



Correlaciones entre propiedades mecánicas y propiedades físicas en suelos pumíticos no saturados

Correlations between mechanical properties and physical properties in unsaturated soils pumice

Zamudio Zavala, P. E. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Vargas del Río, D. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Ochoa-González, G. H. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

RESUMEN: Se realizaron diversas pruebas de caracterización física (granulometría, contenido de agua, densidad, etc.) y de comportamiento mecánico (corte directo y permeabilidad) en suelos pumíticos que representan la gran mayoría de los suelos (depósitos piroclásticos) de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG). Dichos suelos están conformados por arenas limosas y cenizas provenientes de la actividad volcánica reciente en el valle de Atemajac. Se llevó a cabo un análisis de regresión multivariable para poder obtener expresiones matemáticas que resolvieran las propiedades mecánicas de estos suelos a partir de sus propiedades índices. Las expresiones que presentamos son ecuaciones prácticas que proponemos como una forma alternativa para obtener la resistencia al esfuerzo cortante y la permeabilidad de los suelos pumíticos de la ZMG, a partir de propiedades físicas sencillas de obtener.

ABSTRACT: We characterized pumice soils of Guadalajara, México (particle size, water content, density, etc.) and assesses their mechanical behavior (shear strength and permeability). Such soils represent the vast majority of the soils in these area. They are silty-sand and ash soils resultant from the recent volcanic activity. We conducted an experiment of multivariate analysis regression from the index properties and the mechanical properties of such soils, in order to obtain practical mathematical expressions. Resulting equations are proposed as an alternative method for evaluation of shear strength and permeability of pumice soils of ZMG.

1 ANTECEDENTES

1.1 Los suelos de la ZMG

En casi la totalidad de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG); hay depósitos de suelos pumíticos con granulometrías comprendidas en el rango de limos a gravas (estas últimas llamadas localmente “jales”), pero abundando principalmente arenas y arenas limosas (llamadas localmente “arenas amarillas”). Estas partículas de suelo son ligeras (densidades naturales de 900 a 1200 kg/m³), erosionables, deleznales, con superficie rugosa, y, en algunos casos, con cementación débil a media (Lazcano, 2001).

Las compacidades de los suelos casi siempre van de sueltas a altas conforme se va profundizando; y se observa un contraste marcado en poca distancia, entre los depósitos “suelos” y los compactos, hasta llegar a la roca basal; constituida por tobas, conglomerados y antiguas coladas de lavas (principalmente basálticas y riolíticas).

La roca basal está fracturada a muy fracturada, y en ocasiones tiene intercalaciones de depósitos de suelo que se formaron en períodos entre las erupciones volcánicas que produjeron las diferentes coladas de lava (Lazcano, 2001).

1.2 Origen y formación

El pasado reciente del territorio de Jalisco y de la ZMG ha estado marcado, en espacio y tiempo, con eventos

volcánicos y tectónicos. Los depósitos son el resultado de la actividad volcánica del Pleistoceno.

La sierra La Primavera (llamada antes Sierra del Astillero) constituye una estructura volcánica compleja denominada caldera. Por su origen volcánico complejo, la sierra La Primavera está constituida por domos, derrames de lava, depósitos de pómez de caída libre y flujos de ceniza; estos flujos de ceniza en particular son denominados Toba Tala, la cual fue generada al final del Holoceno (Mahood, 1977).

Tanto el subsuelo de casi toda la ZMG como sus alrededores están constituidos por la Toba Tala la cual está formada por material vítreo o amorfo representados granulométricamente por limos, arenas y gravas de pumicita (dominante al 80%) y, en menor proporción, por clastos de tamaño de arena y grava riolíticos y por material cristalino fragmentado o roto.

El vidrio volcánico se generó por el rápido enfriamiento de la lava al ascender hasta la superficie, pudiéndose presentar como pómez u obsidiana.

La abundancia de gases durante la erupción y el rápido enfriamiento generó una alta porosidad, el material así formado es la pumicita, un vidrio que, se caracteriza por su abundancia de “vesículas” o “burbujas”. Si la lava tuvo demasiada agua y su enfriamiento fue rápido, el material resultante es pómez. Pero si la lava no contenía muchos gases ni mucha agua y su enfriamiento fue rápido, el material resultante es obsidiana, la cual se caracteriza por un desarreglo atómico que se traduce en un color oscuro y en la carencia de minerales, es un vidrio volcánico.

2 DISEÑO DE EXPERIMENTO

2.1 Variables independientes

Las variables consideradas como independientes en el diseño del experimento son:

- Granulometría (D_{10} y cantidad que pasa la malla 200)
- Densidad seca
- Energía de compactación
- Esfuerzo efectivo

Se ha optado el D_{10} , ya que es empleado en correlaciones vs coeficiente de permeabilidad, en virtud de la representatividad de un suelo a través de este tamaño (Hazen, 1930).

Se han realizado algunos trabajos previos al respecto, tanto de resistencia al esfuerzo cortante en suelos pumíticos (Ochoa González G.H. et al. 2014), como de correlaciones en suelos pumíticos (Vargas y Ochoa, 2014), que no solo preceden al presente, sino que lo complementan.

2.2 Granulometría.

Se obtuvieron dos tipos de suelos típicos de la ZMG, el primero con alto contenido de finos (33%), arena limosa SM, conocido en la región como Tepetate; el segundo con poco contenido de finos (5%), arena bien graduada con grava (SW)g conocido en la región como Jal.

Empleando estos dos suelos típicos y controlando su granulometría se crearon otros dos suelos intermedios, también típicos de la ZMG, con 12% y 27% de contenido de finos, las curvas granulométricas promedio de tres muestras representativas de cada uno de los cuatro tipos de suelo, se presentan en la figura 2, donde se incluyen por cierto las curvas granulométricas obtenidas también con la prueba de hidrómetro para tener la curva granulométrica de cada suelo de forma completa (ASTM D422, 2007). Las granulometrías se realizaron mediante lavado por malla No.200 (0.075 mm).

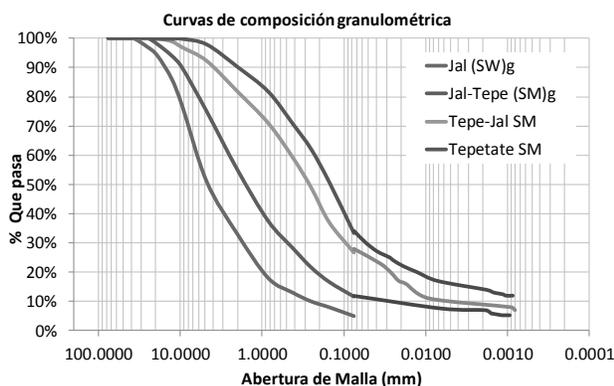


Figura 2. Curvas de composición granulométrica.

Después de obtener los límites de consistencia (ASTM D4318, 2005) de los cuatro tipos de suelo, se procedió a clasificarlos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), empleando para ello la normativa (ASTM D2487, 2011), logrando identificar los suelos de la forma siguiente:

- Arena bien graduada con grava (SW)g, 5% finos = JAL
- Arena limosa con grava (SM)g, 12% finos = JALTEPE
- Arena limosa SM, 27% finos = TEPEJAL
- Arena limosa SM, 33% finos = TEPETATE

Para lograr el Jaltepe, la combinación en volumen fue: 66% de Jal y 33% de Tepetate y para lograr el Tepejal, la combinación en volumen fue: 33% de Jal y 66% de Tepetate.

2.3 Contenido de agua

Los contenidos de agua se variaron de tal forma, que se tuviera para los suelos naturales (Jal y Tepetate) cuatro contenidos de agua: ω_{campo} , $\omega_{\text{óptimo}}$, $\omega_{+\text{óptimo}}$, $\omega_{-\text{óptimo}}$.

Para los suelos de granulometría controlada tres contenidos de agua: $\omega_{\text{óptimo}}$, $\omega_{+\text{óptimo}}$, $\omega_{-\text{óptimo}}$.

Ya que se seleccionó una sola forma de compactación y una sola energía de compactación para elaborar las probetas con cada contenido de agua se logró diferente grado de acomodamiento, esto es, se lograron diferentes densidades (Fig. 3, tabla 1). Sin embargo, aplicando esta única energía dinámica de compactación no se logró restituir las muestras hasta la densidad natural del suelo, sin embargo, sí se lograron densidades típicas de los suelos de la ZMG.

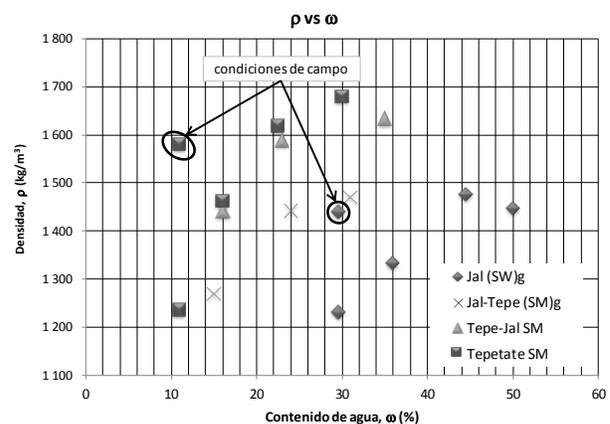


Figura 3. Contenidos de agua y densidades alcanzadas.

Tabla 1. Contenidos de agua y densidades alcanzadas.

	Jal		Jal-Tepe		Tepe-Jal		Tepetate	
	ω (%)	ρ (kg/m ³)						
% Campo	30	1439					11	1578
% Cam - Lab	30	1231					11	1236
Menor	36	1333	15	1268	16	1442	16	1462
% Óptimo	44	1477	24	1442	23	1588	23	1617
Mayor	50	1448	31	1469	35	1634	30	1680

2.4 Forma y energía de compactación

El método de compactación para la elaboración de las probetas fue el dinámico, por ser el más conocido, estandarizado y controlado.

La energía seleccionada para aplicar a todas las probetas es la energía equivalente a la prueba AASHTO modificada, es decir, 2700 kN•m/m³ (ASTM D1557, 2009).

No se tomó en cuenta, la trituración de los sólidos del suelo, debido a que se pretendía crear suelos lo más controlados (homogéneos) posibles y típicos de la ZMG, además que la clasificación SUCS no cambia en tres de los suelos estudiados.

Si bien las curvas granulométricas se obtuvieron previas al acomodo en los moldes (para cualquiera de las pruebas mecánicas), se cuenta con granulometrías posteriores a la compactación, apreciando claro está, un aumento considerable en el porcentaje que pasa la malla No.200 (0.075 mm), sin embargo, no cambia la clasificación SUCS en la mayoría de los casos y deja los mismos suelos típicos de la ZMG. Los autores sentimos que esta situación, es decir, el acomodo de las partículas de suelo en los moldes y las densidades sin triturar que se alcanzan en la naturaleza deberán estudiarse ampliamente.

Tabla 2. Efecto de la compactación en la granulometría y clasificación SUCS.

	Jal	Jal-Tepe	Tepe-Jal	Tepetate	
Abertura (mm)	% QUE PASA	% QUE PASA	% QUE PASA	% QUE PASA	AASHTO Modificada
0.075	5%	12%	27%	33%	Antes
0.075	20%	24%	35%	38%	Después
	SUCS	SUCS	SUCS	SUCS	
	(SW)g	(SM)g	SM	SM	Antes
	(SM)g	(SM)g	SM	SM	Después

En la tabla 2, se presenta un promedio de la "trituración" de los granos a través de este medio de compactación, donde se observa que los suelos no

cambian su clasificación SUCS, para efectos de esta investigación nos seguiremos refiriendo al Jal como (SW)g, aclarando que las pruebas físicas se realizaron previas al acomodo de las partículas para obtener las propiedades mecánicas.

2.5 Esfuerzo efectivo

El esfuerzo efectivo en el ensayo de corte directo aplicado a las probetas se consideró como variable independiente dentro del experimento.

El ensayo de corte directo estandarizado empleado fue el de condiciones no consolidadas, no drenadas y con deformación controlada (ASTM D6528, 2007).

El ensayo de corte directo estandarizado empleado fue el de condiciones No consolidadas No drenadas con deformación controlada (ASTM D6528, 2007).

3 PROPIEDADES ÍNDICE

3.1 Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio para la obtención de las propiedades índice de los suelos fueron las que se muestran en la figura 3.

Las pruebas se realizaron para los diferentes tipos de suelo y para los diferentes grados de acomodo alcanzados (densidades); para poder determinar entre otros parámetros la Compacidad Relativa de cada grupo especímenes de los cuatro tipos de suelo y densidades.

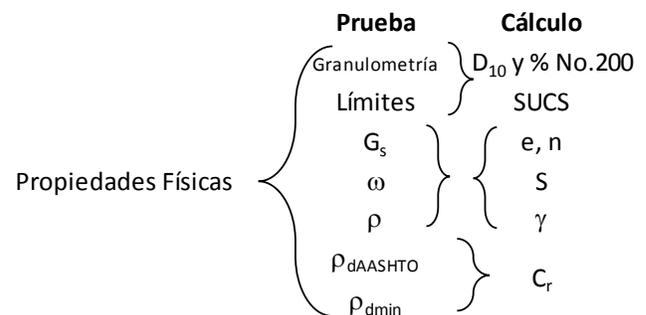


Figura 3. Esquema de las pruebas de laboratorio realizadas.

Para la ejecución de las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo los estándares ASTM siguientes:

- Granulometría (ASTM D422, 2007)
- Porcentaje que pasa la malla No. 200
- Límites de Consistencia (ASTM D4318, 2005)
- Densidad Relativa de Sólidos, G_s (ASTM D854, 2010)
- Contenido de agua, ω (ASTM D2216, 2010)
- Densidad, ρ (Masa / Volumen)
- Masa Vol Seca Máxima $\rho_{dAASHTO}$ (ASTM D1557, 2009)
- Masa Volumétrica Seca Suelta ρ_{dmin} (ASTM C29, 2009)

Tabla 3. Propiedades obtenidas mediante pruebas de laboratorio.

Suelo	Pasa Malla No. 200 (%)	G _s	ω (%)	ρ (kg/m ³)	ρ _{dmax} (kg/m ³)	ρ _d (kg/m ³)
Jal (SW)g	5	1.88	30	1231	1022	950
			36	1333		980
			44	1477		1022
			50	1448		965
Jaltepe (SM)g	12	2.02	15	1268	1163	1103
			24	1442		1163
			31	1469		1122
Tepejal SM	27	2.17	16	1442	1291	1243
			23	1588		1291
			35	1634		1210
Tepetate SM	33	2.31	11	1236	1320	1114
			16	1462		1263
			23	1617		1320
			30	1680		1292

Los demás parámetros obtenidos de los suelos (tabla 4), se calcularon a partir de las pruebas realizadas en el laboratorio, estos parámetros son:

- Diámetro correspondiente al 10% de la muestra, D₁₀
- Clasificación de Suelos, SUCS (*ASTM D2487, 2011*)
- Relación de vacíos, e
- Porosidad, n
- Grado de Saturación, S
- Peso específico, γ
- Compacidad Relativa, C_r

4 PROPIEDADES MECÁNICAS

4.1 Ensayos de corte directo

Como ya se mencionó el ensayo de corte directo estandarizado empleado fue el de condiciones No consolidadas No drenadas (por la velocidad de aplicación de la deformación) con deformación controlada (*ASTM D6528, 2007*).

Se prepararon 6 probetas de cada uno de los 14 tipos de suelo identificados: Jal (SW)g con 4 densidades, Jal-Tepe (SM)g con 3 densidades, Tepe-Jal SM con 3 densidades y Tepetate SM con 4 densidades, logrando realizar 84 ensayos de corte directo (14 curvas de estado de esfuerzo con 6 puntos cada una).

Tabla 4. Otros parámetros índice de los suelos empleados.

Suelo	D ₁₀ (mm)	e	n (%)	S (%)	γ (kN/m ³)	C _r (%)
Jal (SW)g	0.25	1.13	53	53	12.55	73
		0.91	46	74	13.59	93
		0.84	48	100	15.06	100
		0.94	49	99	14.76	90
Jaltepe (SM)g	0.025	0.83	42	36	12.93	89
		0.74	45	66	14.70	100
		0.80	45	78	14.97	93
Tepejal SM	0.0025	0.74	40	47	14.70	91
		0.68	43	74	16.19	100
		0.79	44	96	16.66	85
Tepetate SM	0.00025	0.94	49	25	12.60	90
		0.83	43	44	14.90	84
		0.75	45	69	16.48	100
		0.79	44	88	17.13	93

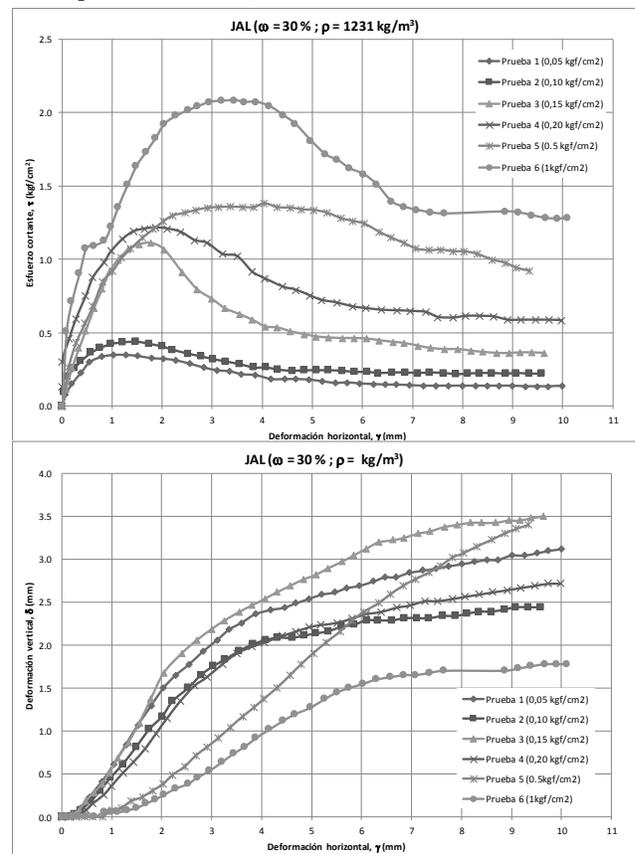


Figura 4. Resultados de las pruebas de corte directo, como ejemplo el Jal (SW)g, con 44% de contenido de agua y densidad de 1477 kg/m³.

Los esfuerzos efectivos empleados para determinar las leyes constitutivas de los suelos pumíctos fueron: 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.50 y 1.00 kgf/cm² (5, 10, 15, 20, 50 y 100 kPa).

La deformación vertical que se presenta de ejemplo es positiva, es decir, el suelo presenta dilatancia en los casos mostrados, aumenta su volumen.

4.2 Ensayos de permeabilidad

Se realizaron 14 pruebas de permeabilidad de carga constante, para determinar el coeficiente de permeabilidad “k” de los diferentes tipos de suelo (ASTM D2434, 2006).

Se prepararon probetas de cada uno de los 4 tipos de suelo identificados: Jal (SW)g con 4 densidades, Jal-Tepe (SM)g con 3 densidades, Tepe-Jal SM con 3 densidades y Tepetate SM con 4 densidades, logrando realizar los 14 ensayos de permeabilidad.

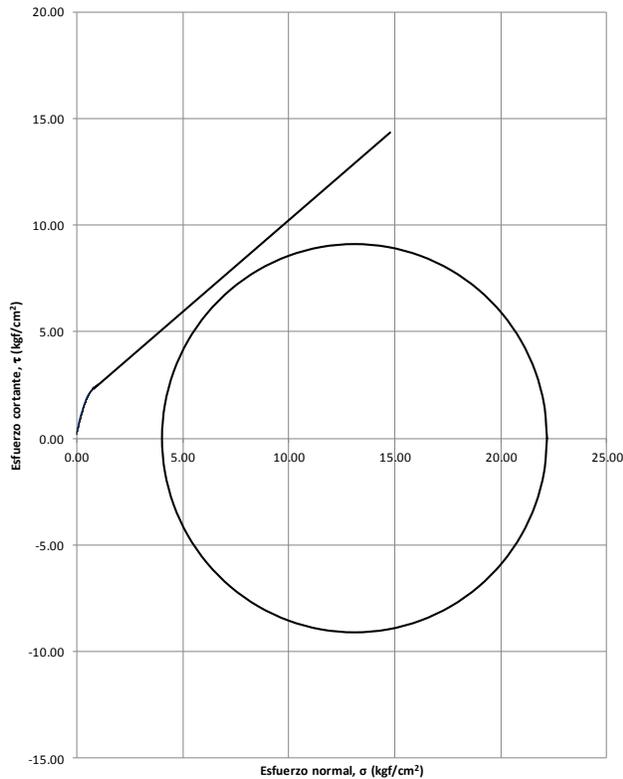


Figura 5. Ejemplo de los ensayos triaxiales relacionados con los resultados de corte directo.

4.3 Triaxiales

Adicionalmente se llevaron a cabo 4 pruebas triaxiales en condiciones No consolidadas No drenadas con deformación controlada, para corroborar los resultados obtenidos mediante los ensayos de corte directo (ASTM D2850, 2007).

Se prepararon 4 probetas de cada uno de los 4 tipos de suelo identificados: Jal (SW)g, Jal-Tepe (SM)g, Tepe-Jal SM y Tepetate SM.

Tabla 4. Propiedades mecánicas para el Jal (SW)g.

Suelo	σ_0 (kgf/cm ²)	c (kgf/cm ²)	ϕ (°)	τ_{falla} (kg/cm ²)	τ_{res} (kg/cm ²)	k (m/s)	
Jal (SW)g	0.050	0.00	81.31	0.289	0.106	0.0027	
	0.100			0.617	0.253		
	0.150			0.944	0.401		
	0.178	0.93	48.14	1.127	0.548		
	0.200			1.152	0.644		
	0.500			1.487	0.873		
	1.000			2.045	1.300		
	0.050	0.21	74.94	0.395	0.056		0.0043
	0.100			0.581	0.172		
	0.150			0.767	0.287		
	0.200	0.62	52.59	0.952	0.403		
	0.230			0.963	1.135		
	0.500			1.277	1.123		
	1.000			1.930	1.501		
0.050	0.00	81.90	0.343	0.193	0.0022		
0.100			0.694	0.300			
0.150			1.046	0.407			
0.199	1.12	48.68	1.342	0.514			
0.200			1.343	1.144			
0.500			1.685	1.149			
1.000			2.253	1.600			
0.050	0.15	79.24	0.412	0.116		0.0022	
0.100			0.675	0.234			
0.150			0.938	0.352			
0.196	0.93	48.47	1.146	0.470			
0.200			1.151	0.539			
0.500			1.490	0.874			
1.000			2.054	1.492			

Tabla 5. Propiedades mecánicas para el Jal-Tepe (SM)g.

Suelo	σ_0 (kgf/cm ²)	c (kgf/cm ²)	ϕ (°)	τ_{falla} (kg/cm ²)	τ_{res} (kg/cm ²)	k (m/s)
Jaltepe (SM)g	0.050	0.20	77.05	0.410	0.144	0.0029
	0.100			0.614	0.256	
	0.150			0.809	0.364	
	0.200			0.996	0.467	
	0.500			1.927	0.982	
	0.800	1.91	40.60	2.538	1.325	0.0015
	1.000			2.769	1.497	
	0.050	0.16	78.47	0.395	0.158	0.0015
	0.100			0.619	0.260	
	0.150			0.830	0.358	
	0.200			1.027	0.452	
	0.500			1.922	0.929	
	0.800	1.65	40.60	2.324	1.256	0.0015
	1.000			2.506	1.424	
	0.050	0.26	73.58	0.431	0.078	0.0015
0.100	0.431			0.078		
0.150	0.431			0.078		
0.200	0.431			0.078		
0.200	0.431			0.078		
0.500	3.26	34.27	0.431	0.078	0.0015	
1.000			0.431	0.078		

Tabla 6. Propiedades mecánicas para el Tepe-Jal SM.

Suelo	σ_0 (kgf/cm ²)	c (kgf/cm ²)	ϕ (°)	τ_{falla} (kg/cm ²)	τ_{res} (kg/cm ²)	k (m/s)
Tepejal	0.050	0.32	66.07	0.433	0.111	0.0008
	0.100			0.538	0.223	
	0.150			0.640	0.330	
	0.200			0.737	0.431	
	0.500			1.223	0.920	
	0.800	0.90	39.07	1.548	1.207	0.0008
	1.000			1.710	1.330	
	0.050	0.20	75.02	0.380	0.125	0.0008
	0.100			0.554	0.242	
	0.150			0.720	0.355	
	0.200			0.878	0.463	
	0.500			1.647	1.026	
	0.800	1.27	46.64	2.115	1.440	0.0008
	1.000			2.327	1.665	
	0.050	0.37	73.34	0.533	0.135	0.0008
0.100	0.688			0.241		
0.150	0.836			0.345		
0.200	0.976			0.445		
0.500	1.652			0.993		
0.800	1.36	40.63	2.049	1.442	0.0008	
1.000			2.221	1.710		

4.4 Resultados de ensayos de corte directo y permeabilidad

En las tablas 4, 5, 6 y 7, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo y permeabilidad.

Debemos tomar en cuenta que se tienen dos comportamientos diferentes en la misma ecuación de comportamiento al esfuerzo cortante, uno en el inicio del estado de esfuerzos antes de 0.2 kgf/cm² (20 kPa) de esfuerzo normal, con un ángulo de fricción “alto” y una cohesión “baja” y posteriormente a ese nivel de esfuerzo se presenta un ángulo de fricción menor y una cohesión mayor, presentando lo que podría llamarse un punto de inflexión (Zamudio et al, 2016).

5 CORRELACIONES

5.1 Metodología

Con el fin de establecer una relación empírica entre las propiedades físicas consideradas a priori como más significativas y el comportamiento mecánico e hidráulico de los suelos, se realizó un experimento de regresión multivariable con las variables independientes siguientes:

- Esfuerzo efectivo, σ_0
- Contenido de agua, ω
- Densidad seca, ρ_d
- Densidad húmeda, ρ
- Diámetro correspondiente al 10% de la muestra, D_{10}
- % que pasa la malla No.200

Tabla 7. Propiedades mecánicas para el Tepetate SM.

Suelo	σ_0 (kgf/cm ²)	c (kgf/cm ²)	ϕ (°)	τ_{falla} (kg/cm ²)	τ_{res} (kg/cm ²)	k (m/s)
Tepetate	0.050	0.30	59.51	0.418	0.196	0.00011
	0.100			0.464	0.234	
	0.150			0.565	0.335	
	0.200			0.659	0.392	
	0.500			1.078	0.886	
	1.000			2.035	1.470	
	0.050	0.25	63.40	0.298	0.113	0.00015
	0.100			0.366	0.166	
	0.150			0.690	0.271	
	0.200			0.705	0.396	
	0.500			1.153	0.886	
	1.000			2.269	1.602	
	0.050	0.35	62.51	0.290	0.147	0.00004
	0.100			0.633	0.256	
	0.150			0.693	0.328	
	0.200			0.705	0.396	
	0.500			1.357	0.837	
	1.000			2.235	1.470	
	0.050	0.23	66.23	0.234	0.136	0.00004
	0.100			0.422	0.200	
	0.150			0.739	0.283	
	0.200			0.754	0.403	
	0.500			1.274	0.829	
	1.000			2.525	1.600	

Se realizaron 94 combinaciones con estas variables, y se evaluó su comportamiento con pruebas de corte directo y permeabilidad de laboratorio. Por consiguiente, las variables dependientes fueron las siguientes:

- Esfuerzo cortante de falla, τ_{falla}
- Esfuerzo cortante residual, τ_{res}
- Coeficiente de permeabilidad, k

Los datos fueron analizados mediante el algoritmo *Multiple Regression* de StatGraphics Centurion XVII, incluyendo como variables explicativas los diferentes productos de variables independientes que multiplican

coeficientes de los términos de los polinomios de la mezcla. Con el fin de sólo incluir en el modelo explicativo aquellos términos estadísticamente significativos se depuró el modelo mediante la técnica de *Stepwise Regression* utilizando como criterio de depuración un p-valor menor al 0.01%.

Sólo estas variables fueron analizadas y no así la cohesión y la fricción del suelo, en virtud de que se observaron “puntos de inflexión” en la curva polinómica que simboliza la resistencia de falla al cortante, entre los 20 kPa a 80 kPa, y que, representan importantes dispersiones, sobre todo para esfuerzos relativamente bajos, menores a 10 kPa.

5.2 Correlación esfuerzo cortante de falla

Tabla 8. Resultados de la depuración de variables independientes

Par.	Estimate	Standard Error	T	P-Value
σ_0	1.91672	0.0707744	27.082	0.0000
ρ_d	0.574208	0.0520464	11.033	0.0000
Pasa200	-0.01228	0.0024012	-5.114	0.0000

Tabla 9. Análisis de varianza

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1.3748E12	3	4.5716E11	962.98	0.0000
Residual	4.1302E10	87	4.74733E8		
Total	1.4128E12	90			

R-squared = 97.0766 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 97.0094 percent
 Standard Error of Est. = 21788.4
 Mean absolute error = 16479.5

A partir de este análisis se deduce que el esfuerzo cortante de falla puede explicarse en un 97% a partir del esfuerzo efectivo (σ_0), la densidad seca (ρ_d) y el porcentaje de suelo que pasa la malla 200 (Pasa200). La ecuación explicativa para el esfuerzo cortante de falla es:

$$\tau_{falla} = 1.92 * \sigma_0 + 56.31 * \rho_d - 1204 * Pasa200 \quad (1)$$

donde: τ_{falla} y σ_0 están en Pascales, ρ_d en kg/m³ y Pasa200 como porcentaje del total.

5.3 Correlación esfuerzo cortante residual

Tabla 10. Resultados de la depuración de variables independientes

Par.	Estimate	Standard Error	T	P-Value
σ_0	1.48079	0.0360439	41.0829	0.0000
ρ_d	8.5454	1.46906	5.81693	0.0000

donde ρ_d está en kg/m^3 , Pasa200 como porcentaje del total y D_{10} en metros.

Tabla 11. Análisis de varianza

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	5.32E11	2	2.66E11	2154.84	0.0000
Residual	1.09E10	88	1.23E8		
Total	5.43E11	90			

R-squared = 97.9989 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 97.9762 percent
 Standard Error of Est. = 11111.7
 Mean absolute error = 7788.73

A partir de este análisis se deduce que el esfuerzo cortante residual puede explicarse en un 98% a partir del esfuerzo efectivo (σ_0) y la densidad seca (ρ_d). La ecuación explicativa para el esfuerzo cortante residual es:

$$\tau_{res} = 1.48 * \sigma_0 + 8.55 * \rho_d \quad (2)$$

donde: τ_{res} y σ_0 están en Pascales, y ρ_d en kg/m^3 .

5.4 Correlación coeficiente de permeabilidad

Tabla 12. Resultados de la depuración de variables independientes

Par.	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
ρ_d	0.0000028	1.92096E-7	14.3285	0.0000
$\rho_d * \text{Pasa200}$	-8.03E-8	7.13529E-9	-11.2563	0.0000
$\rho_d * D_{10}^2$	0.000845	0.000314855	2.68342	0.0087

Tabla 13. Análisis de varianza

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.0003	2	0.000	299.31	0.0000
Residual	0.0000	88	3.294E-7		
Total	0.0003	90			

R-squared = 91.1669 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 90.9638 percent
 Standard Error of Est. = 0.000573927
 Mean absolute error = 0.000372219

A partir de este análisis se deduce que la permeabilidad puede explicarse en un 91% a partir de la densidad seca (ρ_d), la interacción entre la densidad seca y la cantidad de suelo que pasa la malla 200 ($\rho_d * \text{pasa200}$), y la interacción entre la densidad seca y el cuadrado de D_{10} ($\rho_d * D_{10}^2$). La ecuación explicativa para la permeabilidad del suelo es:

$$k = (2.75E^{+6} * \rho_d) - (8.032E^{-8} * \rho_d * \text{Pasa200}) + (8.45E^{+4} * \rho_d * D_{10}^2) \quad (3)$$

6 CONCLUSIONES

Se proponen tres ecuaciones que permiten evaluar la resistencia al esfuerzo cortante de falla, la resistencia al esfuerzo cortante residual y la permeabilidad para las arenas pumíticas de la ZMG. Como los coeficientes de regresión son altos y el error estándar es aceptable, mientras que el universo de muestreo abarcó un amplio rango granulométrico dentro de un contexto geotécnico consistente, consideramos que la permeabilidad o el esfuerzo cortante pueden ser obtenidos de forma alternativa a partir de parámetros físicos que pueden obtenerse de pruebas granulométricas y la densidad seca. Ciertamente, las pruebas concluyentes deberían estar basada en pruebas de corte directo, triaxial y permeabilidad. Sin embargo, la simpleza y economía de las pruebas físicas requeridas para obtener importantes criterios de diseño, significan una mejor base para los cálculos geotécnicos y los prediseños.

REFERENCIAS

- ASTM C29 (2009) “Método de prueba estándar para la determinación de la densidad (peso unitario) y los vacíos en los agregados”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D422 (2007) “Método de prueba estándar para el análisis de tamaño de partícula de Suelos”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D854 (2010) “Método de prueba estándar para la gravedad específica de sólidos del suelo por agua y picnómetro”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D1557 (2009) “Método de prueba estándar para determinar en el laboratorio, la compactación del suelo usando un esfuerzo modificado ($2700 \text{ kN} \cdot \text{m}^3$)”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D2216 (2010) “Método de prueba estándar para la determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo y roca por masa”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D2434 (2006) “Método de prueba estándar para determinar la permeabilidad de los suelos granulares

- (carga constante)”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D2487 (2011) “Práctica estándar para la clasificación de los suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS), *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D2850 (2007) “Método de prueba estándar de compresión triaxial no consolidada-no drenada en suelos cohesivos”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D4318 (2005) “Método de prueba estándar para el límite líquido, límite plástico, y el índice de plasticidad de los suelos”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D6528 (2007) “Método de prueba de corte directo simple estándar, consolidado no drenado, de suelos cohesivos”, *American Standard Test Material International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- Mahood, G. A. (1977) “A preliminary report on the comeditic dome and ash flow complex of sierra la primavera, Jalisco, México.”, *Instituto de Geología No. 2, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Hazen A. (1930) “Water Supply”, *American Civil Engineers Handbook*, Wiley, Nueva York
- Lazcano D. S. (2001) “Sismicidad Histórica de Guadalajara, Jal.”, *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*. Guadalajara, Jal. Oct 31- Nov 3.
- Ochoa González G.H., Vargas Del Rio D. y Zamudio Zavala P. E. (2014) “Resistencia al esfuerzo cortante en suelos pumíticos”. *XXVII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica 2014 (RNIG), Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG)*. Puerto Vallarta, Jalisco.
- Vargas Del Rio D. y Ochoa González G.H. (2014) “Correlación entre ángulo de fricción interna y peso volumétrico seco para las arenas pumíticas de la zona metropolitana de Guadalajara”. *XXVII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica 2014 (RNIG), Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG)*. Puerto Vallarta, Jalisco.