

MANEJO DE ELEMENTOS FINITOS PARA MODELAR ESTRUCTURAS DE PAVIEMTO EN O CERCA DE LA FALLA USANDO UN MÉTODO DE MÓDULO VOLUMÉTRICO CONSTANTE¹

Carlos R. González² y Mariely Mejías Santiago³

Resumen: Hoy día se requiere que ingenieros militares implementen metodologías de diseño capaces de predecir el rendimiento de los pavimentos basado en información de campo limitada. Investigadores del U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) han desarrollado un método de modelaje simplificado, el cual se ha implementado en los criterios de diseño. En este método se asume que los materiales mantienen un módulo volumétrico constante mientras que el módulo de elasticidad y la razón de Poisson varían a medida que el elemento se aproxima a la falla. Estas suposiciones previenen el colapso de los elementos a medida que se aproximan a la falla, forzando al material a fallar en cortante. Este artículo resume el método técnico, incluyendo la validación del procedimiento usando simulaciones de pruebas de laboratorio conducidas en materiales de pavimento y pruebas de campo conducidas en secciones de pavimentos de aeropuertos de escala real. Las predicciones de rendimiento de pavimentos usando este método proveyeron una conformidad razonable con los esfuerzos observados bajo cargas de aviones en el campo. Basado en los resultados de este estudio, este método será utilizado para desarrollar criterios nuevos de diseño de pavimentos militares.

Palabras clave: aeropuertos, ERDC, fallas, método de módulo volumétrico constante, pavimentos.

USE OF FINITE ELEMENTS TO MODEL PAVEMENT STRUCTURES IN OR NEARBY A FAILURE USING A CONSTANT VOLUMETRIC MODULE METHOD

Abstract: Currently, military engineers are required to implement design methodologies able to predict pavement performance based on limited field data. Researchers at the U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) have developed a simplified modeling method, which has been implemented in the design criteria. This method assumes that the materials maintain a constant volumetric module while the modulus of elasticity and Poisson's ratio vary as the element approaches failure. These assumptions prevent collapse of the elements as they approach the fault, forcing the material to fail in shear. This article summarizes the technical approach, including the validation of the method using simulations of laboratory tests conducted on pavement materials and field trials conducted on full scale airport pavement sections. The pavement performance predictions using this method provided a reasonable conformity with the observed efforts under aircraft loads in the field. Based on the results of this study, this method will be used to develop new criteria of military pavement design.

Key words: airports, constant volumetric module method, ERDC, failure, pavements.

¹ Artículo recibido el 15 de noviembre de 2012 y aceptado para publicación el 20 de diciembre de 2012.

² Ingeniero Civil de Investigación, Rama de Aeropuertos y Pavimentos, Laboratorio de Geotecnia y Estructuras, Centro de Ingenieros de Investigación y Desarrollo de la Armada de los EE. UU., 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 39180. E-mail: carlos.r.gonzalez@erdc.usace.army.mil

³ Ingeniero Civil de Investigación, Rama de Aeropuertos y Pavimentos, Laboratorio de Geotecnia y Estructuras, Centro de Ingenieros de Investigación y Desarrollo de la Armada de los EE. UU., 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 39180. E-mail: mariely.mejias@erdc.dren.mil

INTRODUCCIÓN

El diseño y la evaluación de estructuras de pavimentos en aeropuertos militares envuelven retos especiales para los ingenieros de pavimentos. Muchas veces solo data limitada de la resistencia de los suelos y del pavimento está disponible y otras veces es difícil de obtener. Mientras que la implementación de procesos analíticos más rigurosos han sido estimulados en la comunidad de pavimentos, los soldados en el campo aún confrontan limitaciones para coleccionar la data apropiada para poder usar estos métodos. Por lo tanto, los procedimientos analíticos mecánicos siempre deben considerar la calidad de la información que el soldado puede proveer. Por esta razón, el U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) está actualmente buscando maneras para simplificar métodos de modelaje que provean respuestas razonables con data limitada, en particular procedimientos de elementos finitos simplificados que puedan proveer mejores predicciones que las que provee el método estándar de elasticidad por capas.

Hay muchas maneras de analizar estructuras de pavimentos usando el método de elementos finitos. La más rigurosa es usando un análisis tridimensional, dinámico y no-lineal de elementos finitos (Kim, 2007). Usando este método, se podría modelar realísticamente la geometría del pavimento y los efectos en el mismo de una llanta de avión en movimiento. Sin embargo, los requerimientos de computadora para ese tipo de análisis, las complicaciones para desarrollar las mallas tridimensionales, y la reducción, análisis e interpretación de la data computada hace este método muchas veces impráctico para diseño de pavimento rutinario. Una forma simple y que provee resultados razonables es haciendo el análisis usando llantas individuales. En este caso se hace un análisis de elementos finitos no-lineal axi-simétrico de una carga de llanta estática. Es importante mencionar que el uso de análisis estáticos para evaluar los efectos de la carga de una llanta individual en movimiento sobre una estructura de pavimento sólo provee una tendencia del comportamiento del pavimento. Cuando se trata de relacionar un parámetro de respuesta computado al desempeño del pavimento (en términos de pasadas para fallar) usando métodos estáticos, el parámetro de respuesta tiene que ser usado como un índice del desempeño real del pavimento el cual se obtiene en experimentos a escala real. No obstante, usualmente se obtienen buenas correlaciones y en el pasado se han logrado predicciones razonables del desempeño del pavimento (Lytton et al., 1993; Von Quintus, 1994).

El problema de manejar la falla a medida que el material comienza a fallar en corte es de gran importancia y es difícil de manejar. Este artículo presenta una técnica que ha sido implementada en ERDC en un programa de elementos finitos axisimétrico para manejar la falla a medida que los materiales se acercan. Usualmente se asigna un módulo de elasticidad mínimo a los materiales para prevenir el colapso del elemento finito. Sin embargo, el método presentado en este artículo se enfoca en asumir que el módulo volumétrico del material se mantiene constante a lo largo de su historia de esfuerzos, y la razón de Poisson se recalcula o se ajusta, esencialmente para forzar al elemento a fallar en corte y prevenir que colapse. Se usaron las propiedades básicas de suelo determinadas por pruebas de laboratorio para los materiales de la subrasante, base subyacente y base para establecer las propiedades fundamentales de los materiales. Estas propiedades fueron incorporadas a un modelo de suelo para hacer predicciones de pruebas triaxiales de laboratorio y de pruebas de campo de California Bearing Ratio (CBR). El modelo también se utilizó para hacer predicciones de cargas reales de aviones en una sección de pavimento experimental a escala real que fue construida en ERDC.

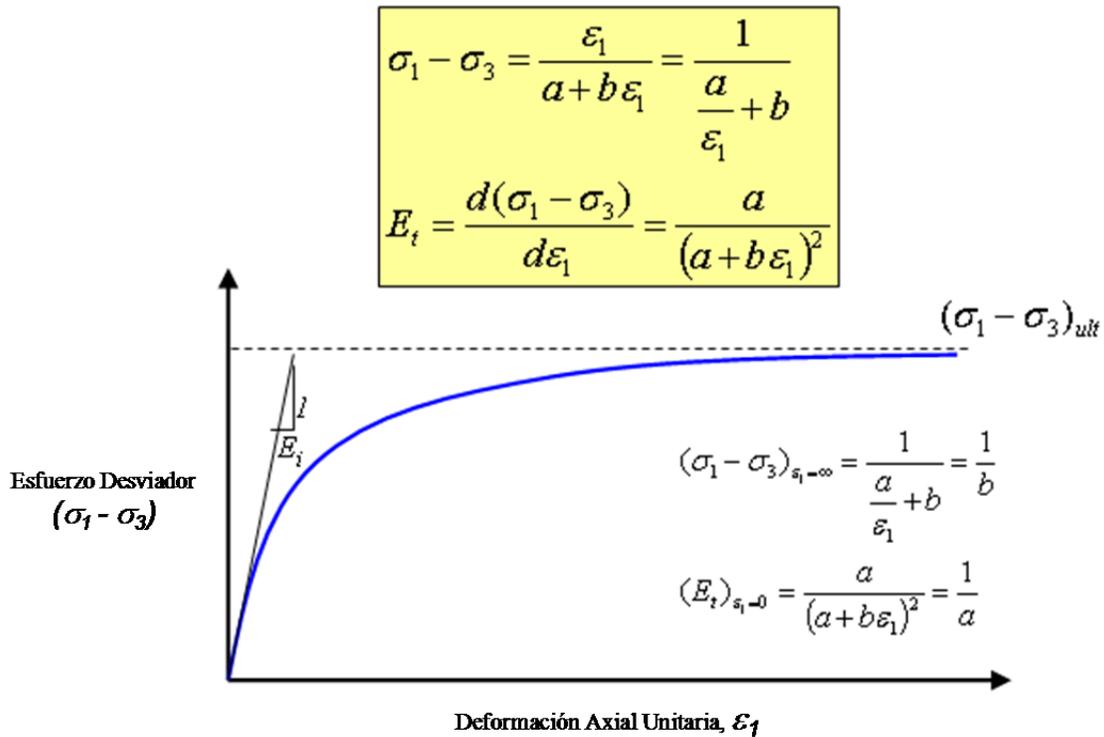
Los resultados de estos análisis mostraron un gran potencial para la implementación de procedimientos de análisis mecánico-empíricos para el diseño y la evaluación de pavimentos.

MODELO HIPERBÓLICO NO-LINEAL

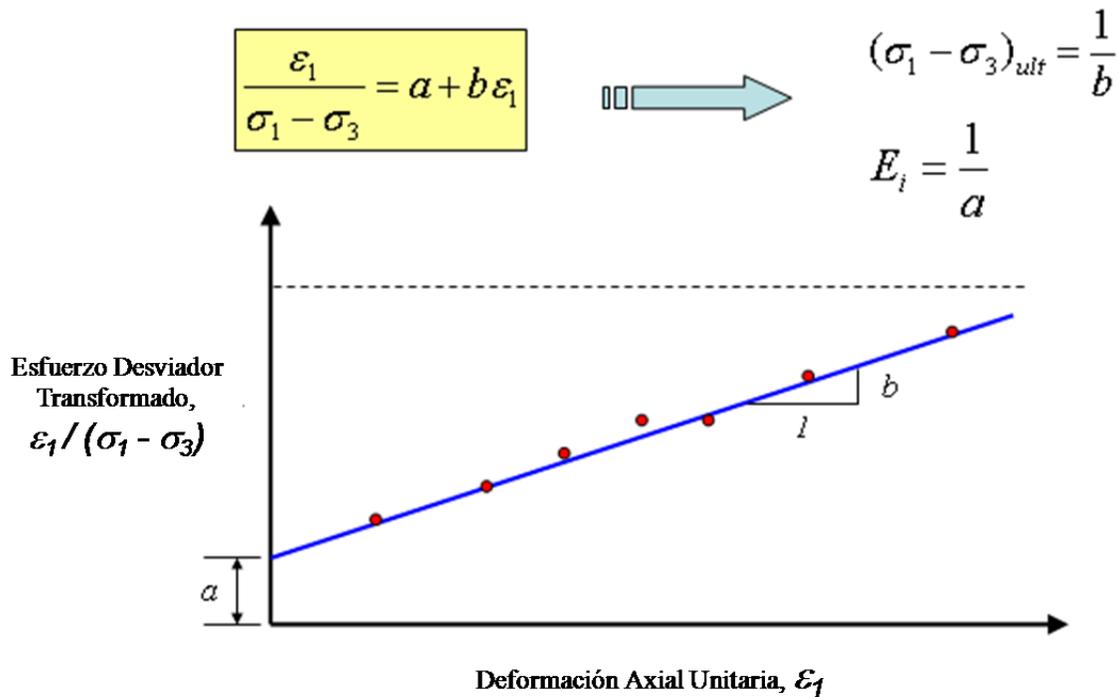
El modelo no-lineal seleccionado para este estudio fue un modelo de suelo hiperbólico (Kulhawy et al., 1969). La forma no-lineal de las curvas de esfuerzo-deformación fue representada por una hipérbola de la forma:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon_1}{(a+b\varepsilon_1)} \quad (1)$$

donde, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ es la diferencia en esfuerzos principales, ε_1 es la deformación axial, y a y b son parámetros para los cuales los valores son determinados experimentalmente. La Figura 1 muestra la representación gráfica de este modelo. De la Figura 1a se puede observar que estos parámetros son el recíproco de la pendiente inicial (módulo tangencial inicial) y la asíntota de la curva de esfuerzo-deformación.



a) Forma básica



b) Forma transformada

Figura 1: Modelo de suelo hiperbólico no-lineal. a) Forma básica; b) Forma transformada.

Para determinar los parámetros a y b , la ecuación (1) se transforma a lineal con la siguiente expresión:

$$\frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b \quad (2)$$

Los parámetros a y b pueden ser determinados usando el intercepto (módulo tangencial inicial) y la pendiente de la línea (diferencia en esfuerzos últimos), respectivamente, de una prueba de compresión triaxial.

El valor de la diferencia en esfuerzos asíntóticos $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$, es siempre mayor que la resistencia en compresión del suelo en falla, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$. La relación entre estos dos parámetros se llama “razón de falla” y se expresa de la siguiente forma:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (3)$$

Las razones de falla, R_f , las cuales son medidas de cuán cerca la forma de la curva de esfuerzo-deformación puede aproximarse con una hipérbola, se han encontrado que tienen un rango de valores entre 0.5 y 1.0 para una variedad de suelos. La variación del módulo tangencial inicial debido a la presión de confinamiento puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$E_i = K \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (4)$$

donde, E_i es el módulo tangencial inicial, σ_3 es el esfuerzo principal menor, p_a es la presión atmosférica (o una presión de referencia), K es un número de módulo, y n es un exponente que determina la razón de variación de E_i con σ_3 . En análisis de elementos finitos no-lineales es necesario saber el valor del módulo tangencial en varios puntos de la curva de esfuerzo-deformación debido a que requieren análisis de esfuerzos incrementales para obtener resultados confiables. Las ecuaciones (3) y (4) se combinan con el criterio de falla Mohr-Coulomb para obtener la siguiente ecuación:

$$E_i = \left[1 - \frac{R_f \cdot (1 - \sin \phi) \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cdot c \cdot \cos \phi + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin \phi} \right]^2 \cdot K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (5)$$

donde, c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

La ecuación (5) fue usada en este estudio para determinar el valor del módulo tangencial en cualquier punto en la curva de esfuerzo-deformación y por ende representa la no-linealidad de los materiales. Una explicación más detallada del modelo hiperbólico puede ser encontrada en Kulhawy, et al. (1969). Debido a que este es un modelo constitutivo elástico incremental, los valores iniciales de la razón de Poisson fueron asumidos y luego fueron computados basado en el estado de esfuerzos en cada punto. Para esto se asumió que no hay cambio volumétrico durante la aplicación de carga (indicado por un módulo volumétrico constante). Para arcillas de alta plasticidad saturadas y para suelos granulares bien compactados, es razonable asumir esto. El módulo volumétrico constante inicial, \bar{B} se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{B} = \frac{E_i}{3(1 - 2\nu_i)} \quad (6)$$

donde ν_i es la razón de Poisson inicial. A medida que se aplica la carga, y el material se mueve a lo largo de la curva de esfuerzo-deformación (Figura 2), la razón de Poisson instantánea se recalcula usando la ecuación:

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_t}{3\bar{B}} \right) \quad (7)$$

Este proceso de modelaje en esencia previene que los elementos finitos que representan el suelo colapsen cuando el módulo de elasticidad disminuye a valores pequeños y fuerza al material a “fallar” en cortante. Este dato es

ilustrado en la Figura 3. A medida que el módulo de elasticidad disminuye la razón de Poisson se acerca a 0.5, lo cual hace el material incompresible, y el modulo volumétrico en cortante disminuye, lo cual hace que el material falle en cortante. En resumen, cinco parámetros (K , n , c , ϕ y R_f) se utilizan en conjunto con la ecuación (5) y son implementados en un programa de computadora de elementos finitos axisimétrico para modelar materiales de pavimentos.

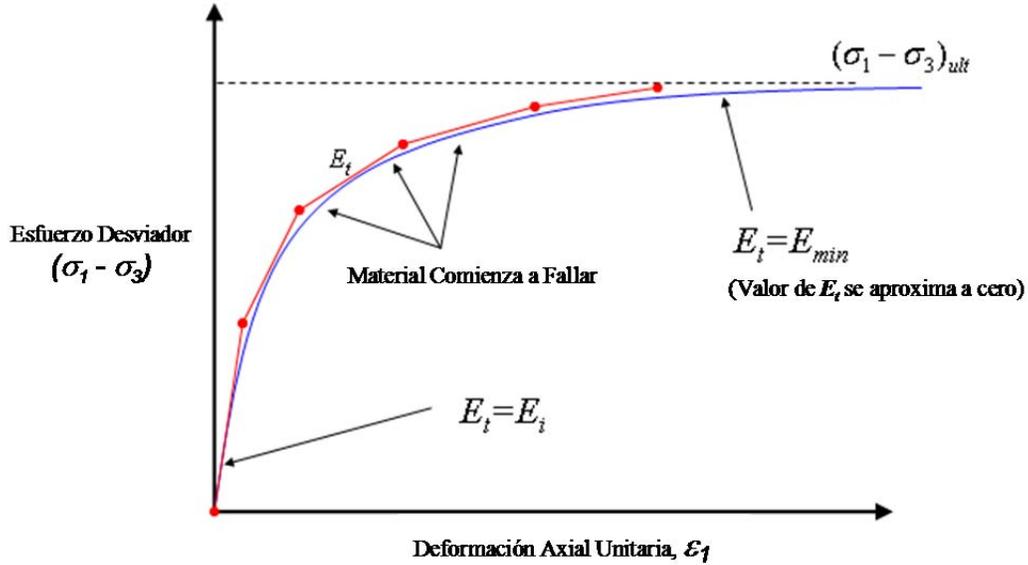


Figura 2: Cambio en modulo instantáneo a lo largo de la curva de esfuerzo-deformación.

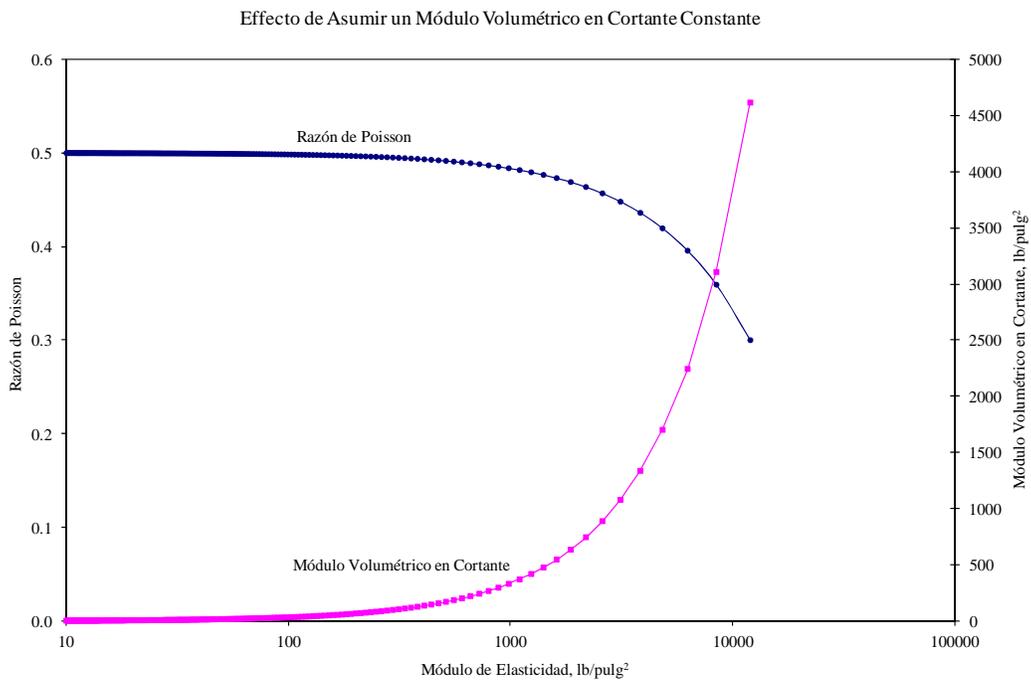


Figura 3: Relación entre el modulo de elasticidad, la razón de Poisson y el modulo de cortante para un módulo volumétrico constante.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Pruebas triaxiales fueron llevadas a cabo en ERDC para establecer los cinco parámetros (K , n , c , ϕ y R_f) usados para modelar el comportamiento no-lineal de las estructuras de pavimento evaluadas en este estudio. Las pruebas triaxiales fueron conducidas a una razón constante de deformación de 1% por minuto a tres distintas presiones de confinamiento $\sigma_3 = 5, 15$ y 30 lb/pulg²). Tres materiales que representaron la subrasante, base subyacente y base fueron probados bajo las condiciones de contenido de humedad y densidad que fueron medidas durante la construcción de secciones de pavimento construidas en ERDC.

Las subrasante usada en ERDC era una arcilla de alta plasticidad (CH), clasificada usando el Unified Soil Classification System (USCS) (U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1960). Esta arcilla también es conocida en Mississippi como "Vicksburg Buckshot Clay." Para la subrasante en las secciones de prueba se utilizaron tres distintos California Bearing Ratios (CBR): 4, 10, y 15. Los contenidos de humedad correspondientes a estos valores de CBR fueron 34%, 30%, y 27%. El ángulo de fricción interna se determinó que era cero ($\phi = 0$). Los resultados de las pruebas triaxiales se muestran en la Figura 4, la cual incluye la transformación hiperbólica correspondiente. La data de laboratorio del suelo de la subrasante mostró una excelente correlación y se ajustó muy bien al modelo de suelo hiperbólico para valores de deformación desde 0.5% hasta 3%. Estos valores de deformación aplican a la mayoría de los pavimentos con cargas de aviones.

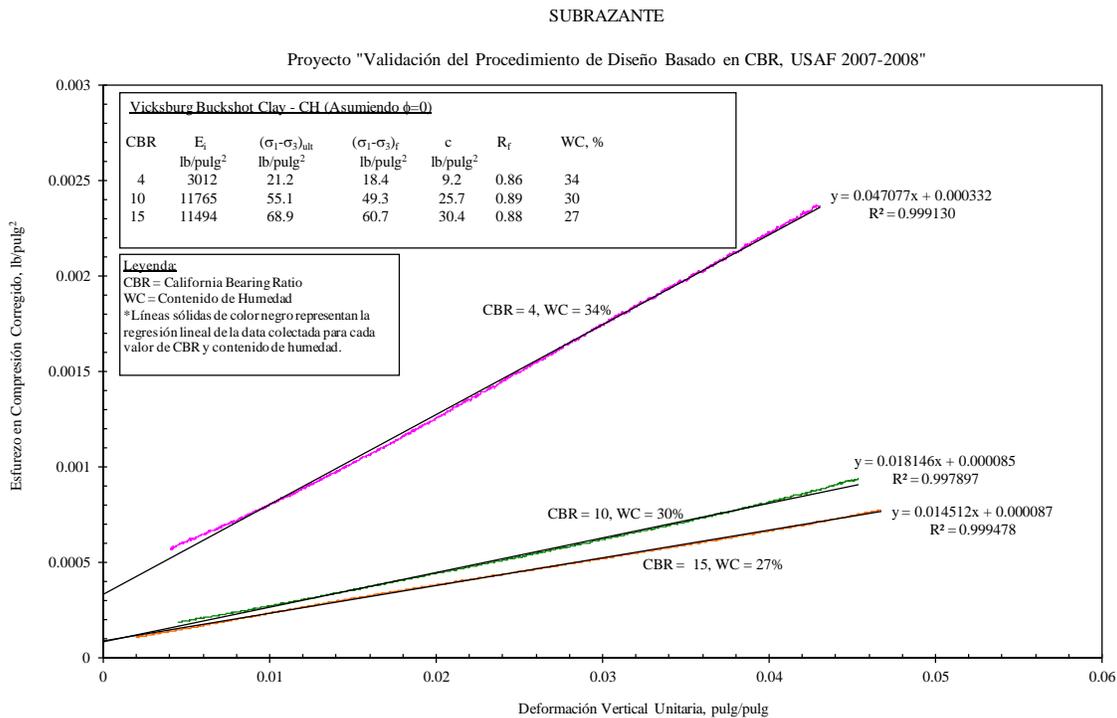


Figura 4: Transformación hiperbólica lineal del material de la subrasante (arcilla de alta plasticidad "Vicksburg Buckshot").

La base subyacente se componía de un 67% por peso de grava triturada y un 33% por peso de polvo de piedra caliza. Esta composición resultó en una gradación con un ángulo de fricción interna de 48 grados y una cohesión de 8 lb/pulg². El contenido de humedad para la base en las secciones de prueba varió de 3% a 4% y la densidad seca máxima era aproximadamente 125 lb/pie³. Los resultados de la aproximación hiperbólica se presentan en la Figura 5 y como la subrasante, también se ajustan muy bien al modelo en un rango de deformaciones desde 0.5% hasta 3%. Los resultados de pruebas triaxiales fueron también usados para establecer la correlación entre el módulo inicial y la presión de confinamiento como se demuestra en la Figura 6.

Similarmente las propiedades de la piedra caliza triturada usada para la base se muestran en las Figuras 7 y 8. El ángulo de fricción interna del suelo de la base se encontró que era 50 grados y la cohesión 7 lb/pulg². La densidad

seca máxima era aproximadamente 133 lb/ pie³. Este material mostró buena correlación con el modelo para un rango de deformaciones de 1% a 3%, pero se alejaba de la transformación de suelo lineal hiperbólica para deformaciones mayores de 3%. Sin embargo, la mayoría de las deformaciones que se han medido en el campo están entre el rango de 1% y 3%. Así que la aproximación hiperbólica se considero ser adecuada para el modelaje de elementos finitos simplificado usado en este estudio.

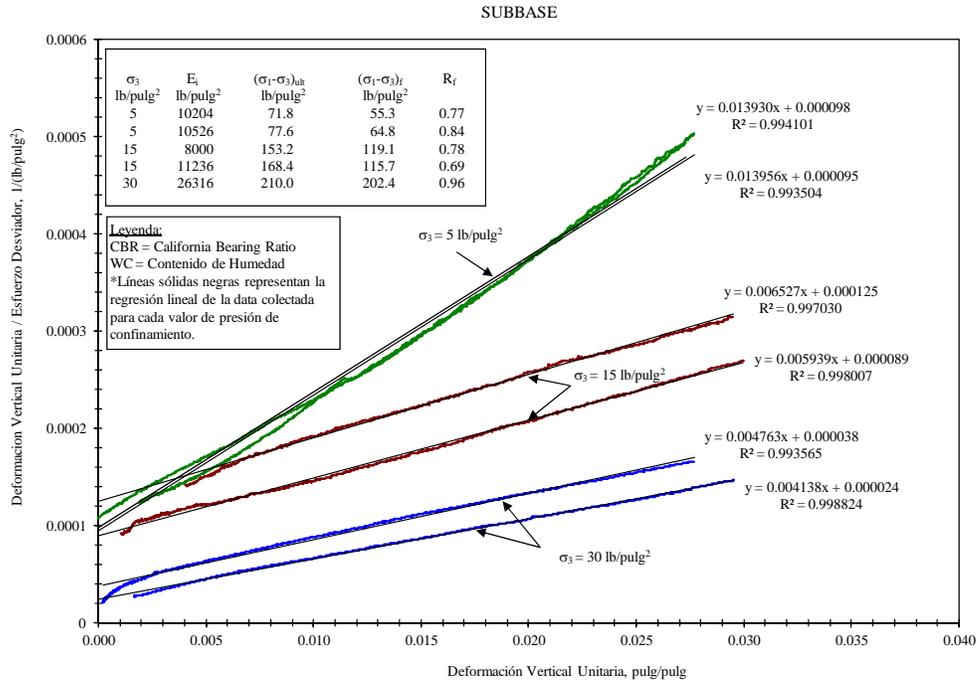


Figura 5: Transformación hiperbólica lineal de la base subyacente (grava triturada).

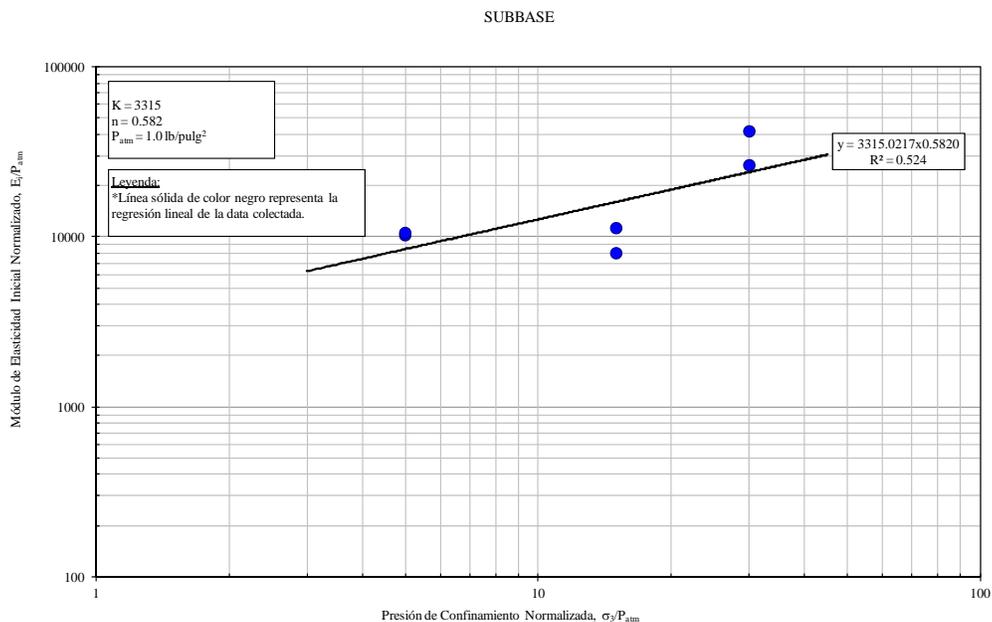


Figura 6: Módulo de elasticidad inicial versus presión de confinamiento para la grava triturada de la base subyacente.

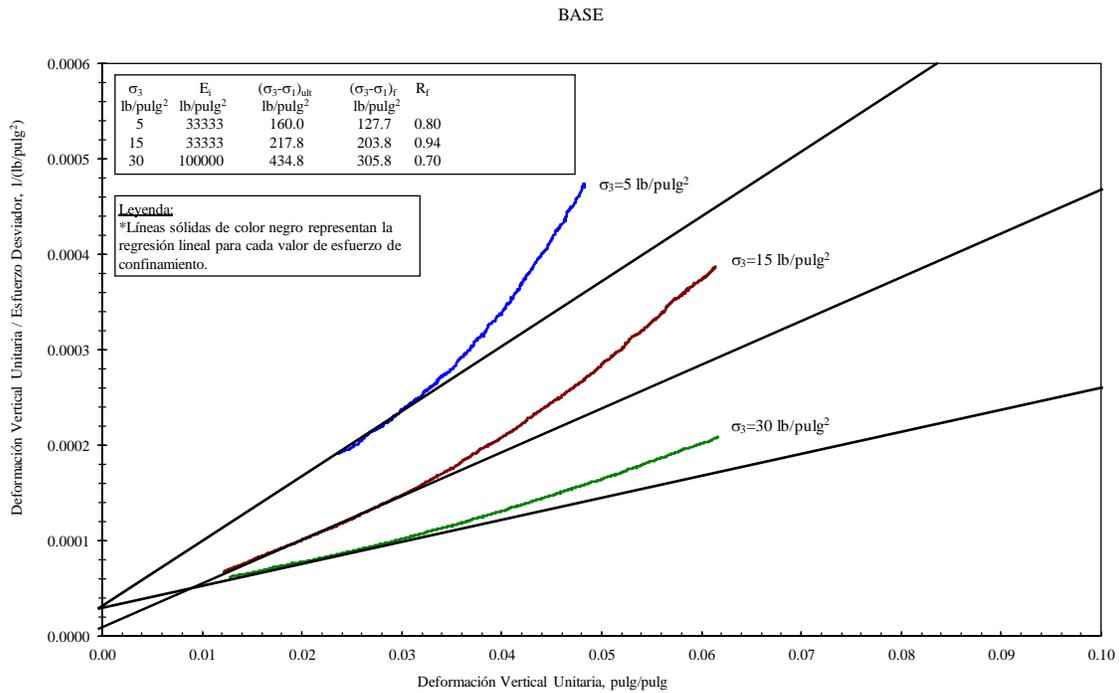


Figura 7: Transformación hiperbólica lineal de la piedra caliza triturada de la base.

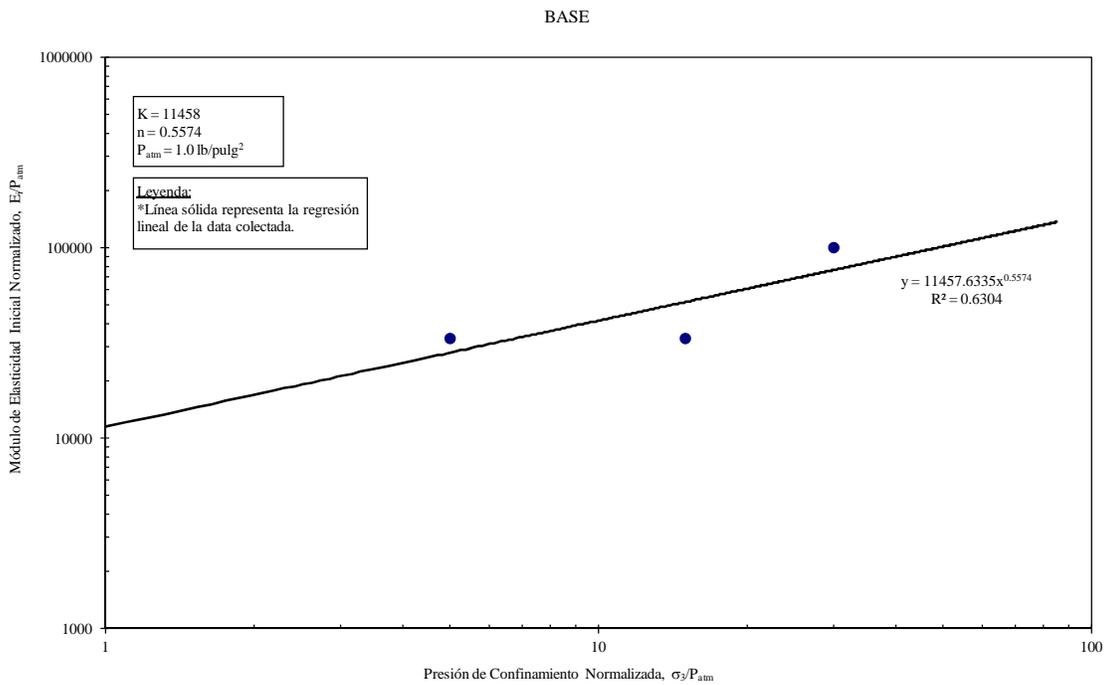


Figura 8: Módulo de elasticidad inicial versus presión de confinamiento para la piedra caliza de la base.

SIMULACIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIO

El primer paso para corroborar el método fue usar los datos de laboratorio de la subrasante, base subyacente y base para simular las pruebas triaxiales. Las curvas de esfuerzo-deformación predichas se compararon con las curvas obtenidas en las pruebas de laboratorio para determinar si es razonable asumir que el módulo volumétrico es constante. Para esto, se desarrolló un código de elementos finitos axisimétrico que implementa el modelo hiperbólico de suelo con la suposición de un módulo volumétrico constante. Este modelo fue seleccionado por ser un modelo sencillo y fácil de implementar y corroborar con elementos finitos.

La Figura 9 muestra una simulación de una prueba de compresión sin confinamiento de una arcilla de alta plasticidad con un CBR de 10. La curva simulada (línea entrecortada) se ajusta muy bien a los resultados de laboratorio con $R_f = 0.90$.

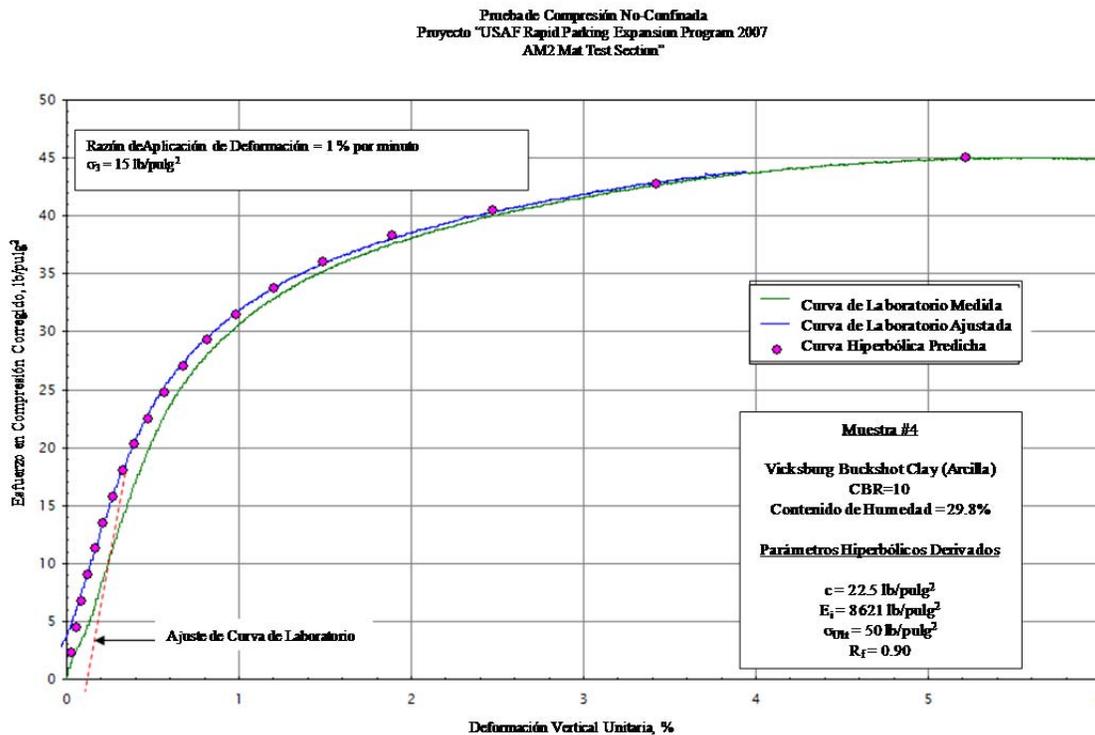


Figura 9: Simulaciones de las pruebas de compresión sin confinamiento en la subrasante.

La Figura 10 muestra simulaciones del material de la base subyacente a presiones de confinamiento de 5, 15 y 30 lb/pulg^2 . Se hicieron dos simulaciones a cada presión de confinamiento; en la primera se asumió una interface áspera (plato de carga rígido) entre el plato de carga de arriba y la muestra; y en la segunda se asumió una interface lisa (plato de carga flexible). Como se muestra en la Figura 10, las curvas de esfuerzo-deformación simuladas cruzan la data de laboratorio, pero las simulaciones usando la interface lisa están más cercanas a la data medida. Para poder modelar este caso más precisamente, el código de elementos finitos usado en este estudio tendría que ser modificado para incluir elementos de interface y asignar un valor apropiado de fricción entre el plato de carga y la muestra. Sin embargo, todavía se cree que los resultados representan razonablemente el comportamiento no-lineal del material de la base subyacente.

Estos resultados demuestran que el modelo hiperbólico y la suposición del módulo volumétrico constante pueden predecir razonablemente el comportamiento no-lineal de los materiales de pavimento estudiados.

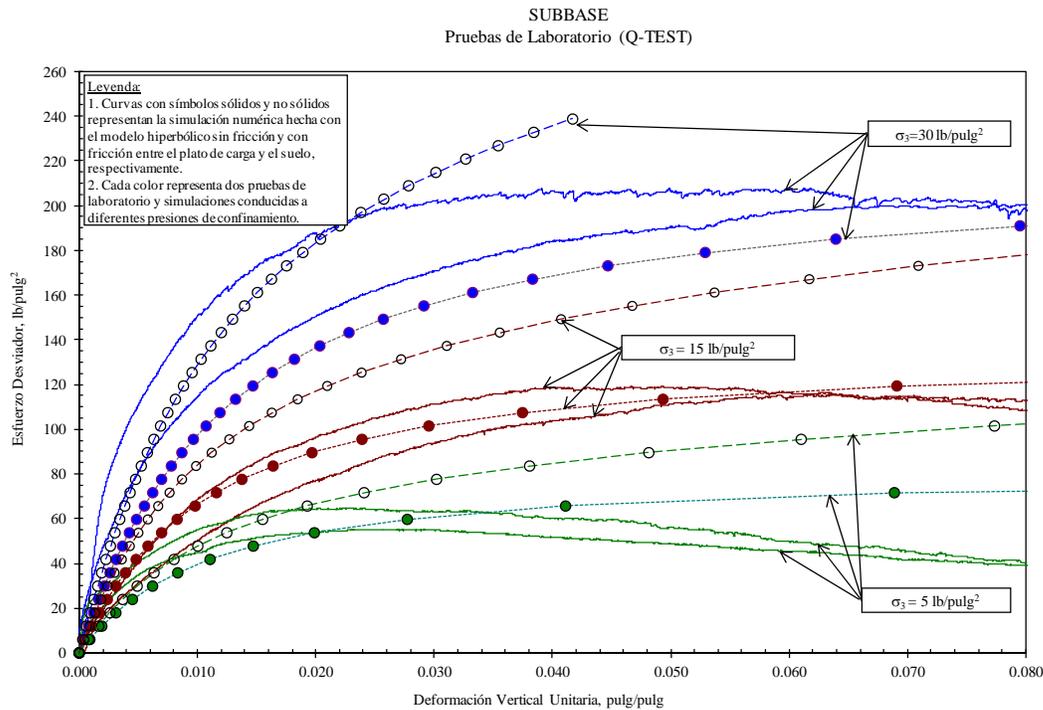


Figura 10: Simulación de las pruebas CBR de campo en la base subyacente.

SIMULACIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO

Los buenos resultados obtenidos de las simulaciones en muestras de laboratorio guiaron a extender la aplicación del modelo hiperbólico de suelo a modelaje de pruebas de CBR de campo. Las simulaciones de las pruebas CBR de campo se condujeron en la superficie de la subrasante, de la base subyacente y de la base en secciones de pavimento experimentales construidas en ERDC.

La Figura 11 muestra los resultados del modelaje de tres pruebas de campo de CBR en la superficie de una arcilla de alta plasticidad que se usó para un estudio de validación de la prueba de campo de CBR. Para las simulaciones se usaron dos valores de cohesión, los cuales fueron determinados en pruebas de laboratorio para la construcción de dos secciones de prueba en ERDC. Los resultados del modelaje muestran que las curvas de esfuerzo-deformación concuerdan con los resultados de campo. El caso de comportamiento lineal elástico se incluye también en la Figura 11 para comparación, y se puede notar cuán pobre el modelo lineal elástico predice el comportamiento de esfuerzo-deformación de la arcilla.

La Figura 12 muestra la simulación del perfil de deflexión en la superficie durante una prueba de campo de CBR en el material de la subrasante a medida que el pistón se carga más allá de la deflexión máxima especificada por la prueba. Se puede observar que el modelo hiperbólico en conjunto con la suposición de módulo volumétrico constante puede predecir la deformación de la superficie del suelo a medida que se va acercando a la falla en cortante.

La Figura 13 muestra los resultados del modelaje de las pruebas CBR de campo llevadas a cabo en la superficie de la base subyacente de grava triturada. En este caso, dos simulaciones fueron hechas, con y sin sobrecargas. Durante las pruebas CBR de campo los anillos de sobrecarga se añaden para incluir el efecto de la presión de sobrecarga ejercida por la base y la capa de asfalto que se esperan poner sobre la base subyacente. Se puede observar que la predicción es mucho mejor cuando se incluyen las sobrecargas. De nuevo, estas predicciones se consideran razonables y afirman la viabilidad de usar la suposición de módulo volumétrico constante en conjunto con un modelo hiperbólico de suelo para predecir el comportamiento del pavimento bajo cargas de aviones.

Pruebas de CBR de Campo
 CBR=10, Contenido de Humedad=30%
 Proyecto "USAF Rapid Parking Ramp Expansion Program 2007
 AM2 Mat Test Section"

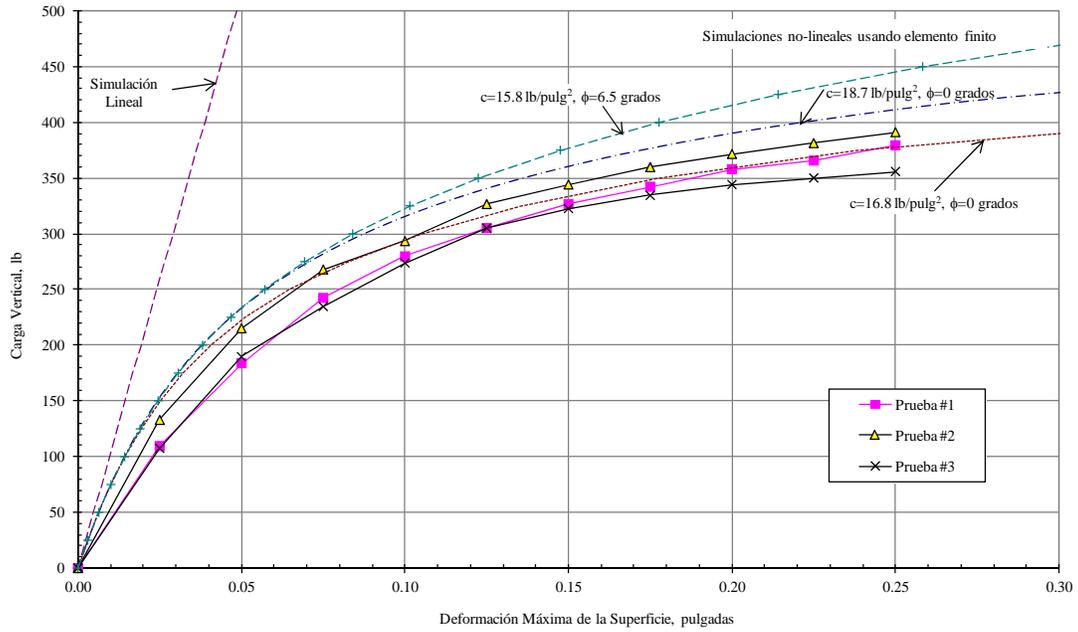


Figura 11: Simulación de las pruebas CBR de campo en la superficie de la subrasante.

Simulaciones de las Pruebas de CBR de Campo Usando Elemento Finito
 CBR=10, Contenido de Humedad=30%
 Proyecto "USAF Rapid Parking Ramp Expansion Program 2007
 AM2 Mat Test Section"

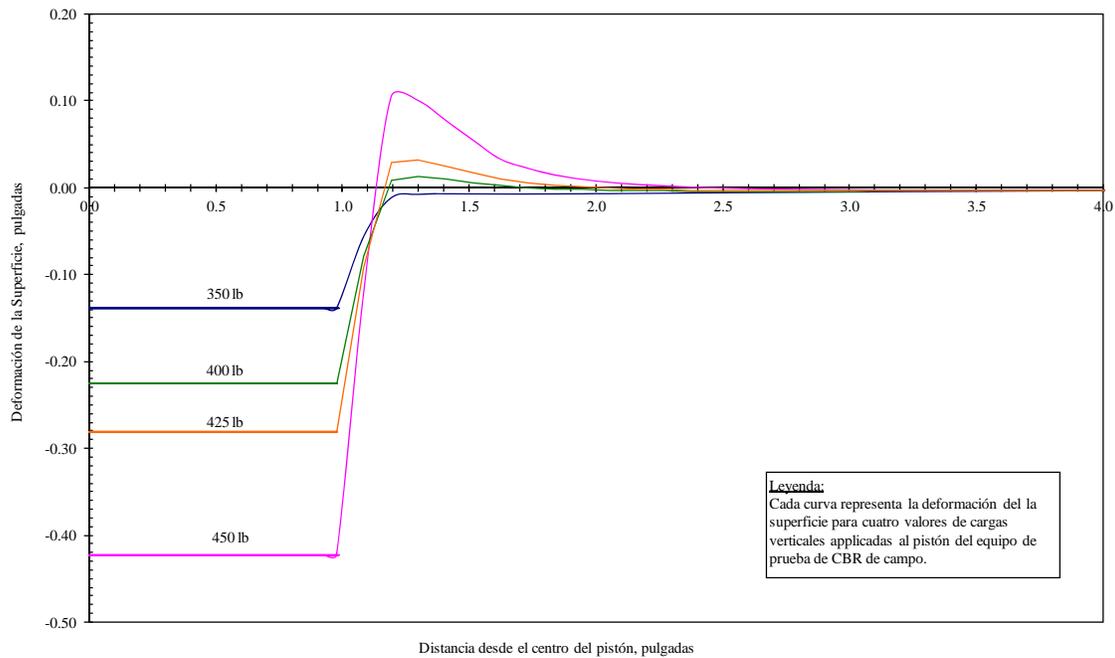


Figura 12: Perfil de superficie simulado de pruebas CBR de campo llevadas a cabo en la superficie de la subrasante.

Simulación de la Prueba de CBR de Campo
 Subbase - Grava Triturada+Polvo de Piedra Caliza
 Sección de Prueba Num 1

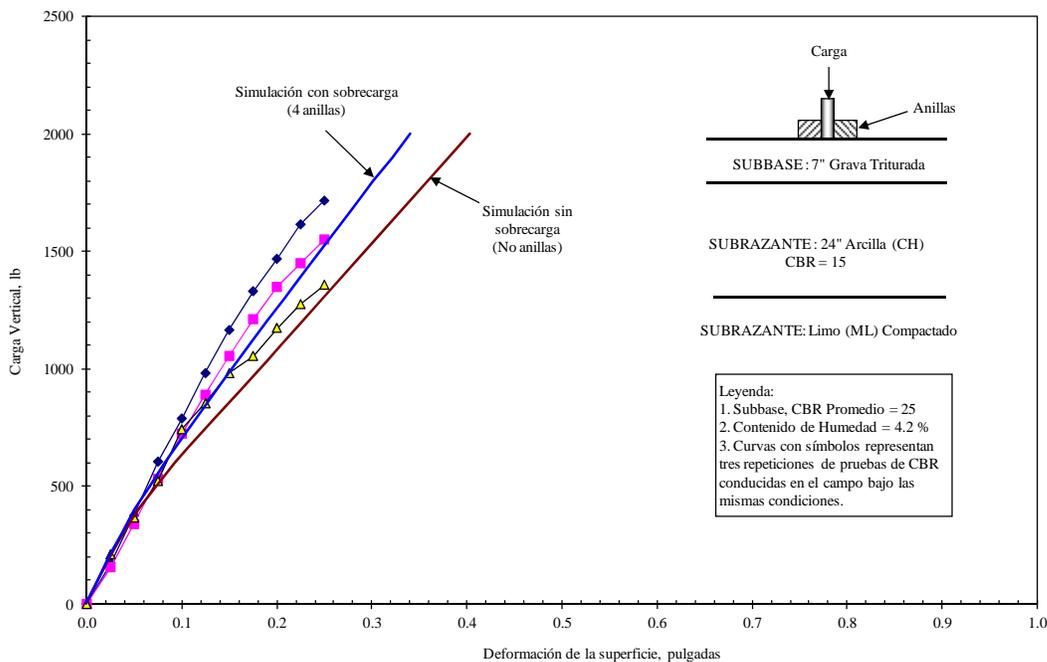


Figura 13: Simulación de pruebas CBR de campo conducidas en la superficie de la base subyacente.

PREDICCIÓN DE ESFUERZOS BAJO CARGAS DE AVIONES

Los resultados obtenidos del modelaje de pruebas triaxiales de laboratorio y de pruebas CBR de campo fueron extendidos mas allá hacia la predicción de los esfuerzos que ocurren en el pavimento bajo cargas de aviones a escala real. Se modelaron estructuras de pavimentos de las mismas secciones de prueba mencionadas anteriormente usando el modelo de suelo hiperbólico.

La Figura 14 muestra las lecturas de esfuerzo vertical medidas por celdas de presión de suelo (EPC por sus siglas en inglés), las cuales fueron instaladas en la base (EPC1) y en la subrasante (EPC2) a profundidades medidas desde la superficie del pavimento de 13 y 36 pulgadas, respectivamente. El pavimento fue cargado con una llanta de C-17 moviéndose lentamente (aprox. 2 mph) y con una carga de 34,000 lb. La celda EPC1 leyó una presión vertical de 80 lb/pulg² mientras que la EPC2 leyó una presión vertical de 20 lb/pulg². La estructura de pavimento ilustrada a la derecha de la Figura fue modelada usando la implementación en elementos finitos del modelo de suelo hiperbólico con el módulo volumétrico constante y usando los parámetros de suelos descritos anteriormente en este artículo.

Se hicieron dos simulaciones: una de ellas asumiendo que la capa de asfalto era lineal y elástica con módulos de elasticidad de 200,000 lb/pulg², y la segunda asumiendo que el asfalto se comporta como un material no lineal con un valor de $c = 20$ lb/pulg² y un $\phi = 45$ grados. En ambas simulaciones, la base, base subyacente y subrasante fueron simuladas con comportamiento no lineal. Estas simulaciones fueron hechas con los parámetros hiperbólicos no lineales obtenidos de las Figuras 4 a la 8.

Los resultados de estas simulaciones se presentan en la Figura 15 y se comparan con las mediciones de presión de campo (EPC1 y EPC2). Como se puede observar, los esfuerzos verticales simulados concuerdan con los medidos en el caso de la subrasante. Los esfuerzos fueron influenciados considerablemente por la forma en la que la capa de asfalto es modelada. Cuando el comportamiento del asfalto es modelado como lineal elástico, los esfuerzos verticales son subestimados por un 60%. Si la capa de asfalto es modelada como una base de alta calidad, el esfuerzo vertical se subestima por solo un 20%. Esto implica que se necesitan análisis más rigurosos de las propiedades del asfalto para poder modelar apropiadamente el impacto de la capa de asfalto en los esfuerzos verticales cerca de la superficie del pavimento.

Sin embargo, la habilidad del procedimiento analítico de elementos finitos descrito en este artículo para modelar pruebas de laboratorio y de campo, y así como también las buenas predicciones de esfuerzos en la subrasante obtenidas, muestran la viabilidad de este método para análisis de estructuras de pavimentos bajo cargas de aviones.

Prueba de Tráfico Lento (Velocidad = 2 millas por hora)
 Llanta del C17 cargada a 34,000 lb y 140 lb/pulg² de presión
 Lecturas de Presión para Carril de Prueba 1, Sección 4

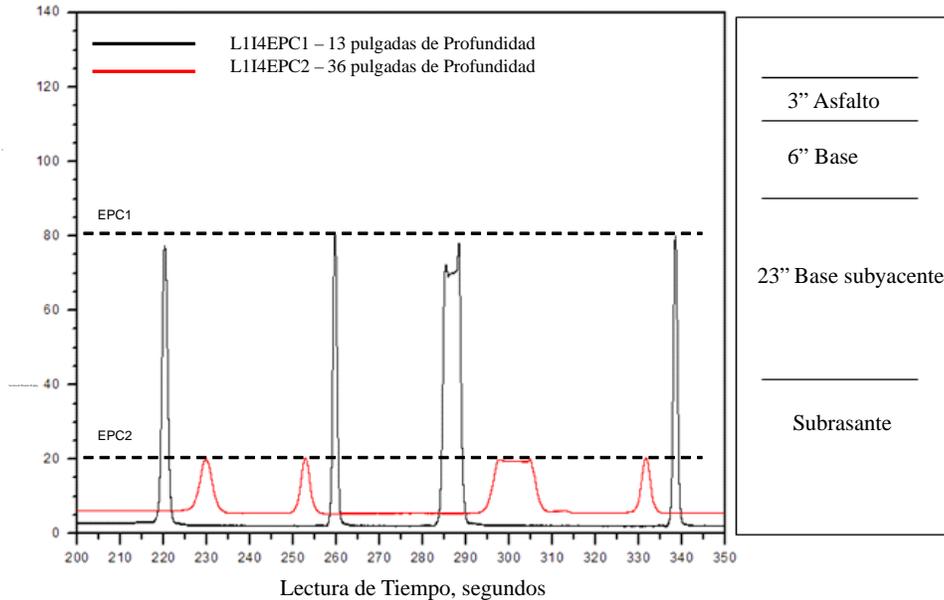


Figura 14: Lecturas de presión vertical de suelo en una sección de prueba.

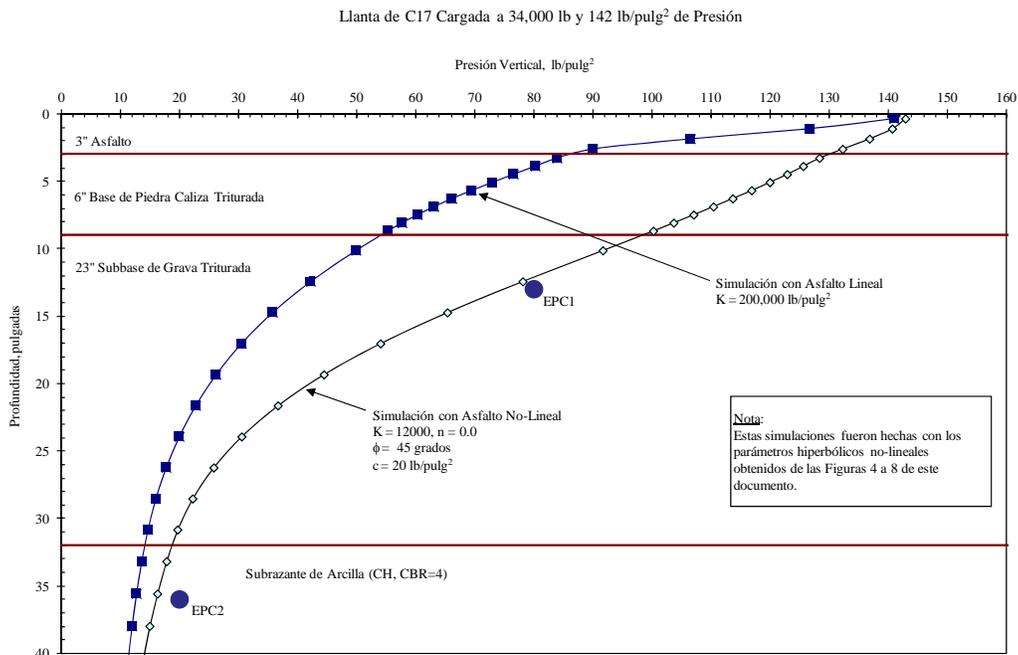


Figura 15: Comparación entre esfuerzos verticales medidos por las celdas de presión de suelo y los esfuerzos verticales modelados.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta un nuevo método implementado en ERDC para modelar materiales de pavimento. En este método se asume que los materiales mantienen un módulo volumétrico constante mientras que el módulo de elasticidad y la razón de Poisson varían a medida que el elemento se aproxima a la falla. Estas suposiciones previenen el colapso de los elementos a medida que se aproximan a la falla, forzando al material a fallar en cortante. Las simulaciones hechas usando este método fueron comparadas con resultados de pruebas triaxiales de laboratorio y pruebas CBR de campo. También se hicieron simulaciones para predecir los esfuerzos en estructuras de pavimento de escala real bajo cargas de aviones.

Los resultados de los análisis hechos en este estudio llevan a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El modelo hiperbólico es apropiado para los suelos de la subrasante, base subyacente y base usados en este estudio.
- Simulaciones de pruebas de laboratorio y de campo produjeron respuestas que igualan los resultados de pruebas conducidas en estos materiales.
- Las predicciones de respuestas bajo tráfico a escala real produjeron resultados razonables para la subrasante. Las respuestas de la base subyacente y base son más dependientes de las propiedades del material usado para modelar la capa de la superficie de asfalto.
- Se requieren análisis adicionales para predecir la respuesta de la capa de la superficie de asfalto.
- Se recomienda que se implemente este método de análisis para procedimientos de diseño de pavimentos flexibles militares. Este método podría ser usado para desarrollar criterios para pavimentos en regiones donde los datos son limitados.

REFERENCIAS

- Kim, M. (2007). "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements Considering Nonlinear Pavement Foundation Behavior", Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.
- Kulhawy, F. H., Duncan, J. M., and Seed, H. B. (1969). "Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Embankments During Construction", Report TE-69-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Lytton, R. L., Uzan, J., Fernando, E. G., Roque, R., Hiltunen, D. y Stoffels, S. M. (1993). "Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes", Report SHRP-A-357, Strategic Highway Research Program, Washington.
- U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (1960). "The Unified Soil Classification System", Technical Memorandum No. 3-357, Vicksburg, MS.
- Von Quintus, H. L. (1994). "Performance Prediction Models in the Superpave Mix Design System", Report SHRP-A-699, Strategic Highway Research Program, Washington.