

Aplicación de la fotogrametría digital de rango cercano en un ensayo triaxial para determinar los parámetros elásticos de una muestra de suelo

Application of Digital Close Range Photogrammetry in a Triaxial Test for Determining the Elastic Parameters of a Soil Sample

ADOLFO CAMILO TORRES PRADA*

CARLOS LEONARDO MENDOZA PRIESSENG**

NATALIA EUGENIA MARÍN RIVEROS***

RESUMEN

La presente investigación se realizó con el objetivo de crear cartas de variación de los parámetros elásticos de mezclas de suelo artificial, las cuales serían utilizadas para futuras investigaciones en modelos físicos. Para tal fin, se ha aplicado la fotogrametría digital de rango cercano para la medición de los desplazamientos relativos en muestras de suelo artificial sometidas a un ensayo triaxial tipo UU. Para las distintas condiciones de esfuerzos durante las etapas del ensayo triaxial se tomaron fotografías con una cámara digital convencional, así se logró recrear los modelos tridimensionales; con la ayuda del hardware y software especializados se realizaron las mediciones en 3D de los desplazamientos relativos, con lo cual se determinaron sus parámetros elásticos, como son: la relación de Poisson ν , módulo de elasticidad E y el ángulo de dilatación ψ . Los resultados obtenidos con esta nueva aplicación fueron comparados con las lecturas tomadas en el ensayo triaxial.

Palabras claves: fotogrametría digital, ensayo triaxial, ángulo de dilatación, relación de Poisson.

ABSTRACT

This research was conducted with the purpose of creating letters of variation of the elastic parameters of artificial soil mixtures, which would be used for future research on physical models. For that purpose, digital close range photogrammetry was applied for measuring relative displacements in artificial soil samples subjected to a UU triaxial test. For the different effort conditions during the triaxial test stages, pictures were taken with a conventional digital camera, thus managing to recreate the tridimensional pictures; the relative displacements were measured in 3D with the help of specialized hardware and software, with which the elastic parameters were determined, such as: the ν Poisson ratio, E elasticity modulus and the ψ dilatancy angle. The results obtained with this new application were compared with the readings taken from the triaxial test.

Keywords: digital photogrammetry, triaxial test, dilatancy angle, poisson ratio.

FECHA DE ENVÍO: 15 DE SEPTIEMBRE DE 2011 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 27 DE NOVIEMBRE DE 2011

*Ingeniero Civil, PhD en Ciencias Técnicas, profesor titular de la Universidad de La Salle, director del laboratorio de Modelos geotécnicos GeoLab. Grupo de investigación CIROC. Correo electrónico: atorresc@unisalle.edu.co

**Ingeniero Civil, MSc en Geoinformación y Cartografía, profesor de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: voxel123@hotmail.com

***Ingeniera Civil, integrante del semillero de investigación del grupo CIROC de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: naeumari@hotmail.com

Introducción

La fotogrametría de rango cercano es definida por Muir (2004) como un procedimiento que esencialmente es similar a la fotogrametría aérea pero en el cual el modelo estereoscópico se construye con varias cámaras fijas y en el que los movimientos de la superficie de un terreno pueden ser medidos a partir de las diferencias en imágenes fotográficas sucesivas. La técnica de la fotogrametría de rango cercano ha tenido múltiples aplicaciones en el seguimiento de movimientos de terreno (Kottenstette, 2005) y estructurales (Dimitar, 2004), uno de los últimos ejemplos más notorios es el desarrollo del sistema de administración de información de espacios subterráneos (USIMS) (Ohnishi et ál., 2007) en el cual la fotogrametría de rango cercano permite la evaluación periódica del estado estructural de este tipo de obras.

En el campo experimental el registro de desplazamientos en las pruebas, a partir de fotogrametría de rango cercano, permite la determinación de vectores de desplazamiento, tanto en 2D como en 3D. En los trabajos de Lee y Bassett (2006) se muestra la aplicación en 2D en pruebas experimentales de laboratorio, en el que se aplica fotogrametría de rango cercano en un ensayo físico experimental para el estudio de la interacción entre muro profundo —suelo— túnel; en los de Cola et ál. (2006) se utilizaron las imágenes digitales para registrar los vectores de desplazamientos de un modelo físico de un talud en falla; también en el trabajo de Torres y Nieto (2009) se empleó el registro de imágenes digitales para observar los vectores de movimiento en la masa de suelo en un modelo físico para el estudio del fenómeno de subsidencia originada por la construcción de túneles.

Una referencia básica de los fundamentos de la utilización de la técnica de fotogrametría de rango cercano para determinar los desplazamientos en 3D en modelos de suelo es el trabajo de Taylor et ál. (1998). Una aplicación específica del registro en 3D de los movimientos en superficie de un ensayo en un modelo físico aparece en el trabajo de Torres y Nieto (2009). En el trabajo de Roncellaa et ál. (2004) se empleó la técnica de fotografía digital en un modelo físico para el registro de los desplazamientos en 3D de la superficie de un talud a escala reducida.

En la figura 1 se presenta en detalle la aplicación de la técnica de fotogrametría digital de rango cercano en el desarrollo y resultados del trabajo de caracterización

geomecánica y evaluación de parámetros elásticos de mezclas artificiales para ser usadas como suelos en modelos físicos (Torres y Marín, 2008).

Materiales y métodos

La toma de fotografías digitales, como pares estereoscópicos a muestras ensayadas en el equipo triaxial, se realizó con la intención de calcular a partir de los desplazamientos relativos las deformaciones que estas sufrían a lo largo del ensayo, el cual fue tipo UV y así poder determinar los parámetros elásticos fundamentales de las muestras. Las muestras ensayadas tenían una densidad de $1,65 \text{ g/cm}^3$ y unas dimensiones cilíndricas de 8 cm de alto y 3,8 cm de diámetro, su composición se determinó por medio de un plan experimental desarrollado durante la investigación principal (Torres y Nieto, 2009), el cual indicaba la cantidad de aceite, arena y bentonita que componían la muestra. En total se realizaron siete mezclas, tres ensayos triaxiales para cada una de las mezclas a tres presiones de cámara diferentes de 8,14 KPa, 16,28 KPa y 24,42 KPa. Por cada muestra se tomaron catorce pares fotográficos para un total de 98 pares estereoscópicos medidos en el software especializado Imagestation.

Desarrollo experimental

Los ensayos triaxiales UU se realizaron atendiendo la norma INV E-153 y sus normas correspondientes AASTHO T 234 y ASTM D 2850; las fotografías se tomaron a lo largo del ensayo desde la lectura de deformación cero hasta el último dato que se tomó en el ensayo con intervalos de tiempo, al tener en cuenta los valores de lectura establecidos. La longitud B definida como la separación entre los puntos en los que se ubica el lente de la cámara para la toma de las fotos estereográficas, debe estar comprendida entre 12 cm y 16 cm, la longitud Z definida como la separación comprendida entre el equipo triaxial y la cámara fotográfica, debe ser suficiente para que el equipo triaxial, con la muestra en prueba, salga en la totalidad de las fotografías que componen el par estereoscópico. El procedimiento general para la toma y medición a partir de las fotografías se muestra en la figura 1, y la descripción general de las etapas principales en este se consigna a continuación:

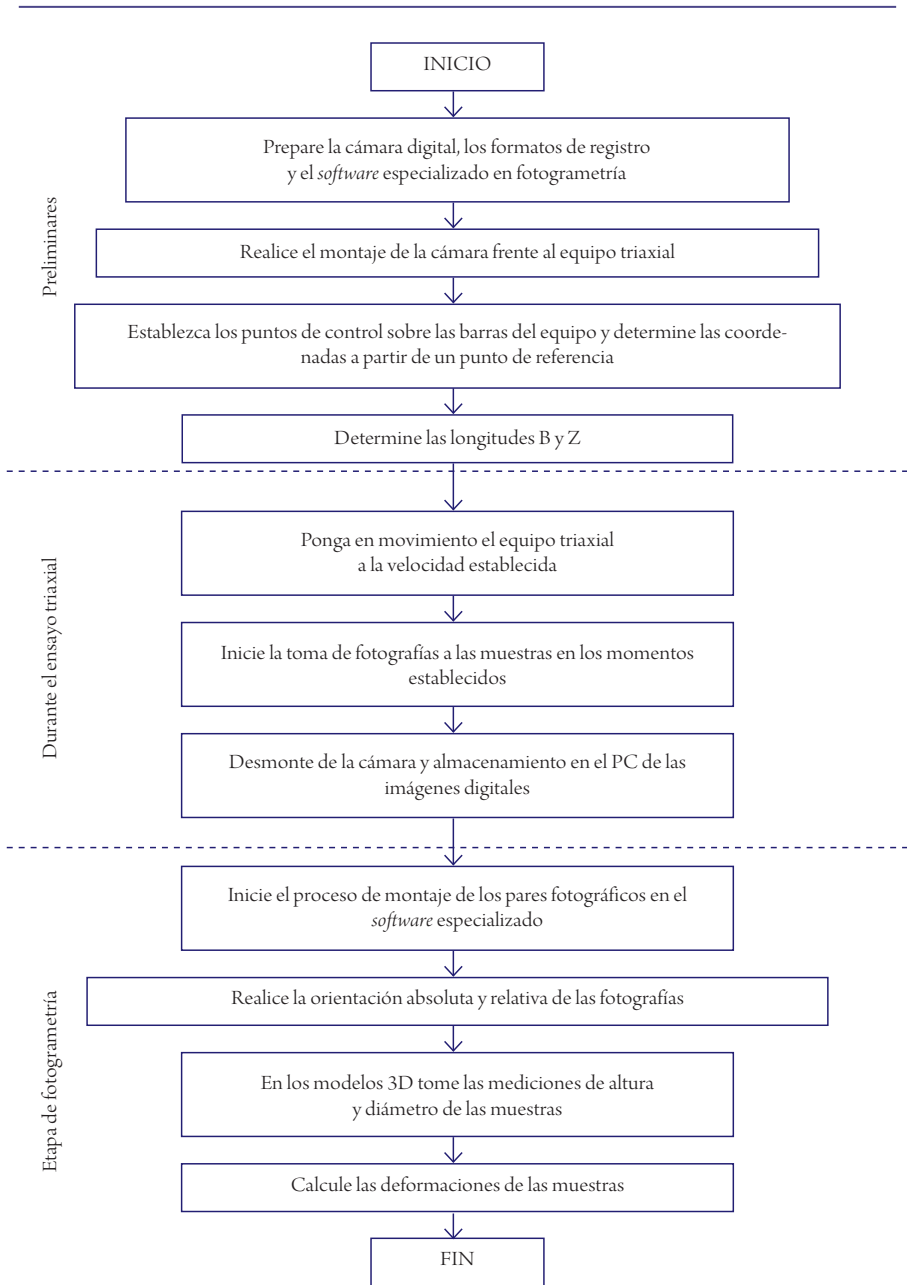


Figura 1. Procedimiento de toma y medición de fotografías

Fuente: elaboración propia.

Descripción del procedimiento toma de fotografías

El procedimiento fue el mismo para todas las muestras ensayadas y básicamente consiste en lo siguiente:

Se realizó el montaje de la cámara digital frente al equipo a una distancia $Z = 90$ cm sobre una superficie nivelada e inmóvil, en la cual se deberá colocar la guía para la toma de fotografías, esto al haber asegurado un recubrimiento suficiente que permitiera tener el modelo estereoscópico del equipo triaxial con la muestra, así como se indica en la figura 2.

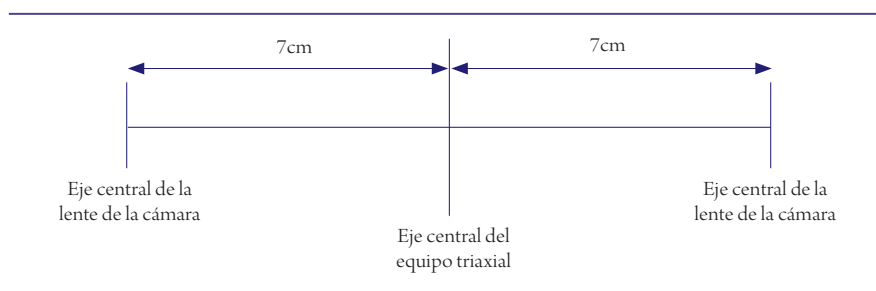


Figura 2. Ubicación del centro de los lentes $B = 14$ cm

Fuente: elaboración propia.

Además, sobre el equipo triaxial se establecieron cuatro puntos fijos que están ubicados en un sistema cartesiano X, Y, Z . Estos puntos deben verse tanto en la fotografía de la izquierda como en la de la derecha.

Es necesario definir los instantes o lecturas de desplazamientos verticales de la muestra en las que se tomarán las fotografías, realizando la primera en el instante cero del ensayo. Una vez iniciado el ensayo, y en las lecturas establecidas, se colocará la cámara sobre las guías y se tomarán las dos fotografías que constituirán el par fotogramétrico correspondiente, en caso de utilizar una sola cámara para tomar las dos fotografías, el proceso deberá realizarse de la forma más rápida posible, preferiblemente en menos de 15 s. La figura 3 presenta una composición de pares fotográficos en la etapa inicial y durante la prueba:

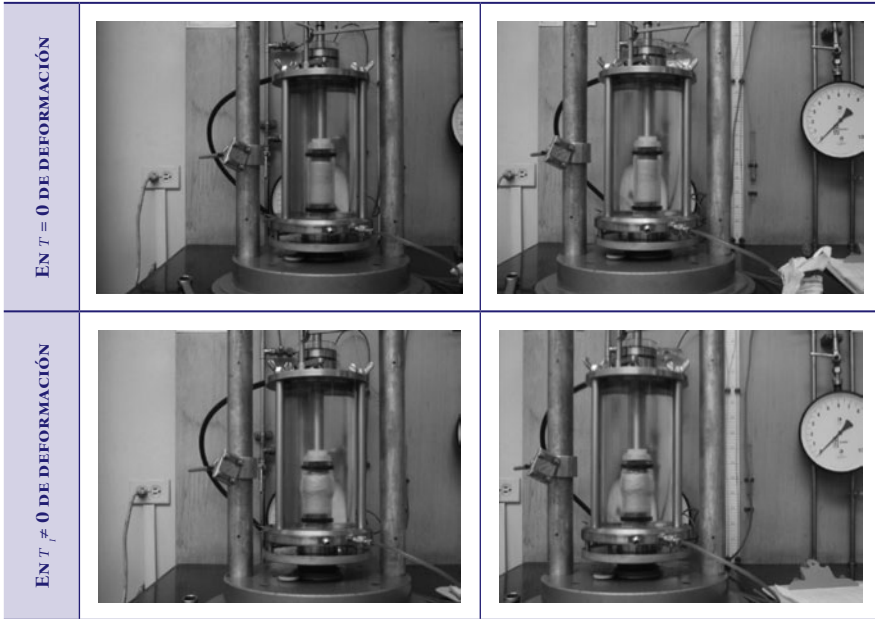


Figura 3. Pares fotográficos en diferentes etapas del ensayo

Fuente: elaboración propia.

Los pares fotográficos obtenidos a lo largo de los ensayos serán manipulados en el software Imagestation, por medio del cual se medirán las deformaciones horizontales de las muestras ensayadas en la totalidad de las fotografías tomadas.

Construcción de los modelos 3D en la estación de trabajo fotogramétrico

La estación de trabajo Imagestation es un paquete compuesto por software y hardware especializado que permite tratar imágenes digitales como pares estereoscópicos que pueden ser vistos en tres dimensiones y en este caso realizar mediciones en volúmenes reconstruidos a partir de fotografías digitales. El manejo de este paquete se realiza a través de sencillas ventanas y el procedimiento de trabajo es el siguiente:

Se inicia el proceso de montaje de las fotografías creando dentro del software la estructura del proyecto y las especificaciones y parámetros a utilizar, así como la cámara empleada para la toma de fotografías. Se deberá utilizar siempre la misma cámara para la realización de todos los ensayos. Asimismo, al tenerse en cuenta que

estas cámaras convencionales no son métricas, se debe realizar un procedimiento de calibración de la cámara; sin embargo, para casos en que no requieran tan altas precisiones esta etapa puede ser obviada. Para la creación de la cámara es necesario tener la información precisa de las características de la cámara utilizada. En el desarrollo de la presente investigación se utilizó una GENIUS G-SHOT P611 de seis megapíxeles de resolución. Esta información permite cargar los datos iniciales en la ventana de edición de la cámara, como se muestra en la figura 4, y queda registrada en una base de datos para futuras aplicaciones.

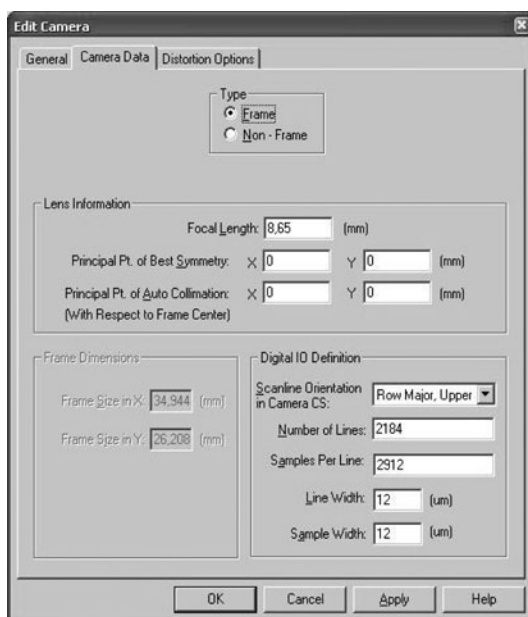


Figura 4. Introducción de información básica inicial para incluir la cámara en la base de datos

Fuente: elaboración propia.

Las fotografías guardadas se renombrarán para facilitar el manejo en el montaje de los pares estereoscópicos, los cuales se crearán automáticamente. La creación de las fajas tiene el siguiente orden:

Creación de la faja

Se asigna el nombre y la numeración de las fotos que conforman la faja a trabajar, en este caso las fotos que conforman un ensayo. Identificación del par estereoscópico

(101, 201, etc.) y de las fotos a trabajar incluyendo la extensión del archivo (jpg). La identificación del par se hace de acuerdo con el número de ensayo y número de par. El software a partir de la identificación de la foto y el incremento que se le dé, creará el par estereoscópico automáticamente (figura 5).

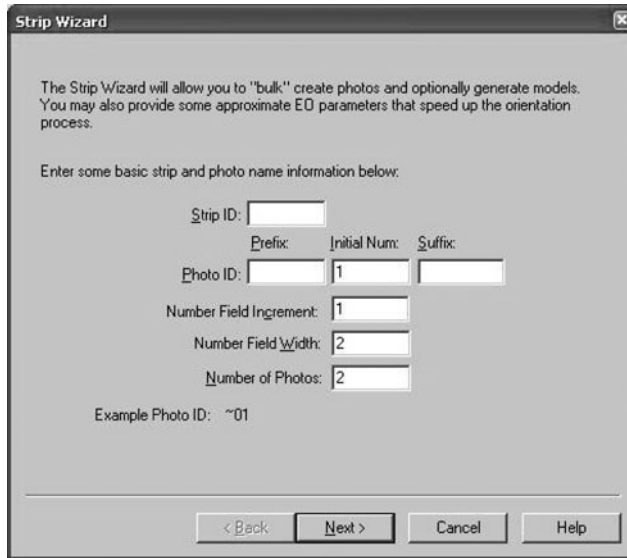


Figura 5. Definición y registro automático de información de las fotografías

Fuente: elaboración propia.

Información de la cámara

En esta parte se selecciona la cámara creada y utilizada en el desarrollo de los ensayos. En caso de que algún ensayo no haya sido realizado con la misma cámara, en esta ventana se podrá escoger la cámara utilizada para que la faja específica se establezca con las características de la cámara utilizada.

Información de la imagen

Se ubica la imagen inicial o de la izquierda en la carpeta que contiene las imágenes de las fotografías tomadas, se ubica nuevamente el nombre de la imagen con el prefijo (0), el sufijo (numero de la imagen de la izquierda) y la extensión del archivo (jpg). En esta ventana (figura 6) el software creará la faja a partir de las

características dadas en la ventana inicial, con el número de la foto de la izquierda identificará la de la derecha y creará el par estereoscópico.

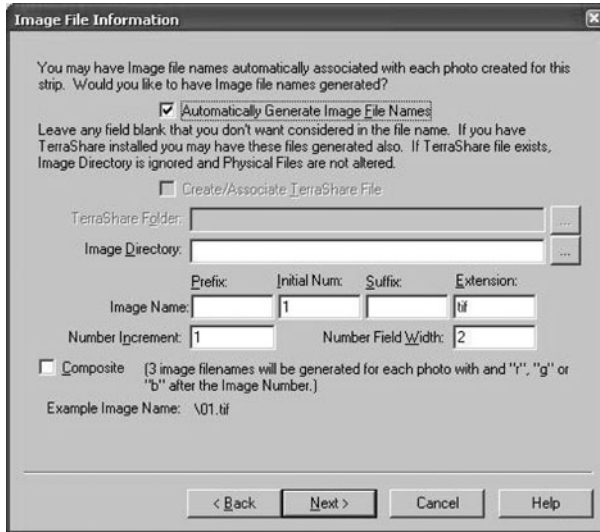


Figura 6. Generación de imágenes que conforman un par estereoscópico

Fuente: elaboración propia.

Una vez creadas todas las fajas a trabajar, se procede a realizar la orientación de cada una sobre un espacio coordinado, para así observar las fotos en tres dimensiones y hacer las mediciones. Al tenerse en cuenta que se utilizan fotografías digitales no es necesario realizar la orientación interior de cada una de las fotografías, por lo cual se inicia el trabajo con la orientación relativa de cada modelo.

Orientación relativa

La orientación relativa permite reconstruir en el espacio el modelo estereoscópico correspondiente a cada par al realizar la intersección de cada uno de los haces de luz correspondientes a cada punto del objeto, consecuentemente determinará los parámetros de orientación de una con respecto a la otra del par para recrear el modelo tridimensional. Esta orientación se realiza ubicando puntos comunes en las fotografías, en total se toman seis puntos distribuidos en todo el modelo como se indica en la figura 7.

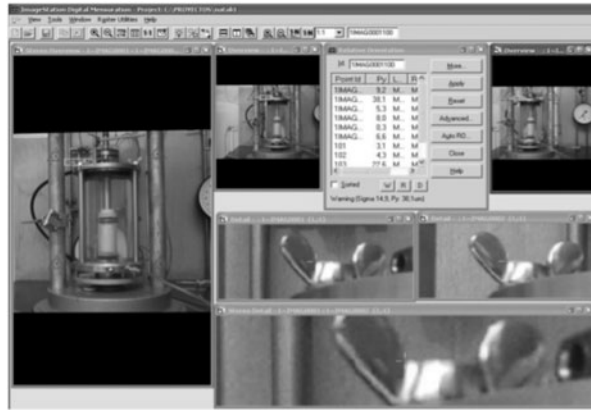


Figura 7. Orientación relativa de las imágenes del par estereoscópico

Fuente: elaboración propia.

Orientación absoluta

A partir de los cuatro puntos fijos establecidos en el equipo triaxial al fijarse las coordenadas X, Y, Z a partir de un origen determinado se establece una orientación que permitirá ubicar las fotografías en un mismo espacio. Los puntos medidos en la fotografía de la izquierda son reconocidos automáticamente mediante la correlación de imágenes por el software en la fotografía de la derecha (figura 8).

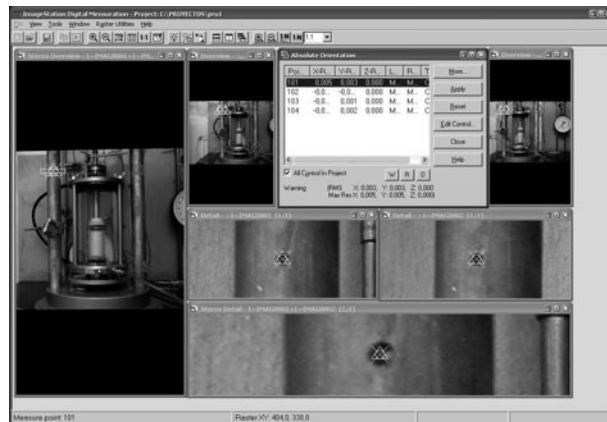


Figura 8. Orientación absoluta de las imágenes del par estereoscópico

Fuente: elaboración propia.

Una vez realizadas las orientaciones de todas las fajas se corre el módulo de medición, esto al emplear un sistema espacial de visualización para ver las fotografías en tres dimensiones y proceder a la medición de cada muestra a lo largo y a lo ancho de esta, conservando para todas las mediciones de la profundidad de la sección donde se mide (figura 9).



Figura 9. Ventana de medición en el modelo 3D ajustado

Fuente: elaboración propia.

Análisis de resultados

Para la numeración de fajas, pares estereoscópicos y mediciones se utilizó el formato que se puede observar en la tabla 1, donde se consignó toda la información de forma ordenada para cada una de las mezclas ensayadas.

Tabla 1. Registro de las lecturas, ajustes y cálculo de deformaciones

MUESTRA NO.		I		MEZCLA NO.		16		FECHA:		4 DE AGOSTO DE 2008			
Nº DE FAJA	Nº DE FOTO	COORD X	COORD Y	ALTO MUESTRA (CM)	ANCHO MUESTRA (CM)	ALTO REAL MUESTRA (CM)	ANCHO REAL MUESTRA (CM)	% DE ERROR ALTO	% DE ERROR ANCHO	VOLUMEN MUESTRA (CM3)	DEFORM. VERTI-CAL	DEFORM. HORI-ZONTAL	DEFORM. VOLUMÉ-TRICA
401	1	2	0.345	0.196	6.93	8.00	3.80	13.38	2.63	90.73	0.000	0.000	0.000
402	3	4	0.345	0.196	6.68	7.71	4.73	13.38	2.63	110.29	0.036	0.246	0.216
404	7	8	0.345	0.196	6.50	7.50	5.43	13.38	2.63	125.60	0.062	0.430	0.384
405	9	10	0.345	0.196	6.43	7.42	5.46	13.38	2.63	125.08	0.072	0.438	0.379
406	11	12	0.345	0.196	6.12	7.06	5.84	13.38	2.63	129.01	0.117	0.538	0.422
407	13	14	0.345	0.196	5.98	5.73	6.90	13.38	2.63	127.14	0.137	0.549	0.401
MUESTRA NO.		2		MEZCLA NO.		16		FECHA:		4 DE AGOSTO DE 2008			
Nº DE FAJA	Nº DE FOTO	COORD X	COORD Y	ALTO MUESTRA (CM)	ANCHO MUESTRA (CM)	ALTO REAL MUESTRA (CM)	ANCHO REAL MUESTRA (CM)	% DE ERROR ALTO	% DE ERROR ANCHO	VOLUMEN MUESTRA (CM3)	DEFORM. VERTI-CAL	DEFORM. HORI-ZONTAL	DEFORM. VOLUMÉ-TRICA
411	1	2	0.345	0.196	7.08	8.00	3.80	11.50	0.26	90.73	0.000	0.000	0.000
412	3	4	0.345	0.196	6.99	7.90	3.85	11.50	0.26	90.76	0.013	0.013	0.000
413	5	6	0.345	0.196	6.84	7.73	4.93	11.50	0.26	115.74	0.034	0.298	0.276
414	7	8	0.345	0.196	6.59	7.45	5.30	11.50	0.26	121.18	0.069	0.396	0.336
415	9	10	0.345	0.196	6.4	7.23	5.55	11.50	0.26	124.26	0.096	0.462	0.370
416	11	12	0.345	0.196	6.34	7.16	5.77	11.50	0.26	128.69	0.105	0.517	0.418
417	13	14	0.345	0.196	6.09	6.88	5.84	11.50	0.26	125.44	0.140	0.536	0.383
MUESTRA NO.		3		MEZCLA NO.		16		FECHA:		4 DE AGOSTO DE 2008			
Nº DE FAJA	Nº DE FOTO	COORD X	COORD Y	ALTO MUESTRA (CM)	ANCHO MUESTRA (CM)	ALTO REAL MUESTRA (CM)	ANCHO REAL MUESTRA (CM)	% DE ERROR ALTO	% DE ERROR ANCHO	VOLUMEN MUESTRA (CM3)	DEFORM. VERTI-CAL	DEFORM. HORI-ZONTAL	DEFORM. VOLUMÉ-TRICA
421	1	2	0.345	0.196	7.05	8.00	3.80	11.88	4.21	90.73	0.000	0.000	0.000
422	3	4	0.345	0.196	6.93	7.86	4.52	11.88	4.21	106.89	0.017	0.190	0.178
423	5	6	0.345	0.196	6.8	7.72	4.91	11.88	4.21	114.85	0.035	0.291	0.266
424	7	8	0.345	0.196	6.65	7.55	5.33	11.88	4.21	123.63	0.057	0.404	0.363
425	9	10	0.345	0.196	6.31	7.16	5.68	11.88	4.21	126.33	0.105	0.495	0.392
427	13	14	0.345	0.196	5.97	6.77	6.20	11.88	4.21	133.05	0.153	0.632	0.466

Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos obtenidos en las mediciones se determinaron las deformaciones verticales, horizontales y volumétricas de cada muestra y se construyeron gráficas como la que se muestra en la figura 10, las cuales permitieron determinar las propiedades elásticas de las muestras.

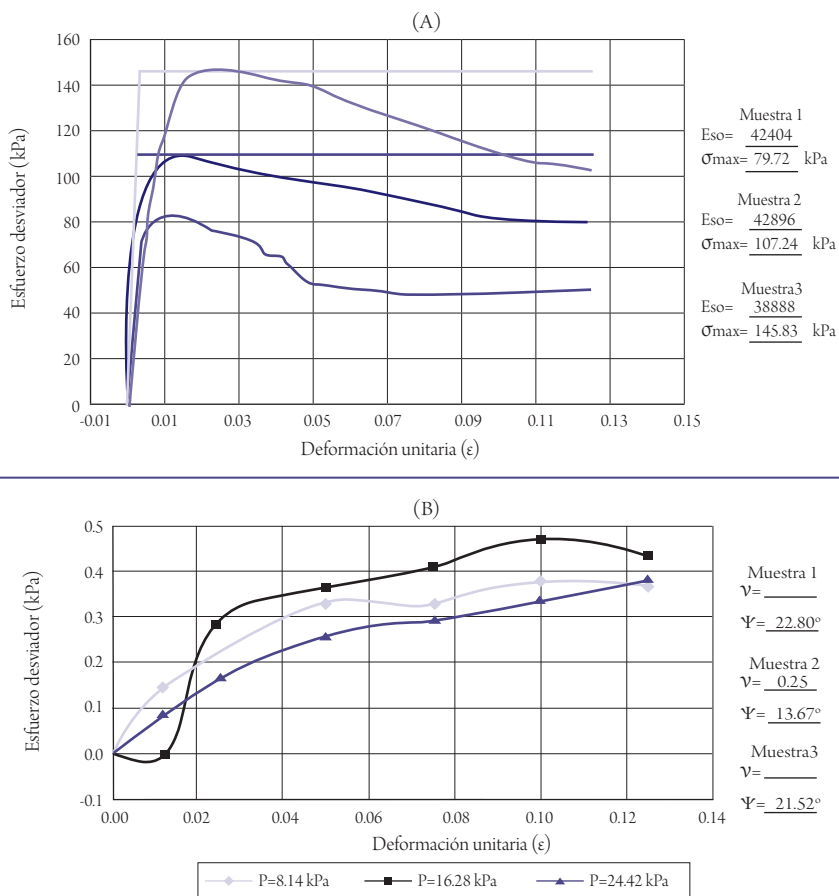


Figura 10. Construcción de las curvas: A) Deformación unitaria vs. esfuerzo desviador y B) Deformación unitaria vs. deformación volumétrica

Fuente: elaboración propia.

A partir de la teoría de Bolton (1986) se determinaron los ángulos de dilatación, aplicando la ecuación 1:

$$\tan \psi = \frac{dy}{dz} \quad (1)$$

Los ángulos de dilatación se corroboraron al aplicar la ecuación 2, desarrollada también por Bolton.

$$\psi = \phi - 30^\circ \quad (2)$$

Donde ϕ es el ángulo de fricción interno del material.

Conclusiones

Fue posible utilizar la fotogrametría de rango cercano para las medidas de desplazamientos de la muestra triaxial, debido a que las muestras registran deformaciones apreciables al montarse los modelos estereoscópicos en la estación digital.

A partir de fotografías de alta definición, procesadas en el software ImageStation, se realizaron mediciones en tres dimensiones y se lograron observar los cambios sin tener contacto directo con las muestras, con lo que se calcularon las deformaciones que tuvo la muestra a lo largo del ensayo, las cuales fueron comparadas con las registradas y obtenidas durante el ensayo triaxial bajo norma ASTM D 2850, llegando a resultados similares entre los dos sistemas de lectura.

Por ejemplo, para la muestra 1 del ensayo que se indicó en la tabla 1, se obtiene que a partir de la medición directa durante el ensayo triaxial que la deformación máxima longitudinal de la muestra es de 0,1250 y la deformación máxima transversal calculada por la corrección del área transversal e indirectamente a partir del cambio en los esfuerzos desviadores medidos es de 0,0689. Entre tanto, los resultados a partir del método planteado por fotogrametría de rango cercano son: 0,1371 para la deformación longitudinal de la muestra y de 0,2743 para la deformación media transversal, es decir, para la deformación longitudinal se tienen una diferencia de tan solo el 9,68 %, entre tanto para la transversal hay una diferencia en los datos de cerca de 3 veces.

La alta precisión que se alcanza al emplear la fotogrametría de rango cercano permite concluir que es un método técnico de alta confiabilidad en la evaluación del estado de deformación de muestras blandas, además que teniendo como patrón inicial la calibración realizada por una medida directa como es la tomada en sentido longitudinal, se puede inferir que la lectura de los cambios del ancho de la

muestra son más exactos por el método de fotogrametría de rango corto que los determinados a partir del cambio del esfuerzo desviador.

Recomendaciones

La toma de fotografías durante el inicio del ensayo debe hacerse al tomar en cuenta las deformaciones de diez en diez hasta cien, para lograr una mejor definición de la primera etapa de la curva de deformación unitaria *vs.* deformación volumétrica.

Se debe utilizar una cámara digital de resolución mayor a seis megapíxeles para mejorar la calidad de las fotografías, lo cual contribuirá en la precisión de las mediciones puesto que estas aumentan el nivel de precisión en el programa.

Para mejorar la precisión en la técnica propuesta se recomienda realizar la calibración de la cámara para corregir los desplazamientos antes de realizar la toma de fotografías y poder corregir mediante el software la distorsión de la lente de la cámara, así se podría llevar a cero el error en las lecturas iniciales.

Sería conveniente realizar varias aproximaciones iniciales con diferentes distancias de Z y B para tener un valor lo más cercano posible a la relación $B/Z = 0,6$, al observar en el par estereoscópico toda la muestra y puntos de control que permite apreciar lo mejor posible las profundidades en los modelos tridimensionales.

Referencias

- Bolton, M. D. (1986). *The Strength and Dilatancy of Sands*. *Geotechnique*, 36(1). 65-78.
- Cola, S.; Simonini, P.; Achilli, V.; Salemi, G. y Agugiaro, G. (2006). *Displacement field of a 1 g model slope from digital image techniques*. *Physical Modelling in Geotechnics*. Londres: 6th ICPMG'06, Taylor y Francis Group.
- Dimitar, J. y Close-Range (2004). *Photogrammetry With Amateur Camera, Proceedings*. Estambul: 20th ISPRS Congress, Youth Forum.
- Kottenstette, J. (2005). *Measurement of Geologic Features using Close Range Terrestrial Photogrammetry, Proceedings*. Anchorage: 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).

- Lee, Y. J. y Bassett, R. H. (2006). *Physical test using close range photogrammetry and numerical, analysis for deep wall-soil-tunnel interaction, Physical Modelling in Geotechnics*. Londres: 6th ICPMG'06, Taylor y Francis Group.
- Mikhail, E.; Bethel, J. y Mcglone, C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Muir, D. (2004). *Geotechnical Modelling*. Londres: Taylor y Francis Group.
- Ohnishi, Y.; Bruines, P. A.; Nakai, T.; Ryu, M.; Katou, T. y Tsujimori, K. (2007). *Extension of the Underground space Information Management System: Road tunnel maintenance. Underground Space. the 4th Dimension of Metropolises*. Londres: Taylor y Francis Group.
- Roncellaa, R.; Scaionib, M. y Forlania, G. (2004). *Application Of Digital Photogrammetry In Geotechnics, Proceedings*. Estambul: 20th ISPRS Congress, Commission.
- Schenk, T. (2002). *Fotogrametría digital*. Barcelona: Marombo Editores.
- Torres, A. C. y Marín, N. E. (2008). *Caracterización geomecánica y evaluación de parámetros elásticos de mezclas artificiales para ser usadas como suelos en modelos físicos*. Bogotá: Terceras Jornadas Académicas de Ingeniería de Rocas, Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, A. C. y Nieto, F. A. (2009). *Study of settlements induced by TBM in soft grounds in Bogotá, Colombia, "Safe Tunnelling For The City and For The Environment", Proceedings*. Budapest: ITA-AITES World Tunnel Congress 2009 and the 35th ITA-AITES general assembly Budapest.