

# Sistema de refracción y vibraciones en la lutita namuriense de Belmez (Córdoba)

**Gabriel Aroca Castillejos.** Graduado en ingeniería en recursos energéticos y mineros. Máster en prevención de riesgos laborales. Grupo de investigación RNM244 “Seminario Antonio Carbonell” (Universidad de Córdoba).

**José Luis Castillejo Sánchez.** Graduado en ingeniería en recursos energéticos y mineros. Grupo de investigación RNM244 “Seminario Antonio Carbonell” (Universidad de Córdoba).

## RESUMEN

La presente comunicación estudia mediante técnicas “in-situ” de Geotecnia Sísmica y sísmica de vibraciones en la lutita Namuriense de Belmez–Córdoba que ha permitido con impactos en perfiles sísmicos de 30 m de longitud conocer profundidades de 15 m, obteniéndose la velocidad unitaria de ondas P y S, la capacidad de carga, los módulos elásticos, el ángulo de fricción y la densidad in-situ. Se aplican resultados de diversos autores y se cotejan con ensayos de corte directo y consolidación.

## ABSTRACT

The present paper studies by means of “in-situ” techniques of Seismic Geotechnics and vibration seismic in the Belmez-Cordoba Namurian shale that has impacts on seismic profiles of 30 m in length to know depths of 15 m, to obtain the unitary speed of P and S waves, load capacity, elastic modulus, friction angle and in-situ density. We apply results from different authors and are compared with direct cut and consolidation trials.





## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

**E**l objetivo de esta publicación es complementar una línea de investigación previa, la cual fue iniciada hace dos años por el Grupo “Seminario Antonio Carbonell” de la EPS de Belmez (Universidad de Córdoba), mediante el estudio de la Lutita Namuriense del Guadiato (inicialmente se realizó en el Westfaliense de la Cuenca) a través de diversos métodos geofísicos.

La sísmica engloba varias ramas de estudio desde la refracción o la reflexión hasta las vibraciones. Se trata de una técnica de investigación que proporciona información de gran detalle y a través del cual se pretende obtener información sobre la Lutita Namuriense situada en la zona de la Cuenca del Guadiato, más concretamente en la zona del parque de Belmez.

Esta lutita sobreconsolidada Namuriense del Guadiato, al igual que las margas del Gua-

dalquivir, presentan tensiones horizontales un 50% superiores a las verticales y sales solubles y poseen el problema geotécnico de originar fisuras verticales y zonas activas importantes de expansión osmótica y consolidación inducida y asentamientos con drenaje del frente ácido hacia superficie. Si además tenemos un periodo seco prolongado y consolidación mecánica debida a cargas externas (sobrepeso), hace que aumente el riesgo geotécnico en estas épocas de sequía y aparecen inestabilidades con las primeras lluvias (grietas en edificios e inestabilidades).

## 2. MATERIALES

La prospección e investigación del terreno serán realizadas mediante diversos equipos de mediciones sísmicas en función de las ca-

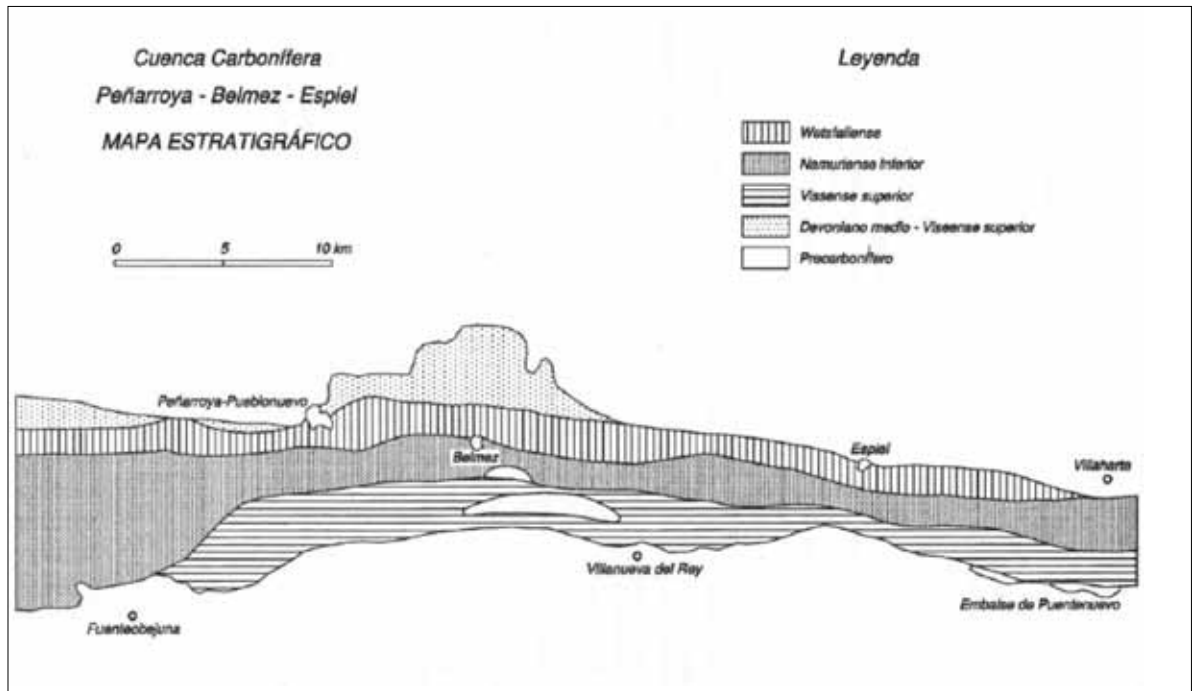


Imagen 1: Estratigrafía de la Cuenca Carbonífera de Belmez (Córdoba).



Imagen 2: Sismógrafo Instantel DS-77.



Imagen 3: Sismógrafo SUNDA GEOFISICA ECHOSEI.

racterísticas que sean de interés dentro del trabajo de investigación.

Se desea obtener información sobre las vibraciones, para lo que utilizaremos un sismógrafo digital "DS-77 Instantel" junto a tres geófonos de velocidad de vibración de partícula vertical, los cuales son captadores desde bajas frecuencias, y por otro lado, velocidades de las ondas P y S a través del terreno, a través de un sismógrafo "Sunda Geofísica Echosei" junto a sus seis geófonos correspondientes.

### 3. METODOLOGÍAS SÍSMICAS

#### Refracción

Se han realizado dos perfiles Norte-Sur, con una longitud de 30 metros y los geófonos dispuestos a 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5 y 22.5 metros, dentro de los cuales se han llevado a cabo dos tiros, directo e inverso, registrando la información en el sismógrafo, donde, en la salida de datos podemos observar los tiempos de llegada de las ondas P (las primeras en



llegar) y de las ondas S (segundas en quedar registradas).

De los tiempos de llegada obtenidos de cada una de las ondas, se hace una media entre el tiro directo (N-S) y el tiro inverso (S-N), y junto con la separación entre los geófonos representamos una gráfica Distancia-Tiempo de cada una de las ondas, constituyendo lo que denominamos dromocronas.

Mediante estas representaciones determinamos las capas de material que se pueden observar con este método, la velocidad de transmisión de las ondas en cada una de las capas, la potencia de cada una de las capas (las cuales serán una menos a las capas determinadas) y las distancias críticas.

Seguidamente se muestran las domocronas de cada una de los perfiles para determinar el número de capas y sus tiempos de intercepto:

A continuación se determinan las velocidades de cada una de las ondas a través de cada capa del terreno, sus potencias y sus distancias críticas. Los módulos dinámicos son necesarios en geotecnia para la cimentación de presas y edificios, en taludes, en el emboquille de túneles, en minería subterránea, entre otras investigaciones geotécnicas. Los módulos de ondas P y S "in situ" obtenidos con sismica (con unos niveles de tensiones muy bajos de velocidad de vibración de partícula) y las deformaciones obtenidas en laboratorio, deben relacionarse con las tensiones naturales, estas siempre se ha justificado que deben registrarse con sismica, se miden pero no pueden deducirse todavía, son necesarias líneas de trabajo con los módulos de cizalladura y volumétrico. Todos estos datos se muestran en la Tabla 1 y 2.

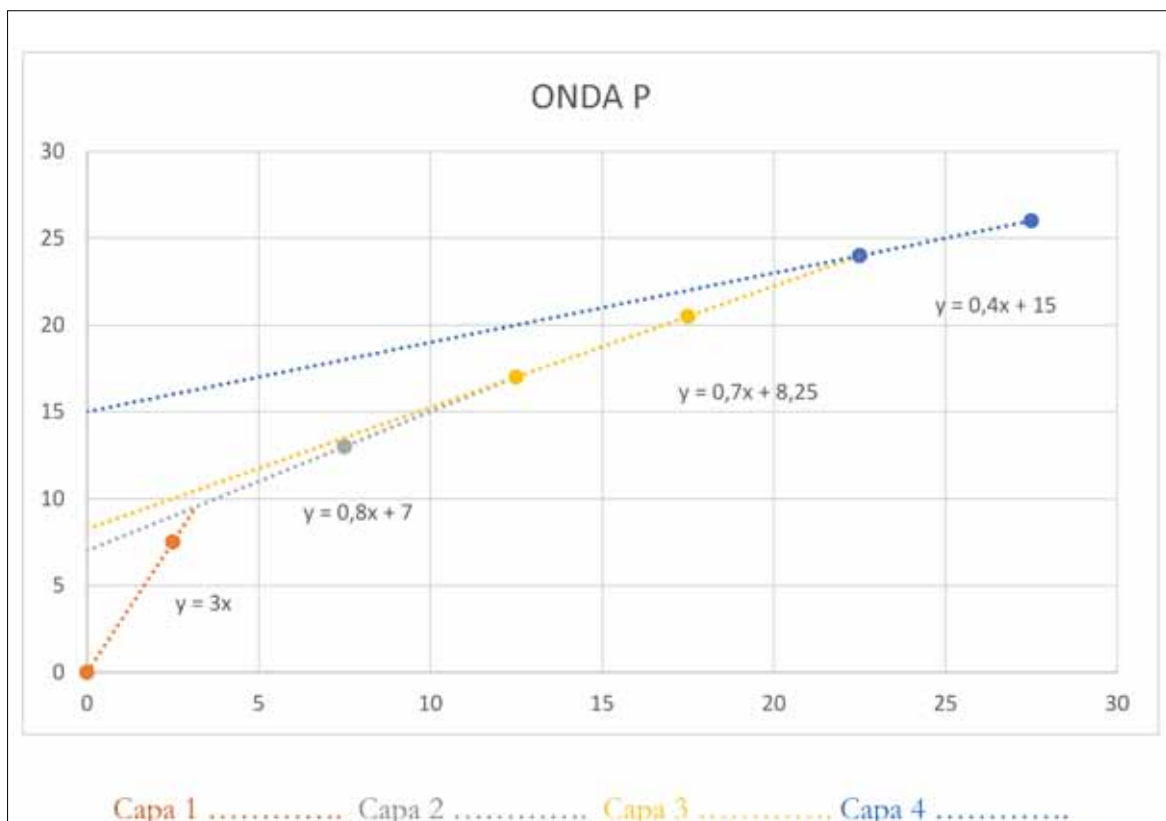


Imagen 4: Dromocrona Ondas P

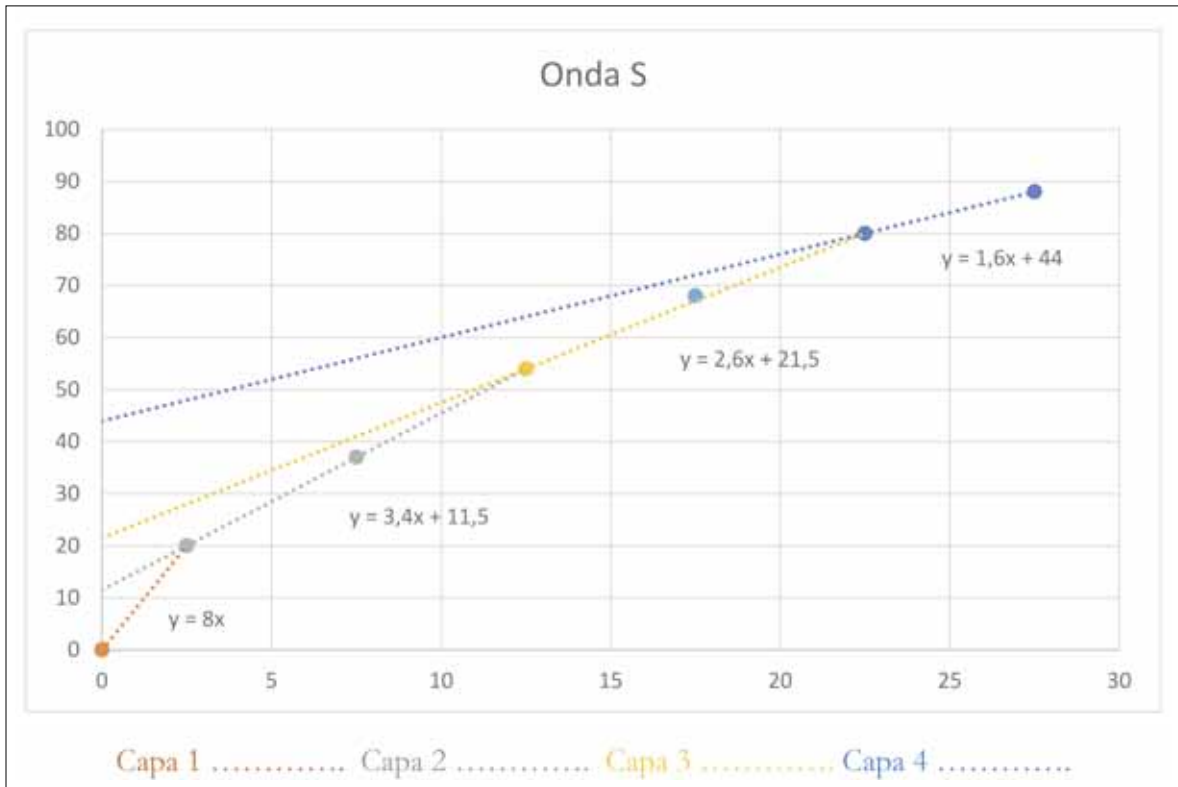


Imagen 5: Dromocrona Ondas S

**MÓDULOS DINÁMICOS Y PARÁMETROS "P"**

Coeficiente tensión lateral o estado inicial esfuerzo "K<sub>0</sub>"= 1,22      Fricción  $\phi = 24,00$   
 Gmáx. Arcilla 27.103      Preconsolidación  $\sigma_{vm}^2 = 10,00$   
 OCR 5,00      Índice porosidad  $e = 0,41$

Vp m/s	Vs m/s	Tiempo P intercepto ms	Profundidad M	DISTANCIA CRÍTICA P	Módulo Poisson	Módulo Young E Kpa	Módulo Volumétrico B Kpa	Módulo Rigidez G Kpa	Mód. Compresión Confinada Lateral M = vvp <sup>3</sup> Kpa	Sísmica Multizona. Impacto A y B= Namuriense Impacto C y D = Westfallense	Capacidad Carga Admisible FS=2 Kg/cm <sup>2</sup>	Ind. Plasticidad	Profundidad	Nspit
333	125	7	1.21	0,00	0,418	88.624	180.111	31.250	221.778	A=Superior-Activa	0,918	20,6	2,7	
1250	294	8,25	2,74	3,18	0,471	508.493	2.894.504	172.872	3.125.000	A=Inferior-Insaturada	2,159	13,2	34,9	
1429	385	15	6,23	11,85	0,461	1.039.377	4.426.578	355.740	4.900.898	A = Profunda	3,393	15,1	78,3	
2500	625		10,00	25,00	0,467	2.750.000	13.750.000	937.500	15.000.000	<b>A=MACIZO ROCOSO</b>	5,508	14,0	334,9	
333	143	6	1,06	0,00	0,387	113.447	167.247	40.898	221.778	B=Superior-Activa	1,050	23,2	4,0	
1000	303	10	3,61	3,00	0,449	532.292	1.755.176	183.618	2.000.000	B=Inferior-Insaturada	2,225	16,9	38,2	
1500	585		0,00	11,39	0,410	2.316.684	4.304.880	821.340	5.400.000	B = Profunda	5,155	21,3	274,6	
0	0		0,00	0,00	0,000	0	0	0	0	<b>B=MACIZO ROCOSO</b>	0,000	0,0	0,0	
250	138	4	0,75	0,00	0,281	97.572	74.216	38.088	125.000	C=Superior-Activa	1,013	28,9	3,6	
334	227	24	4,89	3,98	0,071	220.706	85.701	103.058	223.112	C=Inferior-Insaturada	1,667	34,2	16,0	
511	340	41,4	7,50	18,07	0,103	611.925	256.770	277.440	626.690	C = Profunda	2,996	33,6	53,9	
900	500			0,00	0,277	1.532.143	1.144.000	600.000	1.944.000	<b>C=MACIZO ROCOSO</b>	4,406	29,1	171,5	
265	121	4	0,87	0,00	0,368	80.133	101.407	29.282	140.450	D=Superior-Activa	0,889	24,5	2,4	
334	200	25,5	4,81	5,13	0,220	195.280	116.445	80.000	223.112	D=Inferior-Insaturada	1,469	30,9	11,0	
600	400	39,7	7,49	7,38	0,100	844.800	352.000	384.000	864.000	D = Profunda	3,525	33,7	87,8	
900	500				0,277	1.532.143	1.144.000	600.000	1.944.000	<b>D=MACIZO ROCOSO</b>	4,406	29,1	171,5	
0	0	0	0,00	0,00	0,000	0	0	0	0	E=Superior-Activa	0,000	0,0	0,0	
0	0	0	0,00	0,00	0,000	0	0	0	0	E=Inferior-Insaturada	0,000	0,0	0,0	
0	0	0	0,00	0,00	0,000	0	0	0	0	E = Profunda	0,000	0,0	0,0	
0	0	0			0,000	0	0	0	0	<b>E=MACIZO ROCOSO</b>	0,000	0,0	0,0	

Tabla 1: Velocidades, Profundidades y Módulos Dinámicos Ondas P



MÓDULOS DINÁMICOS Y PARÁMETROS CON ONDA "S"														
Coeficiente tensión lateral o estado inicial esfuerzo "K <sub>0</sub> " =											1,22	Fricción (θ) =	24,00	
Gmáx. Arcilla											27.103	Reconsolidación (β)	10,00	
OCR											5,00	Índice poroso (e)	0,41	
											Densidad Medio Rocoso (γ)	2,40	Ind. Plasticidad	14,00
											DENSIDAD AP. (ρ <sub>0</sub> ) = γ	2,00	Profundidad	1,00
Vp	Vs	Tiempo S	Profundidad (m)	DISTANCIA CRÍTICA (m)	Módulo Poisson	Módulo Young E Kpa	Módulo Volumétrico B Kpa	Módulo Rigidez G Kpa	Mód. Compresión Contrada Lateral M = v <sub>v</sub> <sup>2</sup> /Kpa	Sísmica Multizona Impacto A y D (Profundidad) Profundidad C y E (Módulo)	Capacidad Carga Admisible P <sub>0.25</sub> Kpa/cm <sup>2</sup>	ω <sub>0.25</sub> /v <sub>v</sub> = 0	Nspit	
333	125	11.5	0.79	0.00	0.418	88.624	180.111	31.250	221.778	A=Superior-Activa	0,765	20,6	2,7	
1250	294	21.5	2.95	2.50	0.471	508.493	2.894.504	172.872	3.125.000	A=Inferior-Insaturada	1,799	13,2	34,9	
1429	365	44	6.33	11,80	0.461	1.039.377	4.426.578	355.740	4.900.898	A = Profunda	2,827	15,1	78,3	
2500	625		10,00	25,00	0.467	2.750.000	13.750.000	937.500	15.000.000	A=MACIZO ROCOSO	4,590	14,0	334,9	
333	143	11	0.89	0.00	0.387	113.447	167.247	40.898	221.778	B=Superior-Activa	0,875	23,2	4,0	
1000	303	27	3.53	2.96	0.449	532.292	1.755.176	183.618	2.000.000	B=Inferior-Insaturada	1,854	16,9	38,2	
1500	585	0	0,00	9,37	0.410	2.316.684	4.304.880	821.340	5.400.000	B = Profunda	4,296	21,3	274,6	
0	0	0	10,00	0,00	0,000	0	0	0	0	B=MACIZO ROCOSO	0,000	0,0	0,0	
250	138	10	0.87	0.00	0.281	97.572	74.216	38.088	125.000	C=Superior-Activa	0,845	28,9	3,6	
334	227	30	3.69	3.52	0.071	220.706	85.701	103.058	223.112	C=Inferior-Insaturada	1,369	34,2	16,0	
511	340	57.5	7.50	12,63	0.103	611.925	256.770	277.440	626.690	C = Profunda	2,497	33,6	53,9	
900	500		0,00	0,00	0.277	1.532.143	1.144.000	600.000	1.944.000	C=MACIZO ROCOSO	3,672	29,1	171,5	
265	121	14	1.06	0.00	0.368	80.133	101.407	29.282	140.450	D=Superior-Activa	0,741	24,5	2,4	
334	200	33	2.94	4.29	0.220	195.280	116.445	80.000	223.112	D=Inferior-Insaturada	1,224	30,9	11,0	
600	400	57.7	7.51	6.50	0.100	844.800	352.000	384.000	864.000	D = Profunda	2,938	33,7	87,8	
900	500		0,00	0,00	0.277	1.532.143	1.144.000	600.000	1.944.000	D=MACIZO ROCOSO	3,672	29,1	171,5	
0	0	0	0,00	0,00	0,000	0	0	0	0	E=Superior-Activa	0,000	0,0	0,0	
0	0	0	0,00	0,00	0,000	0	0	0	0	E=Inferior-Insaturada	0,000	0,0	0,0	
0	0	0	0,00	0,00	0,000	0	0	0	0	E = Profunda	0,000	0,0	0,0	
0	0		15,00	20,00	0,000	0	0	0	0	E=MACIZO ROCOSO	0,000	0,0	0,0	

Tabla 2: Velocidades, Profundidades y Módulos Dinámicos Ondas S

## Vibraciones

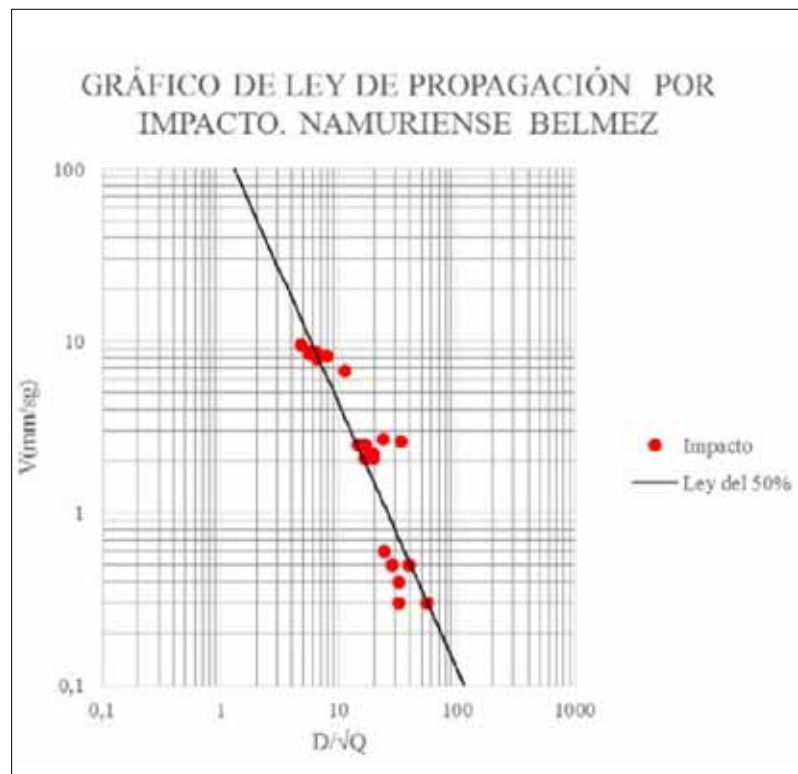
El nivel vibración recibido en un punto, expresado como valor de velocidad de vibración  $V_v$ , es función directa de la carga de explosivo empleado ( $Q$ (KJ)), de la inversa de la distancia entre el punto de disparo y el punto de registro ( $D$ (m)), y de los parámetros ( $A$ ,  $B$  y  $K$ ).

$$V_v = K (D\sqrt{QA})^{-B}$$

Se trata de uno de los puntos principales de este trabajo, ya que hasta ahora no se había realizado ningún estudio sobre las vibraciones en la lutita Namuriense. Para ello es necesario conocer la distancia a la fuente de impacto y su energía, realizando de este modo un análisis de vibraciones con mínimos cuadrados.

Los geófonos se han posicionado en los perfiles a 2.5, 7.5 y 12.5 metros respectivamente y la energía específica utilizada en el impacto ha sido generada por una caída de peso conocida (15,7 Kg = 154 N) a diferentes alturas generando una energía de 50, 100, 150, 200 y 270 N respectivamente y obteniendo de esta correlación entre la caída de peso y la energía específica del explosivo la siguiente Ley de Propagación:

$$V_v = 151.31 \cdot (D\sqrt{QA})^{-1.54}$$



Gráfica 1: Gráfico de Ley de propagación por impacto del Namuriense de Belmez.

#### 4. ENSAYOS GEOTÉCNICOS

Con objeto de caracterizar el terreno se han realizado varios ensayos en laboratorio con muestras de la zona para determinar parámetros como la Densidad, el ángulo de fricción y la carga admisible. Estos ensayos han sido de corte directo y edométrico.

Se ha obtenido para la capa Activa un ángulo de fricción aparente o básico de 24°, que corresponde a la lutita meteorizada. Los ensayos de corte directo a través del geomaterial de la capa inferior no-saturada y de la capa profunda dan ángulos de fricción de 17° y 18,2°.

La Densidad Aparente, tanto del ensayo edométrico como la del corte directo se aproxima siempre al 2,1 (t/m³).

#### 5. RESULTADOS OBTENIDOS

Los distintos parámetros estudiados han sido obtenidos a partir de los datos obtenidos anteriormente y representados mediante el software de modelado “Surfer”, siendo estos:

- Carga admisible (kg/cm²) (Imagen 6)
- Densidad in-situ (t/m³) (Imagen 7)
- Velocidad unitaria ondas P (m/s) (Imagen 8)
- Velocidad unitaria ondas S (m/s) (Imagen 9)
- Ángulo de fricción (Ø) (Imagen 10)

Mayne (2001) aporta una relación de la densidad aparente húmeda in-situ “y” con la profundidad “Z” y “Vs”, 727 datos del terreno con r²=0’81:

$$y \text{ (kN/m}^3\text{)} = 8'32 \lg Vs\text{(m/s)} - 1'62 \lg Z\text{(m)}$$

Siendo yS la densidad de partículas sólidas, podemos conocer el índice de poro “e” en terreno húmedo con la expresión:

$$e = (yS - y) / (y - yw)$$

La carga admisible “Q” con la expresión propuesta por Tezcan et al. (2006), en el uso para taludes y cimentaciones no profundas con FS=2:

$$Q \text{ (Kpa)} = 0'4 y\text{(t/m}^3\text{)} VS\text{(m/s)}$$

Las ondas que hacen vibrar paralelamente son las longitudinales P y las cortantes S son perpendiculares, mediante el método clásico de sísmica y el análisis de vibraciones llegamos a una deducción geomecánica que continua la tendencia conocida sobre los efectos de las ondas dinámicas (Hendron, 1968) y la relación entre las ondas sísmicas y sus vibraciones con el estado tensional y su evolución con el tiempo. Siendo “ $\gamma$ ” la densidad del terreno conocemos las tensiones tangenciales inducidas con la onda S y las tensiones normales inducidas con la onda P, para estimar ángulo de fricción “Ø”.

$$Vv = 2\pi f A = dA/dt \quad dVv/dt = d^2A/dt^2 = 2\pi f Vv = \text{aceleración} \quad (1)$$

$$\sigma = E (Vv/Vp) = E \Sigma \quad \sigma/E = Vv/Vp = \Sigma \quad (2)$$

$$\sigma = \gamma Vv Vp = E \Sigma \quad \text{“Tensión para la onda plana de compresión”} \quad (3)$$

$$\tau = \gamma Vv Vs = G \text{tg}\alpha = G Vv/Vs \quad \text{“Tensión tangencial”} \quad (4)$$

$$\tau/\sigma = \gamma Vv Vs / \gamma Vv Vp = Vs/Vp \quad \tau/G = Vv/Vs = \text{tg}\alpha$$

$$G = \gamma Vs^2 \quad M = \gamma Vp^2 \quad (G/M)^{0'5} = Vs/Vp$$

$$(\sigma/E)/(\tau/G) = \Sigma/\text{tg}\alpha = (Vv/Vp)/(Vv/Vs) = Vs/Vp = \tau/\sigma = (G/M)^{0'5}$$

$$\tau = \sigma \text{tg } \alpha$$

$$\alpha = \text{arc tg}(\tau/\sigma) = \text{arc tg}(Vs/Vp) = \text{arc tg}(G/M)^{0'5} \quad (5)$$

#### 5. CONCLUSIÓN

A manera de conclusión de esta investigación basada en la velocidad de propagación de las Ondas P y Ondas S, y cotejando los resultados deducidos con ensayos geotécnicos y con relaciones contrastadas de diversos autores, con la aplicación conjunta de los sísmógrafos de vibraciones y de refracción que registran a su vez los distintos geófonos del perfil, mediante fuentes de impacto se consigue el objetivo de caracterizar el terreno con aplicaciones en las obras geotécnicas y la corrección o solución de problemas de Ingeniería del Terreno.



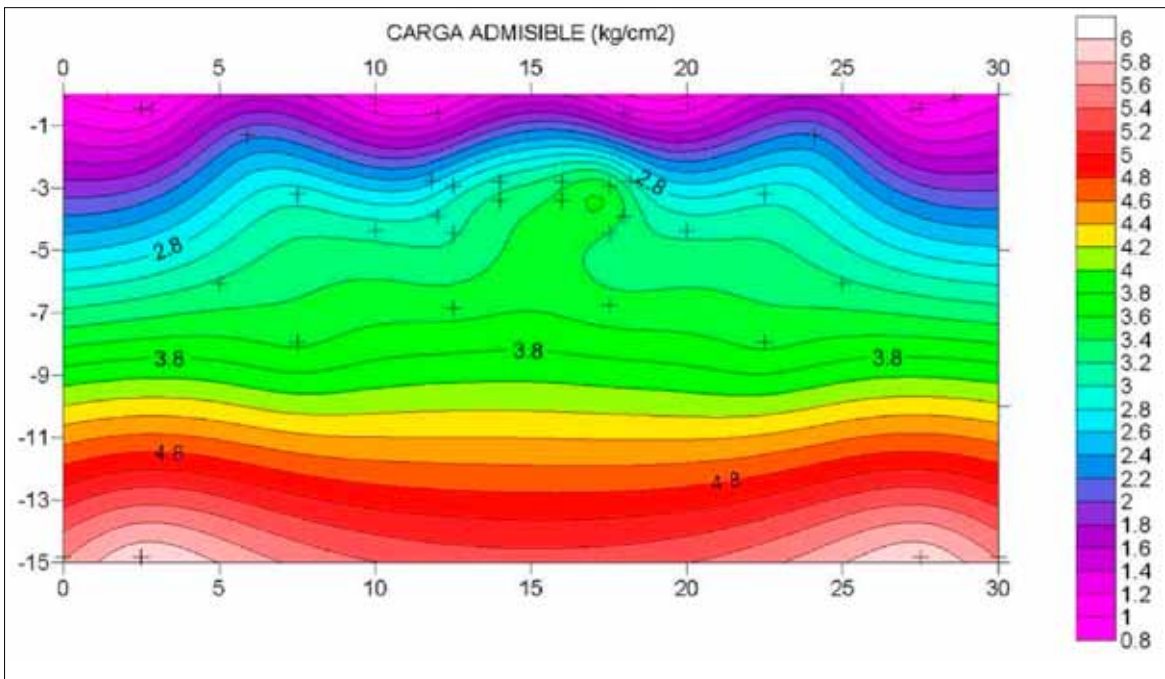


Imagen 6: Carga admisible Namuriense Perfil N-S (kg/cm<sup>2</sup>)

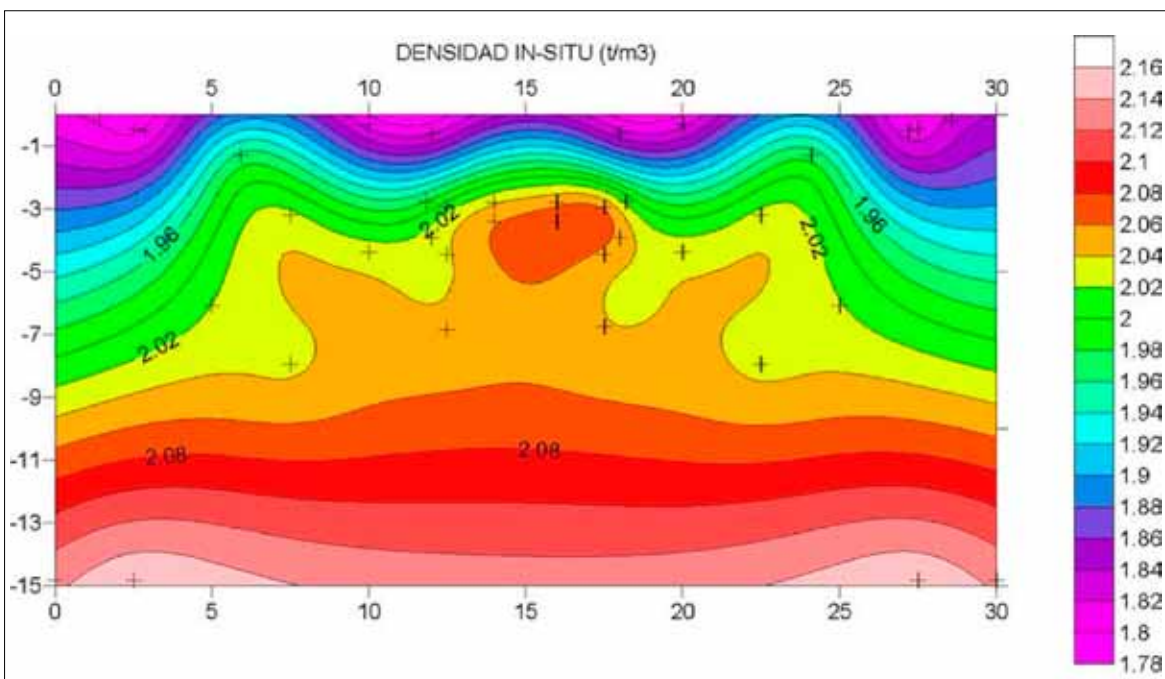


Imagen 7: Densidad in-situ Namuriense Perfil N-S (t/m<sup>3</sup>)

Por lo tanto podemos asegurar como válidos los datos, obtenidos mediante este método, de carga admisible, densidad, módulos dinámicos (obtenidos con Vs) y la estimación del ángulo de fricción (obtenido con Vp y Vs).

Para terminar, podemos decir que también podemos obtener parámetros geotécnicos con este método como son: deformación, distorsión, desplazamiento inicial, porosidad, permeabilidad, humedad, OCR y K<sub>0</sub>. ■



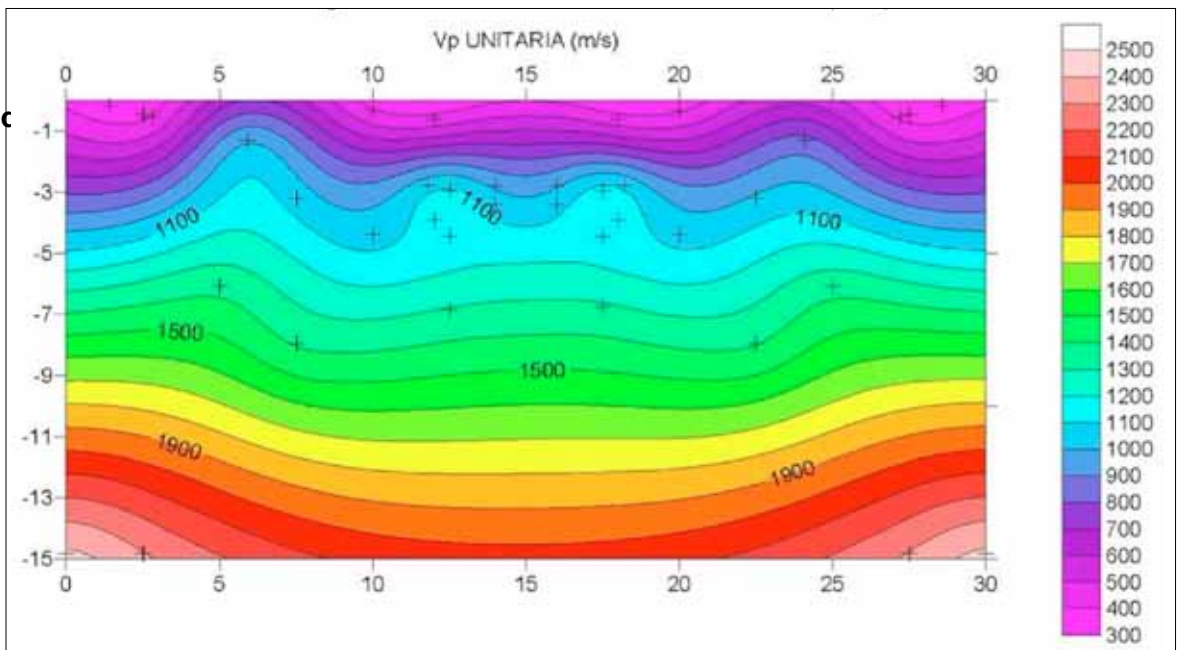


Imagen 8: Velocidad unitaria ondas P Namuriense Perfil N-S (m/s)

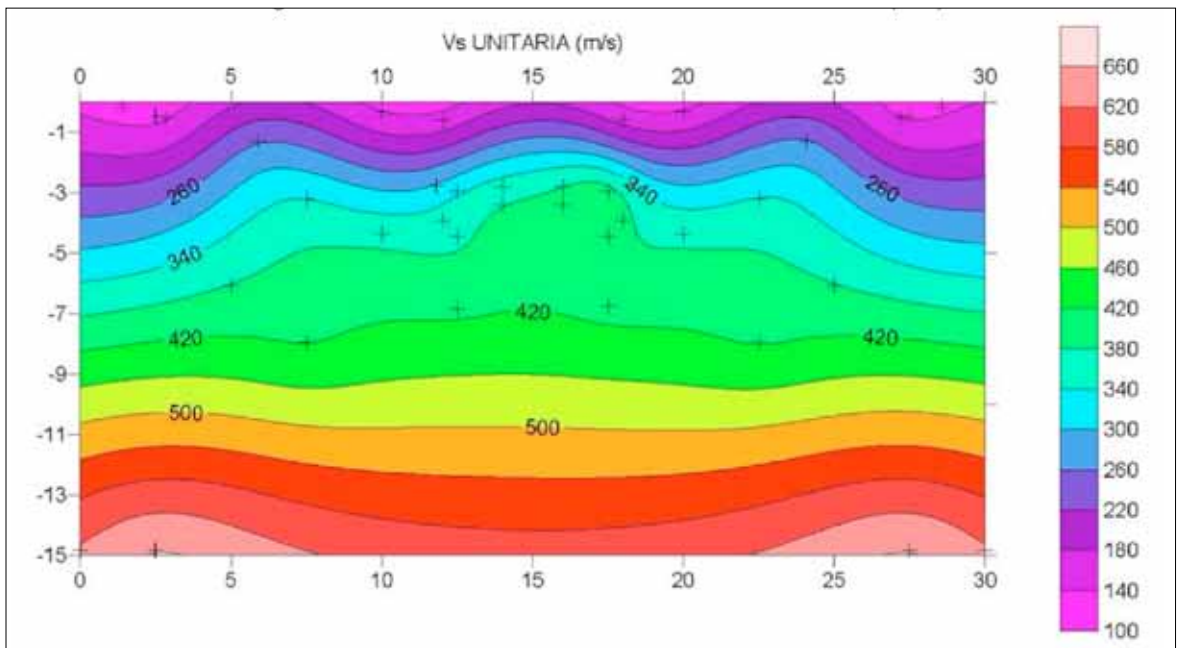


Imagen 9: Velocidad unitaria ondas S Namuriense Perfil N-S (m/s)

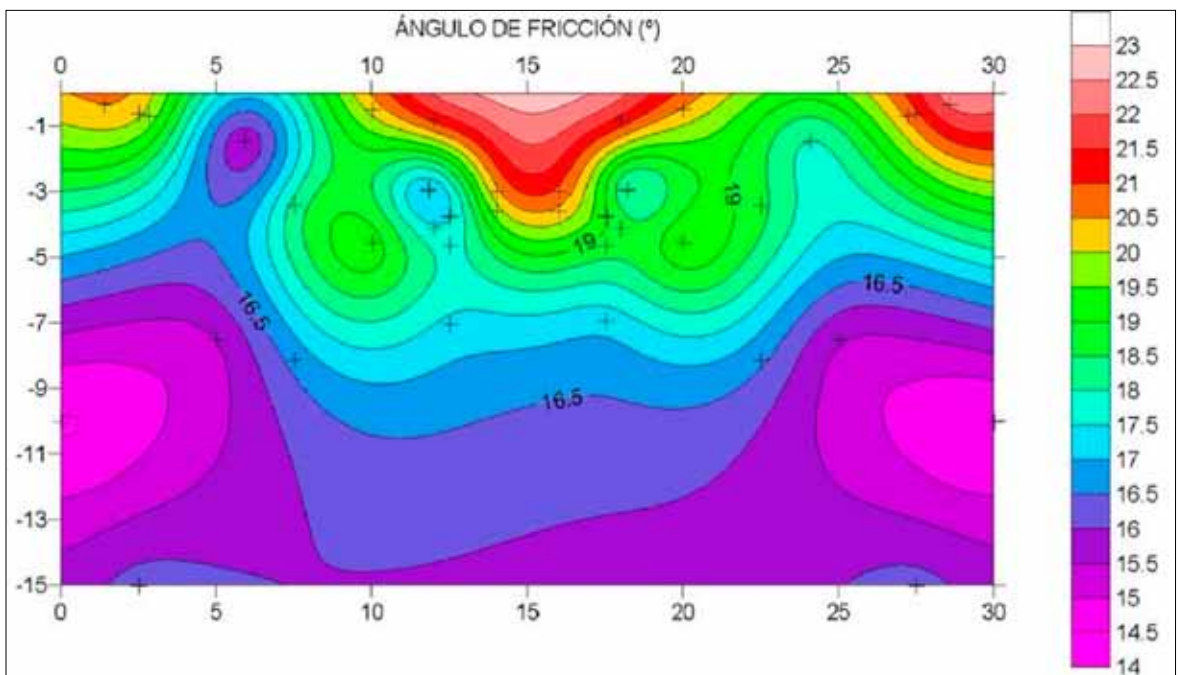


Imagen 10: Ángulo de fricción Namuriense Perfil N-S (°)



## BIBLIOGRAFÍA

Cantos, J. (1974) "Tratado de geofísica Aplicada". Sección publicaciones de Escuela Minas, Madrid.

Clark Davenport, G., Maldonado, A. y Negrillo, R. (1978). "Técnicas Geofísicas para la determinación de propiedades elásticas". Tecniterrae (Madrid).

Coates, D. F. (1973) "Fundamentos de Mecánica de Rocas", Cap. VIII: Dinámica de Rocas. Centro de Inv. Minera. Ministerio de Energía, Minas y Recursos Naturales de Canada. Litoprint, Madrid (1973). Rock Mechanics applied to the design of underground installations to resist ground shock from Nuclear Blast. 5º Symp. Rock Mechanics, Univ. Of Minnesota.

Código Técnico de Edificación (2006). CTE. Documento Básico Cimientos, SE. AENOR (1993): "Control de vibraciones producidas por voladuras. UNE 22.381.93"

Cuellar Mirasol, Vicente. (1983) "Propiedades dinámicas del suelo. Ensayos de campo y de laboratorio". 75 pgs. Laboratorio de Carreteras y Geotecnia. Ministerio de Fomento. Madrid. Cuellar Mirasol, Vicente. (1989) "Uso Geotécnico de parámetros Geofísicos". Laboratorio de Geotecnia. CEDEX. Curso Técnicas Geofísicas aplicadas al reconocimiento Geotécnico.

Daza Sánchez, A. (2011). "Aplicaciones industriales de los terrenos arcillosos de la provincia de Córdoba" Tesis Doctoral. Sobresaliente "Cum Laude", Universidad de Córdoba. <http://hdl.handle.net/10396/5231>

Daza, A. (1989). "Empuje hidrostático en taludes con baja permeabilidad". Capítulo de libro: Tomo homenaje a Jorge Porras Martín, de la Asociación Española de Hidrología Subterránea. IGME: "Hidrogeología y Recursos Hidráulicos XIV". Pgs 113–124. Madrid 1989.

Daza A., Gutiérrez-Ravé J., Siles J., Aroca G., Almansa C., Sánchez M.D. y Viñals A. (2016). "Innovación en Sísmica de Impactos para vibraciones del Terreno". 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica. Edita: Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (Tomo I) Issn 978-84-945284-2-2. Pp

Hardin BD y Black WL (1968). "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay" y Soil Mech. Div., Proc. ASCE, Vol.94 nºSM2, Mar. pp.353–369. Hardin BD y Drnevich VP (1972) "Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves" J. Soil Mech. and Found. Dic. Proc. ASCE. Vol. 98 nº SM7.

Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Underground Excavations in Rock. London, Instm. Mining Metall. Hoek, E. & Bray, J. (1981). Rock Slope Engineering. London, Instm. Mining Metall.

Mayne, Paul W. (2001). "Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests" Institute Georgia USA. Proceedings, International Conference on In-situ Measurement of soil properties y case histories (In situ 2001) Bali, Indonesia, May 21-24, 2001, pp27–48.

Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C., Hoek, E., Deere, D.V., Hendron A.J., Morgenstern, N.R., Rogerts, A. (1970). Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica. John Wiley y Sons, London 1968. Editorial Blume (Madrid).

Tezcan, S. S., Keceli, A. y Z. Ozdemir (2006) "Allowable bearing capacity of shallow foundations base on shear ware velocity". Geotechnical and Geophysical Engineering, 24: 203–218