

NUEVO MÉTODO PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES MEDIANTE LA TÉCNICA PIV

Mauricio Alvarado* y Álvaro Ruiz*, Núria M. Pinyol*†

* Centre de Metodes Numerics en Enginyeria

† Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología que proporciona los desplazamientos acumulados, velocidad, aceleración y deformación de puntos asociados a partículas reales a partir de las medidas obtenidas mediante la técnica conocida como Particle Image Velocimetry (PIV) en método Euleriano. La técnica es especialmente idónea en casos de grandes deformaciones.

En primer lugar, se describe el procedimiento en detalle y finalmente se aplica al caso experimental de la rotura de un talud en centrífuga debido a la pérdida de resistencia por mojado.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*) (Adrian, 1991) permite el cálculo de incrementos de desplazamiento a precisión limitada por el tamaño de píxeles comparando dos imágenes digitales de un objeto antes y después de su deformación. La técnica es no invasiva y no requiere la instalación de sensores que podrían alterar la respuesta del material analizado especialmente en el caso de grandes desplazamientos. Respecto a la medida mediante sensores, la técnica PIV ofrece como ventaja tener información de desplazamientos en todo el dominio de estudio. Esta técnica se ha aplicado extensamente en el campo de la geotecnia experimental (Take, 2003, 2015, Niedostatkiwicz et al. 2011, Senatore et al. 2013). Los desplazamientos se definen como la diferencia entre la posición del centro de una región de píxeles en la imagen antes y después de la deformación. Existen distintas metodologías para la medida de los desplazamientos mediante la técnica PIV. Cuando estas medidas son tomadas de forma Euleriana, los desplazamientos entre imágenes consecutivas son medidos en puntos fijos en el espacio. En este caso no es posible seguir la trayectoria de los puntos del objeto en

movimiento ni la deformada.

White y Bolton (2004) presentaron un procedimiento para calcular deformaciones a partir de incrementos de desplazamiento que consiste en dividir subconjuntos de PIV en elementos triangulares y calcular la matriz gradiente de deformación expresada en los componentes de deformación y rotación. Mediante una metodología similar a la utilizada en el método de los elementos finitos, el campo de deformaciones se calcula en los nodos de los elementos triangulares a partir de los desplazamientos medidos con la técnica PIV. Esta metodología presenta la misma limitación de los elementos finitos, debido a la distorsión de los elementos en caso de grandes deformaciones.

Pinyol y Alvarado (2017) presentan una nueva metodología PIV-NP (*Particle Image Velocimetry - Numerical Particle*) una metodología especialmente adecuada para la estimación de los desplazamientos acumulados y deformación mediante la técnica PIV para el caso de grandes desplazamientos. La metodología permite calcular desplazamientos y deformaciones acumuladas, así como otras variables como velocidad y aceleración, en puntos que representan partículas reales del objeto (*numerical particles*, NP). Este procedimiento está inspirado por herramientas numéricas que combinan dos discretizaciones espaciales: la Euleriana, con puntos de referencia fijos en el espacio; y la Lagrangiana, con puntos fijos en el objeto.

En este artículo presenta la metodología PIV-NP y se aplica al caso de un ensayo en centrífuga en el que se muestra el comportamiento de un talud homogéneo construido con un suelo limo-arcilloso durante mojado por inyección por la parte inferior simulando el ascenso del nivel freático. Se observa el colapso y rotura del talud. La técnica PIV-NP permite conocer la distribución de las deformaciones volumétricas y de corte durante todo el ensayo.

2. METODOLOGÍA PIV-NP

La metodología PIV-NP permite calcular los desplazamientos asociados a partículas en movimiento a partir de los desplazamientos en el tiempo medidos en puntos fijos en el espacio por la técnica PIV. Los datos de entrada son los desplazamientos ocurridos en intervalos de tiempo entre dos imágenes digitales consecutivas en el centro de los elementos de una malla rectangular fija en el espacio. Considere la Fig. 1, una malla rectangular, la cual será llamada la malla de soporte, se compone de elementos rectangulares definidos por nodos que coinciden con los centros de los subconjuntos en los cuales los incrementos de desplazamientos son medidos mediante la técnica PIV. El objeto en movimiento a analizar debe ubicarse en el dominio mediante la asignación de partículas numéricas (NP) en los elementos de la malla soporte ocupados por el objeto. Estas partículas numéricas representaran una porción del material inicialmente contenido en el elemento. Los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y deformaciones serán asignados a estas partículas que representan partículas reales del objeto.

La trayectoria y posición de las partículas numéricas se determina proyectando los incrementos de desplazamiento desde los nodos de la malla de soporte a las partículas numéricas mediante funciones de forma estándar como las utilizadas en los elementos finitos (Zienkiewicz, 1989). El tiempo se discretiza en intervalos que coinciden con los tiempos de captura de las imágenes tomadas al objeto en movimiento. Los incrementos de deformación en los elementos se calculan como el gradiente de desplazamientos en los nodos. La posición de las partículas se actualiza con los incrementos de desplazamientos. En el siguiente paso de tiempo, los nuevos incrementos de desplazamientos medidos mediante PIV en la malla soporte se proyectan nuevamente a las partículas numéricas localizadas en la nueva posición.

A continuación, se detalla paso a paso el algoritmo del procedimiento usado en el PIV-NP:

1. Identificación de las coordenadas de los nodos de la malla soporte según los puntos de medida en PIV.
2. Identificación de los elementos ocupados por el objeto a analizar.
3. Localización de partículas numéricas en los elementos no vacíos.
4. Lectura de los incrementos de desplazamiento en cada nodo ofrecidos por PIV.
5. Mapeo de los desplazamientos desde los nodos a las partículas numéricas.
6. Cálculo de los incrementos de deformación en las partículas numéricas.
7. Actualización de la posición de las partículas numéricas.
8. Cálculo de variables acumuladas de interés asignadas a las partículas numéricas. (desplazamiento y deformación)
9. Regreso al paso 4 para iniciar un nuevo paso de tiempo.

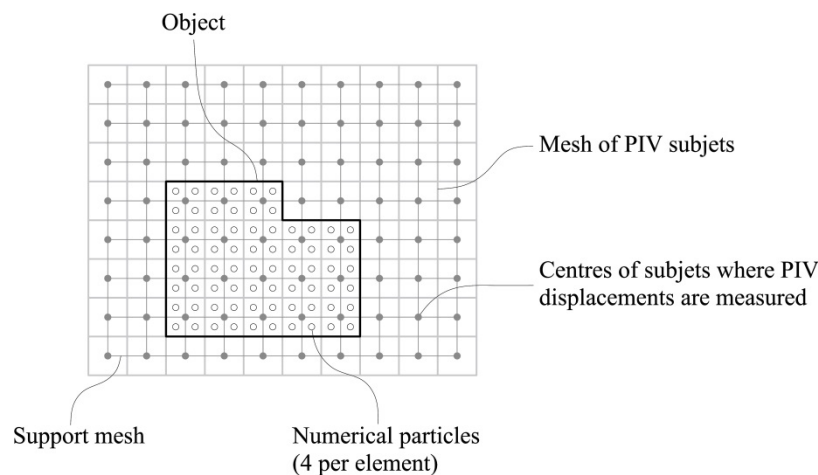


Fig. 1. Esquema de trabajo metodología PIV-NP

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se presenta en este apartado la aplicación de la técnica PIV-NP para la interpretación de un ensayo en centrífuga. El ensayo se ha llevado a cabo en la centrífuga del laboratorio de geotecnia de la universidad de los Andes en Bogotá (Colombia) (Fig. 2a). El prototipo del talud fue construido en una caja transparente como se muestra en la Fig. 2b para poder capturar en imágenes el ensayo y procesarlas mediante la técnica PIV. Las dimensiones del talud se indican en la figura. Su inclinación es de 50° . El suelo empleado es una arcilla limosa de baja plasticidad ($w_L=33\%$, $IP=18\%$), usada en la construcción del núcleo de una presa de tierras (Represa Albagés, España). Inicialmente el suelo mostraba un contenido medio de agua del 10% y densidad seca de 1.5 kg/m^3 (índice de poros de 0.8). En vuelo se incrementa la gravedad hasta llega a 50g, que corresponde a un incremento en la escala del prototipo igual a 50 veces, por lo tanto, los 15cm de altura del talud equivalen a 7.5m. Durante el vuelo se impone un flujo de agua desde la base. Para facilitar la entrada de agua, se construyó una columna de grava al lado derecho del talud.

El ensayo fue grabado mediante la captura de imágenes con una frecuencia de 60 capturas por segundo (fps) con una cámara digital GoPro con 1440 pixeles de resolución. Las imágenes fueron analizadas usando el software libre PIVLab (Thielicke et al., 2014).

Mediante el análisis de los desplazamientos de medidos mediante PIV y procesados siguiendo el procedimiento PIV-NP, se ha podido observar el asiento del talud durante la etapa inicial cuando la gravedad se incrementa. En la segunda etapa de mojado, el agua sube a través del suelo y la columna de grava. Este humedecimiento induce asentamiento del talud debidos al colapso del suelo por pérdida de succión. Finalmente, en cierto momento, se observa la rotura del talud que finalmente alcanza equilibrio con una inclinación de 28° .

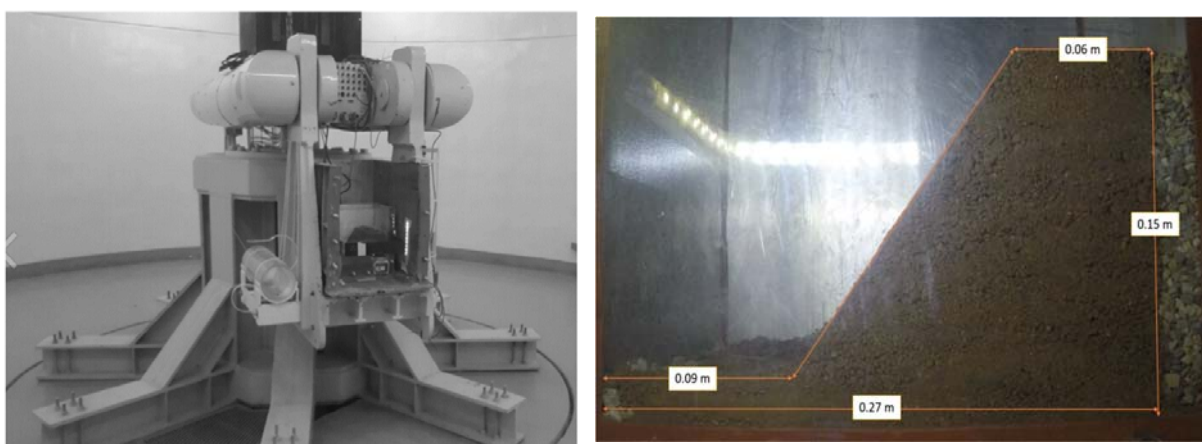


Fig. 2. (a) Máquina centrífuga; (b) Talud de arena construido en caja transparente.

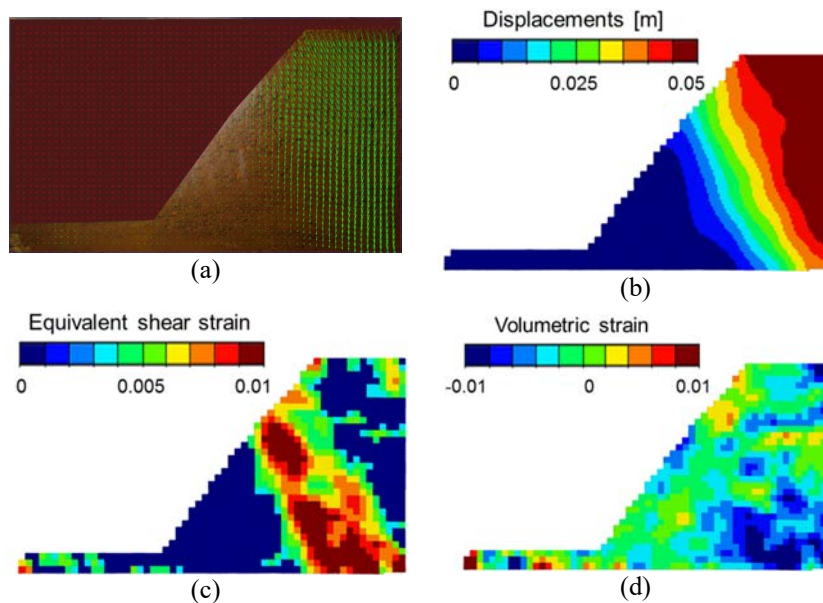


Fig. 3. Medidas al final del incremento de gravedad ($t = 10s$). (a) Vectores PIV de incrementos de desplazamiento (0.2s); (b) Desplazamientos acumulados obtenidos con PIV-NP; (c) Deformación de corte equivalente acumulada; (d) Deformación volumétrica acumulada.

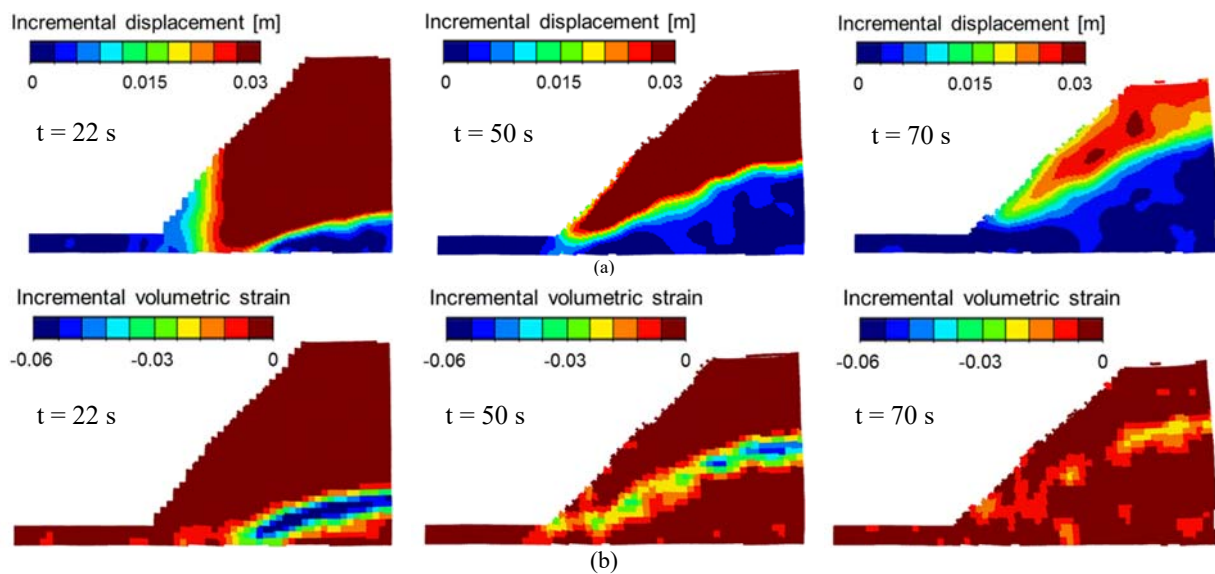


Fig. 4. Fase de mojado. (a) Incrementos de desplazamientos y (b) incrementos de deformación volumétrica a distintos tiempos indicados en la figura.

Se han podido identificar tres etapas. Primero, el talud se asienta debido al incremento en la gravedad. La Fig. 3 muestra los desplazamientos y deformaciones ocurridos al final de esta etapa de carga. Los vectores de incrementos de desplazamientos medidos comparando dos imágenes consecutivas al final de esta primera etapa se muestran en la Fig. 3a. Los

desplazamientos acumulados obtenidos mediante PIV-NP se grafican en la Fig. 3b. Los desplazamientos son mayores en la zona donde el talud es más alto, con un desplazamiento máximo de 5 cm. Debido a esta diferencia de asentamientos entre la corona y el pie del talud, se genera una zona de corte en el medio del talud (Fig. 3c). Las máximas deformaciones volumétricas se observan en la zona más profunda del talud, donde las tensiones alcanzan los máximos valores.

En la segunda etapa, la etapa de mojado, además del flujo vertical de agua, también hay flujo horizontal a través de la columna de grava ubicada a la derecha del talud que facilita la rápida saturación del talud. La evolución del frente húmedo en el suelo se puede distinguir fácilmente debido al cambio en el color del suelo entre el estado saturado y no saturado. Las deformaciones en el talud debidas a esta etapa de humedecimiento se muestran en la Fig. 4. La deformación por compresión volumétrica debida al colapso del suelo se concentra en el frente de humedecimiento. Los desplazamientos se producen principalmente por encima de este frente de humedecimiento donde el suelo se asienta como un bloque rígido.

Finalmente, el mojado produce rotura del talud (Fig. 5) debido a la pérdida de succión y disminución de los esfuerzos efectivos. En esta etapa, deformaciones por colapso y deformaciones de corte ocurren al mismo tiempo. La deformaciones de corte se concentran en el frente de humedecimiento y en cierto momento ($t = 140s$) se puede observar un deslizamiento superficial.

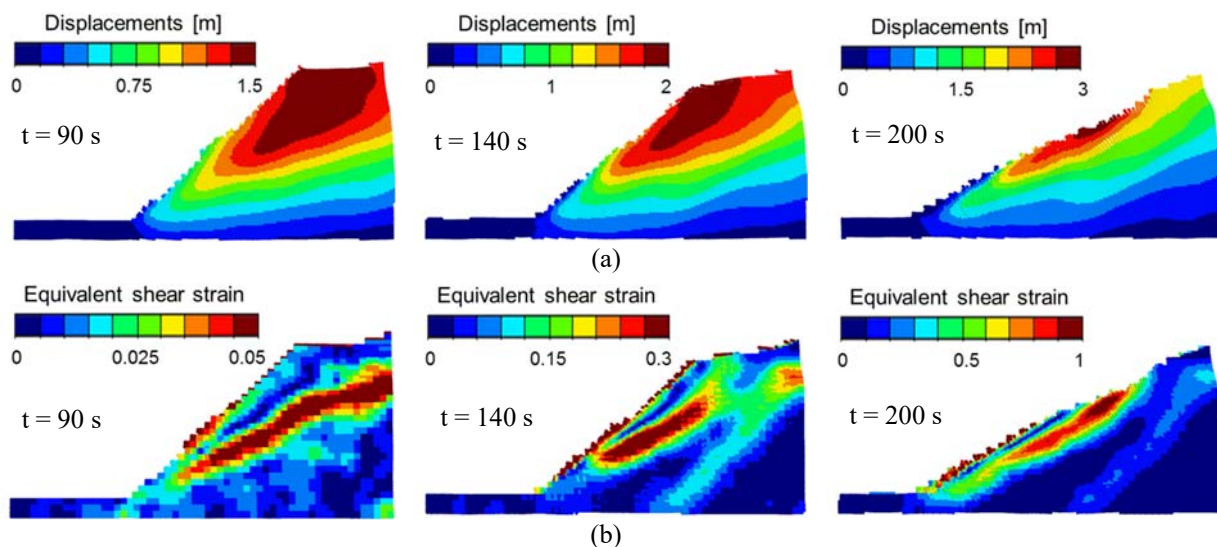


Fig. 5. Etapa de rotura. (a) desplazamientos acumulados y (b) deformación de corte equivalente a distintos tiempos indicados en la figura.

12. CONCLUSIONES

Este artículo describe un procedimiento de interpretación de medidas de desplazamiento obtenidos mediante la técnica PIV. La metodología, especialmente adecuada para la

interpretación de grandes desplazamientos, consiste en transformar los incrementos de desplazamientos obtenidos en puntos fijos en el espacio a puntos móviles que representan partículas reales del objeto en movimiento.

El método puede ser usado de forma complementaria a los programas de la técnica PIV actualmente disponibles. En este artículo el procedimiento se ilustra con el análisis de un talud a escala construido en una maquina centrífuga durante el cual se induce el colapso y rotura por mojado. La geometría obtenida del PIV-NP durante todo el ensayo es remarcablemente similar a las fotografías tomadas. El ejemplo ilustra la evolución de desplazamientos, velocidades y deformaciones de puntos analizados sobre el suelo que desliza. La información detallada que provee este ensayo constituye un caso interesante para verificar las capacidades de los modelos disponibles para el análisis de deslizamientos en suelo no saturado sujeto a humedecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento recibido a través del CIMNE por el CERCA Programme/Generalitat de Catalunya y al Gobierno de España por las ayudas BES-2014-068284 y IJCI-2015-26342 al primer y tercer autor respectivamente.

REFERENCIAS

- Adrian RJ. 1991. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics* 23, 261–304.
- Niedostatkiewicz M. & Lesniewska D & Tejchman J 2011. Experimental analysis of shear zone patterns in sand for earth pressure problems using particle image velocimetry. *Strain* 47(s2):218–231.
- Pinyol N & Alvarado M. 2017. Novel PIV-based analysis for large strains. *Canadian Geotechnical Journal*. (2017. DOI: 10.1139/cgj-2016-0327)
- Senatore, C. & Wulfmeier, M. & Vlahinić, I. & Andrade, J. & Iagnemma, K. 2013. Design and implementation of a particle image velocimetry method for analysis of running gear-soil interaction. *Journal of Terramechanics*, 50(5-6), 311–326.
- Take WA. 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique* 53(7), 619–631.
- Take WA. 2015. Thirty-Sixth Canadian Geotechnical Colloquium: Advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation. *Canadian Geotechnical Journal* 52(9), 1199–1220.
- Thielicke W & Stamhuis EJ. 2014. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software* 2(1): 24-30.
- White, D. J. & Bolton, M. D. 2004. Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand, *Geotechnique* 54, No. 6, 375–397.
- Zienkiewicz, O.C. 1989. The finite element method. Vol. 1. Basic formulation and linear problems. McGraw-Hill, London.