velocidad de desorción a lo largo de todo el avance.

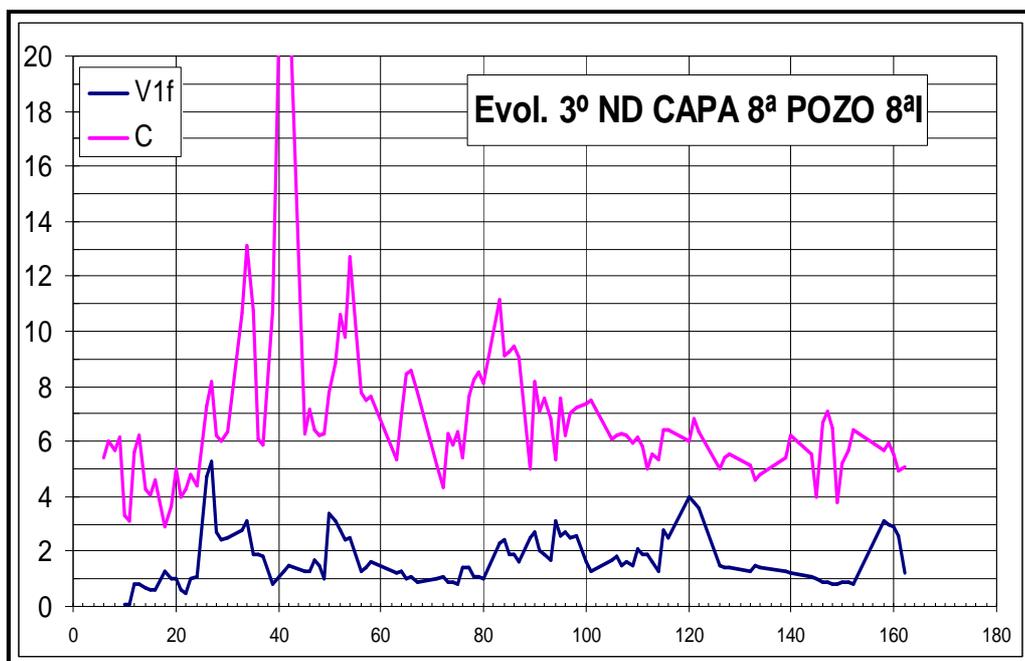
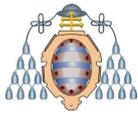


Figura 6.84.- Concentración de gas y V_1 (Nivel 3 Derecha, 8ª I - Pozo Montsacro)



A partir del cuadro 30 y hasta el 50 la concentración se eleva considerablemente siendo los valores muy superiores a $9 \text{ m}^3/\text{t}$. Alrededor del cuadro 85 ocurre lo mismo, también se alcanzan valores de concentración elevados llegando incluso hasta $11 \text{ m}^3/\text{t}$, lo que indica que en estos tramos se avanza en situación no relajada.

Para explicar el porqué de esta situación hay que observar la Figura 6.85, donde se muestra la posición de las labores.

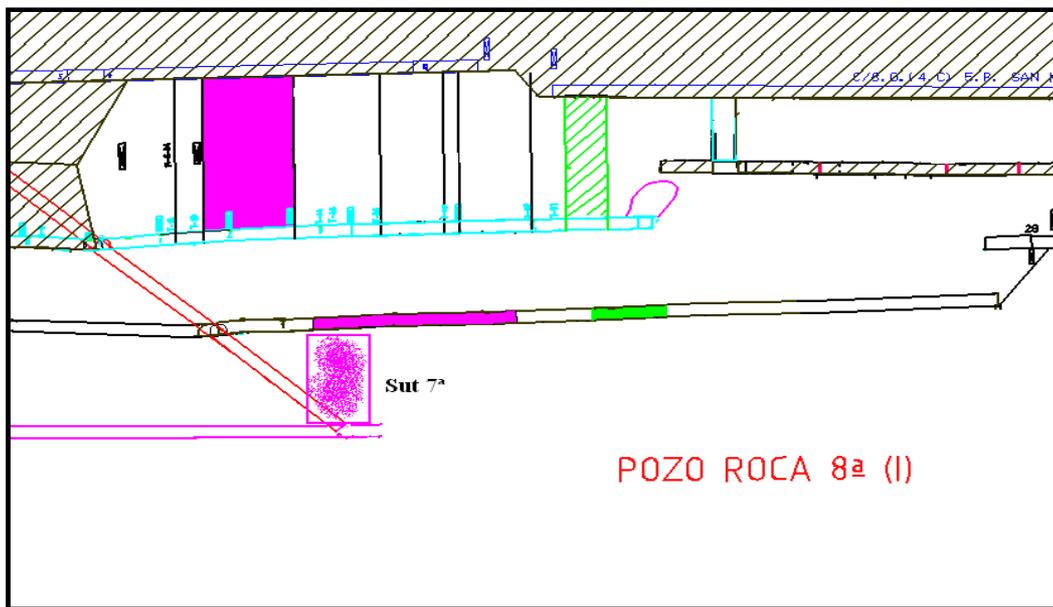
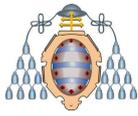


Figura 6.85.- Situación de las labores (Nivel 3 Derecha, 8ªI - Pozo Montsacro)

Al mismo tiempo que se avanza este nivel se está sutirando el inmediatamente superior, así como la capa 7ª. Esto crea, por tanto, una zona de sobretensiones cuya “sombra” alcanza el nivel 3, durante el avance en el tramo que va desde el cuadro 30 hasta el 50. A partir del cuadro 85 el avance pasa por debajo de un macizo sin explotar en el nivel superior, lo que conlleva problemas, como se ve en los datos de concentración (Figura 6.84).

6.5.11 Golpe de techo durante el sutirado Nivel 2.3 N Capa Julia del Pozo Sotón

Este es un ejemplo en el que sólo han intervenido las tensiones del terreno. Se trata del incidente, ocurrido el 4 de septiembre de 2005, durante las labores de sutirado del Nivel 2.3 Norte entre las plantas 10ª y Sub10ª. Este nivel no presentó ningún tipo de problema durante el avance, aunque sí se apreciaron cambios de las concentraciones



durante el avance, en la sombra del hueco dejado por el sutirado del nivel superior, pero sin alcanzar valores importantes. Sin embargo durante el sutirado se comenzó a formar un hueco flanqueado por una falla y una serie de macizos sin explotar dejados para proteger el 2º Corte. Este hueco fue aumentando de tamaño hasta que el vano fue lo suficientemente grande para afectar el frente de sutirado antes de sufrir su propio hundimiento. La Figura 6.86 muestra la situación de las labores representando en azul el carbón sin explotar así como los huecos dejados.

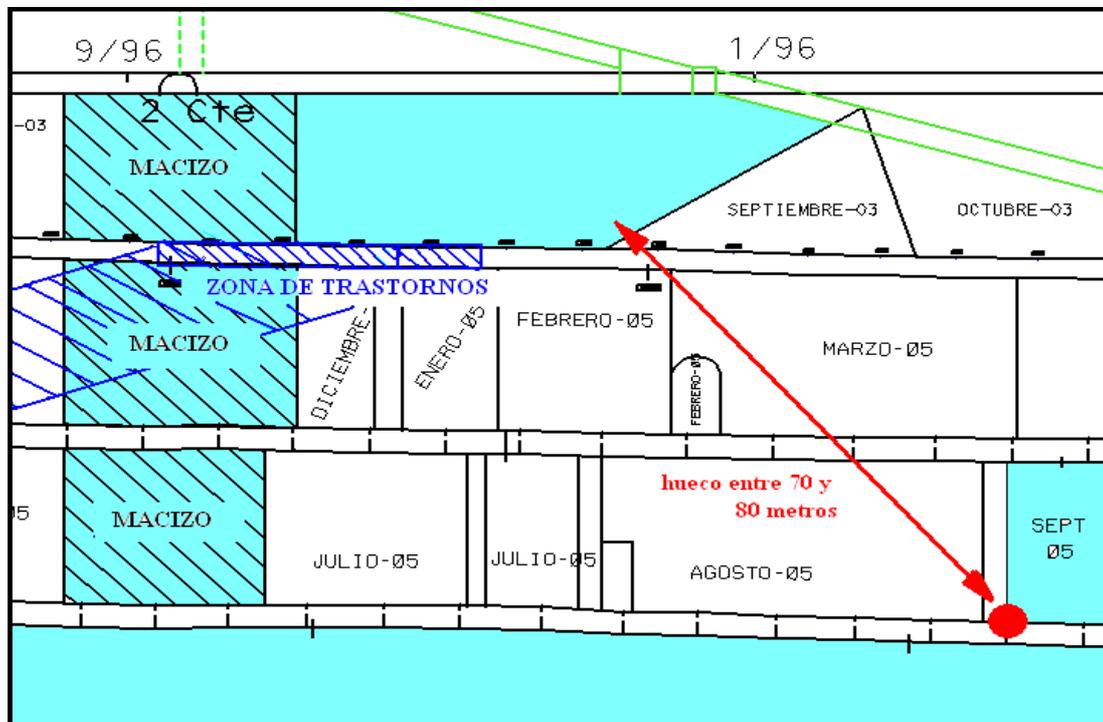
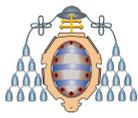


Figura 6.86.- Situación de las labores (Nivel 2.3 Norte, Capa Julia - Pozo Sotón)

La línea roja muestra el vano que se formó previo al golpe de techo y que se encontraba entre 70 m y 80 m. El golpe de techo consistió en una fuerte convergencia de un tramo de unos 20 m desde el frente de explotación hasta una montadura que había ocurrido durante el avance. Estos cuadros sufrieron una fuerte convergencia tanto horizontal como vertical, sin perder su posición relativa, ya que la entibación estaba formada por cuadros metálicos cerrados por tablonés de madera de 3 cm de espesor. Hubo postes de cuadros que se separaron 65 cm del hastial y el carbón se derrabó por el hueco creado en la convergencia. Asimismo se observó que la capa de carbón sobresalía de los hastiales como si hubiera sido comprimida. Solo quedó afectada esta zona,



mientras que la parte ya sutirada no sufrió deformaciones. La presión generada por el hueco fue tan grande que la esquina del macizo que estaba debilitada por una montadura no resistió mientras que el resto si lo hizo.

Esta situación se volvió a repetir en el mismo nivel, de nuevo otra falla paralela a la anterior creó un nuevo hueco en forma triangular que fue creciendo hasta generar el mismo nivel de sobretensión que el hueco anterior. En este caso ya se habían tomado medidas y se colocaron puntales en los primeros cuadros del nivel para fortalecer la posible zona de riesgo. Cuando el sutirado llegó hacia el cuadro 10 se incrementó la convergencia de los cuadros, aunque no de forma, pero sí a lo largo de varios días. La Figura 6.87 muestra esta situación, el triángulo rosa indica el hueco que se va creando a medida que progresara el sutirado.

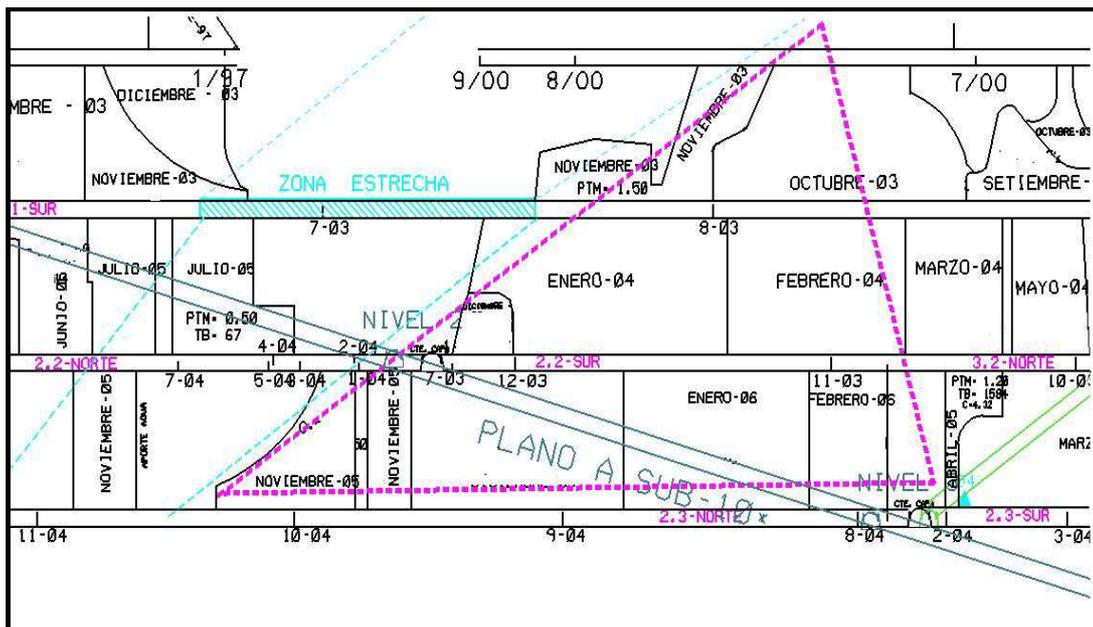
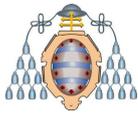


Figura 6.87.- Situación de las zonas sutiradas (Nivel 2.3 Norte, Capa Julia - Pozo Sotón)

Como dato adicional se puede comentar que el plano de servicio de esta explotación sufrió una fuerte y continua convergencia especialmente, entre el 1º y el 2º Nivel, que obligó a su reparación varias veces. En la figura anterior también se puede ver que esta zona coincidía con la que había quedado sin explotar. En esta zona se concentraron las tensiones generadas por los huecos del sutirado y acabaron afectando al plano.



6.6 Conclusiones de los trabajos realizados en mina

La situación de riesgo de FGD se produce cuando se combina un alto gradiente de presión de gas con un estado de equilibrio inestable en las tensiones que están reteniendo el carbón.

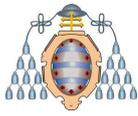
En la Figura 6.88 se resumen todas las variables que intervienen en un FGD.



Figura 6.88.- Resumen de las variables que intervienen en un FGD

Durante el desarrollo de las labores de una explotación se pueden encontrar zonas que presentan un riesgo importante de generar un FGD, debido a las situaciones particulares en las que se encuentran, relacionadas, en general, con la concentración de tensiones y el estado del carbón.

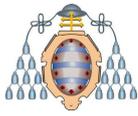
- **Zonas con alta concentración de tensiones.** Se puede producir por la propia profundidad, por cambios de potencia o por otras labores cercanas que las inducen. Esto da lugar a una reducción de la permeabilidad, con lo que se reduce el flujo salida de gas y aumentan el gradiente de presiones del terreno y el de



presiones de gas. En esta situación, un pequeño efecto iniciador podría hacer que el equilibrio inestable se rompiera y se produjera la liberación rápida de la energía acumulada, lo que generaría un FGD.

- **Zona con el carbón muy fracturado.** Se puede producir por la cercanía a una falla, por cambios importantes de potencia o por otros trastornos geológicos. En estas zonas su resistencia mecánica es menor y no se necesita mucha tensión para alcanzar la inestabilidad. Al mismo tiempo, el carbón tiene mayor superficie específica, lo que hace que se acumule, para una misma presión de gas, una mayor cantidad de metano que en el resto del macizo. En esta situación, se podría desencadenar un FGD, en las mismas condiciones que en el caso anterior.

Una de las conclusiones que se puede sacar de todo lo expuesto, es que el gas alojado en las fisuras, que se puede asociar a las fracciones Q1 y Q2, es el que más fácilmente y primero se escapa. Por tanto, al acercarse a zonas de sobrepresión, será el más sensible a la disminución de permeabilidad. Esta situación se detectará por un incremento de la concentración de gas, que se manifestará, fundamentalmente, en un mayor porcentaje de las citadas fracciones, siendo, en la mayor parte de los casos, la fracción Q2 la que más se incrementa.



7 MEDIOS DE PREVENCIÓN ENSAYADOS EN MINA

7.1 Inyección de agua

La inyección de agua es un método, denominado local, utilizado en la prevención de FGD. Como todo método, busca la distensión y desgasificación, en este caso, del frente de preparación. Este es el método tradicionalmente utilizado en HUNOSA en los últimos años. En este apartado se tratará de explicar cómo funciona y porqué, en algunas ocasiones, su eficacia disminuye tanto, hasta llegar al riesgo de producirse un FGD.

El hecho de inyectar agua en el carbón aporta las siguientes ventajas:

- El carbón mojado distensiona más fácilmente que si estuviera seco. Esta afirmación se puede comprobar observando los gráficos de deformación-tensión correspondientes a un carbón seco (izquierda) y el mismo carbón húmedo (derecha).

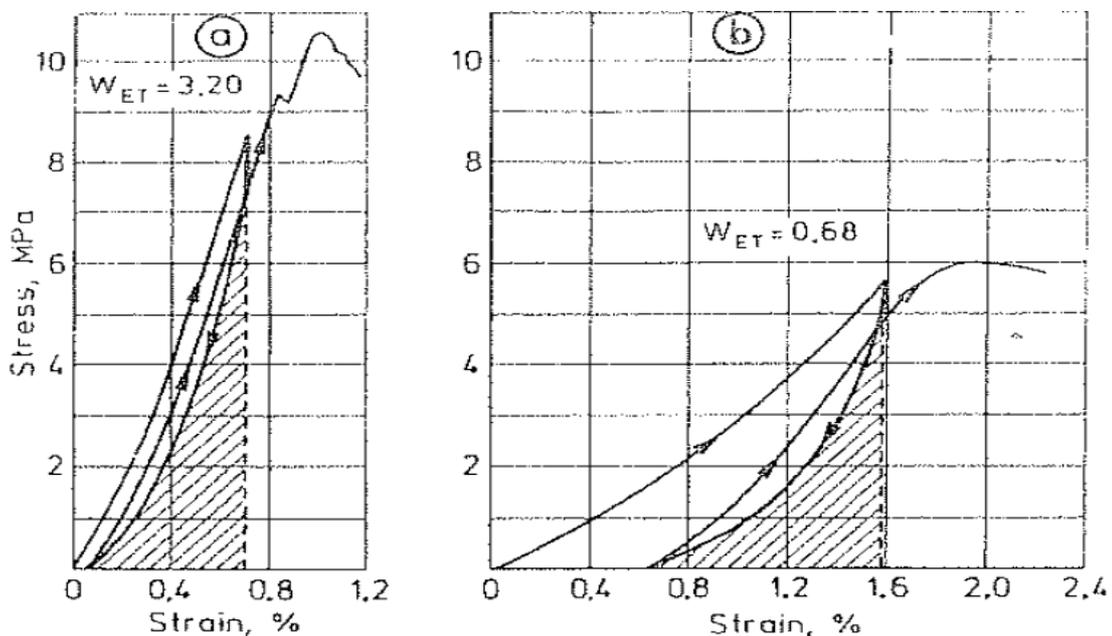
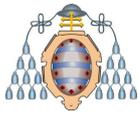


Figura 7.1.- Gráficos tensión-deformación

El carbón húmedo tiene más capacidad de deformarse, lo que implica una mayor relajación de tensión que si estuviera seco. Por tanto cuando se inyecta agua se está ayudando a que la zona empapada se deforme más fácilmente, alejando el pico de sobrepresiones, es decir, aumenta la zona de frenado y se aleja la zona de empuje.



- El carbón, cuando presenta humedad, es más consistente que cuando está seco. La idea es que una humedad suficiente es buena para incrementar la estabilidad, pero una humedad excesiva puede arrastrar el carbón. De ahí que en la técnica de inyección haya que cuidar la cantidad de agua que se utiliza.
- El carbón húmedo tiene menor capacidad de sorber gas, por lo tanto, al inyectar agua en profundidad se produce el desprendimiento de parte del gas adsorbido, mientras que la otra parte se desplaza hacia el interior del macizo. En la Figura 7.2 se puede ver la influencia de la humedad sobre la adsorción en un carbón ensayado de la Capa Julia del Pozo Sotón.

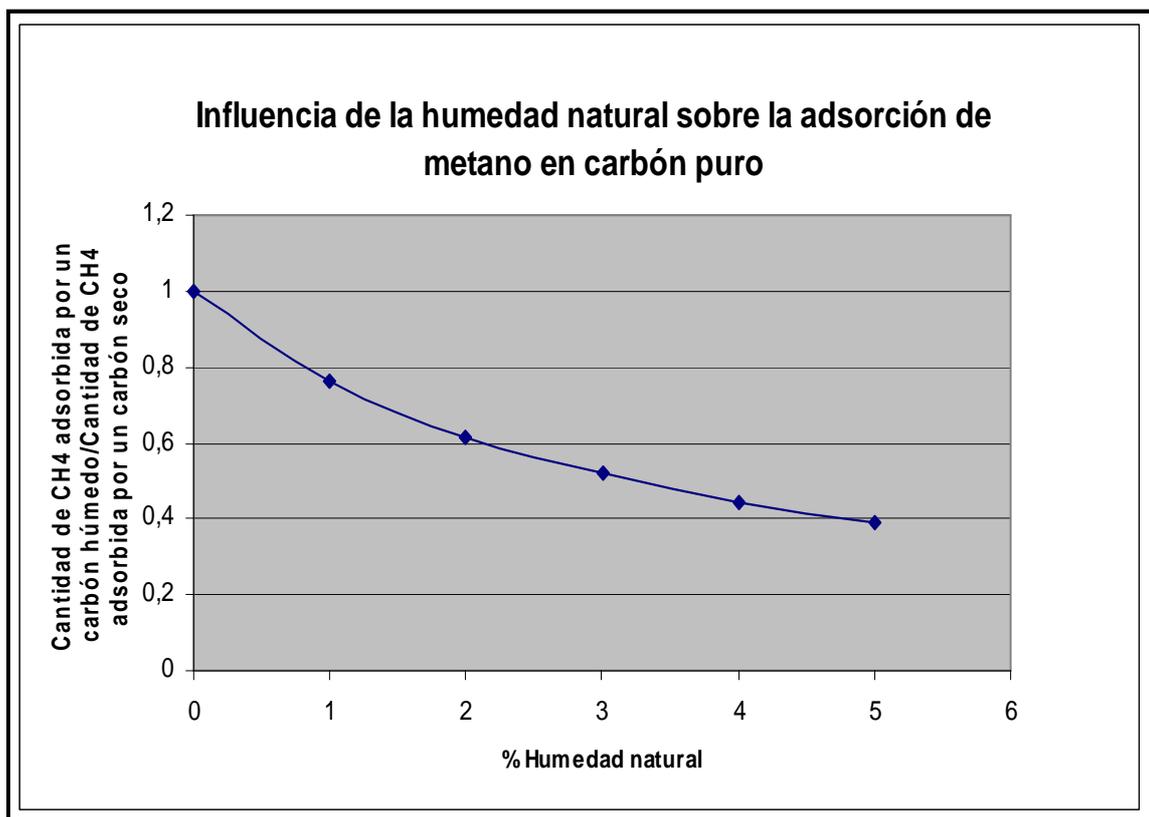
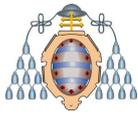


Figura 7.2.- Influencia de la humedad en la adsorción

La relación entre la capacidad de adsorción y la humedad contenida en el carbón se ha descrito en el Apto. 2.2.3.1.



7.1.1 Procedimiento de inyección de agua

En el avance de una guía en carbón, habitualmente se utiliza como índice de riesgo la velocidad de desorción V_1 , que se mide a una profundidad de 2 y 3 m. El valor considerado como nivel de riesgo, a partir del cual se recomienda realizar algún procedimiento de prevención, es $2 \text{ cm}^3/10\text{g}/35\text{s}$.

Para la inyección de agua se realizan uno o varios sondeos horizontales de 4 m de longitud, en función de la potencia y la estratificación de la capa, y se introduce una cánula, hasta una profundidad de 3,5 m, por la cual se inyecta el agua.

La presión del agua se genera con una bomba de inyección volumétrica, con posibilidad de inyectar hasta 200 bar. El modo operativo consiste en incrementar la presión poco a poco. Al principio la cánula, que es de goma, hincha hasta que cierra perfectamente al sondeo. Cuando la presión es suficiente, se abre la válvula de agua y comienza a pasar al carbón.

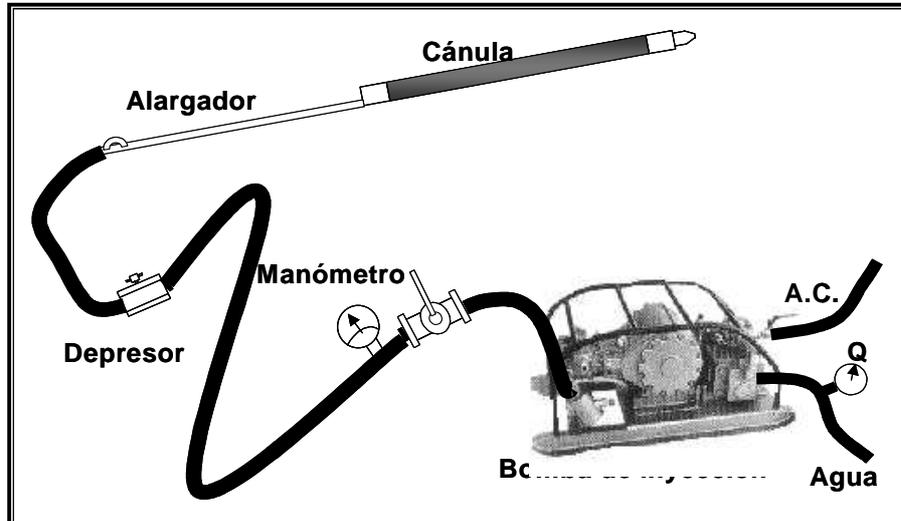
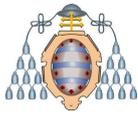


Figura 7.3.- Equipo de inyección de agua

Si se aumenta mucho la presión de la bomba, la inyección será más rápida, pero esto no es lo mejor para una desgasificación lenta, ya que es posible que el agua rompa el carbón y evolucione rápidamente hacia el frente, provocando un FGD. Lo ideal para una desgasificación lenta es que se empape el carbón, con la mayor cantidad posible de agua, sin llegar a generar un FGD.



Como criterio general, cuando el agua sale por el frente de avance se detiene la inyección. Normalmente esta salida de agua suele ir acompañada o precedida del desprendimiento del metano que el agua ha desplazado del carbón.

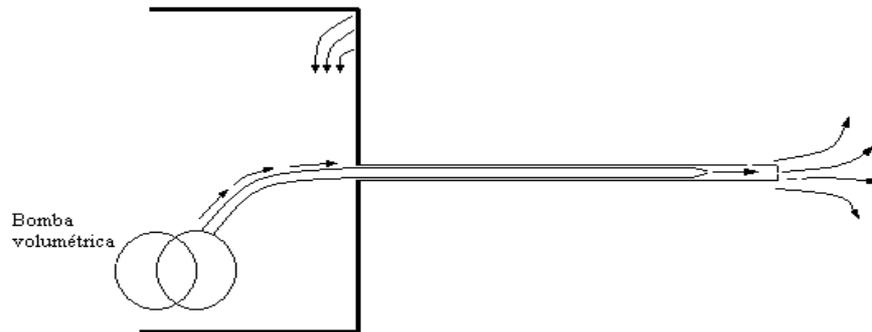


Figura 7.4.- Inyección de agua en el frente de avance

Este desprendimiento de metano va disminuyendo progresivamente, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 7.5, que corresponde a un ensayo real.

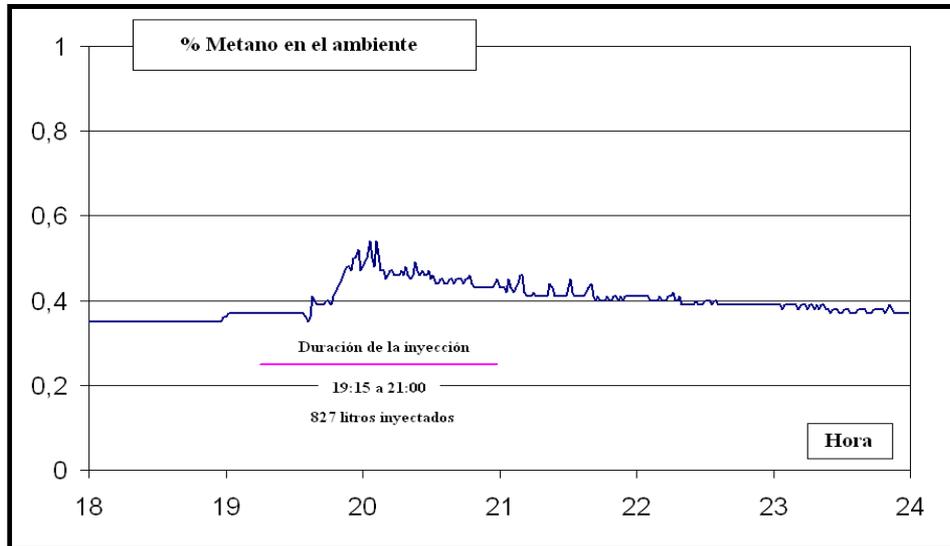
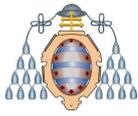


Figura 7.5.- Gráfico del desprendimiento de gas durante la inyección

Una vez detenida la inyección, se comprueba nuevamente la velocidad de desorción a 2 y 3 m. El proceso finaliza cuando este valor se encuentra por debajo del índice de riesgo. De lo contrario se realizan nuevos sondeos y se continúa la inyección.



7.1.2 Fenómenos gasodinámicos producidos durante la inyección

Para explicar el funcionamiento de la inyección, se van a comentar algunos incidentes ocurridos durante el proceso. Las cuestiones que se plantean son dos:

- ¿Cuándo se vuelve peligrosa la inyección?
- ¿Porqué hay momentos en que no es efectiva?

Para finalizar se van a presentar algunas medidas de humedad y una clasificación de la eficacia de la inyección.

7.1.2.1 Avance del 1º nivel derecha de la explotación 863 del Pozo San Nicolás

Se produjeron cuatro FGD, que ya fueron descritos (apartado 6.5.9). Tres de ellos tuvieron un aspecto en común, ya que fueron iniciados por la propia inyección de agua. El primer FGD se produjo durante la preparación para colocar el cuadro 23 (tarea 23). En la Figura 7.6 se representan los valores de las velocidades de desorción, V_1 (eje vertical), a 2 y 3 m y los puntos de inyección de las tareas anteriores (las líneas de distintos colores representan tareas distintas). El eje horizontal representa el número del cuadro colocado.

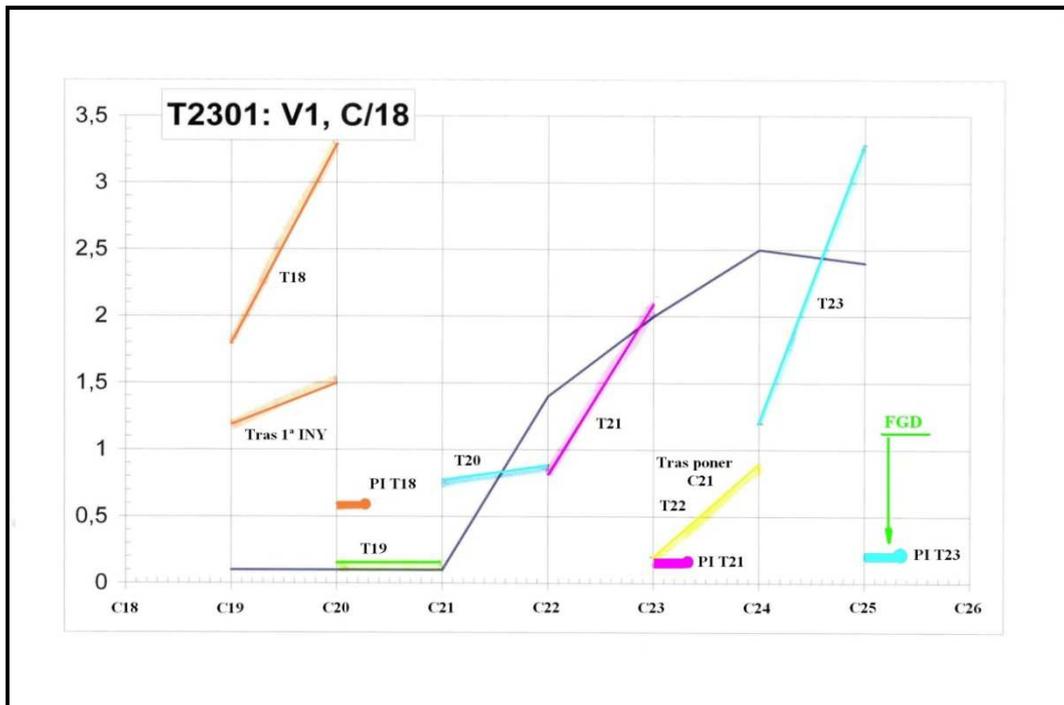
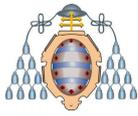


Figura 7.6.- Medidas de V_1 en el entorno del primer FGD (1º nivel derecha, 863 - San Nicolás)



En el cuadro 18 se aprecia que tras la inyección, la velocidad de desorción no disminuyó, en la tarea 19 y 20 no se inyectó, si se hizo en la 21 y no en la 22.

La primera medida tomada tras este incidente fue la disminución de la presión de inyección, que originalmente era de 200 bar, a un valor menor, condicionado por el momento en el que el agua sale por el frente de avance (se detiene la inyección). Parece claro que la presión de 200 bar fue la que inició el FGD, en este caso. Utilizando el símil de la zona de empuje y zona de frenado, se puede concluir que esta presión produjo la rotura de la zona de empuje.

El segundo FGD (véase la Figura 7.7) se produjo en la preparación de la tarea 66, ya dentro de la zona de sobretensión del macizo. La última inyección previa se realizó en la tarea 63. En este caso la presión de inyección ya era menor (90 bar), pero a pesar de todo el FGD tuvo una influencia de, al menos, unos 15 metros.

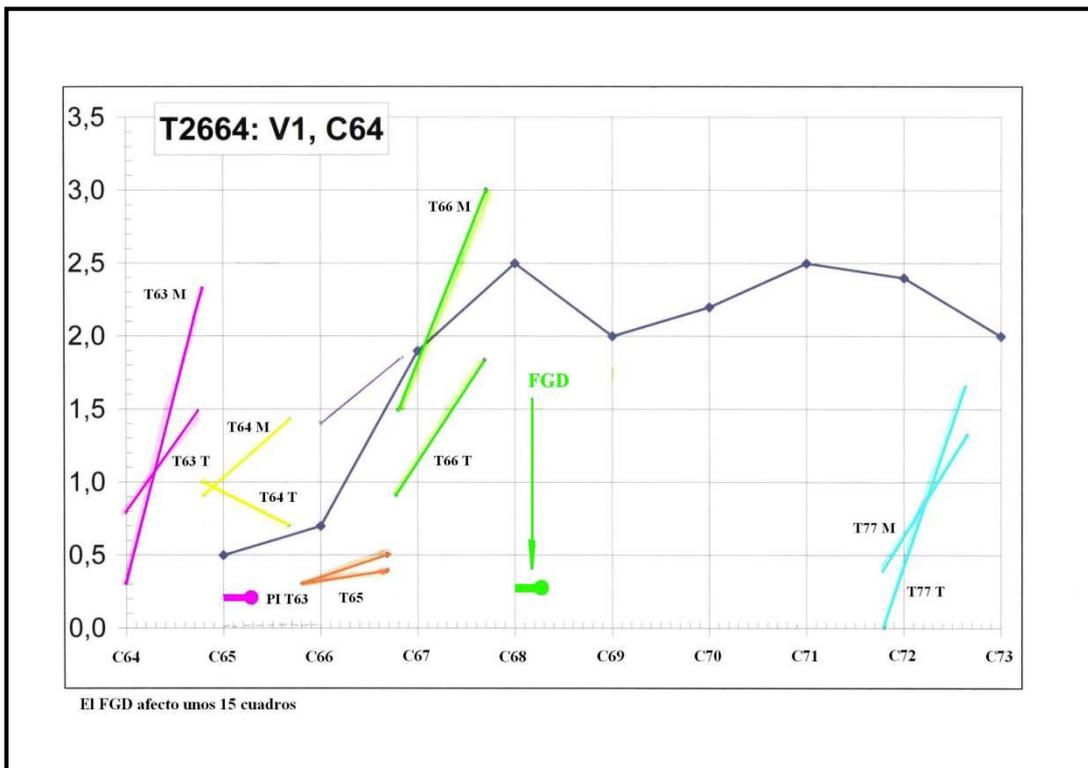
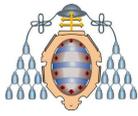


Figura 7.7.- Medidas de V_1 en el segundo FGD (1° nivel derecha, 863 - San Nicolás)



El tercer FGD se produjo en la preparación del cuadro 81, es decir, inmediatamente después del fin de la zona afectada por el anterior. En la Figura 7.8 se puede ver que se produjo durante la primera inyección después del FGD anterior.

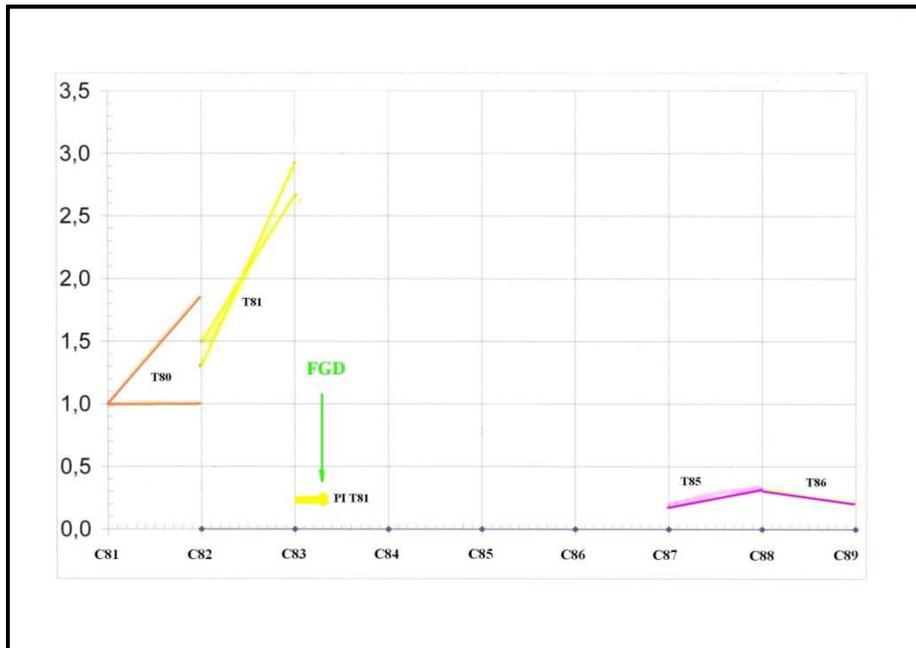
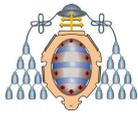


Figura 7.8.- Medidas de V_1 en el entorno del tercer FGD (1º nivel derecha, 863 - San Nicolás)

Los tres FGD tienen en común la alta velocidad de desorción en el metro 3. Hay que recordar que la zona está sobrepresionada y que en el cuadro anterior no se había inyectado. La diferencia está en que la presión de inyección, que era muy elevada en el primero, se redujo para los siguientes y resultó, junto con la ausencia de inyección en algunas zonas, no ser suficiente para la prevención de los demás.

De aquí se puede sacar una primera conclusión y es que **la regularidad en la inyección es muy importante, especialmente cuando se avanza en sobrepresión**. La zona de empuje puede crecer y romper la zona de frenado.

El cuarto FGD se produjo también dentro de la zona de “sombra” del macizo dejado en la capa 7ª, aunque en este caso no fue durante la inyección. En la Figura 7.9 se muestran también los valores de la velocidad de desorción, V_1 , previos, junto con la cantidad de agua inyectada por metro de potencia de capa. En este caso ya se había modificado el criterio de inyección y la referencia de la V_1 se rebajó a $1,5 \text{ cm}^3/10\text{g}/35\text{s}$.



Esto dio lugar a una mayor regularidad en la inyección. Aún así, algunos avances se realizaron sin inyección, como se puede ver en la cantidad de agua inyectada.

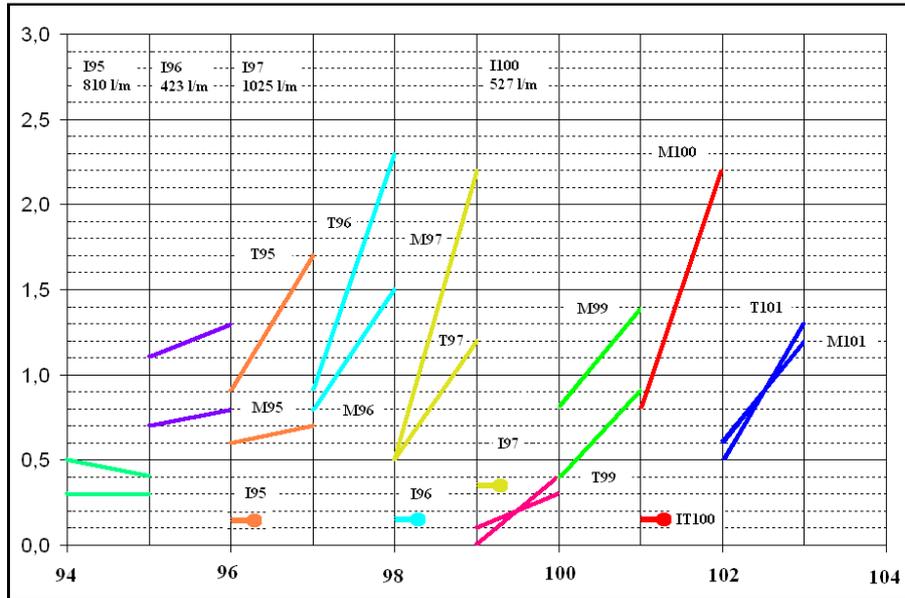
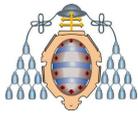


Figura 7.9.- Medidas de VI en el entorno del cuarto FGD

El FGD se produjo en la tarea 101, con valores de la velocidad de desorción menores de $1,5 \text{ cm}^3/10\text{g}/35\text{s}$ y sin inyección. En su estudio posterior, se vio que en esta zona la sobrepresión no sólo procedía del macizo dejado en la capa 7ª sino también de un ligero estrechón que había producido una sobre excavación en las coronas en tareas anteriores. El procedimiento de inyección no fue suficiente para evitar este FGD, aunque conviene recordar que la inyección no mantuvo la regularidad en los cuadros anteriores y, además, la cantidad de agua que se inyectó fue de 527 litros por metro de potencia de capa. En estudios posteriores se verá que esta cantidad de agua es baja en relación a los valores medios que aseguran una zona suficientemente protegida.

Esto confirma que la regularidad de la inyección, con una profundidad y una **cantidad de agua inyectada uniformes**, ayudan a mantener la zona de avance protegida. La explicación está, recurriendo al símil de la zona que frena y la zona que empuja, en que el hecho de llevar una regularidad en la inyección provoca que las dimensiones de la zona de frenado se mantengan uniformes durante el avance, en lugar de disminuir en cada cuadro que no se inyecte, lo que hace que la protección se comporte mejor frente a incrementos imprevistos de la zona de empuje.



7.1.2.2 Avance de los niveles de la capa Julia del Pozo Sotón

En el avance de los niveles se realizaron dos sondeos de control, con objeto de evaluar la efectividad de la inyección, uno en el muro horizontal, y otro en el techo inclinado ascendente con pendientes entre 15 y 40°, midiendo en este último la humedad y las concentraciones. Se observaron zonas en las que el agua alcanzó 9 m hacia el fondo y 4 m hacia arriba. La primera conclusión es que el agua va mas allá de los tres metros inyectados, lo que amplía la zona de protección.

En la Figura 7.10, correspondiente al nivel 2.4 norte, se comparan los gráficos de humedad en tanto por ciento y de velocidad de desorción, V_1 , de los sondeos de control T1 y T2, con el fin de comprobar esta idea.

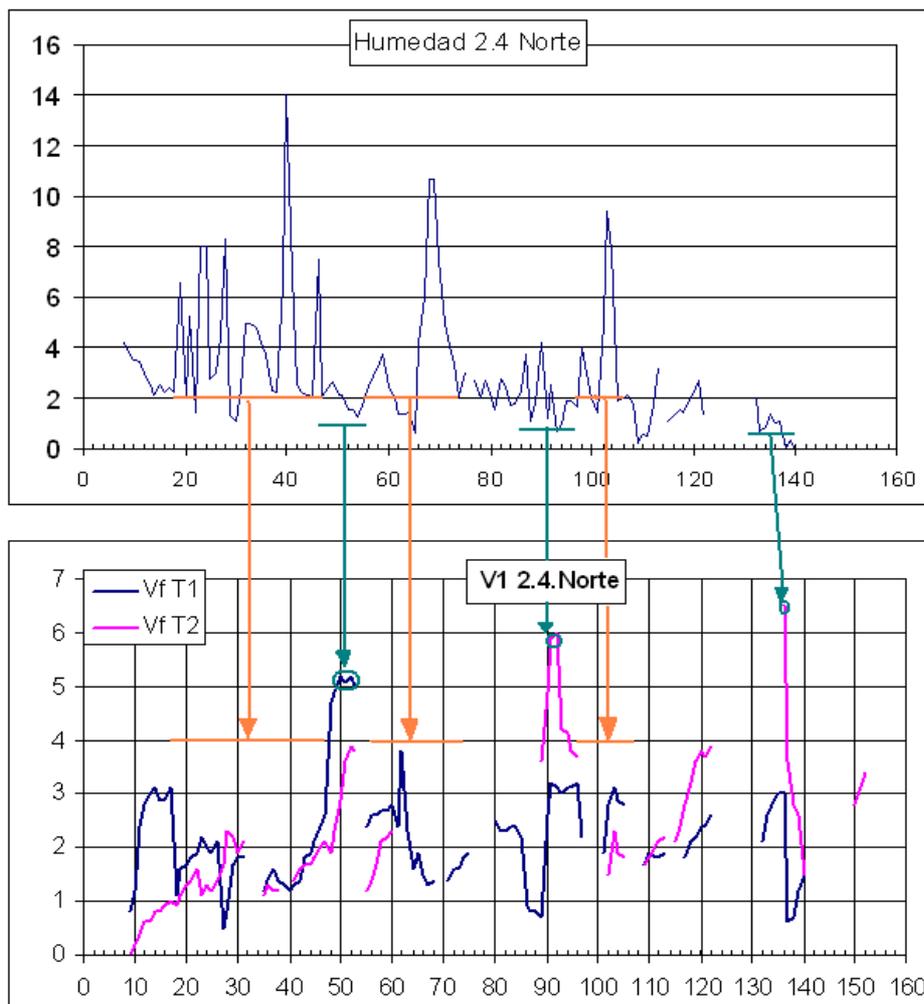
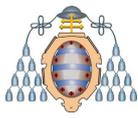


Figura 7.10.- Gráficos de humedad y V_1 en sondeos de control (Nivel 2.4 Norte, Julia - Sotón)



En el gráfico superior, la línea naranja muestra las zonas donde la humedad de los metros finales de los sondeos fue elevada, por lo tanto la inyección ha sido buena. En el gráfico inferior, se puede ver que esas zonas corresponden a valores bajos de velocidad de desorción.

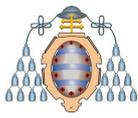
Asimismo, las zonas marcadas con una línea verde son aquéllas en las que la inyección no ha sido buena como se puede ver en la parte superior. Observando nuevamente el gráfico inferior, se ve que se corresponden con picos elevados de velocidad de desorción. Se demuestra así gráficamente como la inyección profunda coincide con una reducción de la V_1 . Este conjunto de valores sirve para obtener una idea inicial de cómo puede funcionar la inyección.

Cuando se atraviesan zonas sobretensionadas, el pico de tensión es mayor y está más cerca del frente. Esto hace que al agua le resulte difícil penetrar más allá de esta zona, al igual que al gas salir de ella. La combinación hace que se produzca un empuje mayor con un freno menor, por lo que el riesgo se eleva. Es, en estas zonas, donde la regularidad de la inyección cobra mayor importancia.

La siguiente cuestión que hay que explicar hace referencia a la cantidad de agua necesaria para tener una inyección profunda. Para ello, se hizo una clasificación de la calidad de la inyección, basada en la protección estimada a los 4 m por delante del frente. A partir de los valores de V_1 ($\text{cm}^3/10\text{g}/35\text{s}$) en los metros 2 y 3, se extrapolaron los valores que podría tener el metro 4, con el criterio siguiente:

- Si su valor estaba por debajo de 1, la inyección se consideraba **profunda**.
- Si estaba entre 1 y 1,5 se consideraba **intermedia**.
- Si superaba 1,5 se consideraba **local**.

En todos los casos, la inyección se mantuvo hasta que el agua llegaba al frente, es decir, hasta que la capa no admitía más agua por el sondeo utilizado para la inyección. Se anotaron, además de la cantidad de agua, la presión de inyección y el tiempo. Todos los resultados se clasificaron de acuerdo con las tres categorías anteriores (inyección profunda, intermedia o local). En la Tabla 7.1 se indican los valores medios para cada caso.



Tipo de inyección	Zona de la capa	Tiempo (min)	Presión (bar)	Agua (l)
Profunda	Techo	50	40	780
	Muro	50	40	550
Intermedia	Techo	45	35	600
	Muro	47	35	550
Local	Techo	36	35	520
	Muro	43	38	510

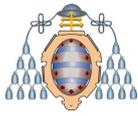
Tabla 7.1.- Características de la inyección

Estos valores, característicos para la Capa Julia del pozo Sotón, no se pueden generalizar a otras capas, ya que cada una tiene sus peculiaridades. En todo caso se puede utilizar este método para obtener los valores característicos de cada capa.

Se observa que cuanto más cantidad de agua se inyecta más grande es el macizo que se protege. También se puede observar que, al producirse solapes en la inyección, los efectos de las anteriores inyecciones en los metros profundos se van sumando. Esto lleva, nuevamente, al concepto de la regularidad en la inyección, ya deducido del ejemplo del avance de la capa 8ª.

Como resumen del método de *inyección de agua*, se puede decir que es el más tradicional y utilizado en HUNOSA para la prevención de FGD. La presencia de humedad en el carbón aporta ciertas ventajas en cuanto a consistencia, capacidad de deformación y de desorción de gas respecto al carbón seco. Los tres parámetros que hay que tener en cuenta en el proceso de inyección son:

- Regularidad: porque se suman los efectos de las anteriores inyecciones
- Alcance: la distancia a la que es capaz de penetrar el agua
- Cantidad: volumen de agua, en litros, introducida en la capa de carbón



7.2 Sondeos de distensión

Los sondeos de distensión y desgasificación son también un método eficaz para la prevención de FGD. Cuando se perfora un sondeo se crea un hueco en el carbón que genera una redistribución de las tensiones internas. El reajuste de tensiones induce una zona fisurada alrededor del sondeo es decir, se produce una distensión local de la zona afectada por él. Una vez distendido el carbón, el gas puede fluir fácilmente a través de las fisuras, realizándose así la desgasificación de la zona afectada por el sondeo.

En los trabajos realizados en HUNOSA, no se han descrito FGD cuando el valor de la concentración de gas se encuentra por debajo del 75% de la considerada como peligrosa. Si se parte de un valor peligroso de $9 \text{ m}^3/\text{t}$ habrá que reducir la concentración límite a la que se producen FGD hasta $6,75 \text{ m}^3/\text{t}$.

Este sistema de desgasificación se va a ilustrar con el avance del nivel 4.1 norte de la capa Julia del Pozo Sotón. Antes del inicio del avance la situación esperada era de baja concentración, por lo que era una buena situación para ensayar el nuevo sistema de prevención, que en un principio se orientó a la desgasificación (sin distensión). Se hicieron 3 sondeos de unos 20 m de forma que se dejara una zona desgasificada suficientemente amplia para avanzar durante una semana. Sin embargo desde el comienzo se empezó a ver que el estado tensional era más elevado de lo inicialmente esperado. Posteriormente se comprobó la existencia de un hueco de unos 60 m, entre 10ª y 9ª plantas, donde quedó una zona sin explotar (ver Figura 7.11), que podía explicar este comportamiento. Los hastiales pueden aguantar sin hundir completamente este vano, pero necesariamente proyecta tensiones hacia las labores inferiores. Si se observa el gráfico de las concentraciones de gas de la Figura 7.12, se puede ver que son elevadas, lo que indica más tensión del terreno.

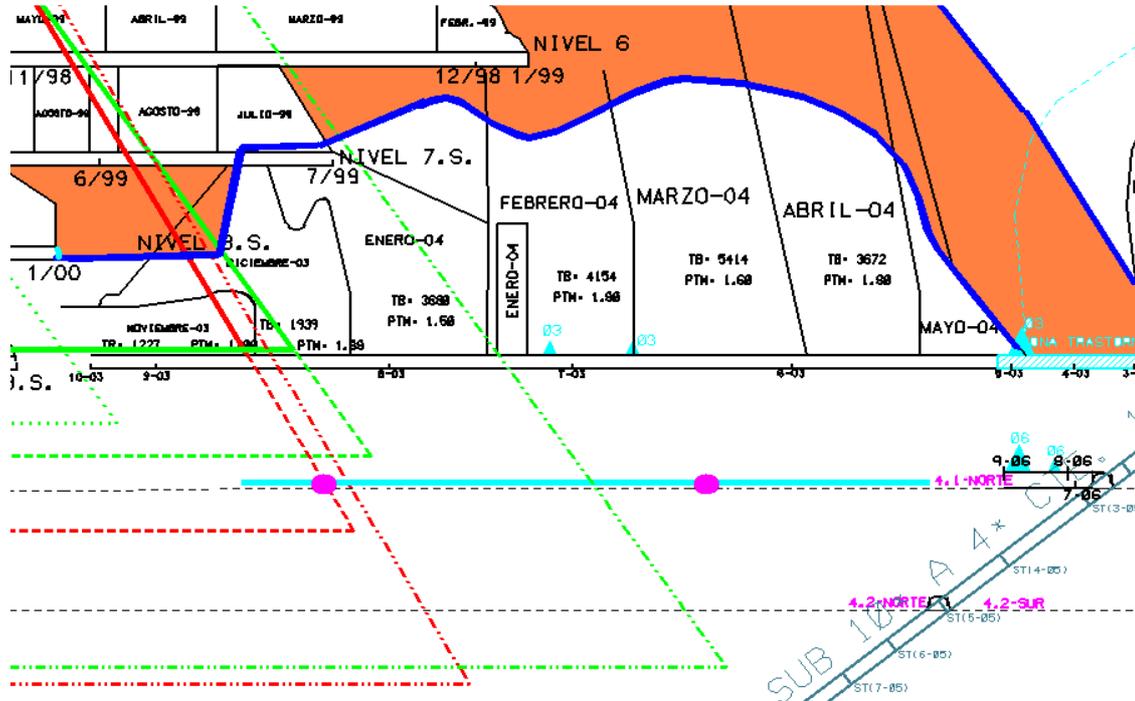
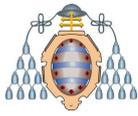


Figura 7.11.- Plano de labores del avance del Nivel 4.1 Norte (Julia - Sotón)

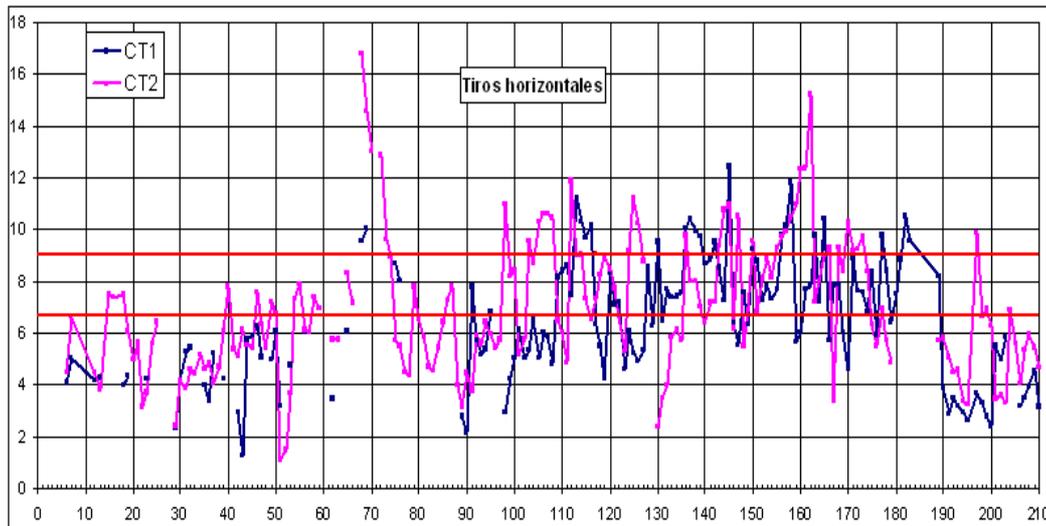
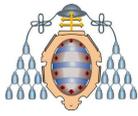


Figura 7.12.- Evolución de las concentraciones de gas

Estos sondeos dieron bastantes problemas porque se generaban muchos *debritus* y acababan atrapando el varillaje. En muy pocas ocasiones se superaron los 10 m, por lo que se decidió realizar un cambio en el procedimiento.



A partir del cuadro 24 se realizaron dos sondeos en cada vena, uno con una pendiente entre 18 y 20° aproximadamente a la altura de la corona y sin drenaje y un segundo sondeo horizontal, a media altura, con drenaje de carbón, es decir con distensión. También se comenzaron a realizar sondeos descendentes. En todos los casos, la longitud era la que permitían las condiciones de la capa. En la Figura 7.13 se puede ver la distribución de los esquemas de sondeos, en verde los inicialmente previstos y en azul y rojo los realizados posteriormente.

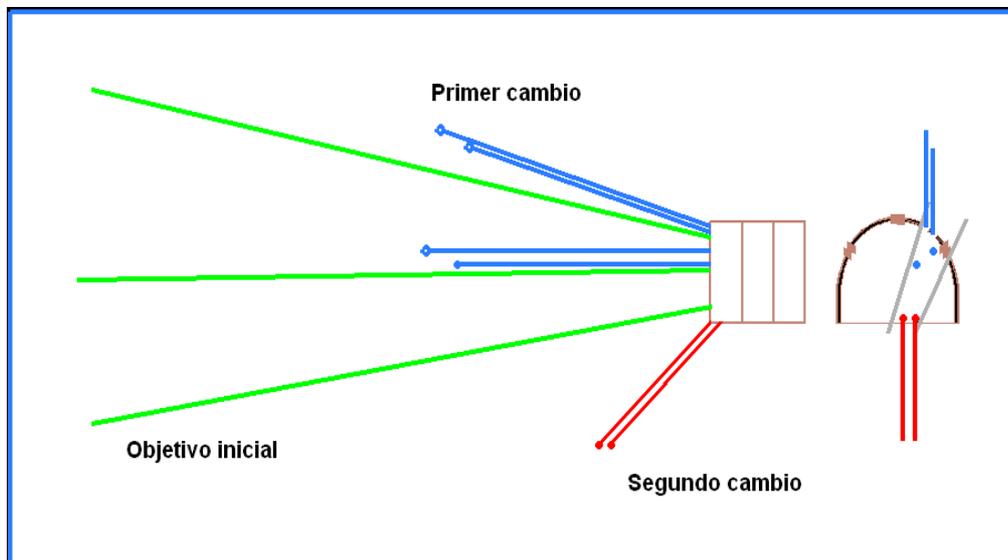


Figura 7.13.- Distribución de los sondeos de desgasificación y distensión

La razón para no realizar el drenaje de los sondeos superiores era no debilitar demasiado la zona de las coronas, para que el propio sistema de prevención no causara montaduras. Para controlar la eficacia del sistema se realizó un control del metano desprendido diariamente.

Las siguientes figuras intentan mostrar una idea de cómo funcionaría este sistema de prevención. En la Figura 7.14 se puede ver que la zona de sobretensión se encuentra cercana al frente durante la realización de los sondeos.

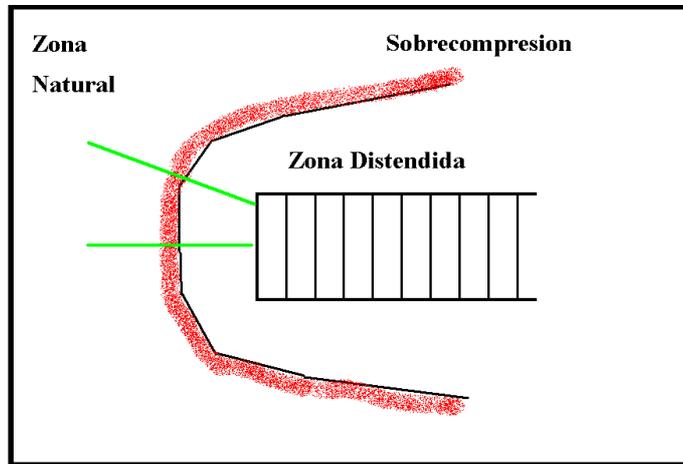
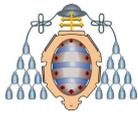


Figura 7.14.- Situación de la zona de sobretensión antes de los sondeos

En la Figura 7.15 se observa como los sondeos surten efecto alejando las sobretensiones del frente.

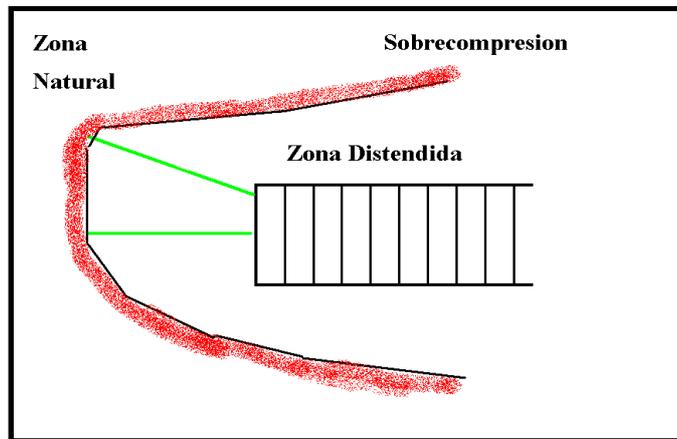


Figura 7.15.- Situación de la zona de sobretensión después de los sondeos

En la siguiente secuencia de imágenes (véase la Figura 7.16) se muestra la modelización de un sondeo de distensión en el frente de un avance donde hay un estrechón próximo. Se puede ver de una forma más realista como, a medida que se realiza el sondeo, la zona de máxima sobretensión se va alejando del frente así como el incremento de la zona distendida. La primera figura corresponde al estado de tensiones antes de iniciar el sondeo. La zona amarilla indica el lugar donde se tiene el máximo de las sobretensiones inducidas en la capa de carbón. La zona azul es la zona distendida en torno al frente de la galería.

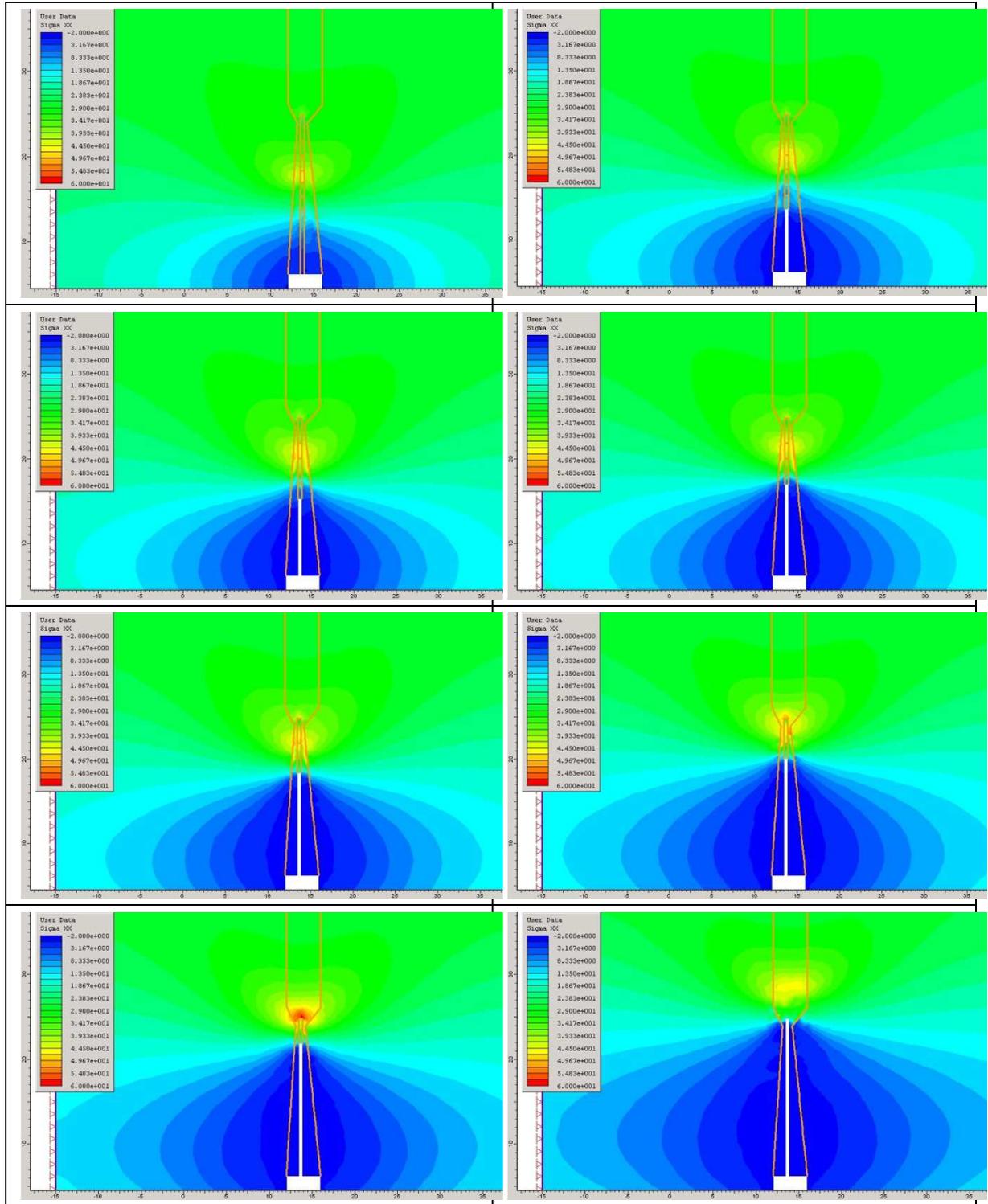
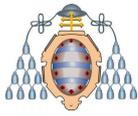
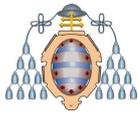


Figura 7.16.- Evolución de un sondeo de distensión



La dificultad se plantea en la medición de la eficacia del sistema de distensión, es decir, cómo saber si ha sido suficiente la distensión. La solución se encontró tras dos pequeños FGD que se produjeron durante el avance de este nivel.

Desde el principio del nivel la capa se había encontrado muy blanda, es decir, el carbón estaba degradado bien por la cercanía a la falla o bien por las sobretensiones inducidas por el hueco superior. Sin embargo, durante el avance del cuadro 77, se produjo un FGD.

En los días anteriores, la capa se endureció con un doble efecto. Por una parte la distensión de los sondeos había disminuido debido a que el drenaje de carbón fue menor. Por otra parte la capa distensionaba menos por sí misma, con lo que al final se produjo un acercamiento de la zona de sobretensión al frente, especialmente por la solera, donde no se realiza distensión y que es por donde al final se desarrolló el FGD.

Después de este incidente, quedó claro que también había que proteger la zona inferior por lo que se adaptó de nuevo el sistema de prevención que incrementase el efecto de la distensión. El procedimiento propuesto buscaba proteger unos 5 m hacia arriba y 5 m hacia abajo como indica la Figura 7.17.

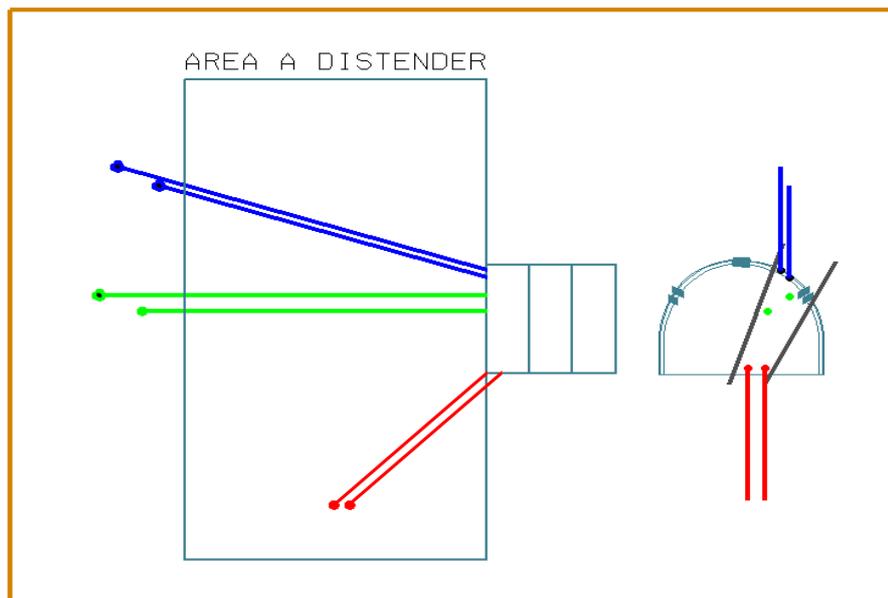
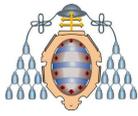


Figura 7.17.- Distribución de los nuevos sondeos de distensión y desgasificación



Los grupos de sondeos se solapan cinco metros y siguen las siguientes fases:

1.- Protección de la corona mediante sondeos de desgasificación. La distensión será únicamente la que se produzca durante la realización del sondeo. Se realiza un sondeo en el muro y otro en el techo con una inclinación entre 18 y 20°.

2.- A media altura se realizan también dos sondeos horizontales, en este caso ya con distensión mediante drenaje de carbón. Cuando el drenaje no es correcto, se aplica un disparo de conmoción, que consiste en la colocación de un pequeño explosivo de seguridad para minas de carbón, 20 SR. en el fondo. La carga se sitúa a una profundidad superior a 7 m.

3.- En la solera se realiza también distensión, pero en este caso mediante disparos de conmoción. Se hacen dos sondeos inclinados, uno en cada vena, buscando una profundidad de, al menos, cuatro metros.

El esquema de este procedimiento de protección es el de la Figura 7.18.

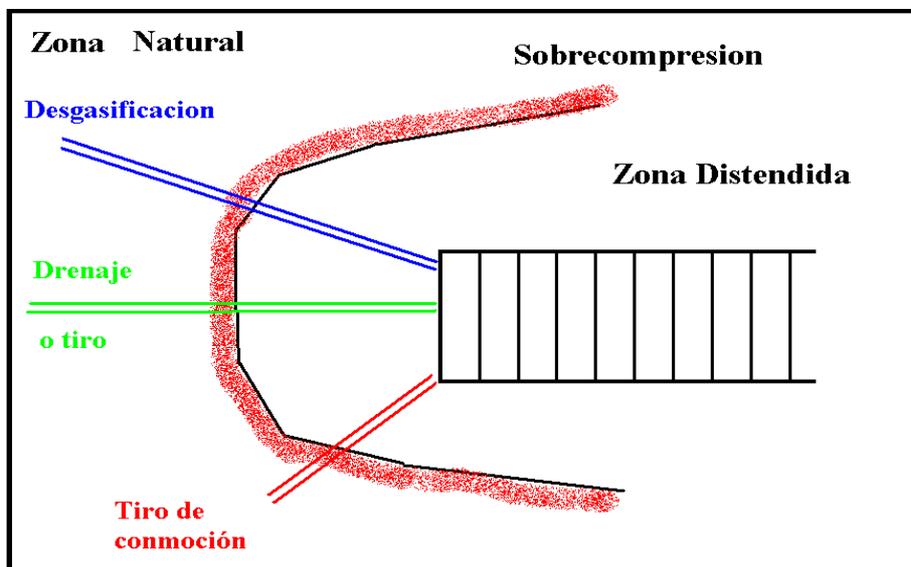
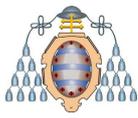


Figura 7.18.- Situación de la zona de sobretensión después de los nuevos sondeos

Después del disparo se realizan dos sondeos de control de la velocidad de desorción, para controlar la eficacia del sistema. En caso que se superase el valor de $1,5 \text{ cm}^3/10\text{g}/35\text{s}$ se aplicaría, además, el sistema de inyección de agua.



El control de la eficacia del sistema se efectuó como en los casos anteriores, mediante el control de la concentración de gas y de la velocidad de desorción, V_1 , en los sondeos, así como el control del gas desprendido durante el avance.

Así se continuó avanzando hasta que se produjo otro FGD durante la inyección en el cuadro 177. Después de realizar el procedimiento de distensión y desgasificación se midió la velocidad de desorción a 2 y 3 m, tanto en el techo como en el muro, dando como valor máximo $0,8 \text{ cm}^3/10\text{g}/35\text{s}$. Aunque no se superaba el valor de $1,5 \text{ cm}^3/10\text{g}/35\text{s}$, se procedió a inyectar agua para empapar el carbón. Se inyectaron 300 l de agua a 25 bar durante 30 minutos. Durante el proceso se empezó a abrir el frente y lentamente se observó cómo se iba produciendo un derrabe.

La situación generada por el fenómeno fue la representada en la Figura 7.19, con el esquema de la ventilación y la referencia de los cuadros en la parte superior.

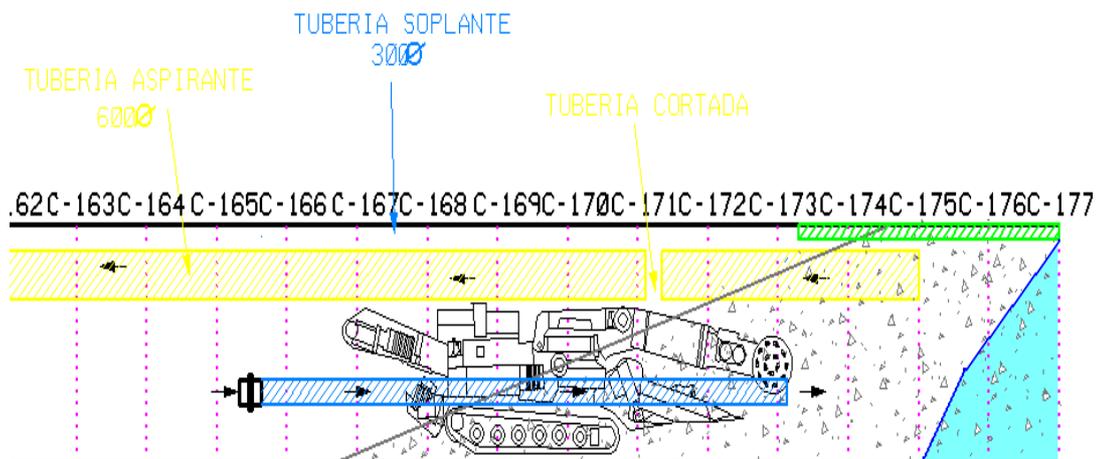
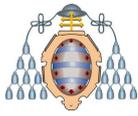


Figura 7.19.- Situación del Nivel después del FGD

El gas liberado fue escaso, unos 175 m^3 , lo que indica que el FGD se produjo debido a las tensiones existentes y no al gas acumulado. El carbón expulsado, casi pulverizado, sepultó parcialmente el minador alcanzando una longitud de unos 10 m, como se ve en la Figura 7.19. Posteriormente se realizaron sondeos con el fin de encontrar de nuevo el frente duro (en azul en la figura) y se comprobó que la fuerza impulsora del FGD procedía de la zona de la solera.



Hasta ese momento, en los sondeos que se realizaban en la solera y se aplicaba el tiro de conmoción, solo era posible introducir 2 cartuchos de explosivo debido a que las paredes del sondeo se desmoronaban rápidamente tapando el sondeo y no permitiendo colocar más. A partir de este FGD, se decidió mejorar el sistema mediante un tubo de PVC que se encajaba durante la perforación y por el cual se extraía el *detritus* permitiendo así que se pudiera introducir explosivo hasta el fondo. Se pasaron a utilizar del orden de 12 cartuchos.

Es importante destacar que los dos FGD ocurrieron en las proximidades de cambios importantes de potencia de la capa que, como ya se había constatado, modifican la distribución de tensiones y pueden incluso duplicar la tensión natural.

7.2.1 Sistema de control de eficacia de la desgasificación

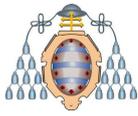
Con estos sistemas de desgasificación, se persigue también la distensión del carbón, por lo que una buena forma de evaluar la eficacia sería medir la cantidad de gas drenado durante el proceso.

En las explotaciones de HUNOSA se dispone de un sistema de registro continuo de control ambiental que permite conocer, entre otras, las medidas de concentración de metano y caudal de aire, en las zonas más representativas. Para saber la cantidad de metano que se libera durante la desgasificación, se utilizaron los datos aportados por el citado sistema.

En este caso, los datos corresponden al metanómetro instalado en la turbina aspirante situada en el frente de la labor.

Antes de comenzar la desgasificación, se mide el valor base de la concentración de metano y se toma como referencia (en la Figura 7.20, flecha rosa y valor en rojo). A partir de ahí se realiza el proceso. El volumen de gas desprendido será el contenido entre las áreas verde y roja de la figura y se obtendrá haciendo la integración de la superficie con el tiempo. En este caso el metano desprendido es de 135 m³.

Para conocer el volumen total de gas desprendido hay que descontar el que aporta la ventilación principal, procedente de otras labores. Para ello, se extrae el metanómetro de la turbina y se registra el valor que muestra en el aire de entrada, que se considera de nuevo como referencia (en la Figura 7.20 se muestra este valor con una



flecha de color azul), de esta forma se elimina, además del error que se produce por el metano que procede de los niveles inferiores, el propio error del metanómetro. El metano total liberado será la suma del contenido en las áreas marcadas de verde y de rojo y se obtendrá integrando de nuevo esa superficie en el tiempo.

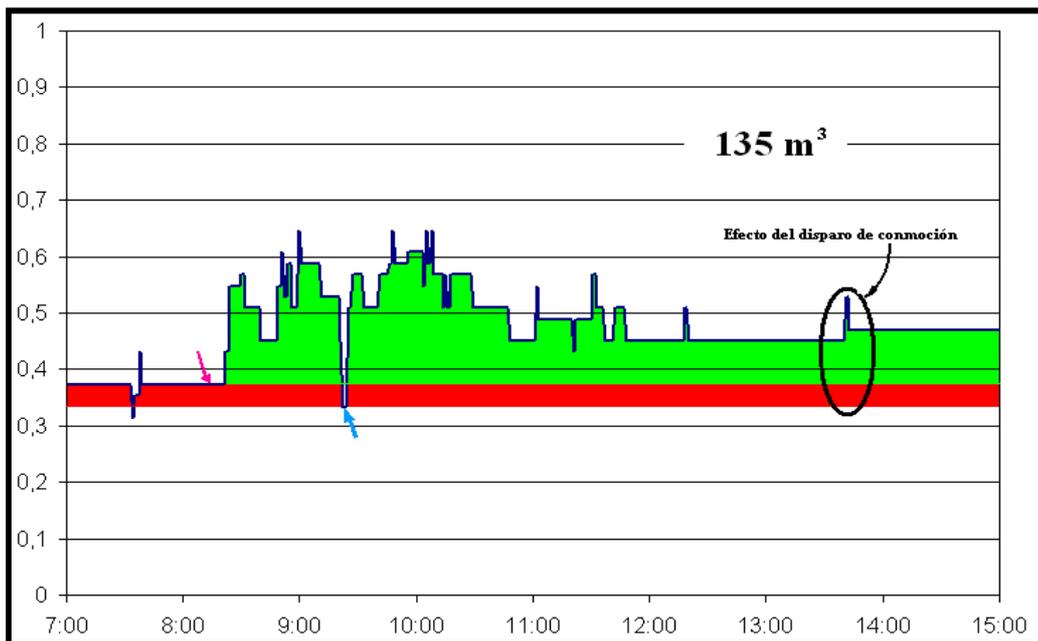


Figura 7.20.- Emisión de gas durante la desgasificación

En la Figura 7.21 se puede observar el ciclo semanal en el desprendimiento de gas durante los días previos al FGD de 14-11-06 en la capa Julia. También se puede observar que en los días previos al FGD el desprendimiento de gas durante los sondeos había disminuido. En todo caso, las cantidades liberadas fueron muy variables.

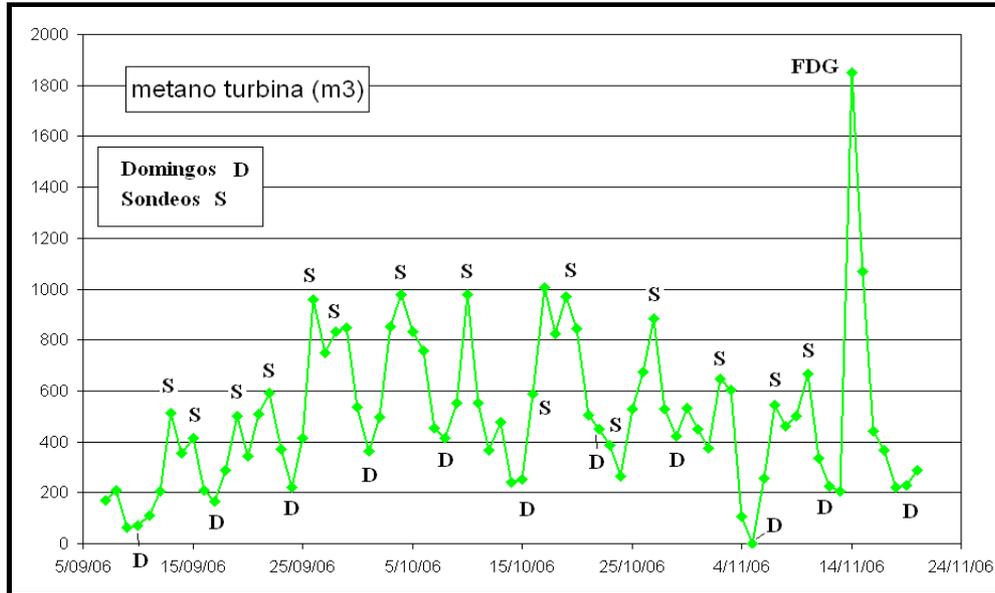
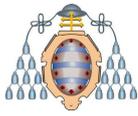


Figura 7.21.- Desprendimiento de metano a lo largo del tiempo

La cuestión que se plantea es el conocimiento de la cantidad mínima que se debe extraer para conseguir el avance del nivel en condiciones de seguridad aceptables.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que no todo el gas contenido en el carbón será liberado. Dado que la concentración Q3 lo hace tras una molienda, se debe de partir sólo de las concentraciones Q1 y Q2 tomadas en cada sondeo.

Para definir la cantidad de gas disponible en la zona que se pretende desgasificar, se parte del volumen de carbón comprendido en un cilindro que tiene por base la sección de la galería mas 5 m perimetrales y por altura el avance, en este caso corresponde a 7 m, que es la distancia más afectada por el FGD (véase la Figura 7.22). Como potencia de la capa se considera la que se observa en el frente de avance.

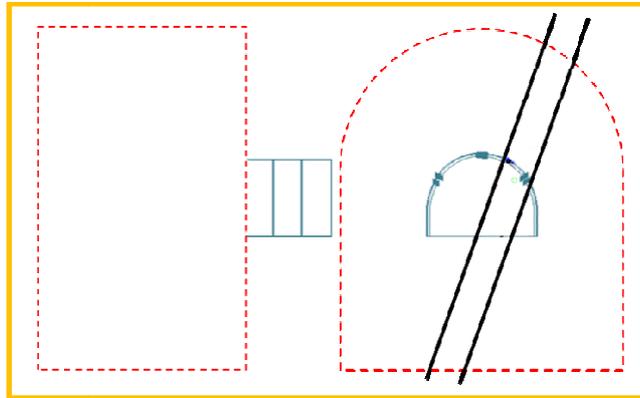
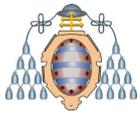


Figura 7.22.- Zona a desgasificar

La eficacia del sistema de prevención se puede cuantificar teniendo en cuenta la relación entre el gas desprendido y el gas disponible, en tanto por ciento, que se ha denominado **Índice de Desgasificación (IDD)**.

En la Figura 7.23 se observa el IDD en todo el avance del nivel 4.1.Norte de la capa Julia, del Pozo Sotón. En abscisas se representan los cuadros avanzados. El pico que se observa en el cuadro 130, se debió a un aumento posterior de la potencia de la capa, por lo que la cantidad de gas disponible fue mayor que la calculada. También están representados los FGD que se produjeron durante el avance del nivel como círculos rojos.

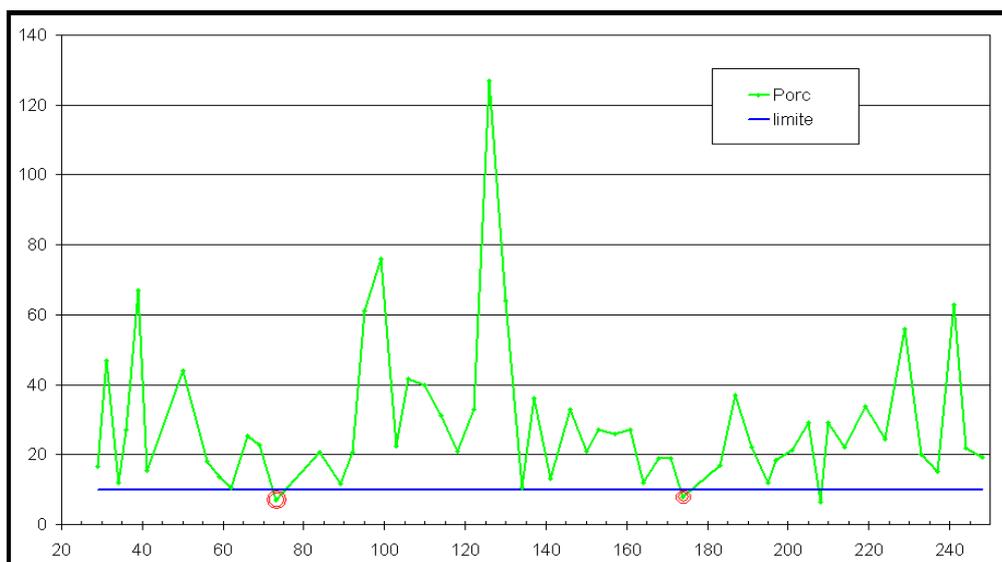
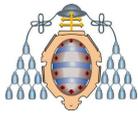


Figura 7.23.- Evolución del índice de desgasificación



La conclusión más importante que se puede extraer de la figura anterior es que la desgasificación conseguida en los días anteriores a los FGD fue pequeña y, en todos los casos, inferior al 10%.

A partir del segundo FDG, para medir la eficacia de los sondeos de distensión se utilizó el criterio siguiente:

- IDD superior al 20%: avance de 5 cuadros hasta los próximos sondeos.
- IDD entre el 10 y el 20%: avance de 3 cuadros hasta próximos sondeos.
- IDD inferior al 10%: realizar nuevos sondeos para avanzar,

7.3 Sondeos descendentes

La perforación de sondeos descendentes es otro sistema utilizado para la prevención de FGD. Esta técnica se ha ensayado en HUNOSA en los niveles 2.4 Norte y 2.5 Norte de la capa Julia del Pozo Sotón.

Con la realización de estos sondeos se persiguieron tres objetivos:

1. Alcanzar la mayor longitud posible, para ver la posibilidad de desgasificar el nivel inferior desde el superior. La longitud máxima que se alcanzó fue de 20 m. La limitación de esta longitud no fue debida al gas si no a que todos los sondeos finalizaron en roca por las irregularidades de potencia de la capa.
2. Determinar los cambios de presión, mediante la instalación de cánulas de gas.
3. Medir la permeabilidad del carbón.

En la Figura 7.24 y en la Figura 7.25 se muestran los esquemas con la disposición de los sondeos en el nivel 2.4 Norte.

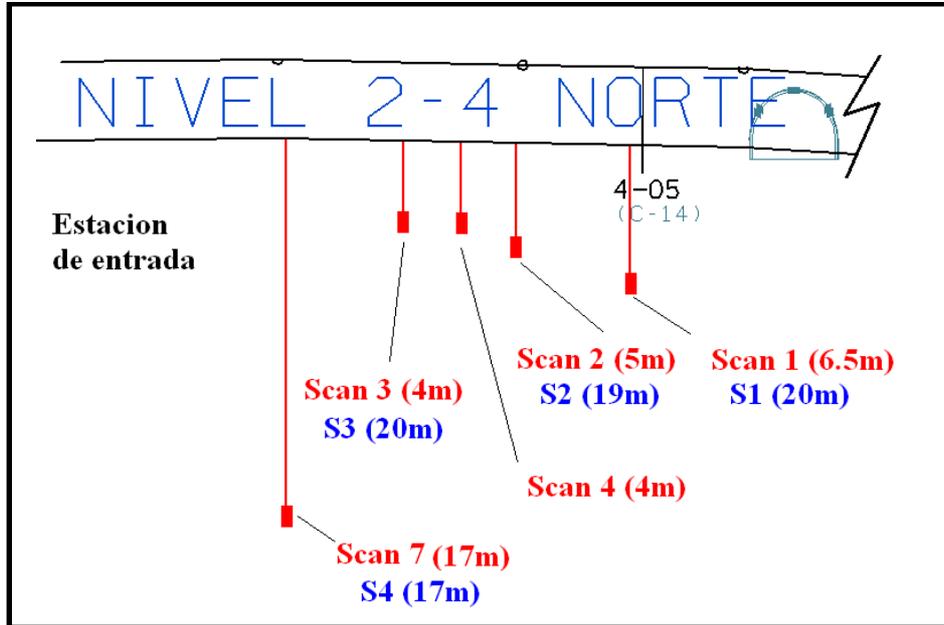
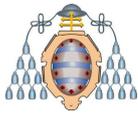


Figura 7.24.- Situación de los sondeos descendentes en la entrada del nivel

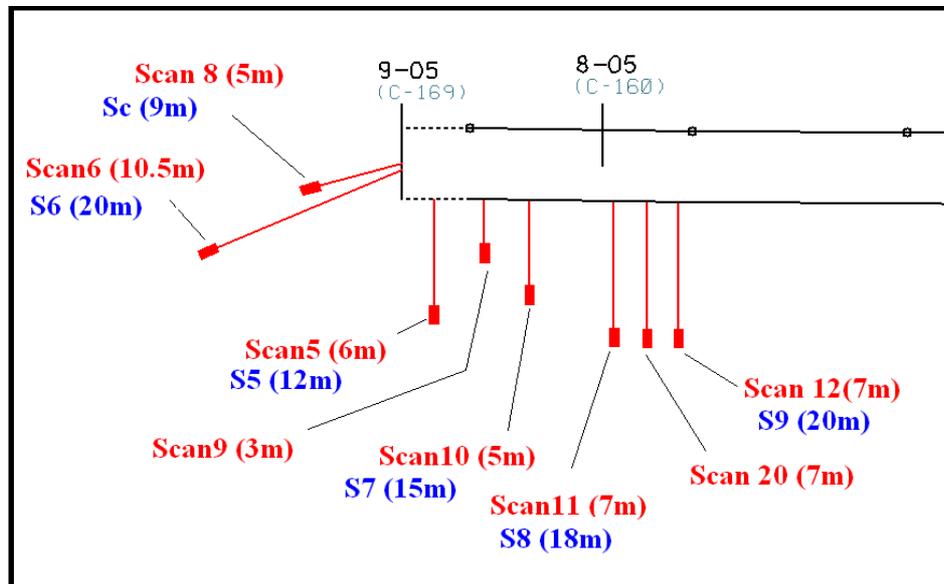
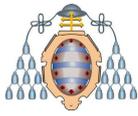


Figura 7.25.- Situación de los sondeos en el frente del nivel

Los cálculos del metano desprendido se realizaron a partir de las medidas registradas en el metanómetro del frente, que estaba situado a la entrada de la ventilación aspirante.



La emisión natural de metano antes del inicio de los sondeos era de 233 m^3 por día y, como consecuencia de la realización de estos sondeos, se incrementó hasta los 517 m^3 por día, todo ello en valores medios.

Sin embargo este flujo de metano no se produjo de forma uniforme. En la Figura 7.26 se representa el flujo de metano que se obtuvo en la situación real.

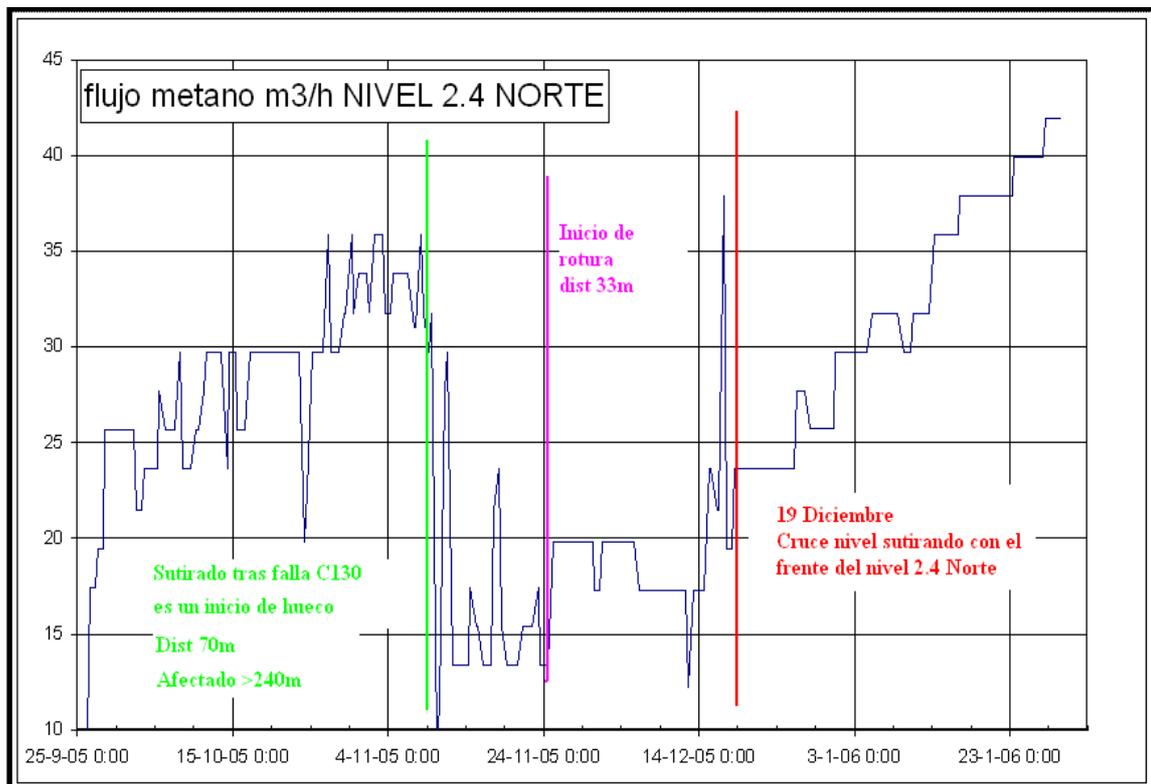
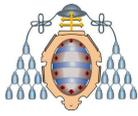


Figura 7.26.- Emisión de metano en el Nivel 2.4 Norte

Se pueden diferenciar las fases siguientes:

- **FASE1:** Incremento considerable de la emisión de metano hasta la línea verde. Este incremento es directamente consecuencia de la realización de los sondeos. El volumen estimado durante esta fase fue de 28.150 m^3 , de los cuales 9.150 m^3 hubieran salido espontáneamente sin los sondeos. En total los sondeos favorecieron la evacuación de 19.000 m^3 de metano. Los picos de la figura se deben a dos razones: por un lado, a las paradas de ventilación, que distribuyen de forma desigual la evacuación del metano, y, por otra, a los cambios de presión



atmosférica en el exterior, que pueden modificar el flujo de salida del gas (un cambio de altas a bajas presiones incrementa el flujo de metano, en esta capa, de hasta 10 m³/h).

- **FASE 2:** Se produce una brusca disminución en el flujo de metano, entre la línea verde y la línea rosa. Los sondeos de desgasificación van reduciendo la emisión de metano de forma progresiva con el tiempo, no de forma brusca. Esta disminución se debió, también, a que se iniciaron las labores de sutirado en el nivel superior y no se había producido la rotura del hastial, con lo que se generaron importantes tensiones. Esto dio lugar, a que se cerraran las grietas y con ello a una reducción de la permeabilidad.
- **FASE 3:** Se vuelve a incrementar el flujo de metano. Esto se debe a que a medida que se produce el avance del sutirado del nivel superior (en dirección contraria al avance de este nivel), la onda de sobrepresión se acerca de forma que su máximo avanza barriendo el nivel con sobrepresiones ya tan grandes que producen la rotura del carbón y por tanto su deformación, con lo que su presión de confinamiento se relaja superándose incluso su permeabilidad inicial. Esto hace que el metano vuelva a salir libremente.

El metano evacuado durante este periodo fue de 72.600 m³, pero no se pudo determinar con exactitud su procedencia (desprendimiento natural o inducido por los sondeos), debido a las dos últimas fases. Aunque parece apreciarse algún efecto sobre la presión de gas en los sondeos, no hay suficientes datos para obtener conclusiones que se puedan considerar como definitivas.

7.3.1 Control de eficacia de la desgasificación

En la Figura 7.27, se puede ver la eficacia de los sondeos verticales. Para ello, se representan las concentraciones de gas medidas en el año 2005 y en el año 2006, después de realizar nuevos sondeos verticales. Entre ambas gráficas se observa una disminución importante.

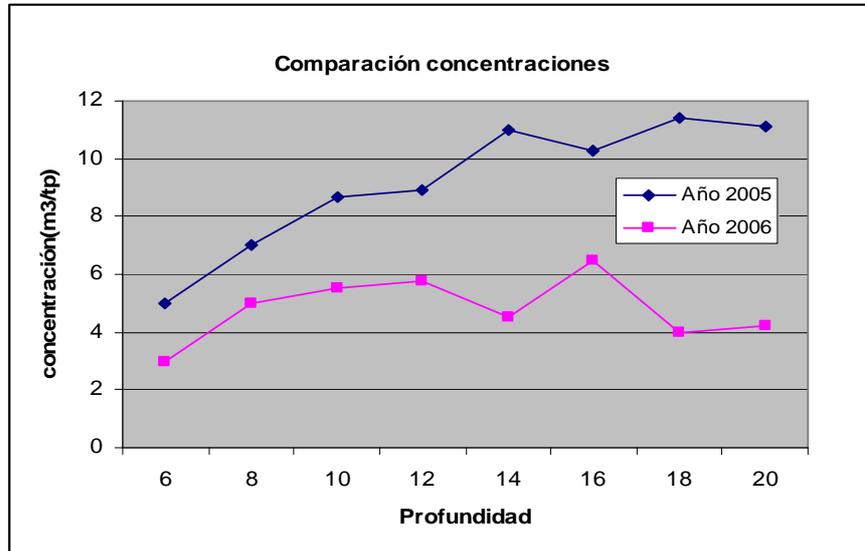
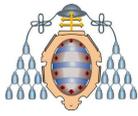


Figura 7.27.- Concentraciones de gas en 2005 y 2006

Con anterioridad, también se realizaron sondeos verticales en el 2 Nivel derecha del pozo 863 de San Nicolás. El objetivo era desgasificar una zona que se encontraba bajo la influencia de las sobretensiones producidas por un macizo sin explotar. La situación de puede ver en la Figura 7.28.

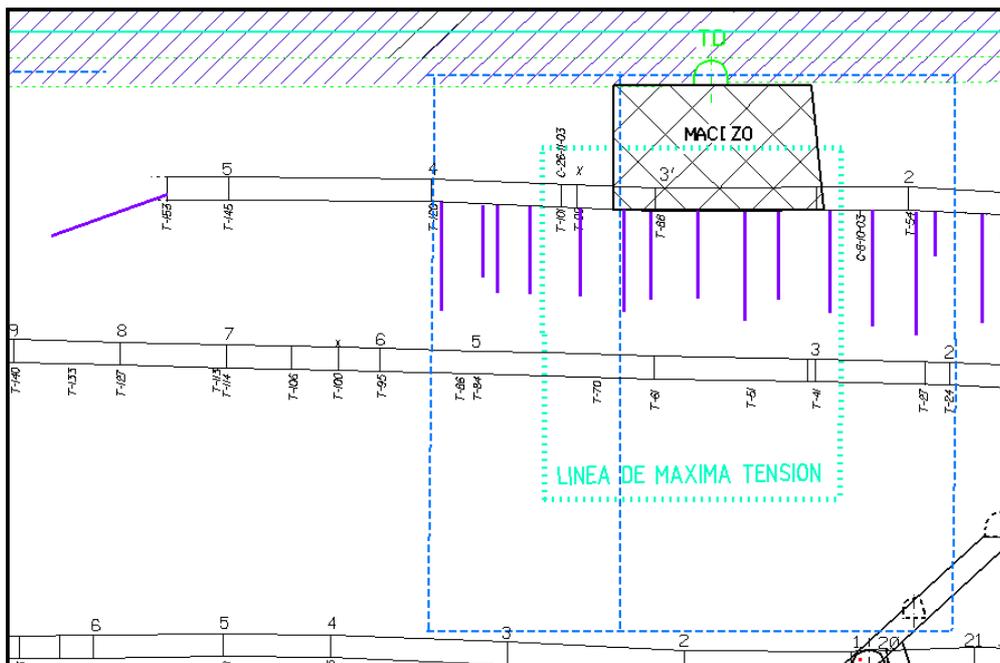
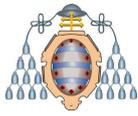


Figura 7.28.- Plano de labores con los sondeos verticales



Las perforaciones realizadas están representadas de color morado en la figura y, como se puede observar, se efectuaron un buen número de sondeos verticales así como otro inclinado en el frente. En este caso, el problema fue que enseguida se llenaban de agua y se pensó que su efectividad iba a ser muy reducida. Cuando se avanzó el nivel inferior se comprobó que, al contrario de lo que pensaba, el procedimiento había funcionado de tal manera que el valor de Q2 era bajo, siendo incluso cercano a cero en algunos momentos. Todo esto se puede ver en la Figura 7.29, donde se representa la evolución de las distintas concentraciones a lo largo del avance de una galería. En abscisas se representan los cuadros donde se realizaron las medidas.

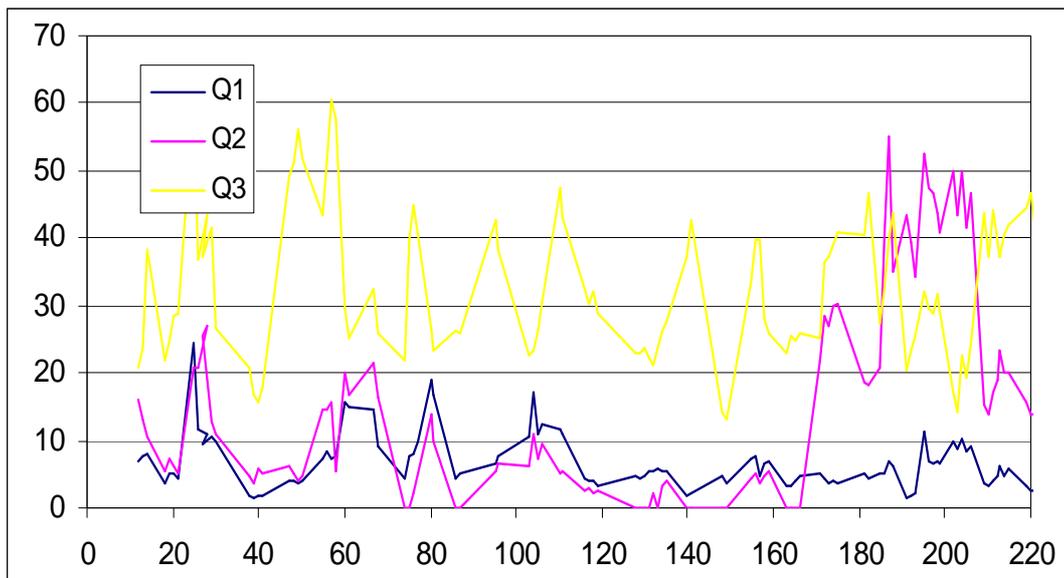
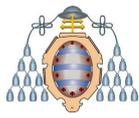


Figura 7.29.- Evolución de las concentraciones Q1, Q2 y Q3

El valor de Q2 siguió siendo bajo incluso después de dejar atrás la zona de influencia de los sondeos verticales, lo que hace pensar que el inclinado realizado en el frente también cumplió con su labor. Una vez pasada la zona de influencia, el valor de Q2 volvió a subir.

El sistema de desgasificación por sondeos verticales es un método que todavía está poco desarrollado en HUNOSA. Sin embargo, en las pruebas que se llevaron a cabo se obtuvieron unos resultados muy prometedores en lo relativo a la prevención de FGD.



7.4 Resumen de las actividades preventivas

En este apartado se van a resumir las medidas preventivas que se han utilizado en la mina. Hay que tener en cuenta que las condiciones de trabajo en el interior de las explotaciones no permiten, en muchos casos, la aplicación de medidas más sofisticadas. Otro factor a tener en cuenta es la normativa minera en materia de seguridad, que restringe mucho la utilización de equipos eléctricos en el interior. Todo ello limita las medidas preventivas que, por otro lado, deben de ser eminentemente prácticas,

La Figura 7.30 representa lo que se ha dicho acerca de los FGD, donde se han integrado las medidas preventivas.

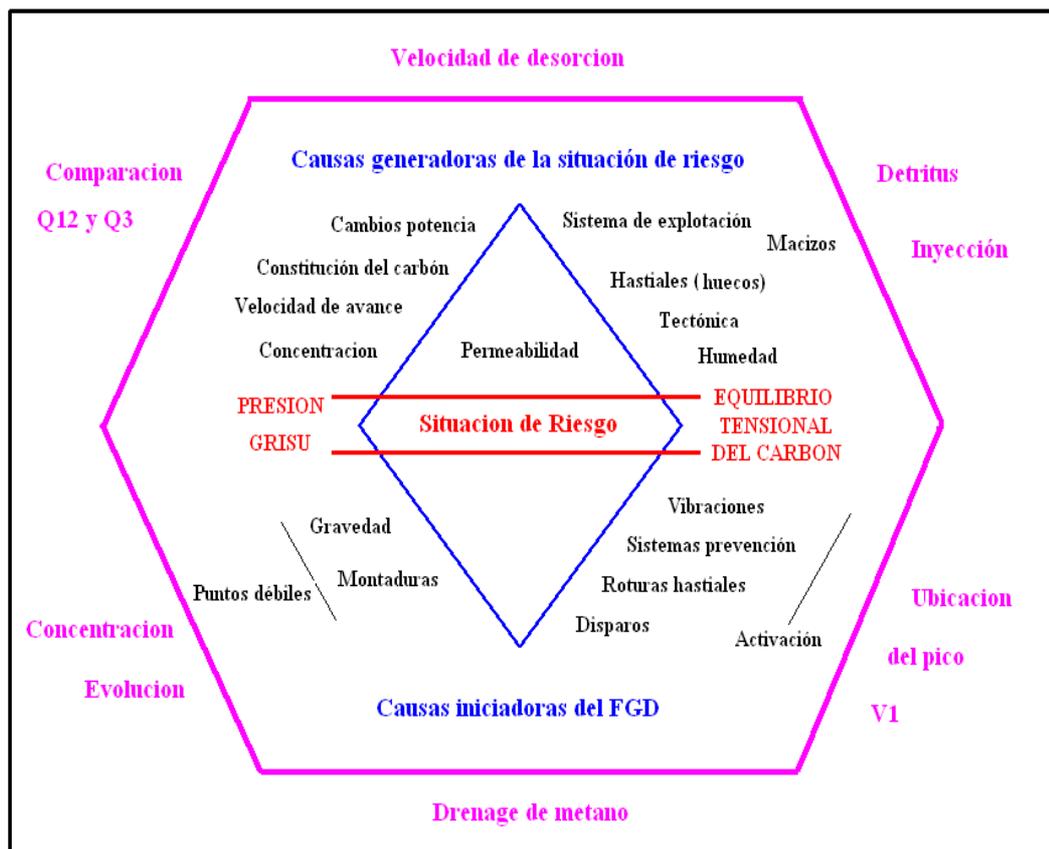
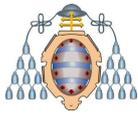


Figura 7.30.- Variables que intervienen en un FGD

Para entender mejor esta figura, conviene recordar los conceptos siguientes:

- La situación de riesgo no solamente viene dada por la velocidad de desorción sino también por la concentración de gas. No se han descrito FGD con



concentraciones inferiores a $6 \text{ m}^3/\text{tp}$. Sin embargo, tendencias crecientes de dicha concentración pueden indicar la cercanía de zonas peligrosas. Si este incremento de concentración corresponde a Q2, entonces la probabilidad de acercarse a una zona de riesgo aumenta.

- Las fuentes principales de riesgo son los macizos dejados en otras capas cercanas y los huecos mal hundidos en las propias. Sin embargo, mientras que los macizos son conocidos y se pueden delimitar sus zonas de influencia, los huecos suelen ser totalmente desconocidos.
- Otras fuentes de riesgos importantes son los estrechones que, como se ha visto, pueden llegar a duplicar los valores de compresión local del carbón. En ocasiones puede ser peor un estrechón que un hueco o macizo. Durante el avance del nivel 4.2N de la capa Julia se pudo comprobar cómo el Índice de Distensión (IDD) utilizado para determinar la eficacia de las medidas tomadas, avisó de la existencia de un estrechón. En la Figura 7.31 se representan, en color naranja, los índices obtenidos y en color azul la potencia de la capa.

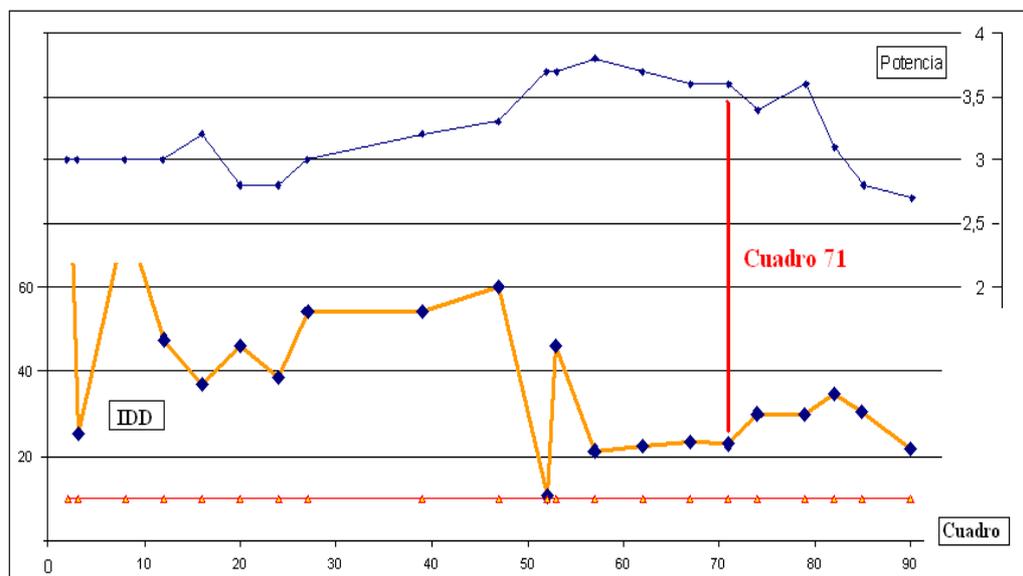
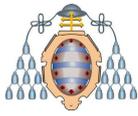


Figura 7.31.- Comparación del IDD con la potencia de la capa

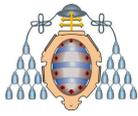
Las fallas también son fuentes de riesgos, porque el carbón ya está fracturado y por tanto debilitado mecánicamente con lo que almacena más metano y no necesita mucha sobrepresión para inestabilizarse.



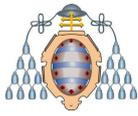
- El sistema de subniveles horizontales es muy sensible a los FGD porque genera muchos huecos que no hunden completamente así como cruces entre los avances inferiores y los sutirajes superiores, de sentido contrario. Debe de hacerse un estudio detallado de la secuencia de y altura de llave.

La prevención de FGD se basa en la distensión y la desgasificación del carbón, para conseguir que se alejen los máximos de sobrepresión y se incremente el “tapón” que estabiliza el frente de avance. Sin embargo, el propio sistema de prevención puede iniciar un FGD, por lo que hay que tomar las medidas de seguridad necesarias para evitar los riesgos de las personas que intervienen en su ejecución.

1. La inyección de agua es el método más empleado en las explotaciones de HUNOSA. Las conclusiones que se sacaron son las siguientes:
 - Cuanta más agua se inyecta mayor es la protección, por lo que siempre hay que ajustar la presión al mínimo posible.
 - Los efectos preventivos de dos inyecciones consecutivas se suman entre si, por eso es importante mantener la regularidad en la misma.
 - Cuando hay importantes sobrepresiones la eficacia de la inyección disminuye considerablemente, por lo que conviene utilizar otro sistema de prevención. También se recomienda avanzar más despacio, para que se vayan ajustando lentamente las tensiones.
 - La inyección es un procedimiento que se debe integrar dentro del ciclo de avance sin embargo, en determinadas situaciones, las mejoras necesarias para incrementar su eficacia, como serían aumentar la longitud de los sondeos de inyección y el tiempo, rompen con esta integración, lo que supone una limitación importante y obliga a acudir a otros sistemas.
2. Los sondeos de desgasificación con drenaje de carbón han resultado muy interesantes por su simplicidad y eficacia. Se utilizan sondeos ligeramente ascendentes con sobreexcavación, para favorecer la salida del carbón. Su uso se limita sólo a las zonas centrales de las galerías. En la zona de las coronas, puede dar lugar a problemas en el avance.



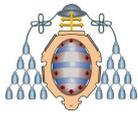
3. Los disparos de conmoción se han utilizado en la zona de las soleras. Su eficacia ha resultado dispar, ya que no ha resultado fácil cuantificar la profundidad y la cantidad de explosivo a utilizar. En los ensayos que se han realizado, se ha podido demostrar su eficacia en zonas con importantes sobrepresiones, pero siempre combinado con otros métodos.
4. Los sondeos descendentes parece una técnica prometedora, que se podría mejorar, mediante la inyección de agua a baja presión. Si la inyección se realiza durante el avance del nivel superior, se dispone de mucho tiempo para que el agua penetre en el carbón, En estas condiciones, el avance del nivel inferior será más sencillo por el aumento de humedad del carbón.



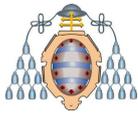
8 CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones del presente trabajo donde se destacan los resultados más significativos que se han obtenido.

1. Los fenómenos gasodinámicos en la mina vienen dados por la conjunción de tres hechos: la presencia de gas (en determinadas condiciones), la existencia de sobretensiones (relacionadas con la tipología de los hastiales, las técnicas de laboreo, estrechones, fallas, etc.) y las propiedades del carbón en relación a su comportamiento frente al gas y a las tensiones (resistencia, deformabilidad y permeabilidad).
2. La distensión y desgasificación del carbón mediante inyección de CO₂ a presión, puede llegar a ser una metodología de trabajo muy interesante para garantizar la seguridad de los trabajos en la minería de carbón. Después de inyectar la capa de carbón en un punto, ya sea con gas o con agua, se crea una zona de influencia alrededor del mismo, donde se produce la fracturación del carbón y con ella la distensión.
3. Dependiendo de la resistencia del carbón, su permeabilidad, la presión a la que se inyecte y el tiempo de inyección, esta zona afectada por la inyección puede llegar al frente del carbón o bien quedar por delante del mismo, separada de la zona distendida por una zona no afectada. En estas últimas condiciones se puede crear una zona sobrecargada que actúa como dique de contención del fluido inyectado, lo que puede comprometer a la seguridad en el avance.
4. Si se detectan zonas intermedias no afectadas entre el frente y el área de inyección, resulta aconsejable un tratamiento posterior intentando comunicar estas dos últimas zonas, por ejemplo mediante sondeos de distensión o inyecciones a distancias progresivas desde el interior del macizo hacia el frente.
5. La inyección, tanto de agua como de gas, es una técnica de descompresión si la profundidad de la inyección y la presión de inyección son tales que se consiga comunicar, en una o en varias etapas, la zona inyectada con el frente de carbón del nivel. Conviene, por tanto, realizar un control durante el proceso de inyección que confirme que este objetivo se ha alcanzado.

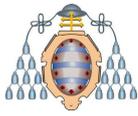


6. Las inyecciones a alta presión (más de 100 MPa) pueden producir daños en los hastiales y sobre todo en la zona del techo que deben ser tenidos en cuenta durante las labores de avance para evitar derrabes. Las inyecciones a baja presión (menos de 10 MPa) aumentan las probabilidades de que aparezcan zonas intermedias no afectadas a menos que se reduzca la longitud de inyección y, con ello, la zona protegida.
7. Para los carbones modelizados, para conseguir longitudes descomprimidas de 8 a 10 m por delante del frente, es necesario ir a presiones de inyección del orden de 50 MPa (que se pueden conseguir con el sistema CARDOX pero más difícilmente con agua). En estas condiciones debe cuidarse el estado de techo y hastiales durante el avance.
8. Para carbones poco permeables, con grandes tensiones inducidas e importantes cantidades de metano, puede resultar más aconsejable la inyección de gas que de agua, ya que el carbón es más permeable al gas. Si se utiliza el agua, se genera una zona distendida de menores dimensiones, se pueden llegar a crear zonas de sobrepresión y se libera menos metano.
9. El sistema PYROC, que utiliza una mezcla productora de gas cuya iniciación se realiza con un inflamador eléctrico accionado por un explosor convencional, tras su deflagración, genera una mezcla de gases no combustibles, principalmente CO₂, que se expanden dentro del barreno, haciendo que se produzcan grietas y con ello la mejora de la permeabilidad.
10. El método de explotación por subniveles horizontales genera muchos huecos que no hunden completamente así como cruces entre los avances inferiores y los sutirajes superiores, de sentido contrario. Todo ello da lugar a sobretensiones que pueden ser críticas en la generación de un FGD.
11. La inyección de agua es el método de prevención más empleado en el avance de los niveles en este tipo de explotaciones en HUNOSA. Se ha observado que, en general, cuanta más agua se inyecta mayor es la protección y que los efectos preventivos de dos inyecciones consecutivas se suman entre si, por eso es importante mantener la regularidad en la misma. Cuando hay importantes



sobrepresiones la eficacia de la inyección disminuye considerablemente, por lo que conviene utilizar otros sistemas de prevención.

12. Los sondeos de desgasificación con drenaje de carbón y los tiros de conmoción han resultado muy interesantes por su simplicidad y eficacia. Sin embargo, debido a sus limitaciones, su eficacia mejora cuando se utilizan de forma combinada con otros sistemas.
13. Los sondeos descendentes y los sondeos de distensión se mostraron como unas técnicas prometedoras, que se podrían mejorar añadiendo la inyección de agua a baja presión. En el primer caso, si la inyección descendente se realiza durante el avance del nivel superior, se dispone de mucho tiempo para que el agua penetre en el carbón. En estas condiciones, el avance del nivel inferior será más sencillo por el aumento de humedad del carbón.
14. En este tipo de explotaciones se ha visto que las fuentes principales de riesgo son los macizos dejados en otras capas cercanas, los huecos mal hundidos en las propias, los estrechones y las fallas. En todos estos casos, el Índice de Distensión (IDD) utilizado para determinar la eficacia de las medidas tomadas, ha resultado muy interesante, ya que ha sido capaz de determinar la existencia de una alteración con anterioridad y ha permitido establecer unos valores mínimos para el avance de los niveles.



9 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

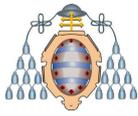
Se proponen para el futuro dos líneas de investigación. Por un lado, la vía experimental en el laboratorio, donde se pueden estudiar distintas muestras de carbón y hacer ensayos con poco riesgo y utilizar equipos de instrumentación precisos. Y por otro lado, la vía minera, para tratar de confirmar los resultados obtenidos en el laboratorio. Hay que tener en cuenta que, la utilización de equipos eléctricos en el interior de la mina, está regulada por la normativa específica, lo que limita el diseño de los ensayos.

9.1 Trabajos en el laboratorio

Para realizar los ensayos en el laboratorio es necesario que las muestras de carbón lleguen lo más inalteradas posible, para caracterizar algunos parámetros relacionados con la interacción entre CO_2 y carbón, tales como:

- Cuál es la cantidad de CO_2 que dicho carbón es capaz de almacenar en función de la presión.
- Cómo se produce el proceso de adsorción-desorción del CO_2 en el tiempo (de cara a minimizar riesgos para el personal).
- En qué grado sustituye el CO_2 al CH_4 en el carbón comparativamente con el agua y el aire.
- Cómo evoluciona la permeabilidad al CO_2 y al CH_4 con el estado tensional del carbón. Este dato permitiría simular con programas informáticos y de una forma mucho más precisa, la evolución del flujo de gas inyectado hacia el carbón y el frente, y, como consecuencia, la distensión obtenida.
- Cuál es la influencia de la velocidad de inyección en el comportamiento tanto del gas en el carbón como del propio carbón.

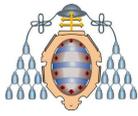
Para cada una de las muestras, habría que diseñar un ensayo experimental, debidamente instrumentado, para controlar la presión de gas y las tensiones. Con todo ello utilizar las diferentes técnicas de distensión local: sondeos, inyección de agua y gas CO_2 con el fin de comprobar su eficacia, valorando sus ventajas e inconvenientes de cara a su utilización en condiciones reales.



9.2 Trabajos en la mina

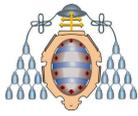
El campo de trabajo en la mina sigue siendo muy amplio. A continuación se indican algunas líneas de actuación.

- El proceso de inyección de agua continúa siendo un misterio. Aunque se ha incrementado mucho su eficacia en los últimos años, en ocasiones puede quedar en entredicho, por eso habría que seguir acumulando datos sobre la humedad alcanzada en profundidad. Asimismo también debería completar la información sobre el metano desprendido con la idea de conseguir un indicador más fiable de la eficacia de la inyección.
- Continuando con la inyección y dado que la penetración del agua es un factor importante, habría que iniciar una investigación acerca de la disminución de la viscosidad del agua y/o su tensión superficial de forma que pueda vencer la baja permeabilidad del carbón y abrirse camino hacia el interior del macizo con lo que mejorar su eficacia. La investigación se podría iniciar con las sustancias que se utilizan en la prevención y lucha contra fuegos cuyo efecto es la disminución de la tensión superficial.
- El incremento de los niveles de Q2 puede anticipar el acercamiento a zonas de sobretensión pero de momento no se pueden cuantificar dichos niveles de riesgo. Tampoco hay suficientes datos sobre la monitorización de las tensiones y su evolución respecto al avance de los sutirados. Se propone profundizar en estos dos aspectos, para tratar de conseguir indicadores del nivel de riesgo.
- Hasta ahora se han construido modelos muy simples sobre el flujo de gas a lo largo de una capa de carbón, que han ayudado a comprender cómo la presión del gas puede cambiar rápidamente durante el avance de un Nivel, si se producen cambios de permeabilidad. Estos modelos deberían completarse para poder trabajar en tres dimensiones, para incluir los cambios de permeabilidad, no solo con la tensión del terreno, sino también con la propia concentración de metano (el carbón al desgasificarse se contrae aumentando su permeabilidad) y para poder incluir los conceptos de Q1, Q2 y Q3.

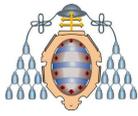


10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

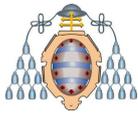
- Airey, E. M. "A theory of gas emisión in coal mining operations". Mining Research and Development Establishment, UK Report N° 21 (1976).
- Ayruni, A.T. "Theory and practice of mine gas control at deep mines". Nedra press, (Translated into English by Rockville, Maryland, USA), 335 pp (1981).
- Barker-Read, G.R.; Radchenko. "Gas emission from coal associated strata: interpretation of quacity sorption-kinetic characteristics". Mining Sci. Technol., 12 263 – 284 (1989).
- Beamish, B.B.; Crosdale, P.J.; *"Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type"*. International Journal of Coal Geology, 35 (1-4) pp. 27-55. 1998.
- Bertard C., Bruyet, B.and Gunther, J. "Determination of desorbable gas concentration of coal (direct method)" International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Volume 7, Issue 1, pp 43-50 (1970).
- Deitz, V.R., Carpenter, F.G. and Arnold, R.G. "Interaction of carbon dioxide with carbon adsorbents below 400 °C". Carbon Vol. 1, pp 245 – 254 (1964).
- Diamond, W.P., Murrie, G.W., McCulloch, C.M., 1976. Methane gas content of the Mary Lee Group of coalbeds, Jefferson, Tuscaloosa, and Walker Counties, AL. US Bur Mines, Rep. Invest. 8117, 9 pp
- Diamond, W.P., LaScola, J.C., Hyman, D.M. "Results of direct – method determination of the gas content of coalbeds". US Bur. Mines, Info. Cir. 9067, 95 pp (1986).
- Ettinger, I.L. "Solutions of methane in coal beds". Solid Fuel Chemistry 18, 24–31. 1984.
- Fu Hua, Jing Xiao-liang, Liang Ming-guang. 2012. "Application of Computational Intelligence Platform in Coal and Gas Outburst Prediction." *Journal of Coal Science & Engineering* 18 (1): 49-54.
- Fuchang Hao, Mingju Liu, Lijuan Sun. 2011. "Study of Comprehensive Technology of Coal and Gas Outburst Prevention in Mining Panels." *Procedia Engineering* 26: 699-703.



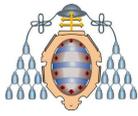
- Greaves, K.H., Owen, L.B., McLennan, J.D. “*Multi-component gas adsorption–desorption behavior of coal*”. Proc. of the 1993 Int. Coalbed CH₄ Symp., Tuscaloosa, AL, pp. 197–205. 1993
-
- Hargraves, A.J. “*Instantaneous outbursts of coal and gas, a review in the proceeding*”. The Australian Institute of mining and Metallurgy, Vol. 285, pp 1-37. 1983.
- Harpalani, S. and McPherson, M.J. “The effect of gas evacuation on coal permeability”. International Journal of Rock Mecanichs and Mining Sciences 21, pp 161-164 (1986).
- Jagiełło, J.; Sanghani, P.; Badosz, T. J.; Schwarz, J. A.; “Thermodynamic study of high-pressure adsorption of methane on activated carbons: The effect of oxidation on pore structure and adsorption energy heterogeneity”. Carbon, 30 (3) pp. 507-512. 1992.
- Kidybiński, A.; “Bursting liability indices of coal”. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 18 (4) pp. 295-304. 1981
- Kim, A.G., 1977. Estimating methane content of bituminous coalbeds from adsorption data. Us Bur. Mines, Rep. Invest. 8245
- Kissel, F.N. and Edwards, J.C. (1975). Two-phase flow in coalbeds, U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 8066, USA, 16 p.
- Levine, J.R., 1992 “Oversimplifications can lead to faulty coalbed gas reservoir análisis” Oil Gas Journal,Nº 23 pp 63-69.
- Li, H.; Yujiro Ogawa,Y.; Shimada, S.; “Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery”. Fuel, 82 (10) pp. 1271-1279. 2003.
Littke, R., and D. Leythaeuser, “*Migration of oil and gas in coals*”. B.E. Law and D.D. Rice, eds., Hydrocarbons from coal: AAPG Studies in Geology 38, p. 219-236. 1993.
- Litwiniszyn, J.; “*A model for the initiation of coal-gas outbursts*”. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 22 (1) pp. 39-46. 1985



- Liu Yanwei, Liu Mingju, and Wei Jianping. 2011. "Regional Outburst-Prevention Technique by Gas Predrainage Based on Large Diameter Boreholes Along Coal Seams Under Deep Mining." *Procedia Engineering* 26: 623-629.
- Mavor, M.J., Pratt, T.J., Britton, R.N. "Improved methodology for determining total gas content, vol. I". Canister gas desorption data summary. Gas Research Inst., Topical Rep. GRI-93/0410. 1994.
- Mavor. M.J., Pratt, T.J.; Nelson, C.R. Quantitative evaluation of coal seam gas content estimate accuracy. Proc. Intergas '95. University of Alabama , Tuscaloosa, AL, pp. 379-388 (1995).
- Mavor, M.J., Pratt, T.J. 1996. Improved methodology for determining total gas content. Vol. II. Comparative evaluation of the accuracy of gas-in-place estimates and review of lost gas models. Gas research Inst., Topical Rep. GRI-94/0429.
- McFall , K.S., Wicks, D.E., Kuuskraa, V.A., 1986. A geologic assessment of natural gas from coal seams in the warrior basin, Alabama. Gas research Inst., Topical Rep. GRI-86/0272.
- McLennan, J.D., Schafer, P.S., Pratt, T.J. A Guide to determining coalbed gas content, Gas Research Inst., GRI-94/0396 (1995).
Murray H.H. "Overview -- clay minerals applications". Appl. Clay Sci. 5, 379-395. 1991.
- Naj Aziz, Dennis Black, and Ting Ren. 2011. "Mine Gas Drainage and Outburst Control in Australian Underground Coal Mines." *Procedia Engineering* 26: 84-92.
- Neuzil, C.E., 1994. "Characterization of flow properties, driving forces and pore-water chemistry in the ultra-low permeability Pierre Shale, North America". OECD/NEA Workshop on the Determination of Hydraulic and Hydrochemical Characteristics of Argillaceous Rocks, Nottingham, UK. ISBN 92-64-14485-4.
- Ogle, M. "Determining the gas content of coal seams using adsorption/desorption techniques". B.E. thesis, Department of Civil and Mining Engineering. University of Wollongong, 158 p. (1984)



- Paterson, L.; “A model for outbursts in coal”. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 23 (4) pp. 327-332.1986.
- Pekot, L.J., Reeves, S.R. “Modeling the effects of matrix shrinkage and differential swelling on coalbed methane recovery and carbon sequestration”. Proceedings of the 2003 International Coalbed Methane Symposium. University of Alabama, Tuscaloosa. Paper 0328. 2003.
- Saghafi, A. “Coal seam gas reservoir characterisation”. Proceedings of the Gas from Coal Symposium, Organised by Ultra System Technology, March 2001, Brisbane, Australia Also available at:
<http://www.australiancoal.csiro.au/pdfs/saghafi.pdf>.
- Stefanska, C. G. “Influence of carbon dioxide and methane on changes of sorption, and dilatometric properties of bituminous coals”. Archiwum Gornictwa, Poland, Vol. 35, pp. 105–113. 1990.
- Schatzel, S.J., Hyman, D.M., Sainato, A., LaScola, J.C., 1987. Methane contents of oil shale from the Piceance Basin, CO. US Bur Mines, Rep. Invest. 9063, 32 pp.
- Seidle, J. P. and Huitt, L. G. “Experimental measurement of coal matrix shrinkage due to gas desorption and implications for cleat permeability increases, paper SPE 30010”. Proceedings of the international meeting on petroleum engineering , Beijing, China, pp.575-582. 1995.
- Sereshki, F. “Improving Coal Mine safety by identifying factors that influence the sudden release of gases in outburst prone zones”. DT University of Wollongong, May 2005.
- Shepherd, J.; Rixon, L.K.; Griffiths, L.; “Outbursts and geological structures in coal mines: A review”. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 18 (4) pp. 267-283. 1981.
- Sheng Xue, Yucang Wang, Jun Xie, and Gang Wang. 2011. "A Coupled Approach to Simulate Initiation of Outbursts of Coal and Gas — Model Development." *International Journal of Coal Geology* 86: 222-230.



- St. George, J. D.; Barakat, M. A.; "The change in effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal". *International Journal of Coal Geology*, 45 (2-3) pp. 105-113. 2001.
- Tingkan Lu, Zhijian Zhao, and Hefeng Hu. 2011. "Improving the Gate Road Development Rate and Reducing Outburst Occurrences using the Waterjet Technique in High Gas Content Outburst-Prone Soft Coal Seam." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 48: 1271-1282.
- Wang, H.T.; et al. "The Effect of Geo-electric Field on coalbed Gas Permeability". *Journal of Changqing University*, 23 (supp.) . 2000.
- Wang, Y.; Jinhe Yang, J.; Chen, P.; "Study on technical classification of Chinese lignites, bituminous coals, and anthracites". *Energy*, 11 (7) pp. 671-678. 1987
- Wu Xiang, Cheng Wu-yi, and Miu Yi. 2011. "Research on Establishing the Indexes System of Controlling the Coal and Gas Outburst Accident." *Procedia Engineering* 26: 2018-2026.
- Xu Yanpeng and Wang Zhaofeng. 2011. "The Development of the Coal and Gas Outburst Prediction Positional Sampler." *Procedia Engineering* 26: 1495-1501.
- Yee, D., Seidle, J.P., Hanson, W.B., 1993. Gas sorption on coal and measurement of gas content. In: Law, B.E., Rice, D.D. (Eds), *Hydrocarbons from Coal*. Am. Assoc. Pet. Geol., Tulsa, OK, pp. 159-184.
- <http://recopol.nitg.tno.nl/downloads/Busch0350.pdf>
- <http://recopol.nitg.tno.nl/downloads/Mazumder0331.pdf>
- <http://recopol.nitg.tno.nl/downloads/Vanbergen0320.pdf>
- http://www.geolsoc.org.uk/template.cfm?name=geoevents_abstracts&eventId=PG20&abstractType=short&showList=true
- <http://www.lne.es/secciones/noticia.jsp?pNumEjemplar=1268&pIdSeccion=38&pIdNoticia=402694&pIndiceNoticia=6>
- <http://www.webislam.com/?idn=2023>
- <http://www.abc.net.au/ra/innovations/stories/s1112463.htm>
- <http://www.co2net.com/infocentre/brochures>

ANEXO I
PUBLICACIÓN COMPLEMENTARIA

Prevención de Fenómenos Gasodinámicos en HUNOSA

Juan José Fernández Díaz¹, Albino González García², Daniel González Suárez³

¹ Dirección de Prevención de Riesgos. HUNOSA. Avda. de Galicia, 44, 33005 Oviedo. juanjf@hunosa.es

² Dpto. Prevención de Fenómenos Gasodinámicos. Avda. de Galicia, 44, 33005 Oviedo. albinog@hunosa.es

³ Dpto. Prevención de Fenómenos Gasodinámicos. Avda. de Galicia, 44, 33005 Oviedo. danielg@hunosa.es

Palabras clave: Carbón, metano, desprendimientos súbitos, liberación de tensiones.

Resumen

El metano contenido en las capas de carbón se desprende, en condiciones normales, de forma continua a lo largo de toda su superficie libre. En algunas situaciones existe el riesgo de que se produzca un Fenómeno Gasodinámico (FGD) en el frente de carbón; dicho fenómeno consiste en un desprendimiento súbito de carbón acompañado de gran cantidad de metano. Este riesgo se valora mediante índices que permiten caracterizar la propensión del carbón a estos FGD.

HUNOSA ha desarrollado métodos de prevención de FGD para el avance de galerías en carbón en explotaciones por el método de subniveles horizontales. En la actualidad, se continúan los proyectos de investigación en capas concretas con el objetivo de poner a punto medidas de desgasificación regionales. En la ponencia se describen de los proyectos más recientes y los métodos aplicados en cada caso.

Abstract.

The methane contained in the coal seams, in normal conditions, flows continuously throughout the surface of the face. In some situations the existing risk is Outbursts (or better called in our case Coalburst); this phenomenon is a sudden coal loosening accompanied by great amount of methane. This risk is assessed using several indexes.

HUNOSA has developed methods of prevention of Coalburst, for the advance of coal galleries in caving exploitation method. Currently we are developing research projects in particular coal seams in order to complete regional degassing systems. The most recent projects and methods applied in each case are described in this text.

1. Introducción

La Empresa HUNOSA, desde su fundación en el año 1967, ha centrado su actividad en la explotación de capas de carbón en la Cuenca Carbonífera Central de Asturias.

Uno de los riesgos más importantes presentes en nuestras explotaciones de carbón son los Fenómenos Gasodinámicos (FGD); bajo esta denominación se engloban un conjunto de manifestaciones que abarcan desde el derrabe con grisú hasta los desprendimientos instantáneos. Estos fenómenos son consecuencia de una liberación de energía, manifestándose con la proyección de forma súbita de carbón, acompañado de un importante desprendimiento del gas.

Los FGD pueden ocasionar que las personas próximas queden enterradas por el carbón, la asfixia por formación de una atmósfera irrespirable y originan atmósfera explosiva.

Existen tres factores fundamentales para la generación de un FGD; la presión del metano contenido en capa, el estado tensional del macizo y el efecto de la gravedad, siendo los dos primeros los factores fundamentales.

Debido a las especiales características del yacimiento, HUNOSA ha tenido que avanzar galerías en capas susceptibles de presentar FGD, contando con un departamento específico, denominado Departamento de Prevención de FGD, que dispone de una amplia experiencia en este campo. En la actualidad cuenta con un equipo compuesto por 15 trabajadores, entre técnicos y operarios, y realiza sus trabajos en los diferentes centros de la empresa.

Dado que las explotaciones se encuentran cada vez en zonas más profundas, y siendo las presiones uno de los factores desencadenantes, los FGD pueden aparecer en capas sin historia y se agravan en otras en las que se producían de forma incipiente, siendo necesario el estudio y desarrollo de medidas preventivas.

A partir de las experiencias obtenidas en las explotaciones desde sus inicios; en los últimos años se vienen realizando diferentes estudios e investigaciones además de desarrollarse métodos para el avance de galerías en situaciones de riesgo.

2. Índice de riesgo

La prevención de los FGD va encaminada a detectar las zonas de riesgo y la aplicación de medidas preventivas en estas zonas. Las zonas de riesgo se valoran mediante índices que permiten determinar la propensión del carbón a estos fenómenos.

Existen diferentes índices desarrollados en distintos países, todos ellos basados en ensayos estandarizados sobre muestras de carbón. HUNOSA ha venido utilizando principalmente dos de estos índices para valorar el riesgo de FGD:

- Un índice encaminado a medir la cantidad de concentración de grisú que tiene la capa, la concentración de gas en capa C.
- Otro evalúa como el gas se desprende del carbón, es decir, la cinética de desorción del gas contenido en el carbón y el índice de velocidad de desorción V1.

Estos valores se complementan con la medida de parámetros o propiedades del carbón (presión de gas, permeabilidad, dureza, estado tensional,...).

Las capas de carbón son diferentes entre sí y su comportamiento ante los FGD no es idéntico; además una misma capa presenta heterogeneidades, variando sus propiedades de una zona a otra. Por lo tanto los valores de referencia de los índices que se utilizan para definir las zonas de riesgo no se pueden extrapolar de una cuenca a otra o de una capa a otra.

A parte del control exhaustivo en las capas que son más propensas a fenómenos gasodinámicos, se considera fundamental la realización de medidas sistemáticas en las capas de carbón con el fin de tener un registro que permita conocer los valores normales de los índices en una capa. La existencia de variaciones en los valores normales de una capa puede indicar la presencia de una

posible zona de riesgo. Estas variaciones se pueden producir por el aumento de la profundidad, trastornos geológicos locales (fallas, pliegues,...), zonas de bordes de tajo, influencia de zonas en activo próxima.

Existe un muestreo sistemático de todos los frentes en carbón activos, con el fin de detectar cualquier variación en las condiciones de una capa en cuanto a su riesgo frente a los fenómenos gasodinámicos. En los últimos años se han realizado más de 5000 sondeos de concentración en capa de carbón de los que se dispone de la medida de concentración y velocidad de desorción.

2.1. LA CONCENTRACIÓN DESORBIBLE DE GRISÚ

Se basa en la medida de la cantidad de gas contenido en el carbón. Existen diferentes métodos para su determinación, utilizándose en HUNOSA la determinación de forma directa a través de muestras de 10 g de carbón tamizado de granulometría 0,8-2 mm, extraídas de la capa mediante sondeos. En un mismo sondeo se pueden tomar distintas medidas a diferente profundidad.

El procedimiento para la obtención de este parámetro se encuentra regulado por la Especificación Técnica 0308-5-92 en la que se establece la metodología para el cálculo del grisú en cada una de las fases siguientes:

Q1: Cantidad de grisú desprendida durante la toma de la muestra.

Q2: Cantidad de grisú desprendida en el traslado en frasco hermético de la muestra al laboratorio.

Q3: Determinación en laboratorio de la cantidad de grisú que resta por desprenderse.

El resultado se expresa en m^3 de gas desprendido por tonelada de carbón libre de cenizas (m^3/tp).

El contenido crítico de grisú es utilizado en diferentes países con respecto a los fenómenos gasodinámicos, varía Hungría , Ucrania y Polonia 8; Alemania 9 , Australia 5-6 (m^3/tp).

HUNOSA utiliza 9 como valor de referencia para indicar las zonas críticas.

2.2.- LA CINÉTICA DE DESORCIÓN

La propensión del macizo de carbón a los fenómenos gasodinámicos se caracteriza, no solamente por su contenido en grisú, sino también mediante índices que evalúan como el gas se desprende del carbón, es decir la cinética de desorción del gas contenido en el carbón.

El índice más utilizado es la velocidad de desorción V1 cuya determinación está regulada mediante la Especificación Técnica 0307-2-92 y expresa la cantidad de grisú en cm^3 que desprende una muestra de carbón de 10 g con una granulometría comprendida entre 0,5 y 0,8 mm, en el intervalo de tiempo que va del segundo 35 al 70 a partir de que la muestra ha sido extraída del macizo de carbón.

La profundidad a la que se valora el riesgo es normalmente de 3 m. Las medidas de V1 se realizan en el interior de la mina mediante un desorbómetro.

El valor crítico, generalmente aceptado, a partir del cual un carbón se considera propenso a los fenómenos gasodinámicos es de $2 cm^3/10g/35s$, aunque en determinadas explotaciones los procedimientos de trabajo obligan a tomar medidas preventivas a partir de $1,5 cm^3/10g/35s$.

La figura 1 muestra una grafica con los resultados de un análisis de concentración y el índice V1.

Velocidad de desorción V_{1p} ($\text{cm}^3/10 \text{ g}/35\text{s}$)

Concentración de gas en capa C (m^3/tp)

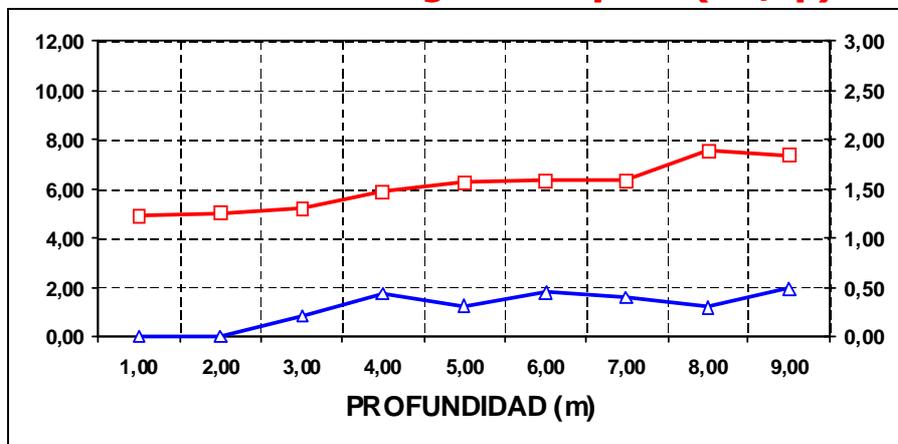


Figura 1. Registro de los índices de riesgo en un taladro perforado en carbón

2.3.- LOS ÍNDICES POR TENSIONES

La localización de las zonas de sobrepresión se realiza mediante medidas directas en la mina o a través de cálculos que determinan las proyecciones de los bordes de tajo o macizos en explotaciones colindantes.

El método de finos de perforación (Test de Jahns) que ha sido desarrollado fundamentalmente a partir de experiencias desarrolladas en Alemania, Polonia y la antigua Unión Soviética, presenta la ventaja de ser a la vez un sistema de relajación y desgasificación del macizo de carbón. Este método está basado en los resultados de un test de perforación mediante sondeos y define la situación como peligrosa si los síntomas de sobrepresión se localizan a una cierta distancia del frente de trabajo. Estos síntomas son la producción de finos exceda el volumen crítico y que la reacción del carbón impida continuar la perforación.

3. Medidas preventivas

Los métodos de prevención de los fenómenos gasodinámicos se pueden clasificar en activos y pasivos.

ACTIVOS: eliminan el riesgo mediante la distensión y desgasificación previa del macizo de carbón:

- Explotación de una capa de defensa (capa égida)
- Sondeos de distensión y desgasificación.
- Inyección de agua.

PASIVOS: se induce el fenómeno cuando se han adoptado medidas de seguridad:

- Disparos de conmoción.

4. Métodos empleados en Hunosa

El método general que se aplica es ir realizando medidas de concentraciones y velocidades de desorción de forma programada en todas las explotaciones activas; en aquellas capas donde se tenga reconocida su propensión a FGD estas medidas se realizan de forma continua. Cuando se producen medidas de los índices de riesgo con valores por encima de las referencias, indicando posible zona de riesgo, se procede inmediatamente a tomar medidas preventivas. Estas son de carácter local, es decir, se aplican en el entorno de la zona de trabajo, siendo necesario continuar con las medidas.



El riesgo de FGD se deduce de la integración de los dos componentes básicos estudiados: el grisú y el estado tensional del macizo de carbón. Es por ello que uno de los objetivos principales ha de ser verificar y evaluar esa integración que conduzca a la identificación de las áreas de riesgo, a ser posible antes de su explotación

La experiencia acumulada con miles de ensayos avala la afirmación de que mientras la concentración de grisú en una capa no suele tener variaciones laterales importantes (Figura 2), la cinética de desorción presenta oscilaciones, normalmente asociadas a trastornos geológicos o zonas de sobrepresión, que identifican las zonas de riesgo.

Es por ello que en las labores propensas a FGD, las medidas de V1 deben de tomarse antes de los trabajos de avance, permitiéndose éste únicamente cuando los valores estén por debajo del valor de $2 \text{ cm}^3/35 \text{ s}$ para 10 g. En caso contrario, se procederá a la aplicación del método de prevención adecuado y se verificará su eficacia. Para ello se comprobará que los nuevos valores son inferiores al límite fijado, antes de reanudar los trabajos.

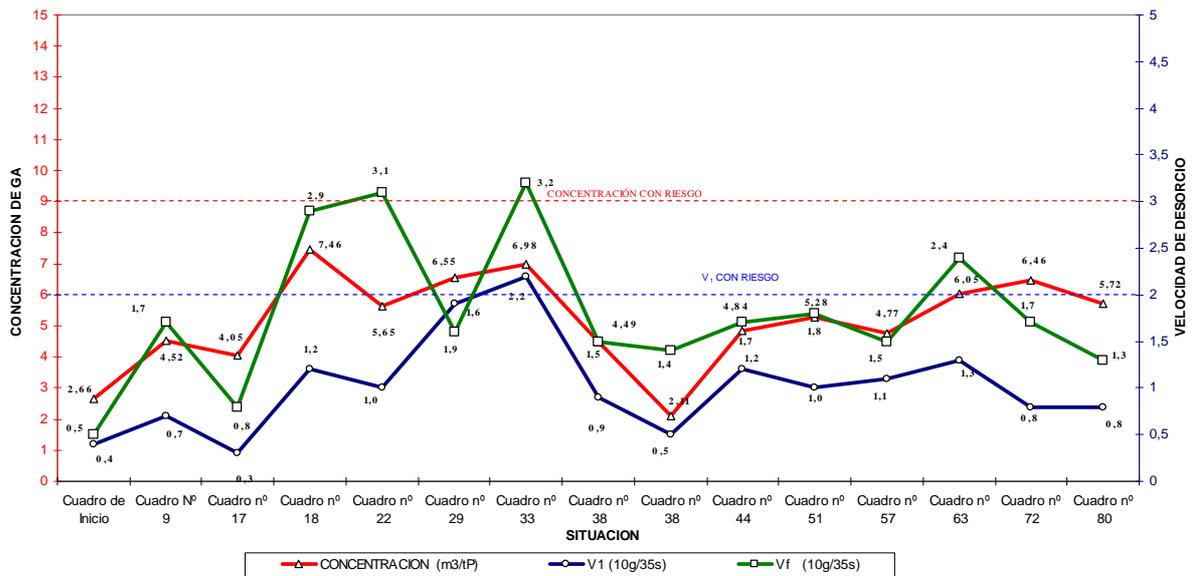


Figura 2. Registro evolución de la concentración de grisú y velocidad de desorción en un avance

Una de las medidas preventivas más utilizadas es la inyección de agua en capa. Para ello se perforan en el carbón unos barrenos de 45 mm de unos 3 metros de profundidad, para posteriormente introducir las cánulas de inyección. La presión de inyección que se utiliza varía según las condiciones de la capa, trabajando entre valores de red hasta los 100 bares.

Existen capas para las cuales las medidas son más específicas, estas capas con propensión a los FGD para las que existen unos procedimientos específicos en los que las medidas preventivas son más exhaustivas.

Cabe destacar la sistemática y los procedimientos para la prevención de FGD llevados a cabo en dos de las capas que actualmente se están explotando en HUNOSA, la capa 8ª y la capa Julia, que presentan características muy diferentes en cuanto a la permeabilidad, ya que la capa 8ª presenta muy poca permeabilidad.

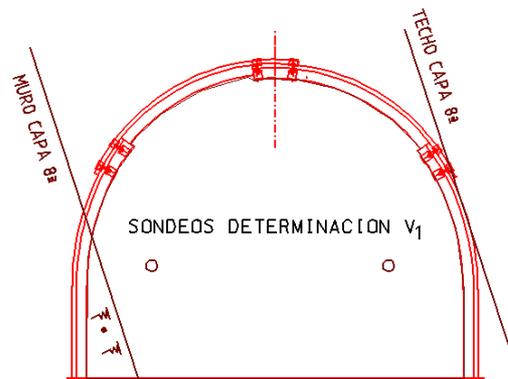
4.1. Capa 8ª pozos San Nicolás y Montsacro

La capa 8ª perteneciente al paquete canales es explotada por los pozos San Nicolás y Montsacro. El método preventivo utilizado es explotar previamente una capa égida o de defensa con el fin de lograr una distensión del macizo, en este caso se explota la capa 7ª (situada a techo) o la capa 9ª (situada a muro) dependiendo de la zona del panel a explotar.

Sobre el plano de capa de la capa 8ª se trazan las líneas de tensión que nos indican las zonas del macizo de la capa 8ª que ha sido distendida por la acción de la explotación de la capa égida y donde se puede avanzar.

Una vez lograda la distensión se procede al avance de la capa 8ª siguiendo un procedimiento específico que incluye los siguientes pasos:

- Antes de metro de avance la medida del índice de riesgo V1 en la vena del techo y en la vena del muro de la capa a 2 y 3 metros de profundidad en cada taladro, según figura 3. En caso de que cualquiera de estos valores superase el límite se procedería a la inyección de agua con sondeos de 3 metros de profundidad.



Los sondeos se daran entre 1.00 y 1.50 m del suelo

Figura 3. Esquema para la determinación del índice V1 en el avance de la capa 8ª.

- Independientemente de los valores del índice V1 obtenidos, cada 2 metros de avance de la galería se procede a la inyección de agua en capa a media presión (aproximadamente 40 bares).

4.2. Capa Julia Pozo Sotón

El método diseñado para la prevención de los FGD en esta capa, perteneciente al paquete Mª Luisa del Pozo Sotón, consiste en la realización de una serie de sondeos en carbón desde el frente de avance efectuados con perforadoras neumáticas manuales, barrenas helicoidales y bocas de tenedor de 45 mm de diámetro.

Este conjunto de sondeos tiene como finalidad lograr una desgasificación y una distensión de la zona influenciada por el avance.

- Sondeos de desgasificación: Con una inclinación de 18° hacia arriba y en la zona superior de la sección se realizan 2 sondeos (uno a techo y otro a muro de la capa). La finalidad es drenar la mayor cantidad posible de carbón de la zona de las coronas.

- Sondeos de distensión: Consiste en la realización de 2 sondeos horizontales en el centro de la sección de unos 9 o 10 metros de longitud uno a techo y otro a muro de la capa. Se intentan hacer de la máxima longitud que permita la perforación de la capa y se ejecutan con los sondeos de desgasificación.

Una vez llegado a la longitud máxima, se continúa accionando la perforadora con el fin de extraer todo el carbón que sea posible, con esto se pretende crear un hueco en el carbón alrededor del taladro que tenderá a autorellenarse con el carbón circundante. La finalidad es lograr una distensión de las tensiones de la capa de carbón y además esta expansión produce figuración a lo largo del carbón, aumentando la permeabilidad y por lo tanto la capacidad de drenaje del gas.

El tratamiento del frente de avance mediante sondeos se realiza de forma que exista un solape entre los sondeos horizontales de 5 metros, la combinación de todos estos sondeos crea una zona que rodea a la zona de trabajo donde la presencia de gas y las tensiones han sido reducidas, disminuyendo considerablemente el riesgo de FGD. La figura 5 refleja el solape que crean estos sondeos y como en una sección de trabajo que se pretenda avanzar se encuentra perforada por la combinación de sondeos realizados desde distintos frentes.

También se procede al control continuo sobre la emisión de metano que se está produciendo en el frente. Se pretende controlar el desprendimiento específico de metano de la capa en el avance normal y compararlo con el gas que se extrae cuando se realizan los sondeos de desgasificación (tratamiento del frente con sondeos) para ver su efectividad.

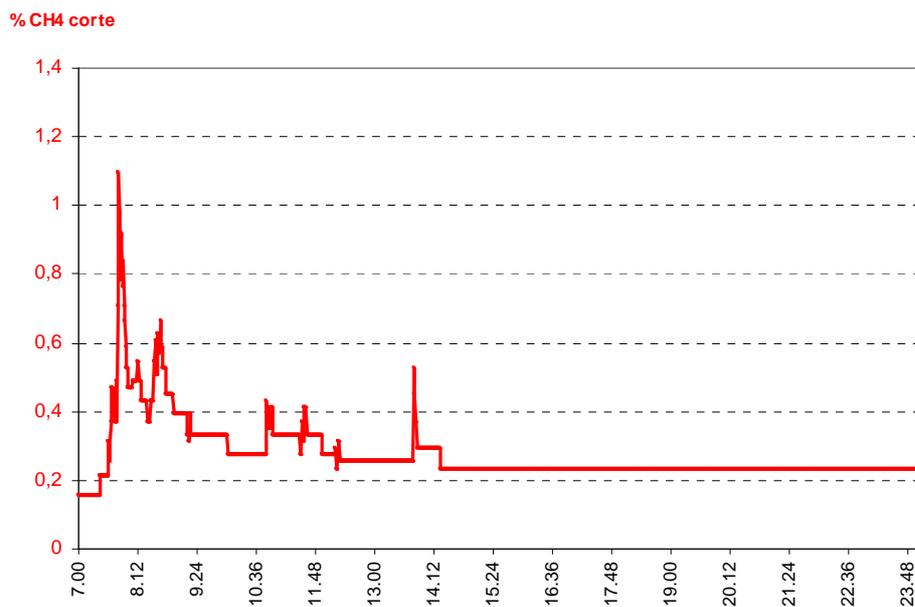


Figura 6. Registro del metanómetro instalado en la tubería de ventilación durante la realización de sondeos.

En la figura 6 se muestra el registro del metanómetro del frente de avance de un nivel de la capa Julia. Se puede observar que durante la realización de los sondeos (realizados durante la mañana) el % de CH₄ aumenta considerablemente, el disparo de la labor se realiza antes de las 14:00 horas. Durante el resto de la jornada no se realizan más labores en esa explotación, por lo que el % CH₄ reflejado es la suma del cero de escala del metanómetro más el metano que se produce por la desgasificación que de forma natural sufre el frente de avance por la permeabilidad propia de la capa.

Se puede observar en las diferentes medidas analizadas que el fondo de escala del metanómetro del frente antes y después de la desgasificación es distinto, siendo siempre más alto el existente después del tratamiento, indicando que la permeabilidad del frente de avance ha sido aumentada con el tratamiento realizado.

Utilizando el % de CH₄ y los caudales ventilación (obtenidos a partir de los anemómetros de las tuberías de ventilación) se puede analizar el desprendimiento de metano en el avance de la galería. En la figura 7 se muestra una gráfica con los datos m³ de metano desprendidos en un día registrado durante el avance de la galería en carbón de un subnivel (4.1 Norte de la capa Julia). A la derecha se indica el avance diario, dicha labor se está avanzando a un relevo.

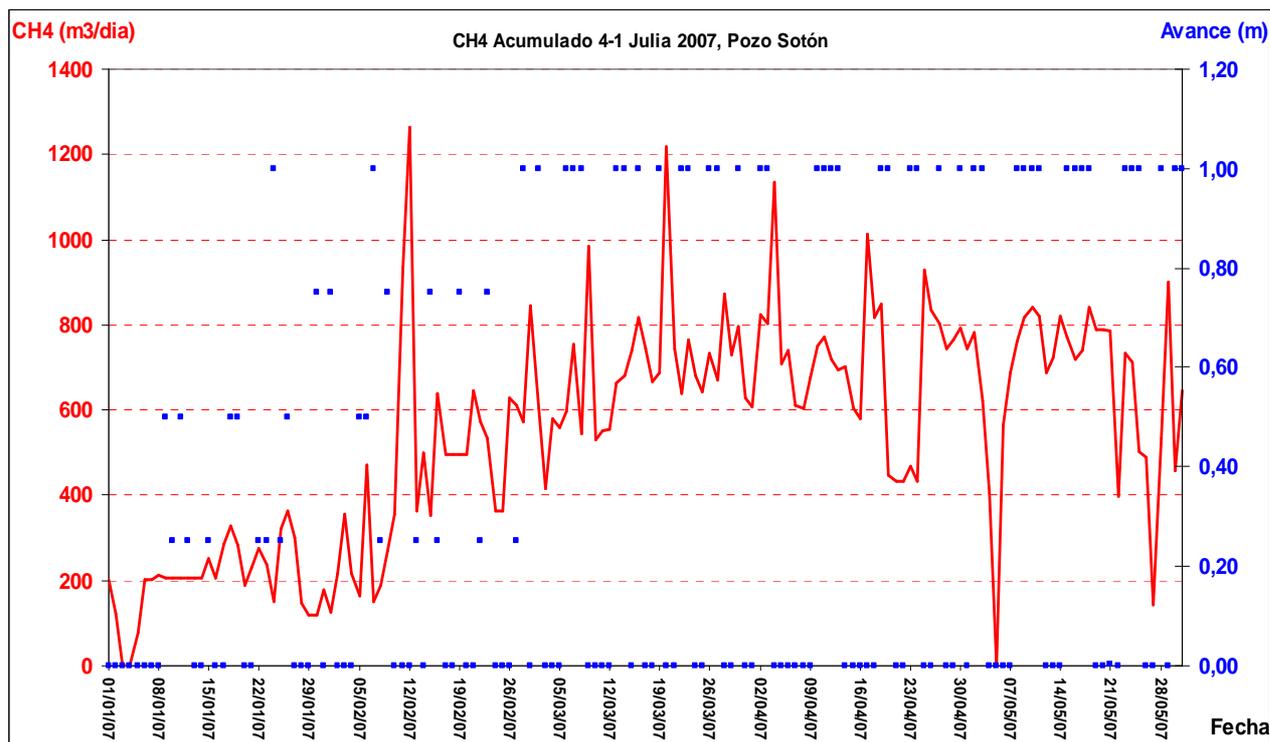


Figura 7. Ejecución de sondeo de desgasificación

Se puede observar que al aumentar el ritmo de avance en la explotación implica un aumento en el volumen de CH₄ evacuado, como era de esperar. Además los días que se realizaron los sondeos de desgasificación en el frente aparecen picos en volumen de CH₄ drenado sin que se haya producido ningún tipo de avance, por lo que ese gas ha de provenir de la zona fisurada por los sondeos mostrando que se produce una desgasificación efectiva de la zona afectada por los sondeos.

Los días donde el caudal se reduce a cero es debido a paradas en la ventilación o fallos en la señal de medida.

5. Proyectos

Durante los últimos años HUNOSA a realizado diferentes estudios de investigación en el campo de la prevención de fenómenos gasodinámicos en diferentes capas. Los estudios se han realizado de forma independiente y también en colaboración con otras instituciones, tanto regionales como nacionales e internacionales.

5.1. Proyecto SAFETECH

Uno de los proyectos realizados por HUNOSA en colaboración con AITEMIN ha sido el proyecto denominado SAFETECH, financiado por la The Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (RFCs). Este proyecto tenía como objetivo la búsqueda de procedimientos y equipos técnicos que previnieran los riesgos de los trabajadores en zonas peligrosas con gases tóxicos o grisú, considerando la viabilidad económica de su aplicación (la productividad del método).

Dado que gran parte de la producción de HUNOSA se obtiene por el método de explotación por subniveles, el estudio se realizó en este tipo de explotaciones y se investigaron técnicas que permitiesen la desgasificación de capas de carbón mediante sondeos.

La investigación se realizó sobre la capa Julia del Pozo Sotón. Mediante diferentes tipos de sondeos se pretendía desgasificar previamente la futura zona de avance de los subniveles, y se realizaron tres tipos diferentes de métodos de desgasificación:

- Sondeos de desgasificación previa de la zona de avance desde el frente. El esquema que se empleo en la realización de estos sondeos se ha explicado en un apartado anterior, el método desarrollado se continúa aplicando actualmente en el avance de los niveles de la capa Julia del pozo Sotón.

- Desgasificación de un nivel aprovechando el nivel superior. Aprovechando el nivel de avance de un subnivel se perforaron diferentes grupos de sondeos descendentes con máquina perforadora neumática PII-8 y barrenas helicoidales. En los sondeos se instalaron cánulas de gas y se selló el sondeo para medir la presión que alcanzaba el gas dentro del sondeo. En la figura 8 se muestra una de las zonas sondeadas (nivel 4), en azul se refleja la longitud del sondeo realizado y en color rojo la profundidad a la que se instaló la cánula de presión.

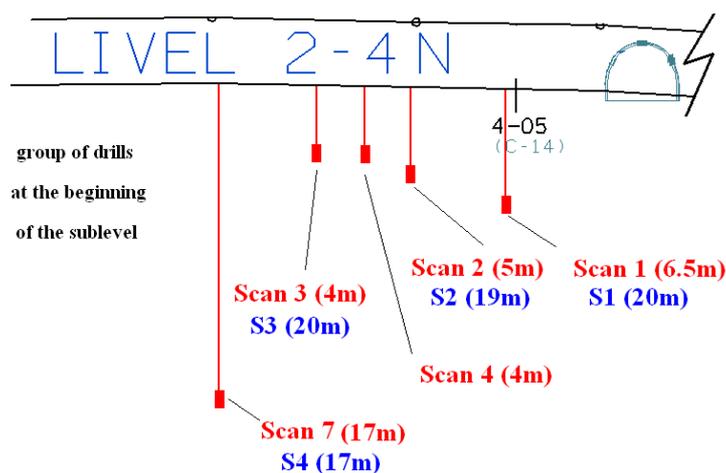


Figura 8. Sondeos verticales en capa para desgasificación del nivel inferior.

Se procedió a medir el CH₄ drenado por la ventilación del nivel donde se realizaron los sondeos (nivel 4). Después de perforar cada sondeo la cantidad de metano evacuada por la ventilación auxiliar aumentaba considerablemente, se puede observar en los picos producidos en la zona A de la figura 9.

Posteriormente se explotó el nivel superior al que habíamos realizado los sondeos (nivel 3), correspondiendo con zona B de la gráfica de metano del nivel 4, figura 9. Al principio, la explotación generó un área de presiones que redujo la permeabilidad del carbón del nivel 4 y por lo tanto el flujo del metano disminuyó (zona central de la figura 9). Si esta presión es suficientemente alta, fisura el carbón. Cuando las presiones en una zona de la capa disminuyen por desplazamiento de la explotación, la permeabilidad del carbón aumenta. Se puede ver este efecto al comenzar el metano a drenar otra vez en el nivel 4.

La figura 9 demuestra el flujo del metano en la ventilación auxiliar agotado durante el periodo inicial de perforación (A) y como posteriormente (B) se produce más metano que en el primer período.

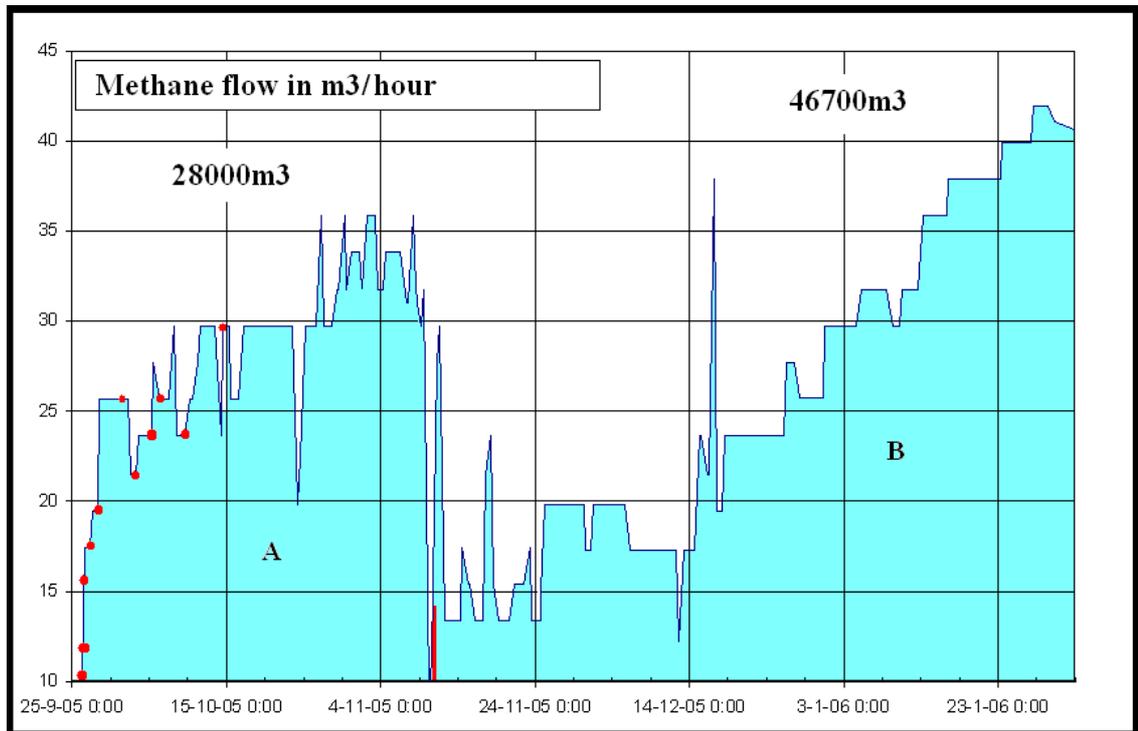


Figura 9. Registro del metano drenado en el nivel 4.

Aunque la cantidad más importante de metano fue drenada durante el segundo período (B); los trabajos se desarrollan generalmente bajo condiciones del primer período (A), así que ésta es la cantidad de gas que tenemos que considerar como evacuada para la protección el nivel siguiente de avance (el inferior).

Además la cantidad de gas extraída en el segundo periodo (B) proviene principalmente del área superior de la galería donde es más grande el efecto de la tensión causada por la explotación y no del área que deseamos proteger para el avance inferior.

Con todo esto existía la posibilidad de que el metano extraído no ayuda a aumentar las condiciones de seguridad del nivel inferior.

Pero después de varios meses de la finalización del nivel superior, se realizaron más sondeos verticales hacia abajo para comprobar el efecto del drenaje. Se vio que los datos obtenidos de concentración de metano habían disminuido, por lo que el drenaje era efectivo en el nivel inferior. Concretamente después de 7 meses, el flujo del metano cayó de 4 m³/hora a casi cero (figura 10). Solamente fueron drenados 2.670 m³ de metano a través de las nuevas perforaciones. Esto significa que las perforaciones iniciales tenían bastante eficacia para proteger el nuevo nivel.

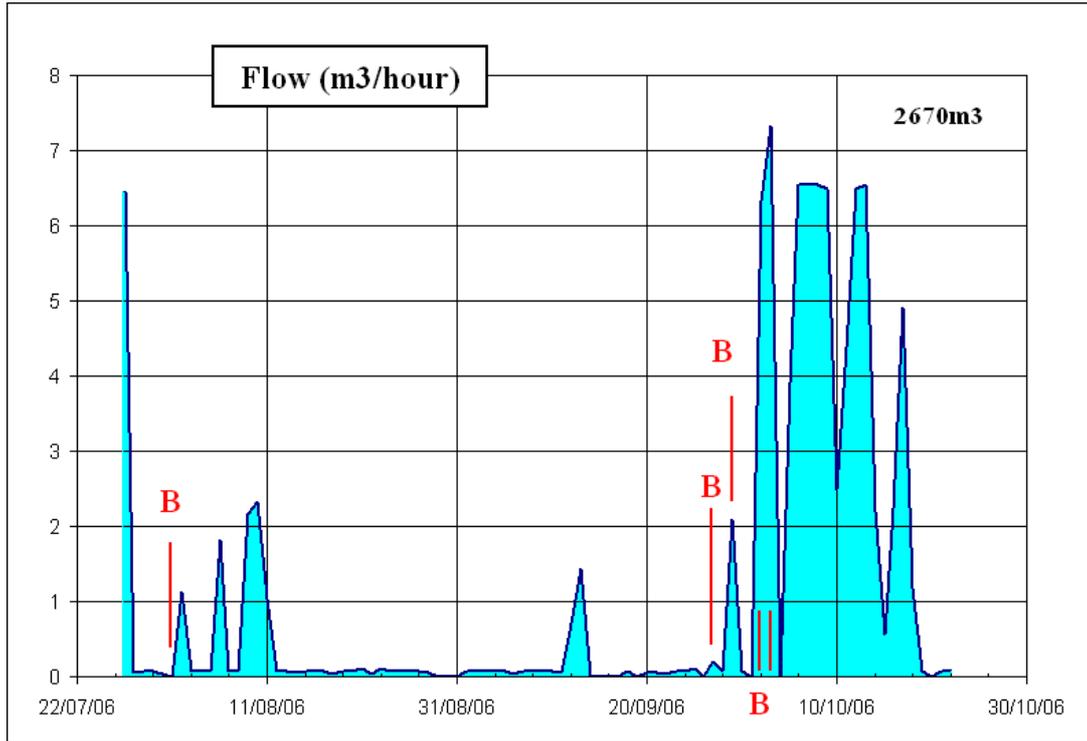


Figura 10. Registro del metano drenado en el nivel 4 una vez finalizada la explotación del nivel 3.

El efecto positivo de esta desgasificación fue comprobado con la concentración del metano en estos nuevos taladros. Se obtuvo que la concentración inicial de $10 \text{ m}^3/\text{t}$ se redujo aproximadamente a $5 \text{ m}^3/\text{t}$ (figura 11). Por lo tanto resultó ser un buen sistema para proteger el siguiente nivel de avance.

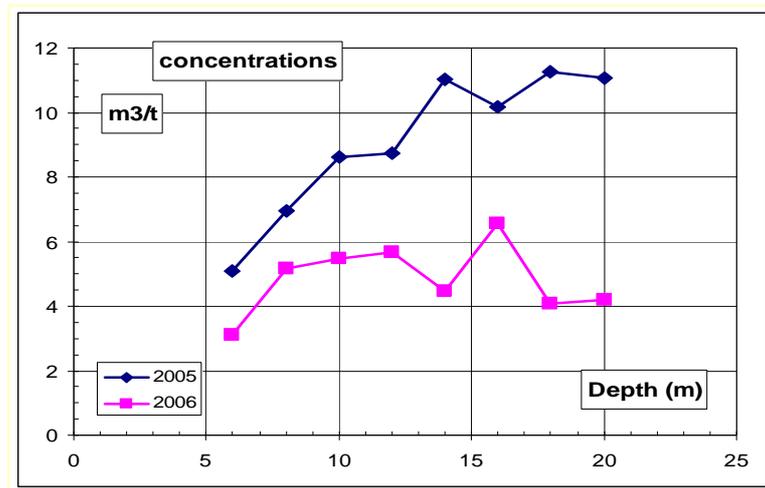


Figura 11. Concentraciones de metano antes y después de los sondeos.

-Desgasificación desde una galería auxiliar en roca: Aprovechando una galería de infraestructura en roca se realizaron una serie de sondeos que atravesaban la zona de roca hasta cortar a la capa de carbón. Estos sondeos se dirigieron a la altura a la que se van a realizar las galerías de explotación de los subniveles para desgasificarlos antes de avanzarlos, la figura 12 muestra una sección de la planificación de los sondeos de desgasificación.

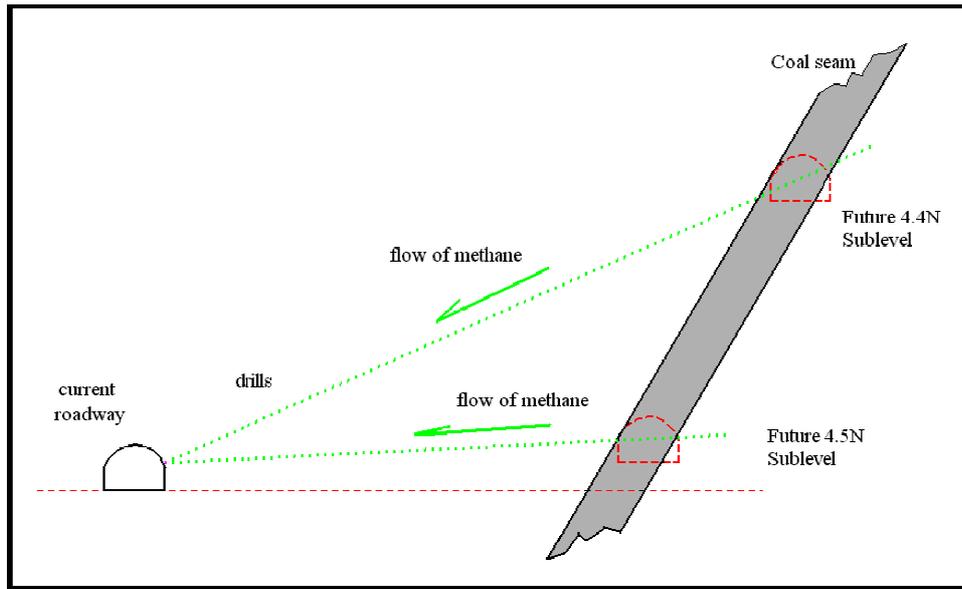


Figura 12. Esquema de la previsión de sondeos de desgasificación realizados desde una galería en roca

Los sondeos se realizaron con máquina neumática perforadora PII-8 desde una galería situada a una distancia de 30 metros de la capa. La figura 13 está realizada durante la perforación de uno de estos sondeos, estos fueron realizados cada 15 metros, la ubicación de estos sondeos se muestra en la figura 14.



Figura 13. Ejecución de sondeo de desgasificación

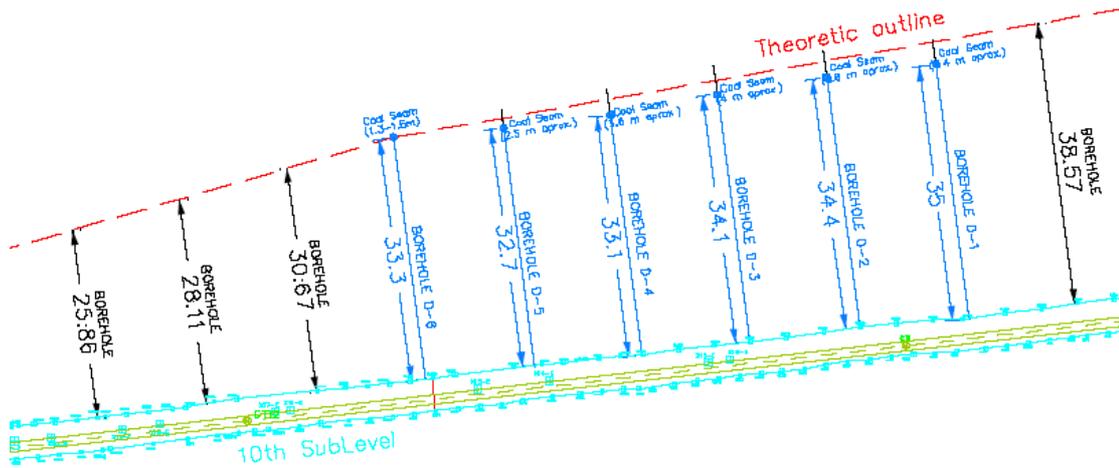


Figura 14. Sondeos realizados desde una galería auxiliar hasta la capa.

Una vez finalizado un sondeo se procedía a introducir una lanza dentro, ésta lleva unido en un extremo un barómetro (figura 15), y después se sellaba con espuma con el fin de medir la presión que se alcanzaba en el sondeo debido a la presión del gas desorbido de la capa.



Figura 15. Sondeo sellado con lanza y equipo de medida de presión

Cuando la presión se estabilizaba se liberaba la lanza para que saliese el gas. Como el aporte de gas evacuado por este método no era muy grande, posteriormente se inyectaban los sondeos con agua a alta presión para fracturar el carbón y aumentar la permeabilidad de la capa y aumentando la zona de influencia de la desgasificación. Mediante la inyección no se consiguió comunicar,

mediante la inyección, dos sondeos consecutivos, por lo que la distancia entre sondeos se debería de reducir en próximos desarrollos.

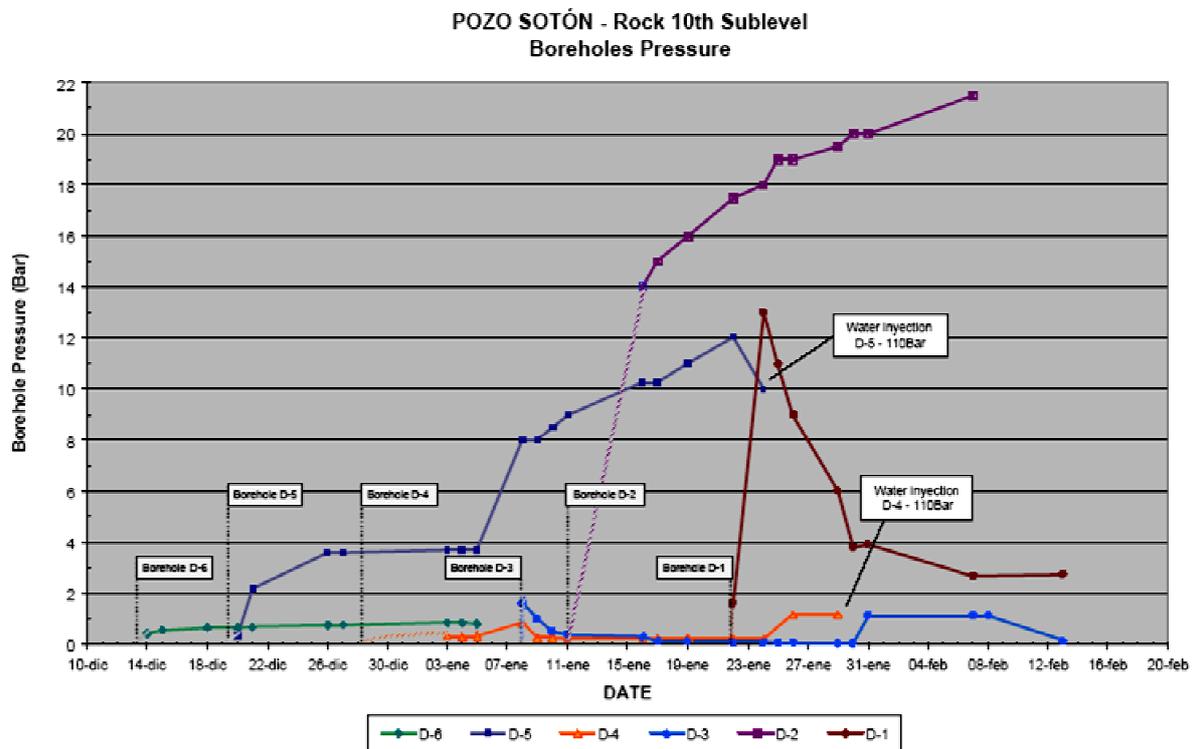


Figura 16. Sondeo sellado con lanza y equipo de medida de presión

La figura 16 muestra las medidas de presión de gas en diferentes sondeos. Se puede observar como una vez sellado el sondeo este empieza a coger presión debido a la situación. Los sondeos que no se cargaron de presión podrían tener alguna fuga por fracturas.

5.2. Estudio capa Julia

Actualmente se está realizando un estudio con la Universidad de Oviedo “Análisis tensodeformacional y gasodinámico de la capa Julia” financiado por el Principado de Asturias.

Este proyecto tiene un doble objetivo:

- Realizar un análisis tensodeformacional y gasodinámico de la capa Julia, teniendo en cuenta el método de arranque por sutiraje, para la predicción de su comportamiento futuro y la elección de la secuencia óptima de explotación a partir de las presiones que se pueden generar sobre la capa.
- Se pretende caracterizar una serie de ensayos de laboratorio para lograr medir la permeabilidad del carbón así como su comportamiento ante las presiones al ser este uno de los factores desencadenantes de un FGD.

En la primera fase del proyecto se ha caracterizado geotécnicamente la capa de carbón y los hastiales. Con el fin de contrastar y calibrar los modelos numéricos que se desarrollan con el ordenador se está realizando una instrumentación de la zona de estudio compuesta por diferentes equipos; se han instalado células de presión, un sismógrafo y cánulas de gas. Se pretende continuar con la instrumentación de la capa Julia en el avance del nivel 4.1 norte con la

instalación de estaciones de convergencia, células de inclusión rígida y más equipos como los anteriores.

También se van a realizar diferentes ensayos de permeabilidad in situ e hidrofracturación. Cabe destacar el desarrollo de un tomamuestras especial para carbón, diseñado para extraer muestras enteras de carbón que puedan ser llevadas lo mas intactas posibles a un banco de ensayo.

El tomamuestras está formado por un conjunto de piezas ajustables que hacen que este instrumento útil para la extracción, transporte y ensayo en el laboratorio.



Figura 17. Tomamuestras en su modalidad de extracción (izquierda) y ensayo (derecha).

En la figura 17 se muestran las fotografías del tomamuestras en su modalidad de extracción y ensayo. Durante la extracción se le coloca un protección en la zona de empuje y una cabeza de corte, una vez hincado y extraído el cilindro del carbón se desmontan estas dos piezas y se le acopla el cierre superior que deja la muestra herméticamente cerrada y quedando lista para llevar al laboratorio para ensayar, este equipo se acopla directamente en el banco de ensayos por lo que la muestra permanece intacta desde la mina y no sufre ninguna alteración, manteniendo su contenido en gas.

El banco de ensayos ha sido especialmente desarrollado para simular presiones sobre el carbón en las condiciones reales del carbón en la mina, comprimiendo el carbón a las presiones de los hastiales e inyectando gas a la presión del gas en la mina.

Consiste en una estructura sobre la que se instala el tomamuestras directamente y se conecta por ambos extremos a unas válvulas, contiene un cilindro empujador que somete a la muestra a compresión y está dotado de sensores y equipos de medida que registran las presiones de gas en los extremos de la muestra, sensores de deformación, medida del desplazamiento del la compresión. La figura 18 muestra un esquema y las fotos del banco de pruebas desarrollado en este proyecto.

Para los ensayos se ha desarrollado un software especial para la captación y toma de datos que permite tratar todas las variables que intervienen en el experimento, la figura 19 muestra un registro concreto de un ensayo. Con este registro se pretende analizar la permeabilidad del carbón en el laboratorio y como ésta se ve afectada por la presión. Se pretende estandarizar una serie de ensayos sobre muestras de carbón fijando los parámetros, secuencias y procedimiento de trabajo para que nos permitan conocer el comportamiento del carbón ante condiciones prefijadas y nos posibilite la comparación de capas distintas entre sí.

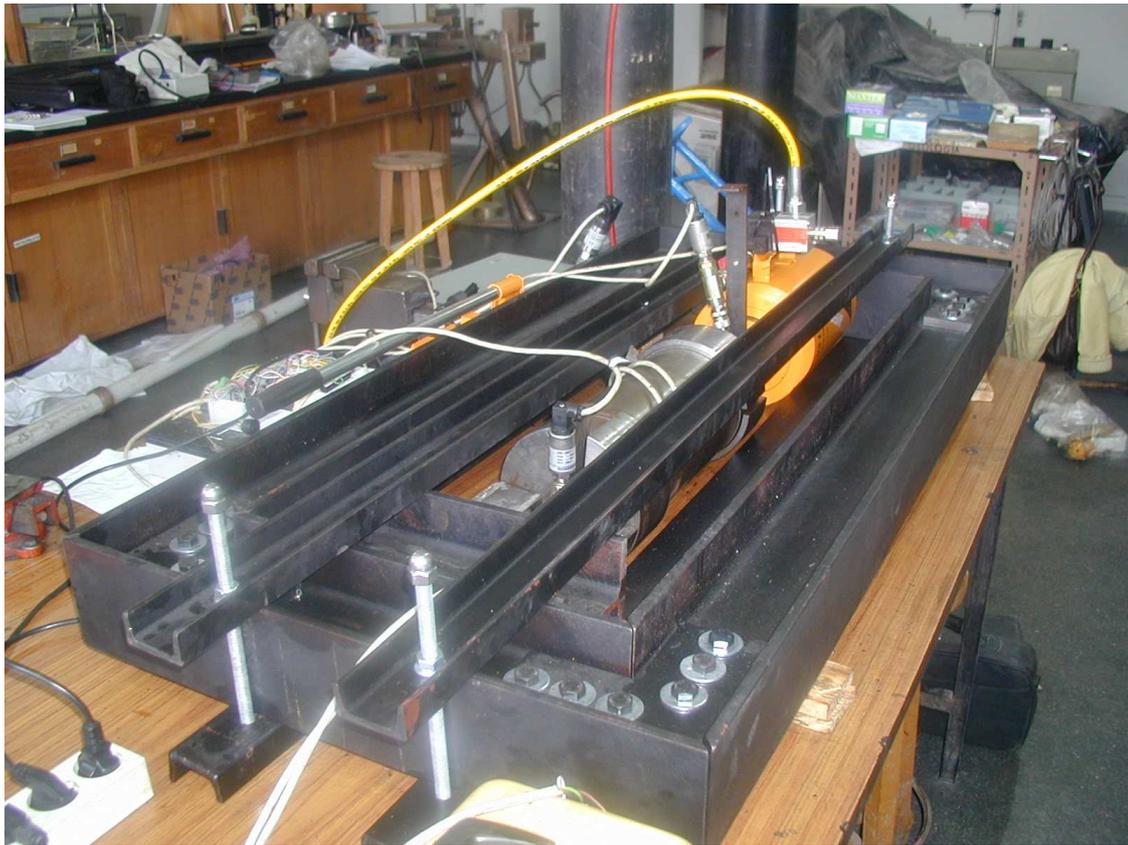


Figura 18. Banco de ensayos para medida de permeabilidades sobre muestra de carbón

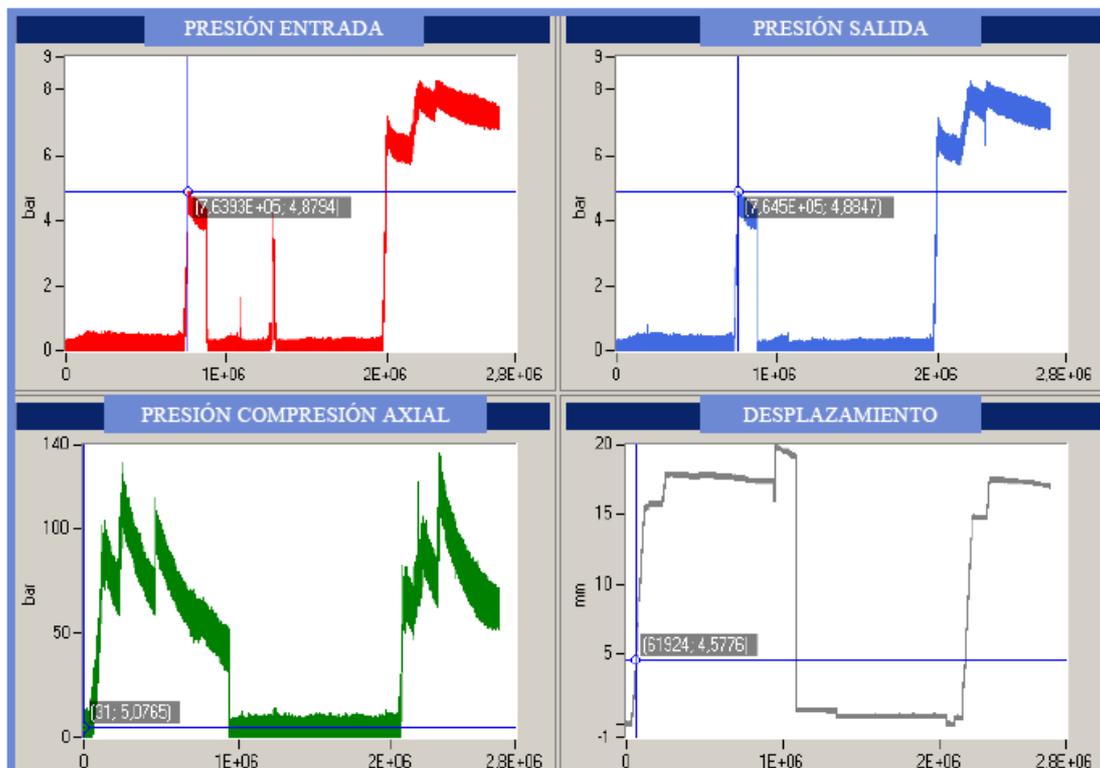


Figura 19. Registro de la toma de datos de los ensayos

Con los datos obtenidos de la caracterización de la capa y los hastiales se pretende desarrollar un modelo informático que refleje el estado tensional de la capa en diferentes situaciones de la explotación con el fin de detectar posibles situaciones de riesgo por presencia de sobretensiones en las zonas de avance. La figura 20 muestra una de las modelizaciones realizadas sobre la capa julia. Dicha capa tiene un buzamiento de 65°, en la imagen puede apreciarse que como en la zona inmediatamente inferior a la galería avanzada se concentran las presiones.

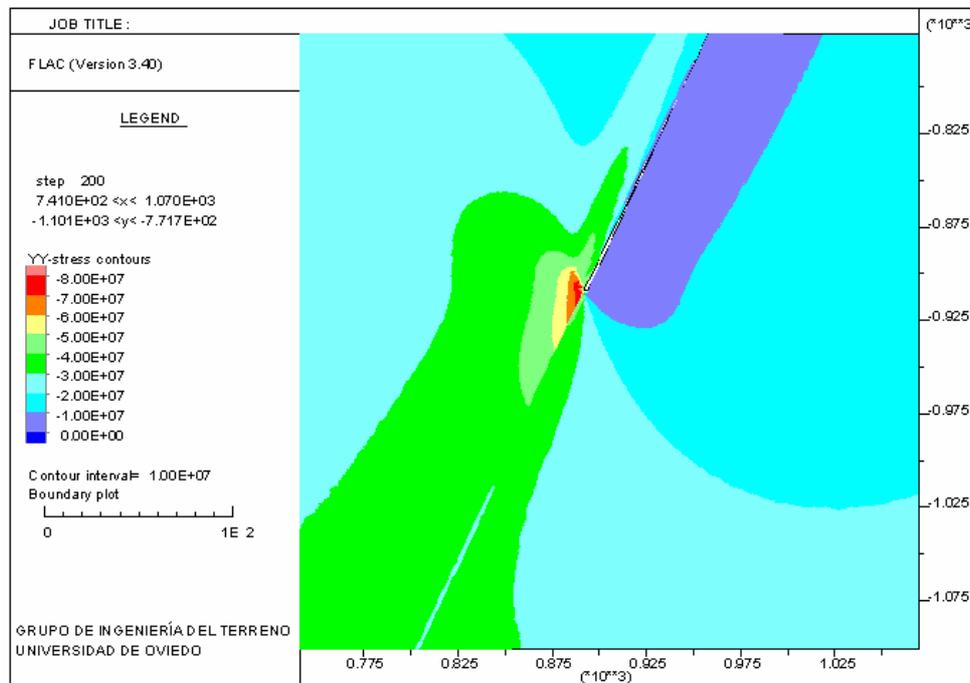


Figura 20. Modelización de tensiones sobre la capa

Referencias

- ITGE. (1995). "Estudio de los Fenómenos dinámicos en la minería subterránea de carbón".
- HUNOSA (1996) Departamento de Prevención y control Fenómenos Gaseodinamicos. "Manual para la previsión y prevención de fenómenos gasodinámicos en la explotación de capas de carbón"
- Gerhard Bräuner (1994). "Rockbursts in coal mine and their prevention".