

# Comportamiento mecánico de las rocas volcánicas

## Mechanical Behaviour of Volcanic Rocks

Áurea Perucho Martínez<sup>1\*</sup>

### Resumen

En este artículo se presentan algunos aspectos relevantes relacionados con el comportamiento mecánico de las rocas volcánicas, basados principalmente en resultados de ensayos de laboratorio realizados en testigos de rocas procedentes de las islas Canarias. Se presentan algunos rangos de variación de los parámetros geotécnicos más relevantes desde el punto de vista del comportamiento mecánico de las rocas, así como algunas correlaciones entre parámetros. En especial, se consideran los piroclastos volcánicos de baja densidad, cuyo comportamiento mecánico es muy singular. Para ellos se ajusta un criterio de rotura empírico a un extenso conjunto de resultados de ensayos de laboratorio.

**Palabras clave:** Rocas volcánicas, Piroclastos, Criterios de rotura.

### Abstract

*Some relevant aspects related to the mechanical behavior of volcanic rocks are considered, mainly based on laboratory tests performed on rocks from the Canary Islands. Ranges of variation of the most relevant geotechnical parameters from the point of view of mechanical behavior and some correlations are given for different types of rocks. More attention is paid to the analysis of pyroclastic rocks, as their mechanical behavior is more peculiar. An empirical yield criterion for low density pyroclasts is adjusted to test results.*

**Keywords:** Volcanic Pyroclasts, Rock Failure Criterion, Volcanic Rocks.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las rocas volcánicas se pueden dividir en los dos grandes grupos siguientes:

- Rocas procedentes de coladas volcánicas de lava, como basaltos, traquitas o fonolitas.
- Rocas procedentes de coladas u oleadas piroclásticas, o bien piroclastos de caída, que forman el grupo de los piroclastos volcánicos.

El comportamiento mecánico de las rocas de cada uno de estos grupos es muy diferente. El primer grupo lo forman materiales de mucha mayor densidad y resistencia que el segundo. Los piroclastos volcánicos están formados generalmente por materiales muy fragmentados, de diferentes texturas y tamaños de partículas, y que presentan casi siempre porosidades muy elevadas y densidades muy bajas. A menudo son materiales muy alterables, de muy baja resistencia y elevada deformabilidad, a excepción del grupo de las ignimbritas, que presentan resistencias mayores y se han incluido en este trabajo dentro del primer grupo.

Estos dos tipos de rocas aparecen frecuentemente alternados y entremezclados, lo cual afecta de manera primordial al comportamiento global del macizo rocoso (fig. 1).

En el laboratorio de Geotecnia del CEDEX se han llevado a cabo varios estudios de rocas volcánicas de las islas

Canarias en los últimos quince años. Algunos resultados de estos estudios se han publicado en los congresos internacionales sobre rocas volcánicas que se han venido celebrando desde hace algo más de una década (congresos de Madeira: Serrano, Olalla y Perucho, 2002a y b; Azores: Serrano, Olalla, Perucho y Hernández, 2007; Tenerife: Serrano, Perucho y Conde, 2010; e Ischia: Perucho, 2015, Serrano, Perucho y Conde, 2015a, b y c), y en alguna revista (Serrano, Perucho y Conde, 2016). Asimismo, se ha realizado una tesis doctoral sobre la caracterización geotécnica de los piroclastos de baja densidad (Conde, 2013).

En este artículo se presentan los aspectos más relevantes relativos al comportamiento mecánico de los dos grandes grupos de rocas volcánicas que se han indicado, en relación a su roca matriz y a partir de resultados de ensayos de laboratorio realizados en los trabajos en los que la autora ha participado.

## 2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS ROCAS PROCEDENTES DE COLADAS DE LAVA

### 2.1. Introducción

Las rocas procedentes de flujos de lava generalmente presentan buenas propiedades resistentes, si bien su comportamiento mecánico viene muy condicionado por las familias de discontinuidades existentes, al igual que en otros macizos rocosos. Es más, a menudo estas rocas se presentan alternando con niveles mucho más débiles escoriáceos o piroclásticos o bien con cavidades, formando masas de roca muy anisótropas y discontinuas. Generalmente, los principales problemas que presentan se deben a su

\* Autor de contacto: [aurea.perucho@cedex.es](mailto:aurea.perucho@cedex.es)

<sup>1</sup> Ingeniera de Caminos. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

heterogeneidad espacial, tanto en dirección vertical como horizontal, que es la que causa frecuentemente problemas de inestabilidad y colapso.

Estos son aspectos sin duda muy importantes que, no obstante, no se van a tratar aquí, ya que este trabajo se centra en el comportamiento mecánico de la roca matriz. El tema de las discontinuidades en macizos rocosos volcánicos es tratado abundantemente por numerosos autores. Por citar algunos, González de Vallejo, Hijazo, Ferrer y Seisdedos (2007) proporciona abundantes datos de valores típicos de discontinuidades en estos materiales, así como valores de los índices RMR y Q de flujos de lavas basálticas; Muñiz Menéndez y González-Gallego (2010) resaltan la gran dificultad de aplicar esquemas de clasificación geomecánica a las rocas volcánicas; Barton (2010) realiza indicaciones acerca de cómo estimar los valores del índice Q en basaltos columnares.



**Figura 1.** Niveles de basaltos, piroclastos y escoria (La Palma).

## 2.2. Resistencia y deformabilidad de la matriz rocosa

Rodríguez-Losada et al. (2007) presentan una clasificación de las rocas volcánicas Canarias basada en criterios litológicos, texturales y de porosidad, definiendo los 12 litotipos indicados en la tabla 1. Pretende ser una clasificación sencilla, de uso práctico, que clasifique a los materiales en grupos de comportamiento geomecánico semejante.

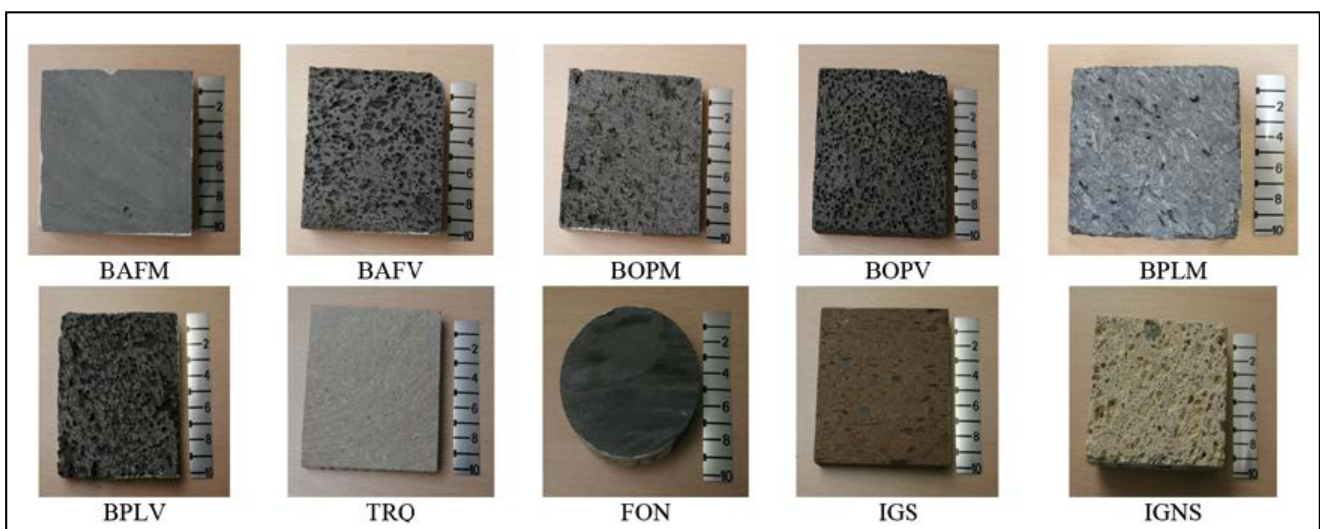
**Tabla 1.** Litotipos definidos (Rodríguez Losada et al. 2007)

Litotipo	Descripción
BAFM	Basalto afanítico masivo
BAFV	Basalto afanítico vacuolar
BES	Basalto escoriáceo
BOPM	Basalto olivínico piroxénico masivo
BOPV	Basalto olivínico piroxénico vacuolar
BPLM	Basalto plagioclásico masivo
BPLV	Basalto plagioclásico vacuolar
FON	Fonolitas
IGNS	Ignimbrita no soldada
IGS	Ignimbrita soldada
TRQ	Traquitas
TRQB	Traquibasalto

Posteriormente Hernández Gutiérrez (2014) reduce el número de litotipos a 10, eliminando tanto el denominado BES, muy poco abundante en las islas Canarias, y el denominado TRQB, cuyo comportamiento mecánico es muy similar al del BAFM, por lo cual se puede unir a ese grupo.

En la fig. 2 se presentan fotografías de los 10 litotipos. Con todos estos tipos de rocas se realizó un extenso estudio, basado en resultados de ensayo con 369 probetas con el objetivo principal de definir sus propiedades geotécnicas. Hernández Gutiérrez (2014) da una detallada descripción de los trabajos llevados a cabo para el muestreo, del origen de cada muestra y de los resultados de los ensayos.

Los ensayos geotécnicos que se realizaron en probetas en laboratorio fueron principalmente los siguientes: pesos específicos real, aparente y seco, porosidades abierta y total, absorción, velocidades de onda ultrasónica (similar a la velocidad de ondas longitudinales), carga puntual, ensayo brasileño de tracción, resistencia a compresión simple y triaxial hasta presiones de confinamiento de 10 MPa. También se realizaron medidas de dureza en bloques con el martillo Schmidt y se realizó un estudio petrográfico con láminas delgadas y un análisis geoquímico con análisis de óxidos, carbonatos, sulfatos y haluros.



**Figura 2.** Algunos de los litotipos definidos en la tabla 1 (fotografías de Hernández Gutiérrez, 2014).

Algunos de estos datos han sido publicados previamente (Rodríguez Losada et al., 2007 y 2009). En la tabla 2 se adjunta un resumen de los resultados más relevantes desde el punto de vista mecánico. Los gráficos de caja adjuntos en las fig. 3 a la fig. 8 muestran los rangos de variación de los diferentes parámetros para cada litotipo. Estas cajas representan el rango intercuartílico (50% de los datos) mientras que la línea marcada señala la mediana de los datos y la cruz el valor medio. Los histogramas de estos datos se recogen en la fig. 10.

Con estos resultados se obtuvieron numerosas correlaciones, algunas de las cuales se muestran más adelante. En

los gráficos de la fig. 9 se pueden apreciar visualmente las variables que correlacionan entre sí.

En la tabla 2 se pueden ver los rangos que se obtienen para los coeficientes de variación. Sin considerar las ignimbritas no soldadas, que aunque se han incluido en este grupo son piroclastos y presentan coeficientes más elevados, los rangos de los coeficientes de variación obtenidos han sido: 0,02-0,21 para el peso específico seco, 0,17-0,26 para la velocidad ultrasónica, 0,41-0,75 para la compresión simple, 0,19-0,57 para la resistencia a tracción y 0,37-0,62 para el módulo de Young.

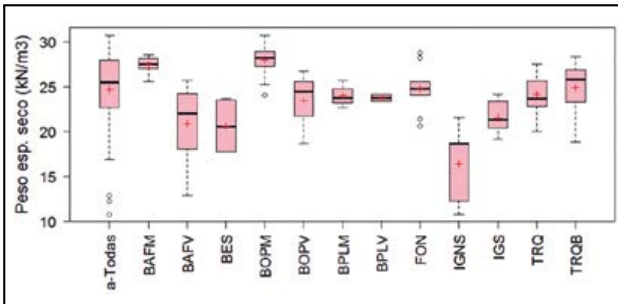


Figura 3. Rangos de variación del peso específico seco.

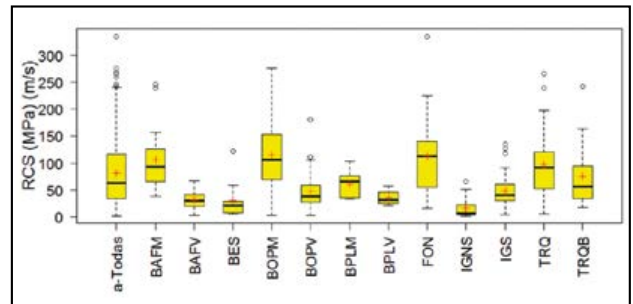


Figura 6. Rangos de variación de la resistencia a compresión simple.

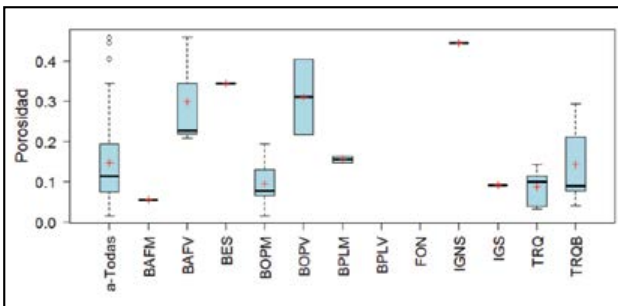


Figura 4. Rangos de variación de la porosidad total.

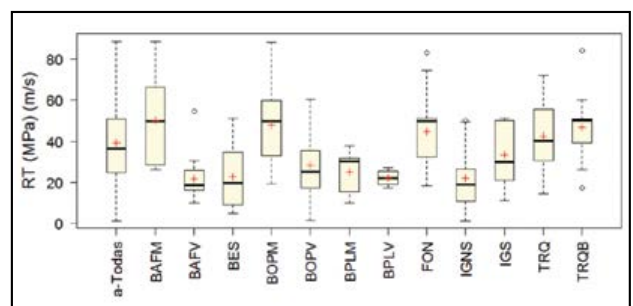


Figura 7. Rangos de variación de la resistencia a tracción.

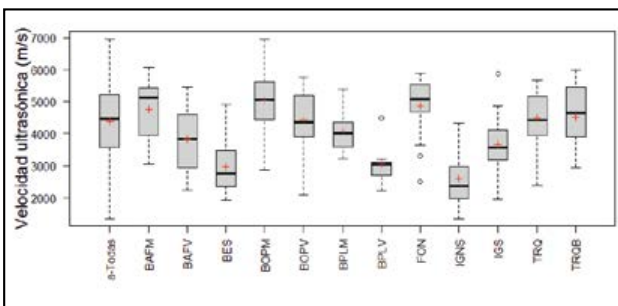


Figura 5. Rangos de variación de la velocidad ultrasónica.

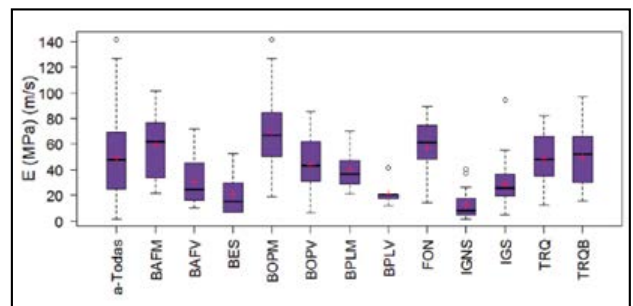


Figura 8. Rangos de variación del módulo de Young.

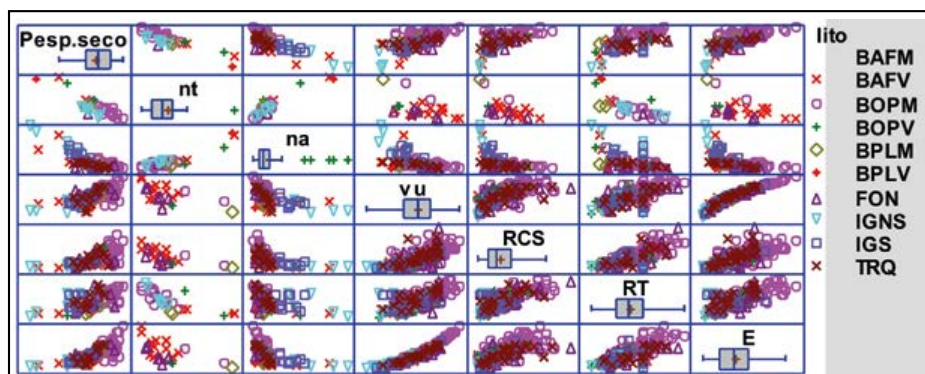


Figura 9. Visualización de las correlaciones entre variables (en los gráficos de caja la línea es la mediana y la cruz la media).

**Tabla 2.** Resumen de resultados obtenidos de rocas volcánicas canarias: valores medios

Litotipo		$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	nt (%)	na (%)	vu (m/s)	RCS (MPa)	RT (MPa)	E (GPa)
BAFM	Media	27,4	5,5	3,6	4752	106,5	50,3	59,9
	Desv. est.	1,0		0,9	975	54,9	21,3	24,7
	Cov.	0,04		0,24	0,21	0,52	0,42	0,41
	n	7	1	7	21	23	13	21
BAFV	Media	20,9	29,8	11,0	3824	31,3	21,7	30,6
	Desv. est.	4,4	13,9	10,1	980	16,0	11,4	18,9
	Cov.	0,21	0,47	0,92	0,26	0,51	0,52	0,62
	n	8	3	8	21	22	14	21
BOPM	Media	28,0	9,6	4,1	5040	115,1	47,9	69,5
	Desv. est.	1,4	5,1	2,3	843	59,8	16,3	25,4
	Cov.	0,05	0,54	0,56	0,17	0,52	0,34	0,37
	n	40	15	40	109	113	86	110
BOPV	Media	23,4	31,1	8,3	4435	47,7	28,2	44,0
	Desv. est.	3,2	13,2	7,0	901	35,7	16,1	20,5
	Cov.	0,14	0,43	0,85	0,20	0,75	0,57	0,47
	n	5	2	5	31	31	23	31
BPLM	Media	24,0	15,6	4,9	4071	60,9	25,0	40,1
	Desv. est.	1,5	1,1	1,1	739	27,9	11,7	16,7
	Cov.	0,06	0,07	0,22	0,18	0,46	0,47	0,42
	n	3	2	3	7	7	5	7
BPLV	Media	23,7		3,3	3053	36,1	22,1	21,5
	Desv. est.	0,6		3,1	713	14,8	4,2	9,5
	Cov.	0,02		0,94	0,23	0,41	0,19	0,44
	n	2		2	7	7	4	7
FON	Media	24,8		3,0	4858	113,1	44,8	57,7
	Desv. est.	2,7		1,4	910	73,7	17,2	21,1
	Cov.	0,11		0,48	0,19	0,65	0,38	0,37
	n	9		9	24	24	21	24
IGNS	Media	16,4	44,4	26,6	2592	16,5	22,0	13,1
	Desv. est.	4,6		10,8	897	19,5	18,1	12,4
	Cov.	0,28		0,41	0,35	1,18	0,82	0,95
	n	5	1	5	15	15	9	15
IGS	Media	21,5		13,3	3650	48,0	33,5	28,9
	Desv. est.	1,7		5,6	738	29,4	14,4	15,4
	Cov.	0,08		0,42	0,20	0,61	0,43	0,53
	n	14		13	48	48	38	48
TRQ	Media	24,1	8,9	4,6	4485	97,3	42,4	48,5
	Desv. est.	2,2	4,4	2,3	887	62,8	17,7	20,9
	Cov.	0,09	0,49	0,51	0,20	0,64	0,42	0,43
	n	15	6	15	31	33	21	31
Todas	Media	24,7	14,7	7,3	4377	81,1	39,3	49,3
	Desv. est.	3,8	11,4	7,4	1107	61,3	18,7	27,8
	Cov.	0,16	0,77	1,01	0,25	0,76	0,48	0,56
	n	122	37	121	338	348	253	340

( $\gamma_d$ : peso específico seco; nt: porosidad total; na: porosidad abierta; vu: velocidad ultrasónica; RCS: resistencia a compresión simple; RT: resistencia a tracción (ensayo brasileño); E: Módulo de Young).

González de Vallejo et al. (2007) indica los valores recogidos en la tabla 3 para matriz rocosa de basalto, acordes con los recogidos en las tablas anteriores.

Se realizaron más de 100 ensayos triaxiales en célula Hoek con presiones de confinamiento de hasta 10 MPa. Sin embargo, no ha sido posible obtener parámetros

representativos de los litotipos, ya que los resultados presentan una gran dispersión, principalmente debida a las diferencias de densidades de las probetas de un mismo litotipo. No obstante, como muestra la fig. 11, se puede observar una clara relación entre la resistencia de la roca y su peso específico si se observan conjuntamente los resultados

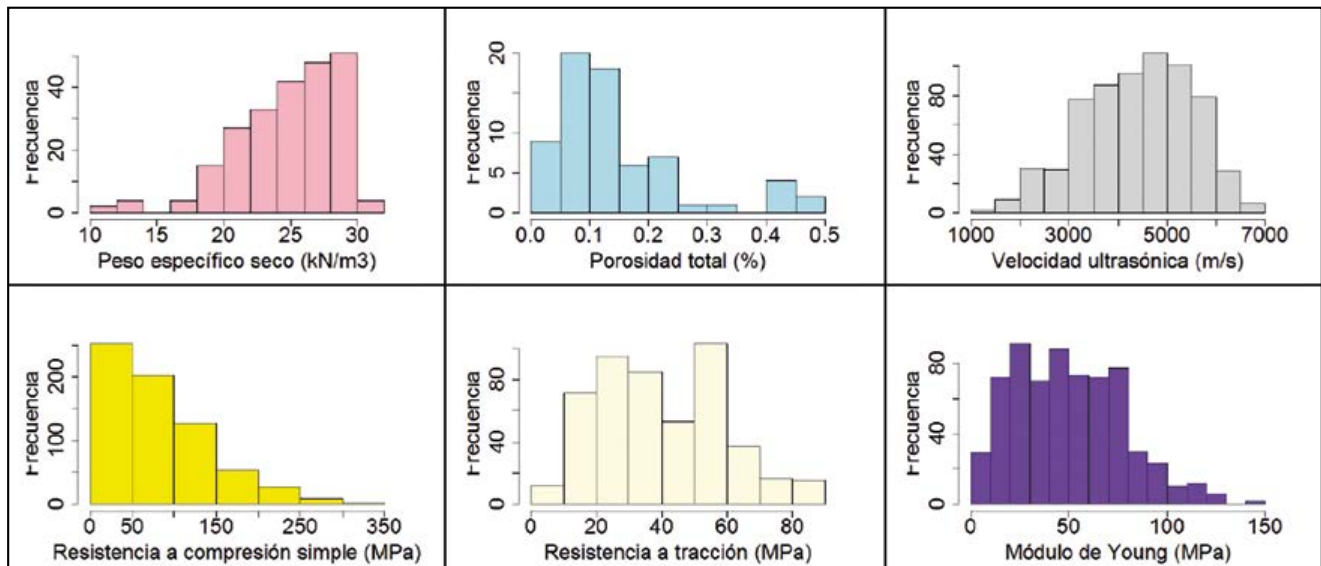


Figura 10. Histogramas de los parámetros mostrados en la tabla 2.

de todas las probetas ensayadas, independientemente del litotipo.

Tabla 3. Datos de basaltos e ignimbritas (González de Vallejo et al., 2007)

	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	RCS (MPa)
Basalto (más frecuente)	15-31 (23-28)	25-160 (40-80)
Basalto vesicular	15-23	< 40
Basalto masivo	> 28	> 80
Ignimbritas	13-20 en ocasiones >20	15-70 < 5 si alteradas

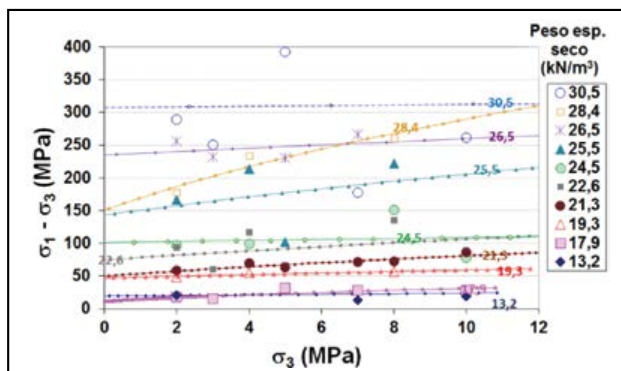


Figura 11. Resultados de ensayos triaxiales en rocas volcánicas.

### 2.3. Correlaciones

Con los datos recabados se obtienen correlaciones, algunas de las cuales se muestran en las figuras siguientes. La fig. 12 muestra la relación entre el valor medio del índice de carga puntual ( $I_{s(50)}$ ) y la resistencia a compresión simple para cada litotipo. Considerando todas las muestras, no solo los valores medios de los litotipos, se obtiene una relación de  $RCS = 15 \cdot I_{s(50)}$ ; si sólo se consideran los basaltos, entonces se obtiene  $RCS = 14 \cdot I_{s(50)}$ . Mesquita Soares, Dinis da Gama y Reis e Sousa (2002) también obtienen esta última relación con basaltos del complejo volcánico de Lisboa.

Sin embargo, la relación no es constante, sino que se incrementa con la resistencia de la roca, como se muestra en la fig. 13.

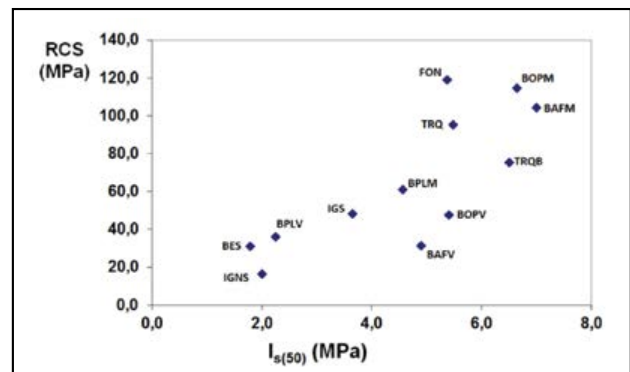


Figura 12. Relación entre el Índice de carga puntual,  $I_s$ , y la RCS (datos de Hernández Gutiérrez).

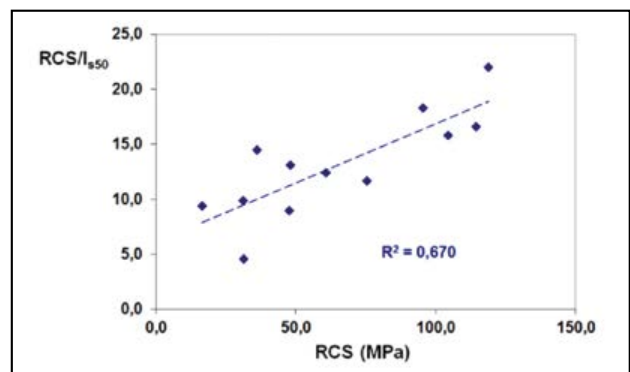


Figura 13. Relación entre  $RCS/I_s$ , y la RCS (Hernández Gutiérrez).

Karaman (2014) recopila una amplia variedad de relaciones proporcionadas por diferentes autores y para distintos tipos de roca. La mayoría son relaciones lineales del tipo  $RCS = 12$  a  $14 I_s$  y unas pocas son no lineales (exponenciales o potenciales). El citado autor estudia esta relación para piroclastos y concluye que probablemente es una relación no lineal y que se requiere una mayor investigación para comprobar si esta relación es también no lineal para todas las rocas blandas. Es muy probable que la relación sea no lineal para todos los tipos de roca, no sólo las blandas.

Por otra parte, Rodríguez Losada et al. (2007) recomiendan incrementar un 18% la resistencia a compresión

deducida del martillo Schmidt para estimar la resistencia a compresión simple:

$$RCS = 1,18 * RCS_{Schmidt}$$

La fig. 14 muestra la relación entre la resistencia a compresión simple (RCS) y la resistencia a tracción (RT, ens. brasileño) para los valores medios de cada litotipo. Si se consideran todos los resultados, se obtiene una relación igual a  $RCS = 2,2 * RT$ ; si sólo se consideran los basaltos, entonces se obtiene  $RCS = 2,4 * RT$ .

En la fig. 15 se muestra el módulo relativo obtenido para estas muestras, con un valor en torno a 500 y un rango de 250 a 1250.

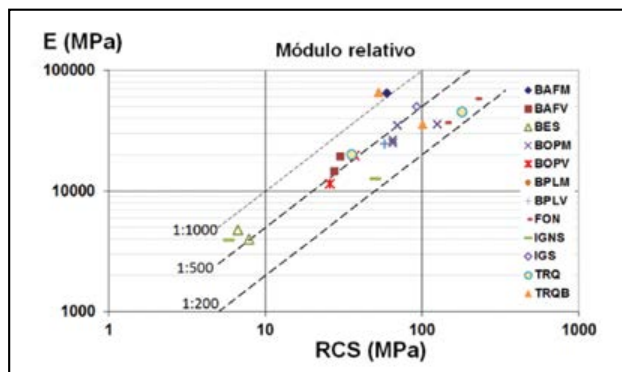


Figura 15. Módulo relativo en rocas volcánicas canarias.

En las fig. 16 y fig. 17 se muestra la relación entre el peso específico seco de estas rocas y la resistencia a compresión simple y el módulo de Young, respectivamente.

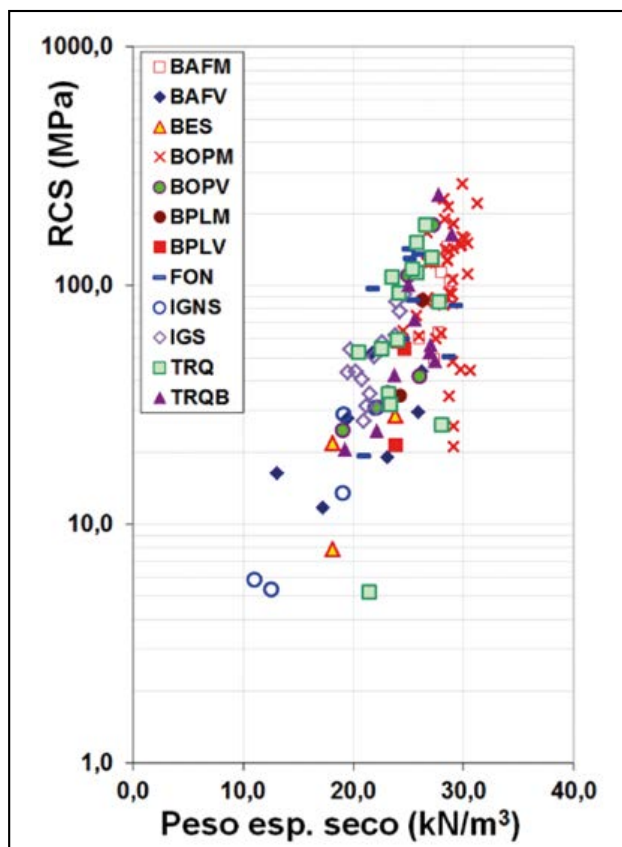


Figura 16. RCS versus peso específico seco en rocas volcánicas canarias procedentes de lavas.

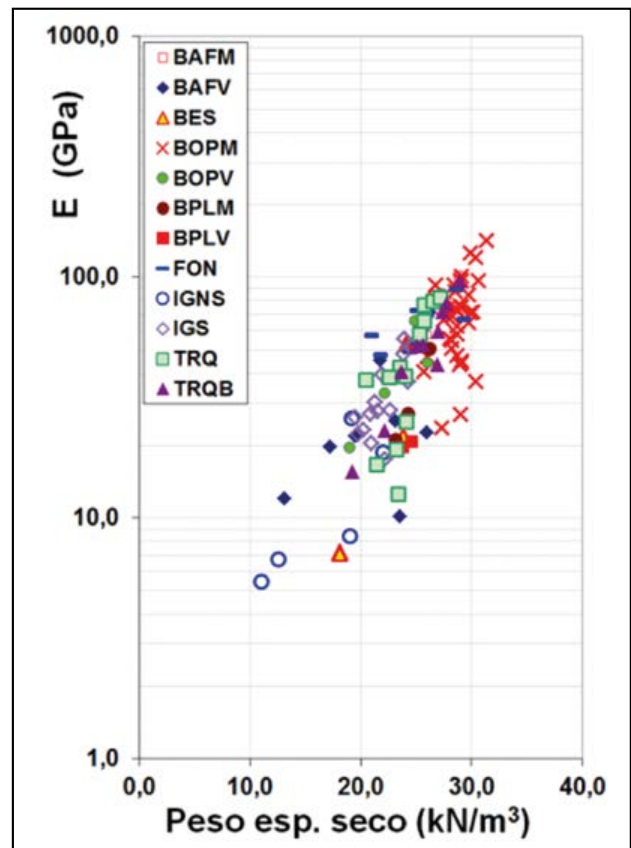


Figura 17. Módulo de Young versus peso específico seco en rocas volcánicas canarias procedentes de lavas.

### 3. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS PIROCLASTOS VOLCÁNICOS DE BAJA DENSIDAD

#### 3.1. Introducción: algunos aspectos relevantes

Al contrario que las masas de lava, los piroclastos volcánicos se ven generalmente poco afectados por discontinuidades. Por tanto, su comportamiento mecánico viene determinado principalmente por el de la roca matriz.

Estas rocas tienen un comportamiento peculiar: a bajas presiones se comportan como una roca, con módulos de elasticidad elevados y bajas deformaciones, mientras que para presiones por encima de un determinado umbral, su estructura se rompe y su deformabilidad aumenta enormemente, pasando a comportarse entonces como un suelo. Este fenómeno es conocido como colapso mecánico, y los materiales que los sufren son rocas mecánicamente colapsables.

No existen muchos datos publicados relacionados con su comportamiento mecánico, a pesar de la abundancia de estudios llevados a cabo en diferentes lugares del mundo desde los años 70 del siglo pasado (e.g.: España: Uriel y Bravo 1971, Uriel y Serrano 1973 y 1976, Serrano 1976, Uriel 1976, Serrano et al. 2002a y b, 2007 y 2010; Lomoschitz Mora-Figueroa 1996; Peiró Pastor 1997; González de Vallejo et al. 2006, 2007 y 2008; Rodríguez-Losada et al. 2007 y 2009; Conde 2013; Hernández-Gutiérrez 2014); Italy: Pellegrino 1970, Aversa et al. 1993 Aversa y Evangelista 1998, Evangelista y Aversa 1994, Cecconi y Viggiani 1998, 2001 and 2006, Cecconi 1998, Tommasi y Ribacchi 1998, Rotonda et al. 2002, Cecconi et al. 2010, Tommasi et al. 2015); Japan: Adachi et al. 1981; New Zealand: Moon 1993).

De hecho, es difícil obtener valores fiables de los ensayos de resistencia debido a varias causas, como las siguientes:

- Por una parte, es difícil obtener buenas probetas de estos materiales, ya que con frecuencia presentan fragmentos muy angulosos, que tienden a romperse al tallarlas. Además, suelen presentar paredes muy rugosas. En especial, los piroclastos poco soldados o cementados, cuanto más débiles son más difíciles resultan de tallar adecuadamente. Como consecuencia, se tiene una importante dispersión de resultados, lo que hace necesaria la realización de un gran número de ensayos para poder tener datos y conclusiones fiables.
- Por otra parte, debido a la rugosidad de las paredes de las probetas, se produce con gran frecuencia la rotura de las membranas utilizadas en los ensayos triaxiales, en especial cuando se aplican presiones de confinamiento altas, lo que dificulta la obtención de valores de presiones isotrópicas de colapso, o valores de resistencia al corte con elevadas presiones de confinamiento.

Además, estas rocas suelen ser muy heterogéneas e incluso cuando los testigos se tallan de un mismo bloque suelen presentar diferencias de densidad que influyen enormemente en su resistencia y deformabilidad.

En los siguientes apartados se va a describir el comportamiento mecánico observado en un gran número de muestras y se va a ajustar un criterio de rotura propuesto por Serrano (2012) para definir la superficie de fluencia de estos materiales. Previamente se comentarán algunos aspectos relevantes relacionados con su macroporosidad, así como otros aspectos relativos a la fabricación de muestras artificiales (*“piroclasto ideal”*), la preparación de probetas y la clasificación utilizada para designar las muestras ensayadas.

### 3.1.1. Macroporosidad

Es bien sabido que la estructura de estos materiales tiene una gran influencia en su resistencia, tal y como han venido señalando numerosos autores desde hace tiempo (e.g.: Pellegrino 1970, Serrano 1976 y 1997, Leorueil y Vaughan 1990, Aversa y Evangelista 1998, Serrano et al. 2007, Conde 2013, Tommasi et al. 2015). En los estudios llevados a cabo en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX desde 2002 (CEDEX, 2007 y 2013), la macroporosidad de los piroclastos se ha venido estudiando con detalle mediante la observación al microscopio, en algunos casos tras sumergir las muestras en resinas coloreadas para facilitar la visualización de los poros (fig. 18).

A partir de estos estudios se definieron cuatro tipos principales de macroporosidad (fig. 19):

- Porosidad reticular, para definir la estructura formada por partículas cementadas en sus puntos de contacto de unas con otras y rodeadas de macroporos; se observa en muestras de pumitas no alteradas.
- Porosidad vacuolar, que se presenta cuando una masa vítrea más o menos homogénea presenta un gran número de vacuolas pseudo-esféricas en su interior; se observa en escorias.
- Porosidad mixta, se presenta cuando se observan las dos porosidades anteriores, de tipo reticular entre las

partículas y de tipo vacuolar en las mismas; se observa en muestras de lapilli no alteradas.

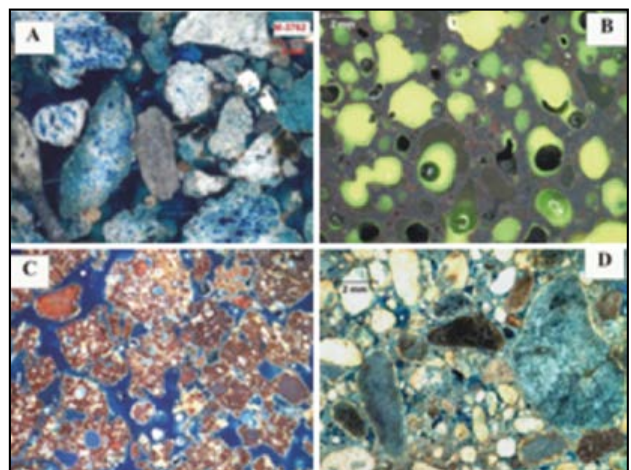
- Porosidad matricial, caracterizada por la presencia de un material fino rellenando los macroporos que rodean a las partículas; se observa en muestras alteradas tanto de lapilli como de pumitas. Es más, se puede definir como el tipo de porosidad de las cenizas también, ya que, debido al pequeño tamaño de sus poros, no presentan macroporos.



**Figura 18.** Muestra de piroclasto inmersa en resina coloreada para observar mejor su macroestructura.

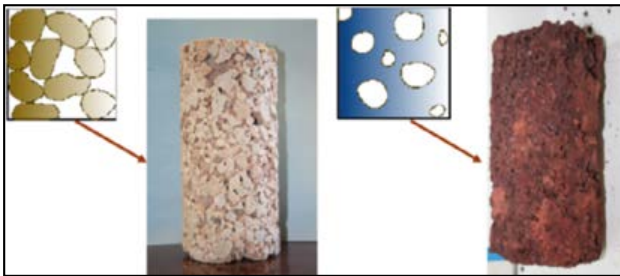
### 3.1.2. Fabricación de probetas: *“Piroclasto ideal”*

Uriel y Bravo (1971) encontraron un comportamiento mecánicamente colapsable en hormigones porosos, que fue ajustado posteriormente por Serrano (1976, Serrano et al. 2002) a un modelo energético definido para piroclastos de baja densidad. Con este precedente y también debido a la gran dificultad de obtener resultados de ensayos de resistencia, así como a la gran heterogeneidad de las muestras, se hizo un intento en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX de fabricar artificialmente un material de estructura parecida a la de los piroclastos reales, pero que pudiera ser más homogéneo y fácil de ensayar. Es decir, un *“piroclasto ideal”*, que pudiera ser útil para encontrar la forma del criterio de rotura de este tipo de rocas.



**Figura 19.** Microfotografías de varios piroclastos con los cuatro tipos de estructura macroporosa definida (A-Reticular; B-Vacuolar; C-Mixta; D-Matricial) (CEDEX 2007; Santana, Santiago, Perucho y Serrano, 2008).

Así, se fabricaron dos tipos de estructuras, simulando las porosidades reticular y vacuolar, respectivamente (fig. 20). Se probaron muchas combinaciones diferentes, utilizando básicamente cemento, bentonita, partículas de arlita y pequeñas partículas esféricas de porexpan en diferentes proporciones. La bentonita se añadió para disminuir la resistencia del cemento. La porosidad reticular se simuló combinando los cuatro elementos mencionados (fig. 21 y fig. 23), mientras que la porosidad vacuolar se simuló combinando cemento y bentonita con partículas de porexpan (fig. 22 y fig. 23). Las partículas de arlita se usaron para simular las partículas de pumita, de baja densidad, y en ambos casos se añadieron partículas de porexpan para simular la elevada porosidad de los piroclastos. Se realizaron numerosas pruebas hasta que se obtuvieron valores de resistencia a compresión simple e isotrópica similares a los de las muestras reales. Este procedimiento se describe extensamente en CEDEX (2013) y Conde (2013).



**Figura 20.** Izquierda: Piroclasto de porosidad reticular (pumita); Derecha: Piroclasto de porosidad vacuolar (escoria).



**Figura 21.** "Piroclasto ideal", con estructura reticular.

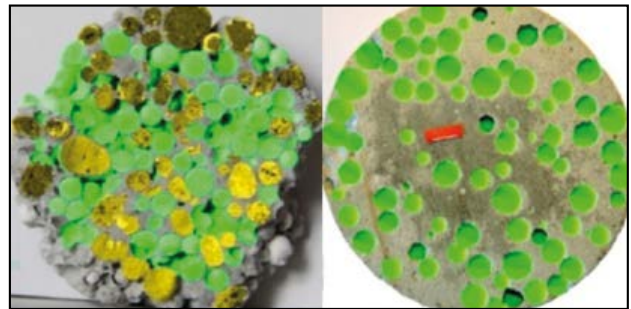


**Figura 22.** "Piroclasto ideal", con estructura vacuolar.

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados por obtener muestras homogéneas, la dispersión de resultados que se obtuvo en los ensayos de resistencia no fue inferior a la obtenida en los piroclastos reales, sino del mismo orden de magnitud. No obstante, el estudio permitió definir la mejor forma de realizar los ensayos triaxiales en estos materiales.

### 3.1.3. Preparación de probetas de piroclastos reales

Después de probar diferentes métodos, se comprobó que la mejor forma de obtener probetas de calidad a partir de los bloques era congelándolos a  $-20^{\circ}\text{C}$  previamente, en especial, en el caso de los piroclastos más débiles, que siempre acababan rompiéndose durante el tallado. Aún congeladas, las muestras más débiles se tallaban cuidadosamente a mano (fig. 24). Cecconi y Viggiani (1998) estudian el efecto de la congelación de una roca blanda piroclástica comparando sus velocidades de onda antes y después del congelado, y concluyen que tras el mismo la reducción de la velocidad de onda es sólo del orden de un 6%. No parece, por tanto, que la congelación produzca una reducción significativa en la resistencia.



**Figura 23.** "Piroclasto ideal" con estructura reticular (izquierda) y vacuolar (derecha). Los huecos (simulados por esferas de porexpan) están coloreados en verde y las partículas (piezas redondeadas de arlita) en amarillo.

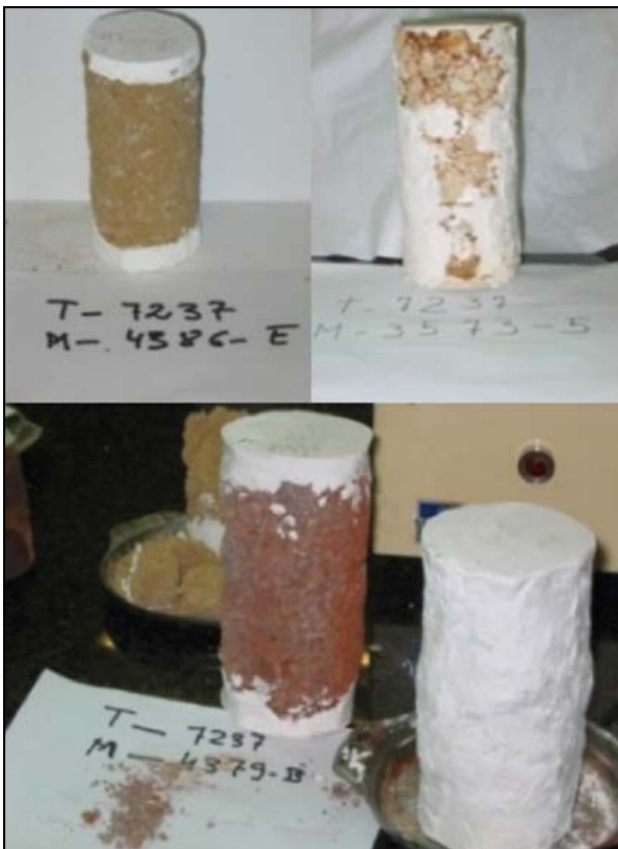


**Figura 24.** Tallado manual de una muestra de pumita.

Por otra parte, a fin de asegurar el paralelismo de las bases de las probetas y, en algunos casos, también para suavizar las irregularidades de las paredes, se usó escayola (fig. 25). Finalmente, para suavizar las irregularidades de las paredes, la mayoría de las veces se optó por cubrir lateralmente las probetas con tejido tipo hule, por encima de tres membranas impermeables de uso común en los ensayos



triaxiales (fig. 26). De esta forma se consiguió que no se rompiera la impermeabilización lateral de las muestra durante los ensayos. Esta protección puede producir un pequeño incremento de rigidez en las muestras, pero no un cambio relevante en los resultados de los ensayos.



**Figura 25.** Algunas probetas cubiertas total o parcialmente por escayola para asegurar el paralelismo de las bases y para suavizar la rugosidad de las paredes.



**Figura 26.** Membranas impermeables (izquierda) y tejido tipo hule usado para los ensayos de compresión isotrópica y triaxiales.

### 3.1.4. Clasificación de piroclastos

Hernández Gutiérrez y Rodríguez Losada definieron en 2007 la clasificación geotécnica mostrada en la tabla 4, como resultado de un extenso estudio llevado a cabo por el Departamento de Infraestructuras del Gobierno de Canarias (CEDEX 2007; Consejería de Obras Públicas y

Transportes del Gobierno de Canarias 2011). Es una clasificación cualitativa que define unos litotipos de piroclastos de baja densidad desde el punto de vista de su composición magmática, su tamaño de partículas y su grado de soldadura, independientemente de su origen. Los piroclastos a los que se va a hacer referencia en los siguientes apartados están clasificados en los cinco grupos principales indicados en la segunda columna de la tabla, sin indicación de su grado de soldadura. Así, los piroclastos serán clasificados como lapilli, pumita, escoria y cenizas basálticas o sálicas.

**Tabla 4.** Litotipos definidos en la clasificación de Hernández Gutiérrez y Rodríguez Losada (CEDEX 2007; Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias 2011)




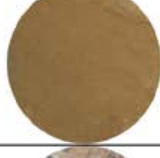
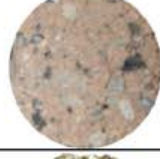

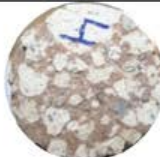
Piroclastos basálticos	Lapilli (LP)	Suelto (S)	LPS
		Soldado (T)	LPT
	Escoria (ES)	Suelto (S)	ESS
		Soldado (T)	EST
Cenizas basálticas (CB)	Suelto (S)	CBS	
	Soldado (T)	CBT	
Piroclastos sálicos	Pumita (PZ)	Suelto (S)	PZS
		Soldado (T)	PZT
	Cenizas sálicas (CS)	Suelto (S)	CSS
		Soldado (T)	CST

Tamaños de partícula: Lapilli (2-64mm); Escoria (>64mm); Cenizas (<2mm); Pumita (>2mm).

Conde (2013) y Conde, Serrano y Perucho (2015) proponen una nueva clasificación derivada de ésta (fig. 27), con la aportación fundamental de definir unos litotipos nuevos dentro de los cinco grupos principales, para distinguir los piroclastos que presentan porosidad matricial, en la forma definida anteriormente. Su principal rasgo característico es que éstos piroclastos tienen un material fino rellenando los poros, y cuyo origen podría ser diverso, pudiendo proceder bien de la alteración de las partículas o bien de depósitos de fluidos, por ejemplo. Como se verá más adelante en las curvas de tensión-deformación, la presencia de matriz en los macroporos influye de forma crucial en el comportamiento mecánico de los piroclastos, por lo que se hace necesario distinguir aquellos que la tienen de los que no. Estos materiales con porosidad matricial probablemente corresponden a los denominados “*tobas*” por muchos autores.

Aparte de los materiales mencionados, se podrían añadir los aglomerados volcánicos y brechas, formados por fragmentos de diferentes tamaños, y no incluidos en estas clasificaciones.

A pesar de que es una tarea difícil, dada la complejidad de estos materiales, sería muy conveniente establecer una única clasificación universal, que permitiera realizar comparaciones más claras entre el comportamiento de materiales ensayados en diferentes lugares del mundo.

	Descripción	Tamaño de partículas (mm)	Matriz	Foto (Escala: diámetro círculo = 7±0.5cm)	Soldadura o litificación	Litotipo
<b>BASÁLTICOS</b>	Cenizas basálticas (Toba cinerítica) (BA)	<2mm	NO**		Litificado	BA-L
					Débilmente litificado	BA-SL
					Suelto	BA-Lo
	Cenizas basálticas con partículas de diferente naturaleza (BA)	Matriz:<2mm Partículas: diferentes tamaños	SI		Litificado	BA-L-P
	Lapilli (LP)	2-64mm	NO		Soldado	LP-W
					Débilmente soldado	LP-SW
			SI		Litificado	LP-L-M
	Escoria (Bombas, Bloques, Brechas) (SC)	>64mm	NO		Soldado	SC-W
					Débilmente soldado	SC-SW
Suelto					SC-Lo	
<b>SÁLICOS</b>	Cenizas sálicas (Toba cinerítica) (SA)	<2mm	NO**		Litificado	SA-L
					Débilmente litificado	SA-SL
					Suelto	SA-Lo
	Cenizas sálicas con partículas de diferente naturaleza (SA)	Matriz:<2mm Partículas: diferentes tamaños	SI		Litificado	SA-L-MP
	Pumitas (Depósitos de flujo de pumitas) (PM)	>2mm	NO		Soldado o Litificado	PM-W/L
					Débilmente soldado/litificado	PM-SW/SL
SI				Litificado	PM-L-M	

\*La nomenclatura se refiere a composición y tamaño (primeras dos letras), seguidas de la unión entre partículas (litificado/soldado/suelto) y donde resulta apropiado, la presencia de matriz (M) o matriz con partículas (MP). Se ha preferido mantener la nomenclatura de las siglas en inglés. \*\* Dado el pequeño tamaño de partícula de las cenizas por lo que, pese a carecer de matriz, su porosidad se puede considerar de tipo matricial.

Figura 27. Litotipos definidos en la clasificación de Conde, Serrano y Perucho (2015).

## 3.2. Resistencia y deformabilidad de los piroclastos

### 3.2.1. Factores más influyentes

El comportamiento mecánico de los piroclastos volcánicos de baja densidad depende principalmente de los siguientes factores (Serrano et al. 2002):

1. Compacidad global.
2. Cementación o soldadura de las partículas.
3. Imbricación de las partículas.
4. Resistencia intrínseca de las partículas.
5. Alteración.

Los tres primeros factores definen la estructura y generalmente están asociados entre sí: en general, cuanto más imbricadas y soldadas están las partículas, mayor es su compacidad y densidad. Por otra parte, también se da el caso de algunos piroclastos muy compactos pero muy friables, cuando las partículas no presentan una buena unión o soldadura.

La compacidad global es el factor más influyente, vital para estimar la resistencia de la roca matriz. La gran importancia del peso específico de la roca, mostrada ya en las rocas volcánicas densas procedentes de lavas, en las que se ha visto que es incluso más influyente que el litotipo, se da también en los piroclastos de baja densidad, como se mostrará más adelante.

### 3.2.2. Caracterización mecánica experimental

#### 3.2.2.1. Ensayos realizados

En los estudios llevados a cabo en los últimos años en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, se han ensayado unas 250 probetas a compresión simple, triaxial e isotropa. Se han incluido los cinco tipos principales de piroclastos definidos: lapilli, pumita, escoria y cenizas basálticas y sálicas. Todos ellos procedentes de piroclastos de caída, con la posible excepción de las cenizas, cuyo origen es incierto, ya que podrían proceder también de flujos piroclásticos.

Los ensayos se realizaron en muestras secadas en estufa y en todos los casos se midieron las deformaciones axiales. En los ensayos de compresión isotropa también se midieron deformaciones volumétricas, mediante el volumen de agua expulsado de la célula durante los ensayos.

La magnitud de las deformaciones volumétricas así medidas puede no ser muy precisa, pero las curvas de deformación volumétrica fueron muy útiles para ayudar a situar los puntos de fluencia en las curvas de tensión-deformación, cuando éstos no estaban muy claros. Los ensayos triaxiales e isotropos se llevaron a cabo en una célula triaxial con presiones de confinamiento hasta 3.5 MPa.

Todas las probetas fueron de unos 5 cm de diámetro (7 en algunos casos para compresión simple) y entre 10 y 13 cm de altura, salvo unas pocas que fueron más cortas y se ensayaron a compresión simple, realizando la corrección de resistencia sugerida por la ISRM en relación a la esbeltez de las probetas.



**Figura 28.** Algunas probetas, antes de ensayarse.

Para cada probeta se determinaron las presiones de fluencia a partir de los resultados de todos estos ensayos de compresión, buscando un criterio de resistencia que pudiera definir la superficie de fluencia para estos materiales. Además de estos ensayos de resistencia se realizaron otros ensayos de identificación, principalmente: peso específico aparente y real, humedad, carbonatos, sulfatos, difracción y fluorescencia por rayos X.

#### 3.2.2.2. Resumen de los resultados obtenidos

En la tabla 5 se incluye un resumen de los resultados más relevantes desde el punto de vista mecánico. Se pueden ver los rangos que se obtienen para los coeficientes de variación, que son los siguientes: 0,10-0,31 para el peso específico seco, 0,02-0,06 para el peso específico de las partículas, 0,68-1,32 para la compresión simple, 0,39-0,46 para la presión isotropa de colapso y 0,32-1,21 para el módulo de Young.

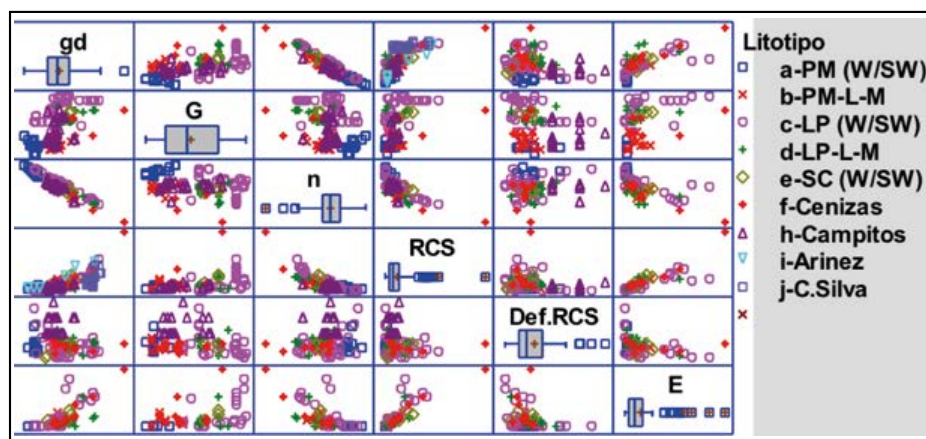
En los gráficos de la fig. 29 se pueden apreciar visualmente las variables que correlacionan entre sí. Se han incluido resultados de ensayos anteriores con litotipos sin identificar (Campitos, Ariñez y C. Silva).

**Tabla 5.** Resumen de resultados en piroclastos de baja densidad

Litotipo		$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	n	RCS (MPa)	Def. RCS (%)	$p_c$ (MPa)	Def. $p_c$ (%)	E (MPa)
Pumita PM-W/L y PM-SW/SL	Media	5,2	23,5	0,78	0,27	1,1	0,22	0,6	16,2
	Desv. est.	0,6	0,7	0,03	0,33	0,5	0,09	0,3	5,1
	Cov.	0,11	0,03	0,04	1,22	0,45	0,39	0,56	0,32
	n	28	28	28	11	11	17	17	9
Pumita alterada (con matriz) PM-L-M	Media	9,7	24,3	0,60	0,94	1,0	-	-	139,9
	Desv. est.	0,9	1,0	0,04	0,64	0,3	-	-	101,7
	Cov.	0,10	0,04	0,07	0,68	0,31	-	-	0,73
	n	13	13	13	13	13	-	-	13
Lapilli LP-W y PM-SW	Media	10,6	29,1	0,64	1,43	0,9	1,4	0,8	270,4
	Desv. est.	2,9	1,7	0,10	1,56	0,7	0,6	0,4	309,0
	Cov.	0,27	0,06	0,15	1,09	0,75	0,46	0,50	1,14
	n	57	47	47	39	39	19	19	33
Lapilli alterado (con matriz) LP-L-M	Media	12,8	28,0	0,55	1,28	1,2	-	-	176,5
	Desv. est.	2,4	0,9	0,07	0,87	0,4	-	-	199,3
	Cov.	0,19	0,03	0,13	0,68	0,32	-	-	1,13
	n	14	14	14	14	14	-	-	12
Escoria SC-W y SC-SW	Media	10,0	28,4	0,58	1,58	0,7	1,4	0,9	242,5
	Desv. est.	2,2	0,6	0,02	1,16	0,5	-	-	117,9
	Cov.	0,22	0,02	0,03	0,73	0,62	-	-	0,49
	n	6	3	3	5	5	1	1	4
Cenizas*	Media	12,3	26,4	0,54	2,31	0,9	-	-	327,9
	Desv. est.	3,9	1,5	0,14	3,04	0,3	-	-	397,8
	Cov.	0,31	0,06	0,27	1,32	0,27	-	-	1,21
	n	12	9	9	12	12	-	-	12
Todas	Media	9,7	26,8	0,65	1,33	1,0	0,9	0,7	215,8
	Desv. est.	3,5	2,7	0,11	1,61	0,5	0,8	0,4	272,8
	Cov.	0,36	0,10	0,18	1,22	0,54	0,92	0,54	1,26
	n	130	114	114	94	94	37	37	83

\* Se han considerado conjuntamente todos los litotipos de las cenizas.

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\gamma_s$ : peso específico de las partículas (G: peso esp. relativo); n: porosidad; RCS: resistencia a compresión simple; Def. RCS: deformación en rotura en el ensayo de RCS;  $p_c$ : presión isotrópica de colapso; Def.  $p_c$ : deformación en rotura en el ensayo de colapso; E: Módulo de Young (parte lineal de la curva).



**Figura 29.** Visualización de las correlaciones entre variables (en los gráficos de caja la línea es la mediana y la cruz la media; Campitos, Arinez y C. Silva con litotipos sin identificar).

Los gráficos de caja adjuntos en las fig. 30 a fig. 35 muestran los rangos de variación de los diferentes parámetros para cada litotipo. Estas cajas representan el rango intercuartílico (50% de los datos) y la línea marcada señala la

mediana de los datos y la cruz el valor medio. Los histogramas de estos datos se recogen en la fig. 36. Con estos resultados se obtuvieron numerosas correlaciones, algunas de las cuales se muestran más adelante.

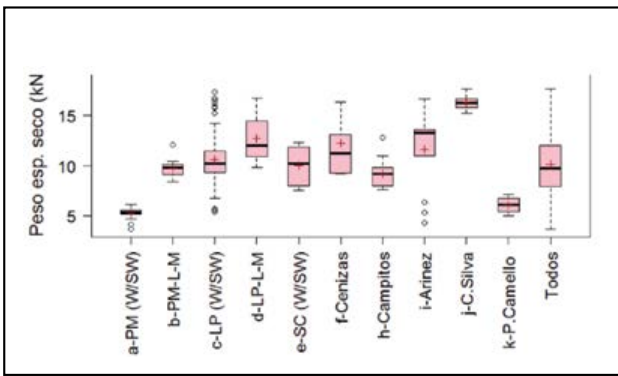


Figura 30. Rangos de variación del peso específico seco.

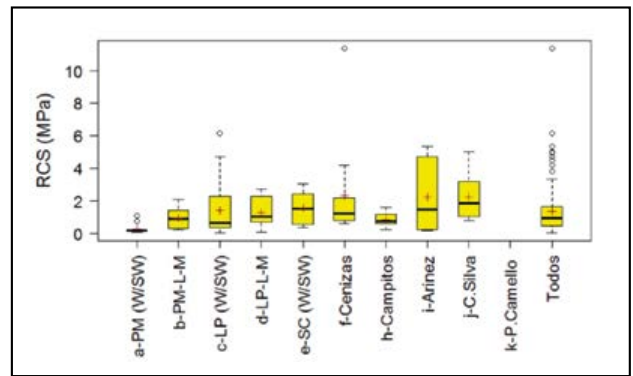


Figura 33. Rangos de variación de la RCS.

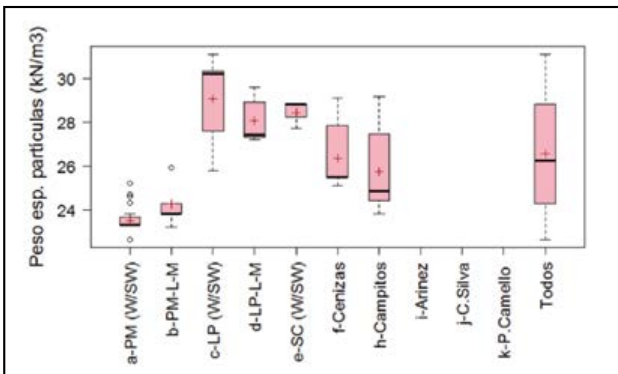


Figura 31. Rangos de variación del peso específico de las partículas.

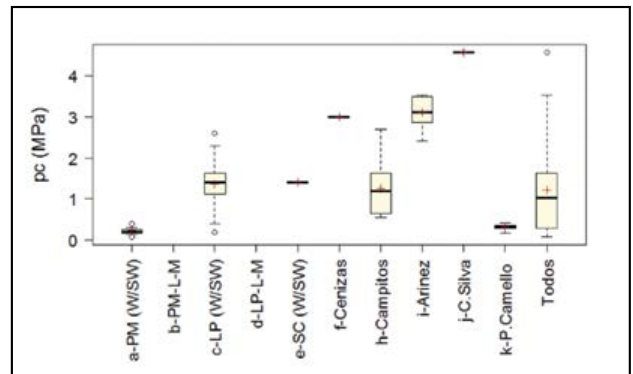


Figura 34. Rangos de variación de la presión isotrópica de colapso.

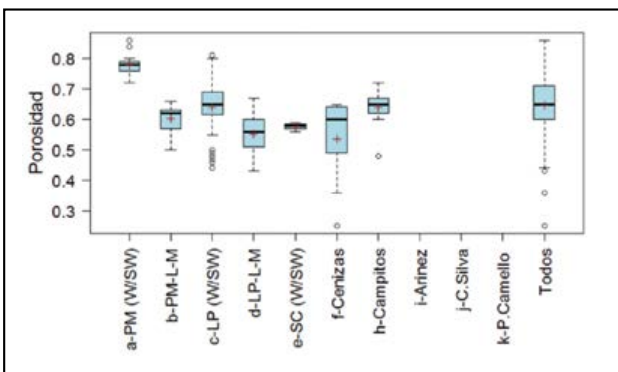


Figura 32. Rangos de variación de la porosidad.

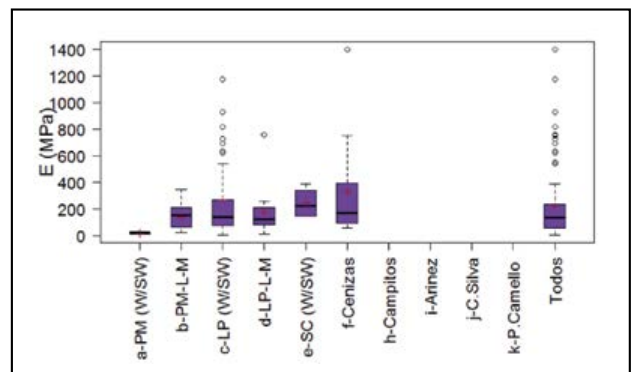


Figura 35. Rangos de variación de módulo de Young.

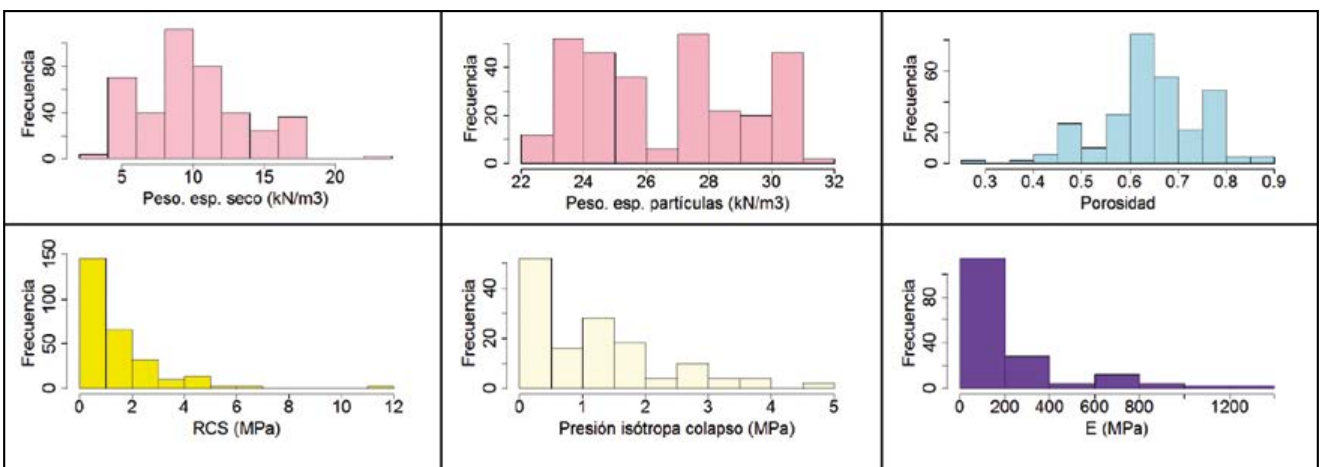
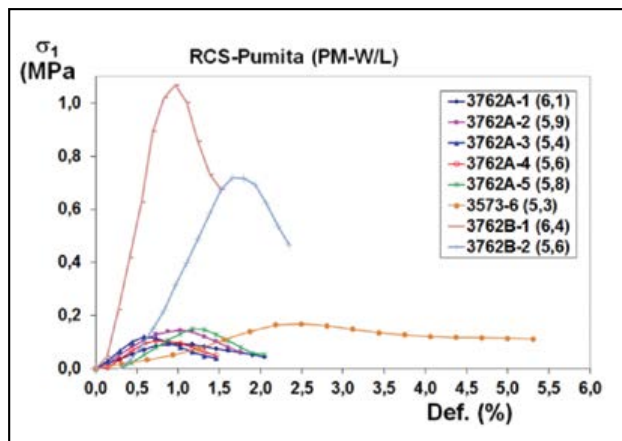


Figura 36. Histogramas de los parámetros mostrados en la tabla 5.

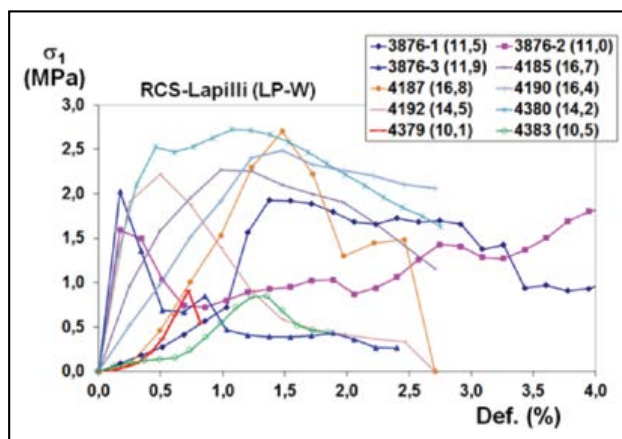
### 3.2.2.3. Comportamientos mecánicos observados

Los resultados de los ensayos muestran una gran influencia de la estructura de la roca. Algunos ejemplos ilustrativos del comportamiento mecánico en los ensayos se adjuntan en las fig. 37 a fig. 47.

En las fig. 37 a fig. 39 se muestran curvas representativas del comportamiento a compresión simple de pumitas, lapilli y cenizas, respectivamente. En la fig. 37 se observa que en las pumitas la rotura a compresión simple produce curvas de tensión-deformación suaves y reflejan un comportamiento elástico antes de la rotura. En cambio, las curvas que se producen en los lapilli (fig. 38) muestran formas mucho más irregulares, y a menudo un comportamiento no lineal antes de la rotura. Sin embargo, en los lapilli alterados, con porosidad matricial, las curvas tienden a suavizarse (fig. 40). Pola et al. (2010) estudian la relación entre la porosidad y las propiedades mecánicas de rocas volcánicas alteradas y también encuentran curvas más suavizadas para grados de alteración elevados.



**Figura 37.** Ejemplo de curvas de ensayos de RCS en pumitas litificadas (en la leyenda se indica entre paréntesis el peso específico de cada una en  $\text{kN/m}^3$ , junto con el número de probeta).

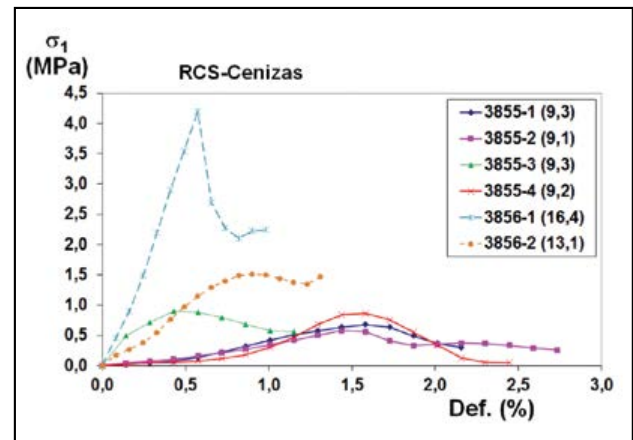


**Figura 38.** Ejemplo de curvas de ensayos de RCS en lapilli soldados (en la leyenda se indica entre paréntesis el peso específico de cada una en  $\text{kN/m}^3$ , junto con el número de probeta). Muestras ensayadas en el CEDEX.

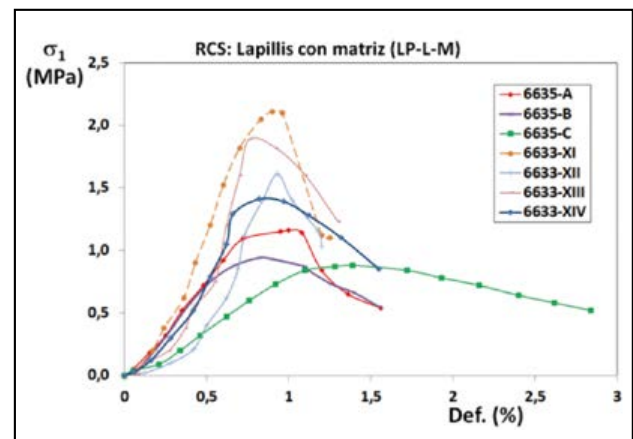
En la compresión simple la rotura se produce principalmente a través de los contactos de las partículas, observándose cómo los planos de rotura pasan entre ellas. La unión entre estos contactos es más débil en las pumitas y en los

lapilli alterados que en los lapilli sanos, lo que produce que las curvas sean más suaves en los dos primeros.

Por otra parte, en la fig. 39 se muestran curvas de compresión simple en cenizas, que presentan formas suaves, en general, por la misma razón.



**Figura 39.** Ejemplo de curvas de ensayos de RCS en cenizas litificadas (en la leyenda se indica entre paréntesis el peso específico de cada una en  $\text{kN/m}^3$ , junto con el número de probeta).



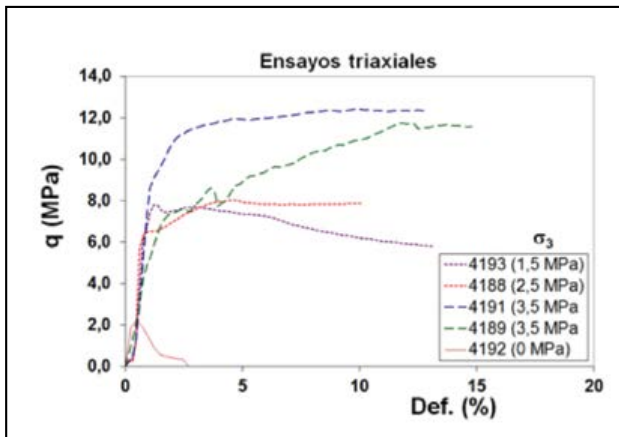
**Figura 40.** Ejemplo de curvas de ensayos de RCS en lapilli alterados (porosidad tipo matricial).

En el caso de las lapilli la resistencia es debida principalmente a la soldadura mientras que en las pumitas y cenizas es más debida a la litificación, ya que debido a su baja densidad cuando se depositan están ya bastante enfriadas. Asimismo, en todos los casos se observa una gran influencia de la densidad de las muestras en la resistencia a compresión simple, lo cual es esperable y se produce también en los demás tipos de roca dado que, entre otras razones, la densidad de las rocas disminuye al aumentar su alteración.

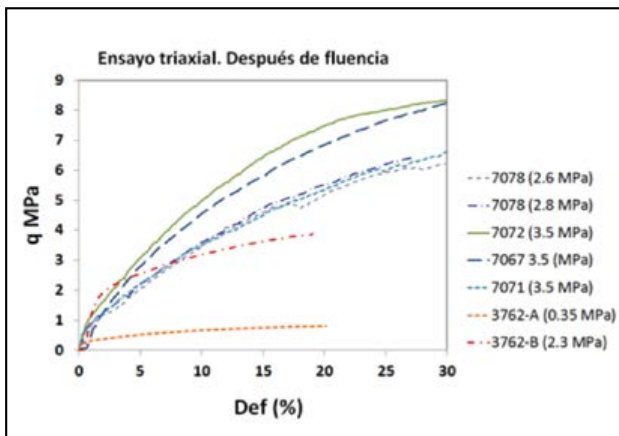
En la fig. 41 se muestran algunas curvas representativas de los resultados de los ensayos triaxiales, para muestras ensayadas con presiones de confinamiento inferiores a su presión de colapso isótropo. El comportamiento que se observa es aproximadamente elástico lineal hasta presiones próximas a las de rotura. Asimismo, se observa una disminución de la fragilidad con presiones de confinamiento elevadas, como ocurre en otras rocas.

Sin embargo, en las rocas ensayadas con presiones de confinamiento superiores a la de colapso isótropo y, por tanto, ya colapsadas al aplicar el desviador, se observa un comportamiento diferente, como puede verse en la fig. 42.

Se observa un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento y la rotura se alcanza para deformaciones axiales muy elevadas (mayores de un 30% a veces).



**Figura 41.** Ejemplo de curvas de ensayos de compresión triaxial (lapilli). Presiones de confinamiento (entre paréntesis) inferiores a las de fluencias.



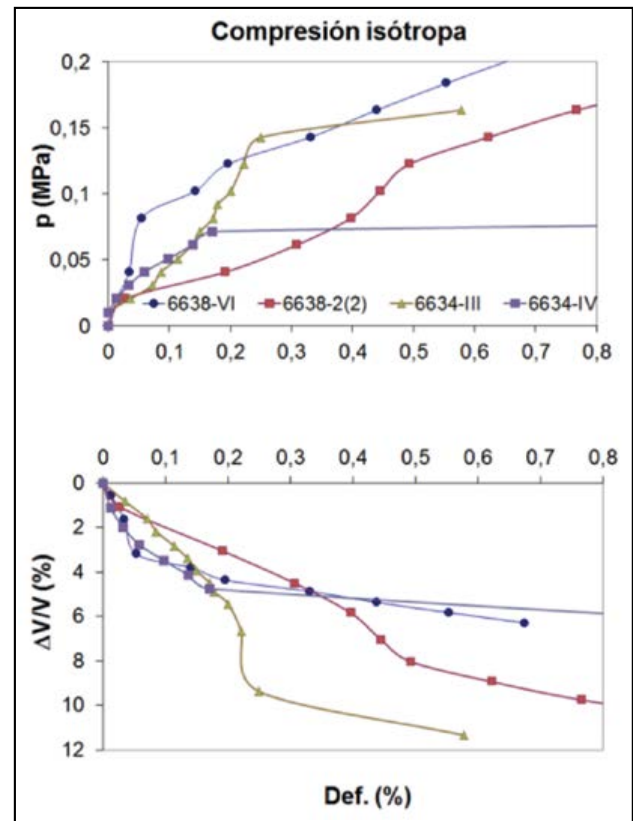
**Figura 42.** Ejemplo de curvas de ensayos de compresión triaxial. Presiones de confinamiento (entre paréntesis) superiores a las de fluencias.

En la fig. 43 se muestra un ejemplo de curvas de deformación volumétrica. Aunque la medida de la deformación en sí no es muy precisa, las curvas muestran la variación producida en las deformaciones volumétricas cuando se produce la fluencia.

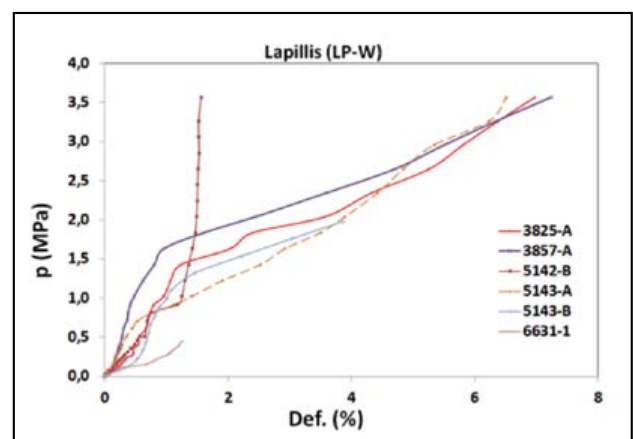
En las fig. 44 a fig. 47 se muestran algunas curvas representativas del comportamiento tensión-deformación de estos materiales en compresión isotrópica.

Mesri y Vardhanabhuti (2009) estudian la compresión de materiales granulares y concluyen que la mayoría de los datos existentes de compresión primaria en suelos granulares muestran un comportamiento que se puede resumir en tres tipos, denominados A, B y C. Puesto que los piroclastos están formados por fragmentos granulares unidos entre sí se les puede suponer un comportamiento similar. En las fig. 44 y fig. 45 se muestran unos resultados típicos de lapilli y pumita, que muestran en ambos casos un comportamiento similar al descrito por estos autores como tipo A, en el cual hay una primera etapa en la que el módulo de deformación es ligeramente creciente o constante, seguida de una segunda etapa en la que el módulo decrece. En algunos casos, se observa una tercera etapa,

en la que el módulo crece de nuevo. El crecimiento del módulo de la primera etapa se puede atribuir a un cierre de la estructura, debido a la aproximación entre partículas. En las fig. 48 y fig. 49 se muestran algunas fotografías de microscopio de pumitas y lapilli, respectivamente, donde, aparte de los macroporos, se observan espacios entre partículas, que tenderán a cerrar cuando la muestra se someta a compresiones.



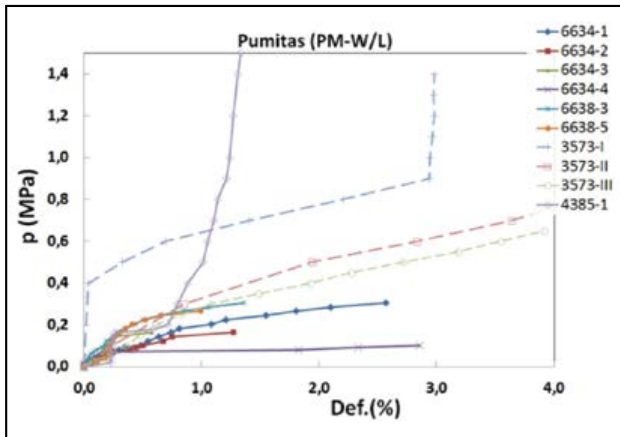
**Figura 43.** Ejemplo de curvas de ensayos de compresión isotrópica y deformación volumétrica (los valores de deformación no son precisos).



**Figura 44.** Ejemplo de curvas de compresión isotrópica de lapillis soldados (p: presión isotrópica media; Def.: deformación axial).

El valor de la presión que separa el comportamiento de la primera etapa del de la segunda es el de la presión isotrópica de fluencia o colapso. Los valores que se obtienen son superiores en los lapilli, con frecuencia en el rango de 1.09-1.54 MPa e inferiores en las pumitas, en el rango de 0.18-0.26 MPa (intervalos de confianza del 95%).

Tommasi et al. (2015) encuentran también un comportamiento tipo A en un piroclasto poco cementado procedente de un depósito de flujo, conocido localmente como “*pozzolana*”.

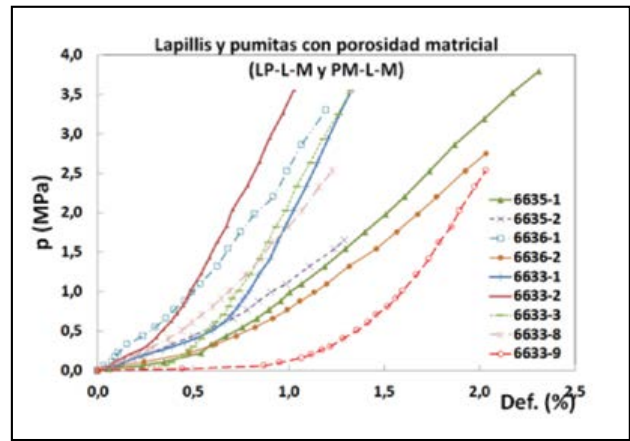


**Figura 45.** Ejemplo de curvas de compresión isotrópica de pumitas litificadas (p: presión isotrópica media; Def.: deformación axial).

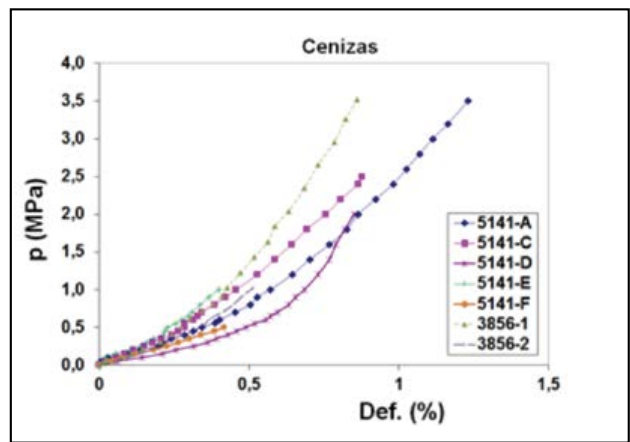
De acuerdo con Mesri y Vardhanabhuti (2009), en la primera etapa de los materiales con comportamiento tipo A se producen algunos movimientos de las partículas que favorecen su imbricación, y se pueden producir daños de nivel I y II, es decir, abrasión o molido de las asperezas de la superficie y rotura o aplastamiento de las esquinas de las partículas, respectivamente. En la segunda etapa se produce daño de nivel III en las partículas, es decir, fracturación, división y aplastamiento y hay un colapso de la estructura del conglomerado que soporta la carga. Cuando se ha producido la mayor parte de las roturas se produce la tercera etapa, durante la cual hay un incremento en el módulo debido a la mayor imbricación y compacidad a que se ha llegado.

En cambio, en pumitas y lapillis alterados se observa un comportamiento diferente. En éstos, los macroporos se encuentran rellenos de un material de grano fino, por lo que presentan una porosidad de tipo matricial. En la fig. 46 se muestran algunos resultados típicos del comportamiento isotrópico de estas muestras. Se observa un comportamiento tipo B, de acuerdo con Mesri y Vardhanabhuti (2009), con una primera etapa en la que el módulo de deformación crece gradualmente, seguida de una segunda etapa en la que permanece constante. Podría existir una tercera etapa en la que el módulo aumentara de nuevo, pero en los ensayos realizados no se ha observado, bien porque se pararon antes de alcanzarla o bien porque no se produce. En la primera etapa se producen daños tipo I y II en las partículas, mientras que en la segunda se producen daños de tipo III en las mismas, que son contrarrestados por la mayor compacidad conseguida, por lo que no se produce colapso y la deformabilidad permanece constante. Desde el punto de vista de la ingeniería civil estos piroclastos alterados con porosidad tipo matricial son mucho menos peligrosos, ya que no sufren colapso mecánico o, si lo sufrieran, sería a presiones y deformaciones mucho mayores.

En la fig. 47 se muestran curvas de compresión isotrópica típicas de cenizas. Se observa un comportamiento tipo B, similar al de los piroclastos alterados, por lo que tampoco sufren colapso mecánico, al menos a los niveles de carga ensayados.

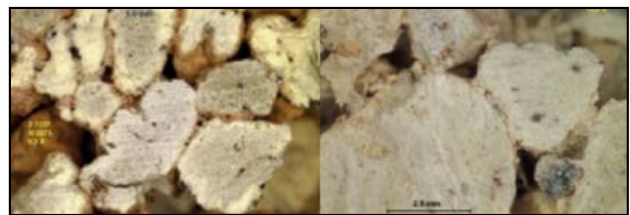


**Figura 46.** Ejemplo de curvas de compresión isotrópica de piroclastos alterados (lapilli y pumitas con porosidad matricial) (p: presión isotrópica media; Def.: deformación axial).

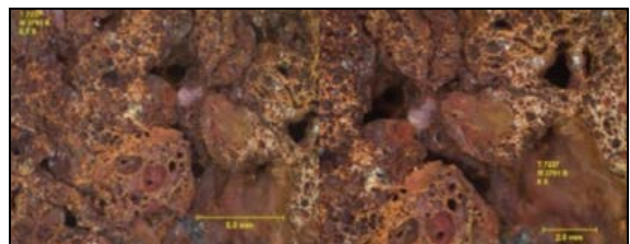


**Figura 47.** Ejemplo de curvas de compresión isotrópica de cenizas litificadas (p: presión isotrópica media; Def.: deformación axial).

De acuerdo con Conde (2013), parece que en compresión isotrópica el colapso es más gradual en muestras de pumitas y más brusco en los lapilli. Las fig. 44 y fig. 45 parecen corroborar esa tendencia, aunque algunas muestras de pumitas también sufren colapso brusco.



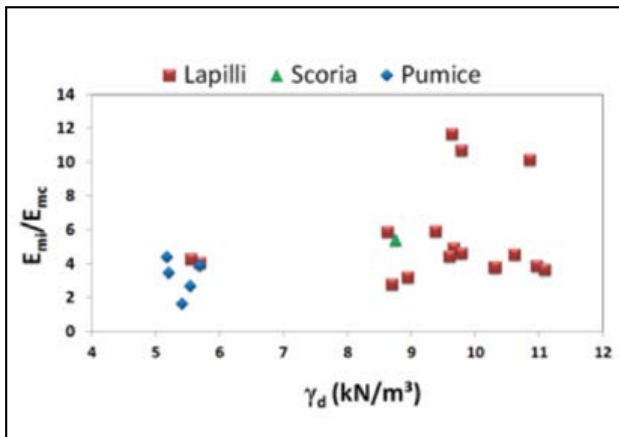
**Figura 48.** Fotografías de microscopio de probetas de pumita. Se observan macroporos y espacios entre las partículas (porosidad reticular).



**Figura 49.** Fotografías de microscopio de probetas de lapilli. Se observan macroporos y espacios entre las partículas, así como poros internos en las mismas (porosidad mixta).



La fig. 50 muestra la relación entre el módulo de deformación antes y después del colapso isotrópico en diferentes muestras. En general, hay mayor variación del módulo en muestras de lapilli, con una relación entre 3 y 12, que en pumitas, con una relación entre 2 y 4.



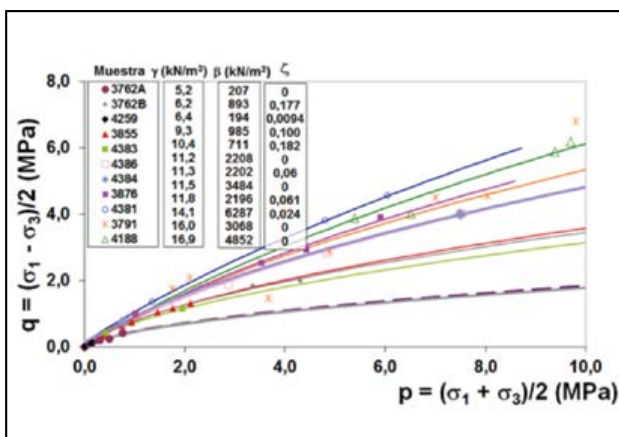
**Figura 50.** Relación entre los módulos de deformación antes ( $E_m$ ) y después ( $E_{mnc}$ ) del colapso en compresión isotrópica (Conde 2013).

### 3.2.3. Criterio de fluencia o colapso

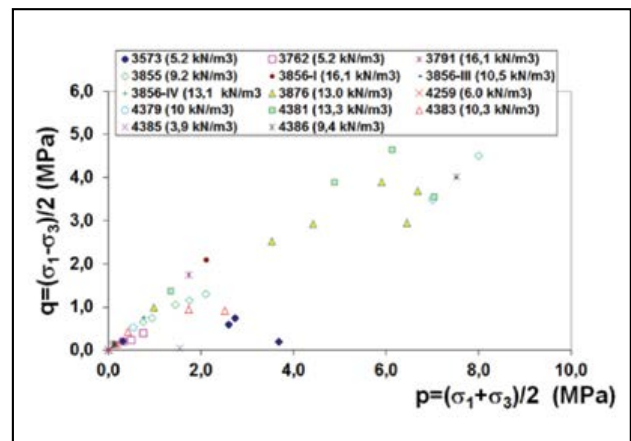
#### 3.2.3.1. Comportamiento a bajas presiones

Para bajas presiones el criterio de rotura triaxial de Hoek y Brown (1980) se puede ajustar a estos materiales. (fig. 51). Sin embargo, en los piroclastos de baja densidad incluso a presiones de confinamiento bajas se puede observar que el criterio tiende a cerrarse en la zona de mayores presiones, como se observa en la fig. 52 y se verá más adelante.

Igual que ocurre con las rocas procedentes de lava, más densas y resistentes, la densidad influye notablemente en la resistencia de estos materiales.



**Figura 50.** Ejemplo de ajuste del criterio de rotura de Hoek y Brown a piroclastos de baja densidad para presiones de confinamiento bajas. Nótese la gran influencia del peso específico ( $\gamma$ ) en la resistencia ( $\beta$  y  $\zeta$  son los parámetros resistentes de Serrano y Ollala) (Serrano et al. 2007).



**Figura 51.** Resultados de ensayos de piroclastos de baja densidad (CEDEX 2007).

#### 3.2.3.2. Colapso mecánico

Algunos autores como Serrano (1976), Adachi et al. (1981), Aversa y Evangelista (1998) y Serrano et al. (2002, 2007, 2010) han desarrollado diferentes ecuaciones tratando de obtener la superficie de fluencia de los materiales piroclásticos.

Se han planteado fundamentalmente dos tipos de modelo para reproducir el colapso mecánico:

- Modelos teóricos, de los que pueden señalarse los modelos estructurales (e.g. Uriel y Bravo 1971, Uriel y Serrano 1973) y modelos energéticos (E.G. Serrano 1976, Aversa y Evangelista 1998, Serrano et al. 2002);
- Modelos empíricos (e.g. Serrano et al. 2015a y 2016).

Por otra parte, Del Olmo y Serrano (2010) trataron de modelizar el colapso de los materiales macroporosos como medios discretos.

En los siguientes apartados se indican algunos rasgos de estos modelos.

#### a. Modelos energéticos de colapso mecánico

De acuerdo con Serrano (1976), se puede establecer el patrón de comportamiento indicado en la fig. 53, en el espacio de tensiones efectivas ( $q, p$ ), definidos según la notación de Cambridge:

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{3}; \quad q = \sigma_1 - \sigma_3$$

Hay un dominio que contiene el origen, dentro del cual el material se comporta de forma elástica en un proceso de carga normal. Para tensiones dentro de ese dominio el piroclasto se comporta como una roca. La frontera de ese dominio elástico es referida como la línea de colapso inferior. Cuando las tensiones alcanzan esta línea, la estructura del material comienza a verse afectada, mientras que cuando alcanzan la línea superior de colapso es totalmente destruida. La rotura ocurre en esta zona de transición definida entre las líneas de colapso inferior y superior. Una vez su estructura ha sido totalmente destruida el material se comporta como un suelo, pudiendo tener una resistencia de pico y otra residual. El comportamiento podrá ser estable o inestable según el punto que se alcance en la línea de colapso superior.

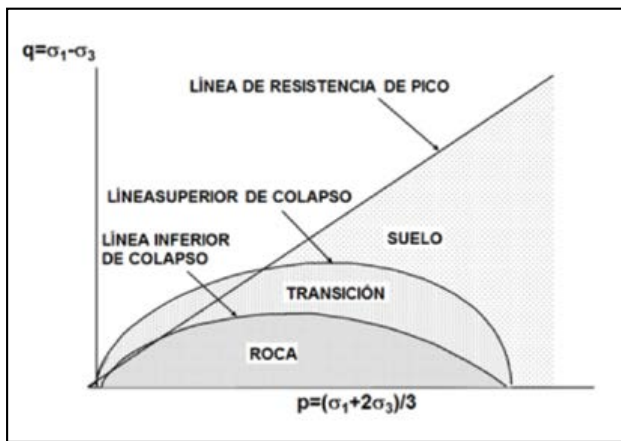


Figura 53. Dominios de comportamiento (Serrano 1976).

Para materiales homogéneos ambas líneas coinciden y la zona de transición desaparece. Estas líneas, que de hecho no son más que las fronteras de los dominios de comportamiento, dependen de la trayectoria de tensiones seguida.

Se consideran cuatro trayectorias de tensiones posibles, cuyas leyes tensión-deformación dependen de la trayectoria tensional (fig. 54):

- Ensayos de compresión isotrópica (curva 1). Algunos ejemplos de este tipo de leyes tensión-deformación se vieron en las fig. 44 (lapilli) y fig. 45 (pumita).
- Ensayos con presión de confinamiento elevada (curva 2). En la fig. 55 se muestra un ejemplo de este tipo de curva para un lapilli.
- Ensayos con presión de confinamiento intermedia (curva 3). En la fig. 55 también se muestra alguna curva de este tipo.
- Ensayos con presión de confinamiento baja (curva 4). Estos tipos de curva se vieron en las fig. 37 a fig. 40.

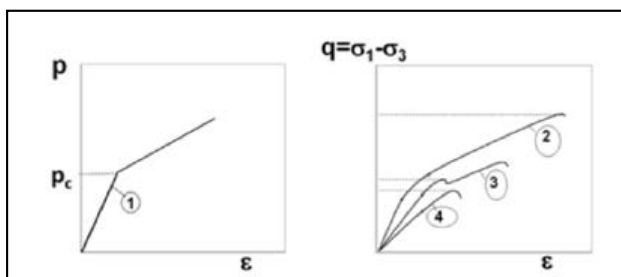


Figura 54. Leyes tensión-deformación indicadas en la fig. 56.

En la fig. 56 se pueden ver las zonas correspondientes a estas trayectorias, con indicación del tipo de rotura.

El modelo matemático desarrollado por Serrano (1976; Serrano et al. 2002) adopta la ley de consumo propuesta por Roscoe y Burland (1968) para arcillas blandas, si bien ligeramente modificada por un factor  $l(h)$ , que depende de la uniformidad y anisotropía del material en relación a la trayectoria de tensiones impuesta. La ley propuesta para rocas macroporosas es:

$$F^* = \lambda(\eta) \sqrt{\psi^2 + M^2}$$

y teniendo en cuenta la teoría de estabilidad local de Drucker (1959), expresada de un modo más general por

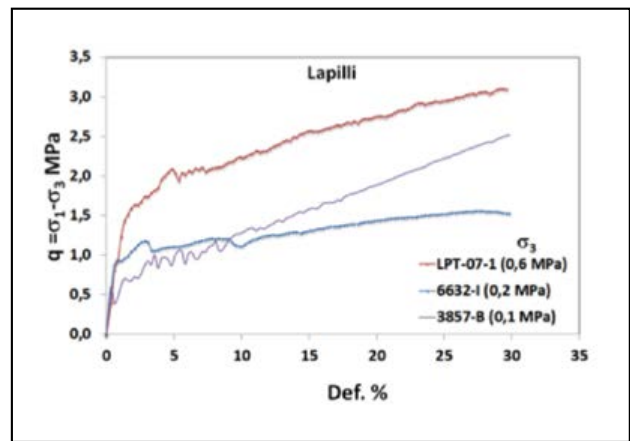


Figura 55. Ejemplos de curvas tipo 2 y tipo 3 indicadas en la fig. 54.

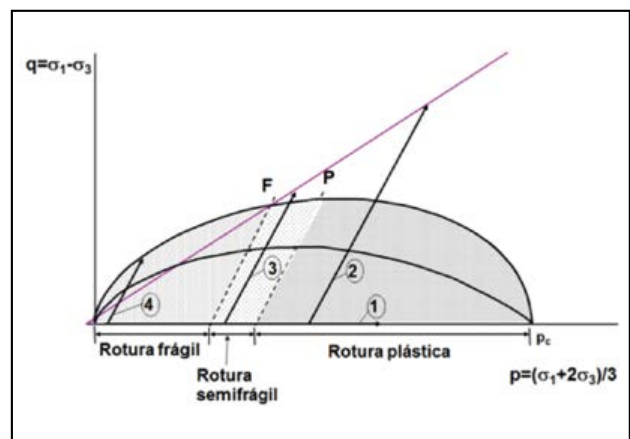


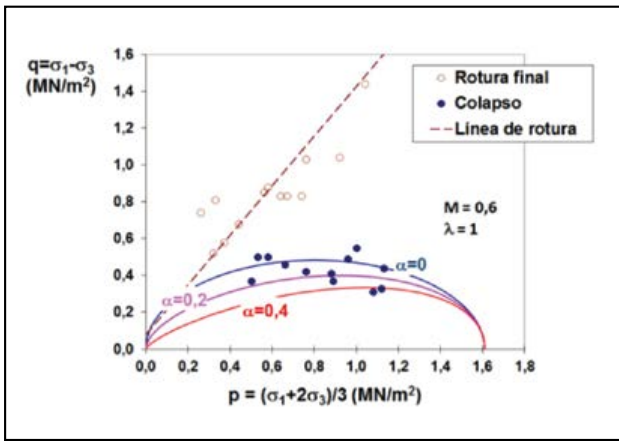
Figura 56. Tipos de rotura (Serrano et al. 2002).

Wong y Mitchel (1975) la ecuación diferencial de las líneas de colapso es:

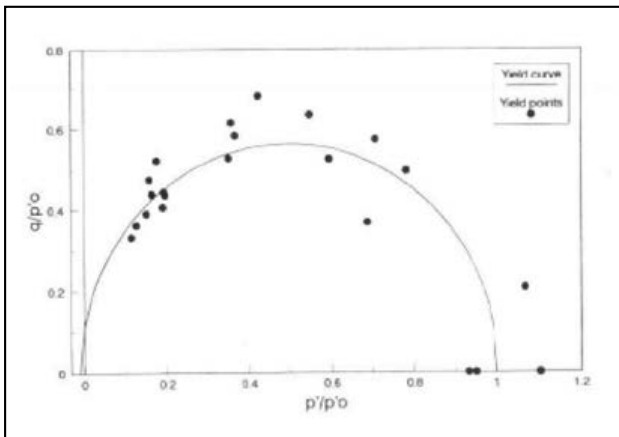
$$p \frac{d\eta}{dp} + \psi + \eta - \alpha = 0$$

donde  $\eta$  es la oblicuidad de las tensiones,  $\eta = q/p$ , y es la relación de dilatación plástica,  $\psi = dv_p/d\gamma_p$  (siendo  $v_p$  y  $\gamma_p$  las deformaciones plásticas volumétrica y de corte, respectivamente),  $M$  es un parámetro friccional y  $\alpha$  un parámetro, que para flujo asociado es igual a cero. Wong y Mitchel (1975) encontraron un valor constante de  $\alpha \approx 0.25$  para arcillas cementadas sensitivas y Serrano (1976) obtuvo valores entre 0 y 0.4 para aglomerados volcánicos si se supone que  $\lambda=1$  y  $M=0.6$  (fig. 57). Según Serrano, la suposición de  $\lambda=1$  se deriva simplemente de la falta de conocimiento de su valor, que debería estudiarse para cada material.

Aversa y Evangelista (1998) obtienen un buen ajuste a resultados de ensayo de una toba volcánica a una curva de fluencia derivada de la Cam-Clay modificada, como se muestra en la fig. 58.



**Figura 57.** Ajuste del modelo energético a muestras de piro-clastos (Serrano et al. 2002).



**Figura 58.** Curva de fluencia propuesta y presiones de fluencia medidas en una toba volcánica (Aversa y Evangelista 1998).

**b. Modelos empíricos: modelo de colapso unificado (Serrano 2012)**

A partir del estudio experimental llevado a cabo en el CEDEX en los últimos años, Serrano (2012) propone un criterio de rotura unificado de la forma siguiente (fig. 59):

$$\varphi(q) = Mf(p_0)$$

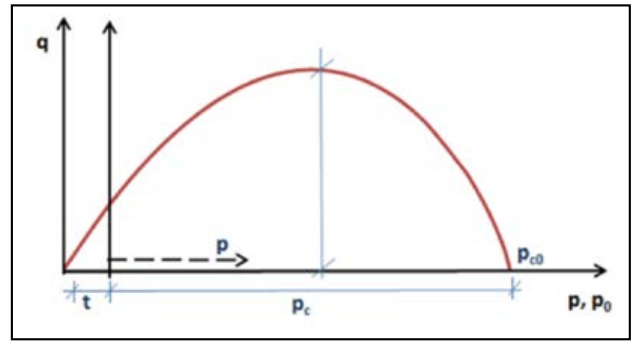
con

$$\varphi(q) = q^{(k+1)} + 2kq$$

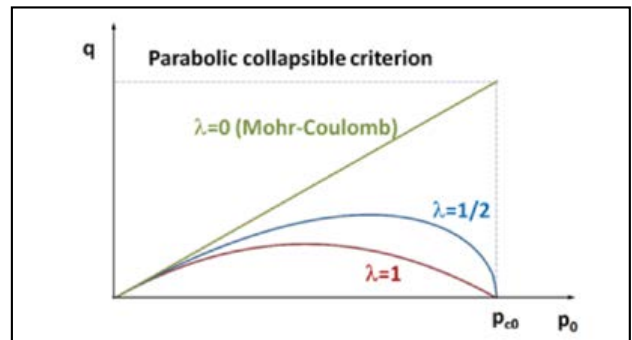
$$f(p_0) = p_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_{c0}}\right)^\lambda$$

donde:

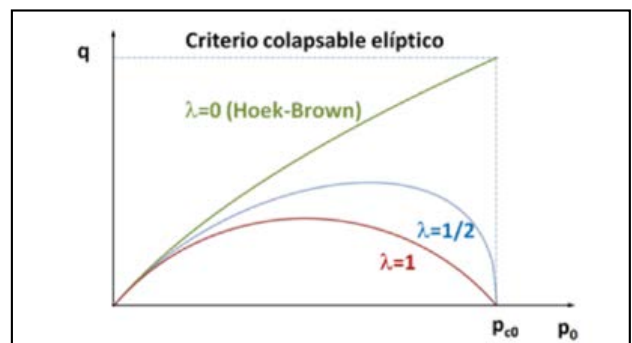
- M es un parámetro friccional;
- k es un coeficiente indicando la ley de resistencia a bajas presiones: si k=0 el criterio es de tipo parabólico colapsable, representando una evolución del criterio de Mohr-Coulomb (fig. 60); si k=1 el criterio es de tipo elíptico colapsable, representando una evolución del criterio de Hoek y Brown (fig. 61);
- λ es un coeficiente que cumple que 0<λ<1;
- q y p son las tensiones desviadora y media respectivamente, definidas de acuerdo a la notación de Cambridge y adimensionalizadas al ser divididas por un módulo resistente,



**Figura 59.** Criterio de fluencia unificado en variables de Cambridge (Serrano 2012).



**Figura 60.** Criterio colapsable parabólico (Serrano 2012).



**Figura 61.** Criterio colapsable elíptico (Serrano 2012).

β, y p<sub>0</sub> es la variable dimensional p referida a un eje q trasladado (ver fig. 59), de modo que:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\beta} ; p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3\beta}$$

$$p_0 = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3\beta} + \frac{t}{\beta}$$

siendo t la resistencia isotrópica de tracción del material; -p<sub>c0</sub> es la presión isotrópica de colapso adimensionalizada y referida al eje q trasladado, de modo que:

$$p_{c0} = \frac{p_c + t}{\beta}$$

Ambos criterios se pueden expresar de la forma simple siguiente:

$$q = Mp_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_{c0}}\right)^\lambda : \text{Criterio colapsable parabólico}$$

$$q^2 + 2q = 6p_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_{c0}}\right)^\lambda : \text{Criterio colapsable elíptico}$$

En el caso del criterio elíptico el coeficiente M debe ser igual a 6 para coincidir con el criterio de Hoek y Brown a bajas presiones (fig. 51). Este criterio depende de cuatro parámetros: dos explícitos,  $\lambda$  y  $p_{c0}$ , y dos implícitos,  $\beta$  y  $t$ .

En el caso del criterio parabólico si se elige como módulo de resistencia,  $\beta$ , para adimensionalizar la presión el valor  $\beta=p_{c0}$ , se simplifica de la forma siguiente:

$$q = Mp_0(1 - p_0)^\lambda$$

Este criterio depende de cuatro parámetros: dos explícitos, M y  $\lambda$ , y dos implícitos,  $p_{c0}$  y  $t$ .

Ambos modelos se ajustaron a la extensa base de datos obtenida a partir de las muestras ensayadas en el CEDEX, así como a algunos datos publicados, obteniéndose un buen ajuste en los dos casos (CEDEX 2013, Conde 2013). No obstante, con el fin de obtener los parámetros de las muestras ensayadas se eligió el modelo parabólico, por ser más simple. En las fig. 62 a fig. 65 se muestran algunos ajustes a diferentes tipos de piroclastos. La fig. 62 muestra un buen ajuste a muestras de pumitas y lapilli. Una vez más, se observa una marcada influencia de la densidad en la resistencia. La fig. 63 muestra el ajuste a muestras alteradas de pumita y lapilli. En estos casos se observa un buen ajuste a los resultados de los ensayos, si bien no se han obtenido

valores de cargas isotropas de colapso o cercanos a ellas en los ensayos. Por tanto, la parte derecha de estas curvas se debería comprobar. Por su parte, la fig. 64 muestra un buen ajuste a muestras de cenizas basálticas y sálicas. Finalmente, la fig. 65 muestra también un ajuste muy bueno a datos de diferentes piroclastos de coladas italianas. Como se puede ver (fig. 62 a fig. 65), en casi todos los casos se obtienen valores del parámetro  $\lambda$  muy próximos a la unidad. Por tanto, se ha definido un criterio parabólico simplificado, adoptando un valor de  $\lambda=1$ , viéndose que se ajusta también muy bien e los resultados obtenidos. En la tabla 6 se muestran los rangos de parámetros obtenidos para las muestras ensayadas. En Serrano et al (2015a y 2016) se pueden encontrar más detalles sobre los ajustes realizados.

Como puede verse, hay una similitud en la forma de las curvas del modelo energético y del modelo empírico de colapso. Los autores están trabajando en la forma de obtener los parámetros para ambos modelos a partir de los resultados empíricos y la relación entre ellos, buscando la base teórica que subyace al modelo empírico.

De este criterio se deduce una relación entre la presión isotropa de colapso y la resistencia a compresión simple, que no es constante, ya que depende de otros parámetros. En Serrano et al. (2015b) se pueden ver el desarrollo de esa relación.

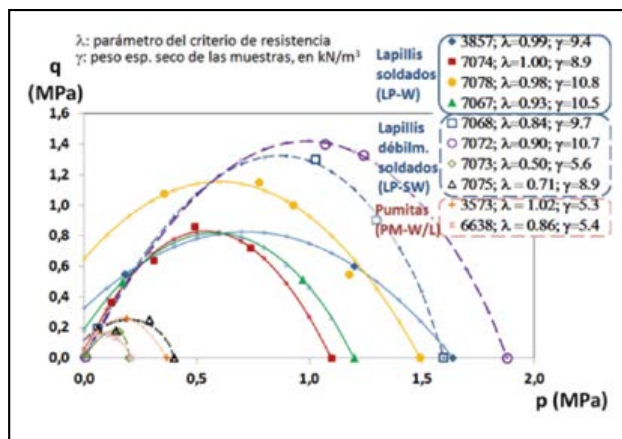


Figura 62. Ajuste del criterio parabólico colapsable de Serrano a muestras de pumitas litificadas y lapilli soldadas (modificado de CEDEX 2013 y Conde 2013).

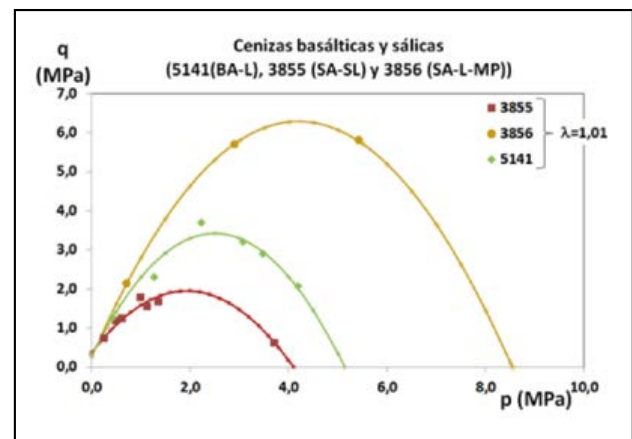


Figura 64. Ajuste del criterio parabólico colapsable de Serrano a muestras de cenizas de piroclastos litificadas (modificado de CEDEX 2013 y Conde 2013).

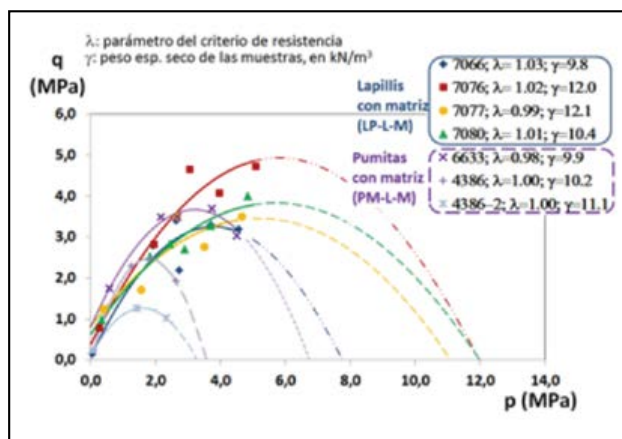


Figura 63. Ajuste del criterio parabólico colapsable de Serrano a muestras alteradas de pumitas y lapilli (modificado de CEDEX 2013 y Conde 2013).

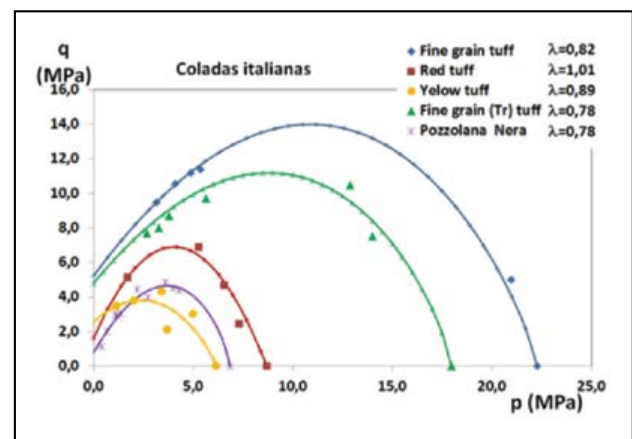


Figura 65. Ajuste del criterio parabólico colapsable de Serrano a datos publicados de tobas italianas (datos de Aversa et al. 1993, Evangelista et al. 1998, Aversa y Evangelista 1998, Tommasi y Ribachi 1998, Cecconi y Viggiani 1998 y 2001).

**Tabla 6.** Rangos de parámetros obtenidos en las muestras ensayadas

Muestra <sup>(1)</sup>	$\gamma_d$ ( $\text{KN/m}^3$ )	n (%)	RCS (MPa)	$\lambda$	$p_c$ (MPa)	M	t (kPa)	Modelo simplificado: $\lambda=1$		
								$p_c$ (MPa)	M	t (kPa)
LP-W	9,0-10,8	65-70	0,37-1,07	0,93-1,00	1,1-1,6	1,8-3,0	19-315	1,1-1,6	1,8-3,0	14-314
LP-SW	5,6-10,7	61-80	0,01-0,19	0,50-0,90	0,2-1,9	1,7-2,9	0,3-84	0,2-1,9	2,3-4,7	0-25
LP-L-M	10,5-12,8	76-78	0,16-1,23	0,99-1,03	7,8-12,0 <sup>(3)</sup>	1,2-1,7	42-766	7,8-16,3 <sup>(3)</sup>	1,0-1,7	84-706
PM-L/W	5,2-5,3	56-67	0,16-0,17	0,86-1,02	0,2-0,4	2,1-2,7	22-69	0,2-0,4	2,6-2,7	24-46
PM-L-M	9,2-10,8	57-59	0,24-1,76	0,98-1,00	3,3-6,7 <sup>(3)</sup>	1,5-2,7	9-422	3,3-6,7 <sup>(3)</sup>	1,5-2,8	1-42
SA-SL	9,2	63	0,75	1,01	4,2 <sup>(3)</sup>	1,8	210	4,1 <sup>(3)</sup>	1,8	243
SA-L-MP	11,5	44	2,14	1,01	8,5 <sup>(3)</sup>	2,9	90	8,1 <sup>(3)</sup>	3,2	26
BA-L	11,5	57	1,26	1,01	5,1 <sup>(3)</sup>	2,6	116	5,1 <sup>(3)</sup>	2,6	88

(1) Nomenclatura según la clasificación de la fig. 27.

(2)  $\gamma_d$ : peso específico seco; n: porosidad; RCS: resistencia a compresión simple;  $p_c$ : presión isotrópica de colapso; t: resistencia a tracción isotrópica; l y M: parámetros del modelo colapsable.

(3) Presión deducida del ajuste del modelo, no de ensayos.

**Tabla 7.** Ejemplo de profundidades de colapso para diferentes tipos de piroclastos

Muestra <sup>(1)</sup>	$\gamma_d$ ( $\text{KN/m}^3$ )	$\lambda$	M	$p_c$ (MPa)	t (kPa)	$p_{co}$ (MPa)	$\xi=t/p_{co}$ (%)	h (m)
LP-W	9,9	1	2,4	1,4	167	1,5	11,009	149
LP-SW	8,2	0,8	2,3	1,1	12,5	1,1	1,176	146
LP-L-M	11,5	1	1,5	10,0	500	10,5	4,762	688
PM-W/L	5,3	0,9	2,5	0,3	30	0,3	9,091	63
PM-L-M	10,0	1	2,5	5,0	20	5,0	0,398	524
BA-L	11,5	1	2,6	5,0	88	5,1	1,730	443
SA-SL	9,2	1	1,8	4,0	210	4,2	4,988	391

(1) Nomenclatura según la clasificación de la fig. 27.

(2)  $\gamma_d$ : peso específico seco; l, M y z: parámetros del modelo colapsable;  $p_c$ : presión isotrópica de colapso; t: resistencia a tracción isotrópica; h: profundidad de terreno colapsado.

Con este criterio de colapso se puede deducir una profundidad teórica de terreno colapsado debido a que las tensiones internas producidas por el propio peso del terreno han alcanzado el valor de la presión de fluencia del material. A modo de ejemplo, en la tabla 7 se muestran los valores de las profundidades de colapso para diferentes materiales, adoptando para los parámetros unos valores intermedios de los deducidos de los ensayos de laboratorio realizados e indicados en la tabla 6, y suponiendo una relación de tensiones,  $k_0$ , igual a 0,5. Esto significa que en esas profundidades el terreno se encuentra colapsado. Este hecho puede ser de gran interés para la construcción de túneles o cavernas subterráneas en estos materiales, ya que el terreno ya colapsado es menos peligroso desde el punto de vista ingenieril.

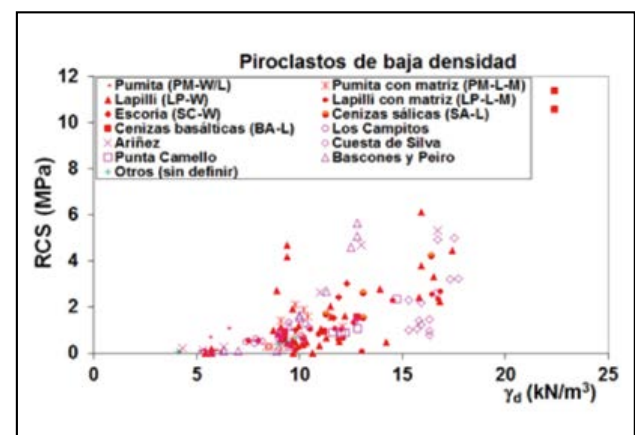
En Serrano et al. (2015c) se detalla la forma de obtener dicha profundidad de colapso.

### 3.3. Correlaciones

Se han obtenido algunas correlaciones con los resultados de los ensayos. Algunas de ellas sido publicadas anteriormente (Serrano et al. 2007) se han ampliado con nuevos datos.

La fig. 66 muestra la relación entre el peso específico seco y la resistencia a compresión simple para diferentes litotipos y para otras muestras de litotipo desconocido, todas ellas ensayadas en el CEDEX. Las siguientes figuras

muestran una tendencia diferente para piroclastos de caída y para piroclastos de coladas entre la resistencia a compresión (simple e isotrópica) y el peso específico seco o la porosidad (fig. 67 a fig. 70). Finalmente, en la fig. 71 se presentan los valores obtenidos de los módulos relativos. Se obtiene un valor medio de 160, es decir,  $E=160 \cdot \text{RCS}$ , con un coeficiente de correlación elevado ( $R^2=0,85$ ).



**Figura 66.** RCS en función del peso específico seco ( $\gamma_d$ ) en 149 datos de piroclastos de caída baja densidad.

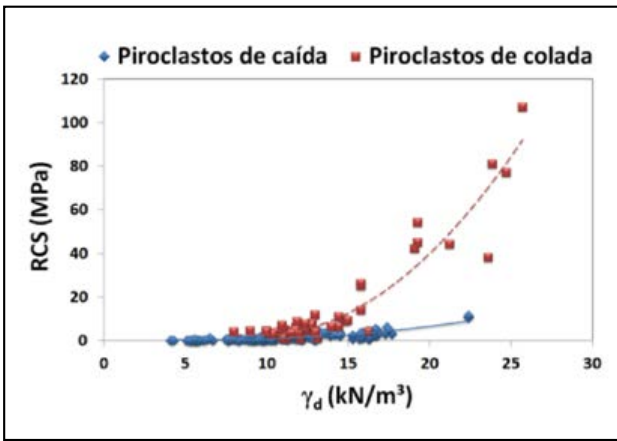


Figura 67. RCS en función del peso específico seco ( $\gamma_d$ ) en piroclastos de caída y de coladas (Conde 2013).

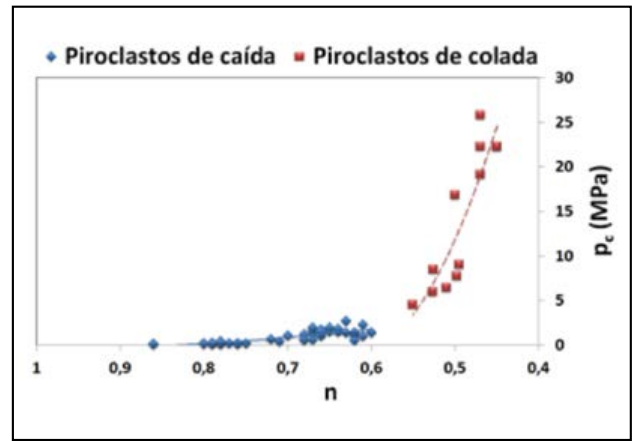


Figura 70. Presión isotrópica de colapso en función de la porosidad ( $n$ ) en piroclastos de caída y de coladas (Conde 2013).

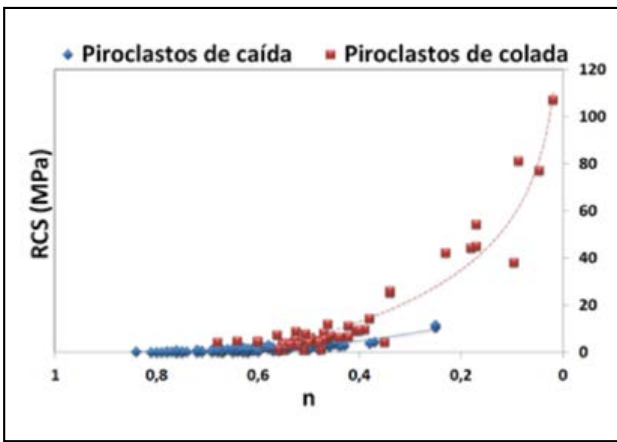


Figura 68. RCS en función de la porosidad ( $n$ ) en piroclastos de caída y de coladas (Conde 2013).

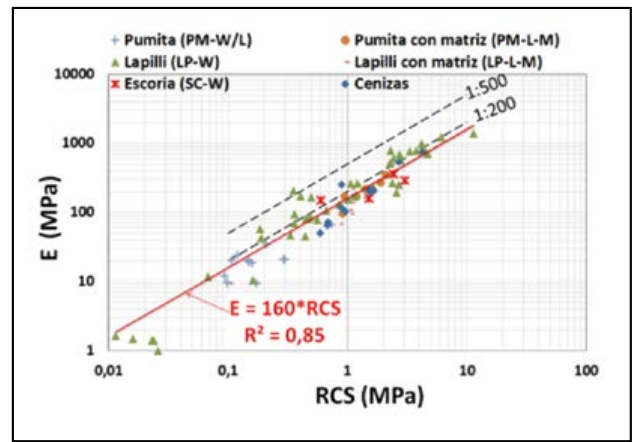


Figura 71. Módulo relativo en piroclastos de baja densidad.

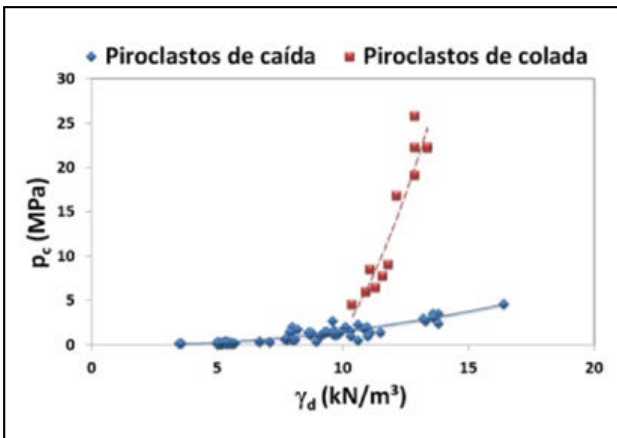


Figura 69. Presión isotrópica de colapso en función del peso específico seco ( $\gamma_d$ ) en piroclastos de caída y de coladas (Conde 2013).

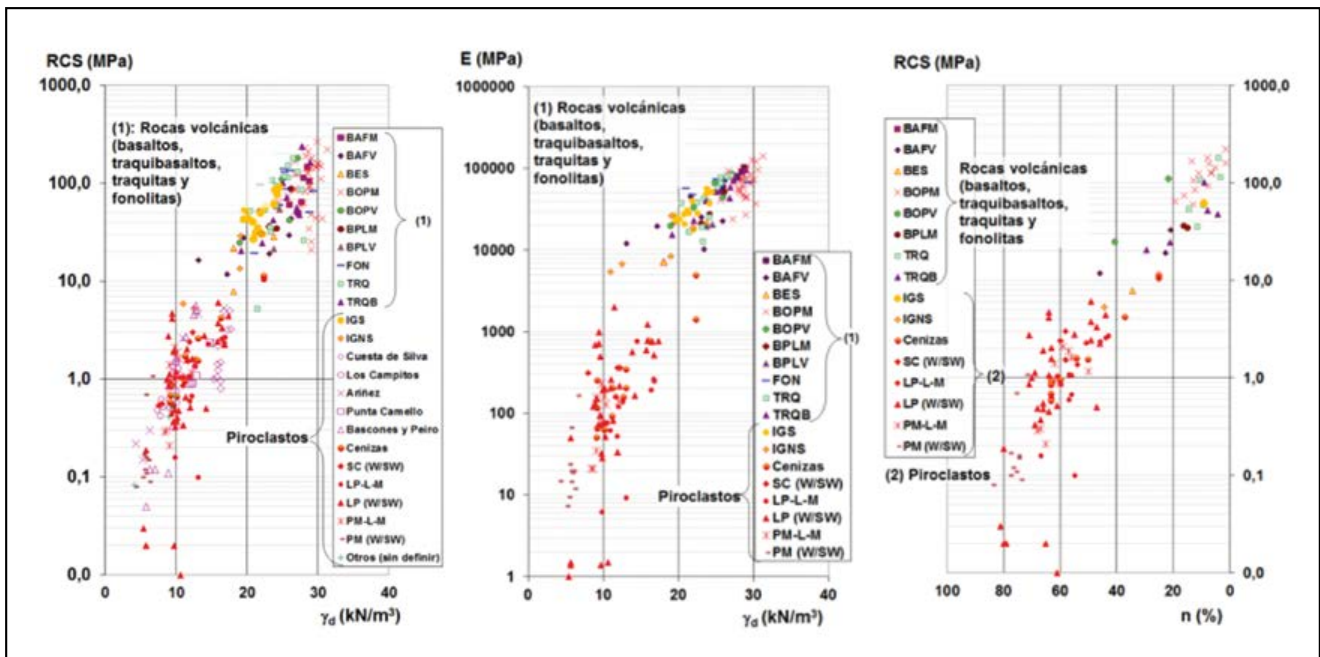
### 3.3.1. Otros aspectos destacados

En ingeniería civil y en construcción, en general, los principales problemas que se presentan relacionados con los piroclastos de baja densidad en relación a su comportamiento mecánico son debidos a su baja capacidad portante y su elevada deformabilidad, así como su colapsabilidad, en especial cuando se puede producir de manera brusca, sin previo aviso. Una forma de evitar el colapso en cimentaciones es inducirlo previamente, antes de construir la

estructura, utilizando compactadores de elevada energía (Uriel 1976).

Adicionalmente a los aspectos analizados anteriormente, hay otros aspectos importantes que deberían considerarse en relación al comportamiento mecánico de los piroclastos de baja densidad, tales como los siguientes:

- A menudo se observa que presentan un comportamiento reológico. Por ejemplo, en un embalse construido en El Hierro se midió un asiento de fluencia del orden del 33% del asiento instantáneo (Martín Gómez et al. 2010); Fe Marqués y Martínez Zarco (2010) realizan un análisis retrospectivo de un túnel en una sección excavada en piroclastos basálticos, basado en medidas de convergencia y observan que son necesarios más de cuatro meses para que se produzca casi el 100% de la deformación final, quedando aún por producirse alguna parte; Evangelista y Aversa (1994) publican algunos resultados de ensayos de fluencia en tobas.
- Influencia del agua en la resistencia y deformabilidad: Vásárheli (2002) estudia este aspecto en tobas volcánicas (andesita, basalto y riolita) con resistencias a compresión simple entre 2,5 y 60 MPa y encuentran una reducción de resistencia del orden del 27% y una disminución del módulo sobre el 20% para muestras saturadas; González de Vallejo et al. (2007) indican una reducción del 30% de la resistencia para tobas volcánicas.



**Figura 72.** Relación en escala semi-logarítmica entre: a) peso específico seco ( $\gamma_d$ ) y RCS; b) peso específico seco ( $\gamma_d$ ) y módulo de elasticidad (E); c) porosidad (n). Rocas procedentes de lavas volcánicas y piroclastos de las islas Canarias.

#### 4. ALGUNAS CORRELACIONES INCLUYENDO TODAS LAS ROCAS VOLCÁNICAS ESTUDIADAS EN EL CEDEX

En la fig. 72 se muestran las tendencias generales para todas las rocas volcánicas estudiadas en el CEDEX, tanto procedentes de lavas como de piroclastos, entre el peso específico o la porosidad de las rocas y su resistencia a compresión simple o su módulo de deformación. Se presentan en escala tanto natural como logarítmica, para facilitar la visualización de la tendencia.

#### 5. RESUMEN Y CONSIDERACIONES FINALES

En zonas volcánicas se pueden distinguir a groso modo dos grandes grupos de rocas volcánicas: rocas procedentes de flujos de lava, generalmente más densas y resistentes, y rocas piroclásticas, de menor densidad y resistencia.

Se han resaltado algunos aspectos relevantes relacionados con el comportamiento mecánico de estos materiales, a partir de ensayos de laboratorio realizados con rocas de las islas Canarias, y se han obtenido rangos de variación de los parámetros geotécnicos más relevantes.

Se han presentado unas clasificaciones de ambos grupos de materiales, en las que los autores dividen los materiales en diferentes litotipos, con comportamiento geomecánico similar.

Se ha prestado más detalle al análisis de los piroclastos volcánicos de baja densidad, ya que su comportamiento mecánico es más peculiar y causa más problemas. En trabajos de ingeniería civil y en construcción los mayores problemas con los piroclastos de baja densidad, desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, se suelen deber a su baja capacidad portante y a su colapsabilidad, en particular cuando se puede producir de forma brusca. Una forma de evitar el colapso en cimentaciones es inducirlo previamente, antes de construir la estructura, utilizando compactadores de elevada energía (Uriel 1976)

Tal y como señalan muchos autores, la estructura de los piroclastos tienen una enorme influencia en su comportamiento mecánico. La macroporosidad de las muestras ensayadas en el CEDEX se analizó meticulosamente y se definieron cuatro tipos diferentes de porosidad: reticular, vacuolar, mixta y matricial.

Se han analizado en detalle curvas de tensión-deformación de un gran número de ensayos de resistencia a compresión simple, triaxial e isotrópica, estudiando el tipo de comportamiento mecánico y las presiones de fluencia, buscando un criterio de fluencia o colapso empírico que se pudiera ajustar a los resultados y tuviera una forma similar a la de los modelos teóricos, más complejos de ajustar.

En cuanto al comportamiento mecánico, se han observado dos tipos diferentes de comportamiento en la compresión isotrópica:

- Por una parte, las pumitas y lapilli no alterados, es decir, sin material relleno en sus macroporos, presentan dos etapas de comportamiento, una primera con un módulo de deformación creciente o constante y una segunda con un módulo mucho menor. La presión que separa una etapa de otra es la presión isotrópica de colapso y los valores obtenidos de ésta han sido de 1,09-1,54 MPa en los lapilli (LP-W) y de 0,18-0,26 MPa en las pumitas (PM-W/L).
- Por otra parte, las pumitas y lapilli alterados, es decir, con porosidad matricial (PM-L-M y LP-L-M respectivamente), así como las cenizas, presentan un comportamiento diferente en compresión isotrópica, con una primera etapa en la que el módulo aumenta, seguida de una segunda etapa en la que permanece constante, sin llegar a colapsar en ningún momento, al menos a las presiones de ensayos utilizadas (hasta 3,5 MPa).

Por tanto, se ha encontrado que los piroclastos con porosidad matricial son mucho menos peligrosos ya que o

bien no sufren colapso mecánico o bien éste se produce a presiones y deformaciones mucho más elevadas que los demás. Este tipo de porosidad matricial se caracteriza por la presencia de un material fino relleno de los macroporos que rodean las partículas y se ha observado en muestras de pumitas y lapilli alteradas, así como en todas las cenizas.

En cuanto al criterio de fluencia o colapso, Serrano (2012) define un modelo empírico que ajusta muy bien a los resultados de los ensayos de todas las muestras de lapilli, pumita y cenizas ensayadas en el CEDEX, así como a datos publicados por otros autores.

Con este criterio de colapso se pueden deducir unas profundidades teóricas de terreno colapsado debido a que las tensiones internas producidas por el propio peso del terreno han alcanzado el valor de la presión de fluencia del material, hecho que puede ser de gran interés en relación a la excavación de obras subterráneas.

Se han indicado otros aspectos relevantes en relación al comportamiento mecánico de los piroclastos de baja densidad, tales como su comportamiento reológico o la influencia del agua.

Aunque es una tarea complicada dada la complejidad de estos materiales volcánicos, sería muy conveniente definir una clasificación universal para ellos, que permitiera comparar fácilmente los resultados publicados de ensayos realizados con materiales de diferentes lugares del mundo.

## 6. AGRADECIMIENTOS

La autora desea agradecer al profesor Serrano, director de todos estos estudios, por compartir con ella sus amplios conocimientos e ideas sobre el comportamiento de las rocas volcánicas. Asimismo, desea agradecer a los demás expertos con los que ha colaborado en estos trabajos, en especial a los doctores Luis Hernández Gutiérrez -quien ha sido responsable de seleccionar y enviar todas las muestras de rocas volcánicas ensayadas en el CEDEX-, y Margarita Conde, así como a los profesores Claudio Olalla y José Antonio Rodríguez Losada. También a Clemente Arias y José Toledo, quienes hicieron el difícil y valioso trabajo de talleo y preparación de las muestras ensayadas de piroclastos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Adachi, T., Ogawa, T., y Hayashi, M. (1981). Mechanical properties of soft rock and rock mass. *Proc. 10<sup>th</sup> ICSMFE* 1, 527-530.

Aversa, S., Evangelista, A., Leroueil, S., y Picarelli, L. (1993). Some aspects of the mechanical behavior of "structured" soils and soft rocks. *International symp, on Geotechnical engineering of hard soils and rocks*, Athens, 1, 359-366.

Aversa, S., y Evangelista, A. (1998). The mechanical behavior of a pyroclastic rock: failure strength and "destruction" effects. *Rock mechanics and Rock engineering*, 31, 25-42 (1998).

Barton, N. (2010). Low stress and high stress phenomena in basalt flows. *3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Rock Mech. and Geo-Engineering in Volcanic Environments*. Tenerife.

Cecconi, M., y Viggiani, G. (1998). Physical and structural properties of a pyroclastic soft rock. *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. 2do International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy*, 1, 85-91.

Cecconi, M. (1998). Sample preparation of a problematic pyroclastic rock. *Problematic Soils*, Yanagisawa, Moroto & Mitachi.

Cecconi, M., y Viggiani, G.M. (2001). Structural features and mechanical behavior of a pyroclastic weak rock. *Int. J. for Num. and Analytical Methods in Geomech.*, 25, 1525-1527.

Cecconi, M., y Viggiani, G. (2006). Pyroclastic flow deposits from the colli alban. *Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Taylor & Francis.

Cecconi, M., Scarapazzi, M., y Viggiani, G. (2010). On the geology and the geotechnical properties of pyroclastic flow deposits of the colli alban. *Bull. of Eng. Geology and Envir.*, 69, 185-206.

CEDEX (2007). Caracterización geotécnica de los piroclastos canarios débilmente cementados. *Final Report* (Abril 2007).

CEDEX (2013). Estudio del comportamiento geomecánico de los piroclastos canarios de baja densidad para su aplicación en obras de carreteras. *Final Report* (Abril 2013).

Conde M. (2013). Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad. PhD Thesis. UCM.

Conde, M., Serrano, A., y Perucho, Á. (2015). New geotechnical classification proposed for low density pyroclastic rocks. *Workshop on Volcanic Rocks and Soils*. Ischia.

Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias (2011). *Guía para la planificación y realización de estudios geotécnicos para la edificación en la comunidad autónoma de Canarias*. GETCAN 011.

Del Olmo, D., y Serrano, A. (2010). Modeling of the collapse of a macroporous material. *3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Rock Mech. and Geo-Engineering in Volcanic Environments*. Tenerife.

Drucker, D.C. (1959). A definition of stable inelastic materials. *Trans. A.S.M.E. Jour. Appl. Mech.* 26:1.

Evangelista, A., y Aversa, S. (1994). Experimental evidence of non-linear and creep behavior of pyroclastic rocks. *Visco-plastic behavior of geomaterials*, Ed, Springer.

Evangelista, A., Aversa, S., Pescatore, T.S., y Pinto, F. (1998). Soft rocks in southern Italy and the role of volcanic tuffs in the urbanization of Naples. *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. 2<sup>do</sup> International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy*, 3, 1243-1267.

Fe Marqués, M., y Martínez Zarco, R. (2010). Geotechnical parameters of basaltic pyroclastics in La Palma Island, based on convergences measured in a tunnel. *3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Rock Mech. and Geo-Eng. in Volcanic Env*. Tenerife.

González de Vallejo, L.I., Hijazo, T., Ferrer, M., y Seisdedos, J. (2006). Caracterización geomecánica de los materiales volcánicos de Tenerife, *ed. M. A. R. G. N°8*, Madrid: Instituto geológico y minero de España.

González de Vallejo, L.I., Hijazo, T., Ferrer, M., y Seisdedos, J. (2007). Geomechanical characterization of volcanic materials in Tenerife. *ISRM Int. Workshop on Volcanic Rocks*. Azores.

González de Vallejo, L. I., Hijazo, T., y Ferrer, M. (2008). Engineering Geological Properties of the Volcanic Rocks and Soils of the Canary Islands. *Soils and Rocks*, Sao Paulo 31 (1): 3-13.

Hernández Gutiérrez, L. E. (2014). Caracterización geomecánica de las rocas volcánicas de las islas Canarias. PhD Thesis. Universidad de La Laguna, Tenerife.

Hoek, E., y Brown T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Eng. Div., ASCE 106 (GT9)*.

Kahraman, S. (2014). The determination of uniaxial compressive strength from point load strength for pyroclastic rocks. *Engineering Geology* 170.

Lerouiel, S., y Vaughan, P.R. (1990). The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Geotechnique* 40, No 3, 467-488.



Lomoschitz Mora-Figueroa, A. (1996). Caracterización geotécnica del terreno con ejemplos de Gran Canaria y Tenerife. *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.

Martín-Gómez, M.R., Fernández-Baniela, F., Arribas-Pérez de Obamos, J.J., y Soriano, A. (2010). Deformational behavior of pyroclastic rocks beneath the upper reservoir of the hydro-wind plant at El Hierro. *3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Rock Mech. and Geo-Engineering in Volcanic Environments*. Tenerife.

Mesri, G., y Vardhanabhuti, B. (2009). Compression of granular materials. *Can. Geotech. J.* 46: 369-392.

Mesquita Soares, S., Dinis da Gama, C., y Reis e Sousa, M. (2002). Geomechanical properties of basalts from the volcanic complex of Lisbon-Some interesting correlations. *Workshop on Volcanic Rocks*, Madeira. Eurock.

Moon, V.G. (1993). Geotechnical characteristics of ignimbrite: a soft pyroclastic rock type. *Eng. Geology* 35(1-2): 33-48.

Muñiz Menéndez, M., y González-Gallego, J. (2010). Rock mass classification schemes in volcanic rocks. *3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Rock Mech. and Geo-Engineering in Volcanic Environments*. Tenerife.

Peiró Pastor, R. (1997). Caracterización geotécnica de los materiales volcánicos del Archipiélago Canario. *Tierra y Tecnología* 16 y 17.

Pellegrino, A. (1970). Mechanical behaviour of soft rocks under high stresses. *ISRM, II Congreso Internacional de Mecánica de Rocas*, Tomo II, Belgrado, R, 3, 25.

Perucho, Á. (2015). Mechanical behavior of volcanic rocks. *Workshop on Volcanic Rocks and Soils*. Ischia.

Pola, A., Crosta, G.B., Castellanza, R., Agliardi, F., Fusi, N., Barberini, V. Norini, G., y Villa, A. (2010). Relationship between porosity and physical mechanical properties in weathered volcanic rocks. *3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Rock Mech. and Geo-Engineering in Volcanic Environments*. Tenerife.

Rodríguez-Losada, J.A., Hernández-Gutiérrez, L.E., Olalla, C., Perucho, A., Serrano, A., y Potro, R. D. (2007). The volcanic rocks of the Canary Islands. Geotechnical properties. *ISRM International Workshop on Volcanic Rocks*. Azores.

Rodríguez-Losada, J.A., Hernández-Gutiérrez, L.E., Olalla, C., Perucho, A., Serrano, A., y Eff-Darwich, A. (2009). Geomechanical parameters of intact rocks and rock masses from the Canary Islands: Implications on their flank stability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 182.

Roscoe, K.H., y Burland, J.B. (1968). On the generalised stress strain behaviour of "wet clay". *Engineering Plasticity*, ed. J. Heyman & F.A. 535-609. Cambridge University Press.

Rotonda, T., Tommasi, P., y Ribacchi, R. (2002). Physical and mechanical characterization of the soft pyroclastic rocks forming the Orvieto cliff. *Workshop on Volcanic Rocks*. Madeira. Eurock.

Santana, M., de Santiago, C., Perucho, A., y Serrano, A. (2008). Relación entre características químico-mineralógicas y propiedades geotécnicas de piroclastos canarios. *VII Congreso Geológico de España*. Geo-Temas 10.

Serrano, A. (1976). Aglomerados volcánicos en las Islas Canarias. *Memoria del Simposio Nacional de Rocas Blandas*. Tomo II. pp. 47-53. Madrid.

Serrano, A. (1997). Mecánica de rocas I: Descripción de las rocas; II Propiedades de las rocas. *Publicaciones de la E.T.S. de I.C.C. y P. Madrid*.

Serrano, A., Olalla, C., y Perucho, Á. (2002a). Mechanical collapsible rocks. *Workshop on Volcanic Rocks*, Madeira. Eurock.

Serrano, A., Olalla, C., y Perucho, Á. (2002b). Evaluation of non-linear strength laws for volcanic agglomerates. *Workshop on Volcanic Rocks*, Madeira. Eurock.

Serrano, A., Olalla, C., Perucho, A., y Hernández, L. (2007). Strength and deformability of low density pyroclasts. *ISRM Int. Workshop on Volcanic Rocks*. Azores.

Serrano, A., Perucho, A., Olalla, C., y Estaire, J. (2007). Foundations in Volcanic Areas. *XIV European Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engin. Geotech. Engin. in Urban Environments*. Madrid, 24-27 Sept. Millpress Rotterdam.

Serrano, A., Perucho, Á., y Conde, M. (2010). Isotropic collapse load as a function of the macroporosity of volcanic pyroclasts. *3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Rock Mech. and Geo-Engineering in Volcanic Environments*. Tenerife.

Serrano, A. (2012). Criterio unificado para materiales colapsables. *Comunicación personal*.

Serrano, A., Perucho, Á., y Conde, M. (2015a). Failure criterion for low density pyroclasts. *Workshop on Volcanic Rocks and Soils*. Ischia.

Serrano, A., Perucho, Á., y Conde, M. (2015b). Correlation between the isotropic collapse pressure and the unit weight for low density pyroclasts. *Workshop on Volcanic Rocks and Soils*. Ischia.

Serrano, A., Perucho, Á., y Conde, M. (2015c). Relationship between the isotropic collapse pressure and the uniaxial compressive strength, and depth of collapse, both derived from a new failure criterion for low density pyroclasts. *Workshop on Volcanic Rocks and Soils*. Ischia.

Serrano, A., Perucho, Á., y Conde, M. (2016). Yield criterion for low-density volcanic pyroclasts. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 86, 194-203.

Tommasi, P., y Ribacchi, R. (1998). Mechanical behaviour of the Orvieto tuff. *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks*. 2<sup>do</sup> Int. Symp. on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy, 2: 901-909.

Tommasi, P., Verrucci, L., y Rotonda, T. (2015). Mechanical properties of a weak pyroclastic rock and their relationship with microstructure. *Can. Geotech. J.* 52: 1-13.

Uriel, S., y Bravo, B. (1971). La rotura frágil y plástica en un aglomerado volcánico de las palmas de gran canaria. *I Congr. hisp.-lusio-americano de geología económica*, Ses. 5.

Uriel, S., y Serrano, A. (1973). Geotechnical properties of two collapsible volcanic soils of low bulk density at the site of two dams in canary island (Spain). *8th Congress I.S.S.M.F.E.* Vol. I: 257-264. Moscú.

Vásárhelyi, B. Influence of the water saturation on the strength of volcanic tuffs. *Workshop on Volcanic Rocks*, Madeira. Eurock (2002).

Wong, P.K.K., y Mitchell, R.J.. Yielding and plastic flow of sensitive clay. *Geotechnique* 25. No 4. (1975).

# Ferrocarriles

## Líneas de actividad

Infraestructura ferroviaria

Vibraciones y fatiga del material móvil

Puentes y otras estructuras

ERTMS: (European Rail Traffic Management System) certificación de equipos genéricos

ERTMS: Certificado de proyectos de vía

ERTMS: Validación tren-vía

Servicios tecnológicos de carácter medio ambiental

.....

## *Fields of Activity*

*Railway Infrastructures*

*Vibrations and Fatigue of Mobile Materials*

*Bridges and Other Structures*

*ERTMS (European Rail Traffic Management System): Components Certification*

*ERTMS: Trackside Projects Verification*

*ERTMS: Train-Track Compatibility Verification*

*Technological Services for Environment-Related Issues*



Más información en  
<http://www.cedex.es>

**CEDEX**

Centro de Estudios y Experimentación  
de Obras Públicas