

**CAPÍTULO****8****CONSIDERACIONES FINALES.  
FUTUROS DESARROLLOS.****8.1 OBJETIVOS.**

Este capítulo está destinado a establecer conclusiones muy generales, ya que las particulares se han indicado a continuación de cada uno de los ejemplos que han servido para extraerlas.

También esta breve sección se ha dejado para dar los lineamientos generales de las tareas que podrían desprenderse de esta tesis y que deberían cumplimentarse en un futuro cercano. Algunas de ellas ya están siendo ejecutadas por personal del Departamento de Mecánica Aplicada de la UNNE como parte de tesis de Maestría o como parte de proyectos de investigación financiados por diferentes entes.

**8.2 SOBRE EL MODELO DE CONSOLIDACIÓN DE SUELOS NO SATURADOS.**

Los objetivos planteados al comienzo de esta tesis en cuanto a la obtención de un modelo elato plástico con no linealidad geométrica con énfasis en consolidación para suelos no saturados han sido llevados a cabo con éxito así como también se ha logrado el programa que resuelve el problema aplicando MEF.

El modelo se ha diseñado y presentado en el Capítulo 2, ecuación (2.3-15), a partir de un análisis intuitivo de los estados de tensión de una masa de suelo y se ha considerado la influencia

del contenido de aire a través de la succión (diferencia entre las presiones del poro de aire y de agua) con el resto de los elementos que intervienen en el proceso. Se ha concluido que es la variación de la saturación con la succión la que imprime una marcada característica no lineal al proceso. También se ha dado valor a aquellos coeficientes que han aparecido sin definir en la literatura, como por ejemplo la rigidez de la estructura con respecto a la succión  $K_m$  (ecuación (2.3-7)).

Cabe destacar que este trabajo es la continuación del que se iniciara en el año 1997 con la referencia [23] y que fuera continuado en las referencias [10] y [53], todos desarrollados en el ámbito del Departamento de Mecánica Aplicada de la UNNE.

Se considera que este logro hará posible resolver algunos de los problemas más comunes en la región de influencia de esta Universidad (y de otras regiones) como lo es el la consolidación y asentamiento de los suelos arcillosos no saturados compresibles de cimentación para fundaciones de obras de ingeniería y estudio de estabilidad de presas de gravedad de material suelto, además de servir de base para la incorporación de futuras ampliaciones de capacidades al contar con un código abierto.

### **8.3 SOBRE EL MODELO NO LINEAL PARA MATERIALES EN GENERAL.**

También ha sido motivo de hipótesis para esta tesis la presunción de poder lograr una formulación del problema no lineal para materiales en general y para materiales tipo suelo en particular. Esta formulación debía abarcar tanto la no linealidad geométrica como la debida a plasticidad. Se ha logrado verificar la hipótesis generando el modelo matemático y su posterior implementación en computador.

En lo que se refiere al modelo no lineal geométrico, en el Capítulo 3, ecuaciones (3.11-6) a (3.11-9), se ha propuesto una alternativa para formular el problema en forma hipoeelástica que evita lidiar con matrices constitutivas no simétricas además de no quedar limitado a condiciones de isotropía por estar formulado sobre tensiones y deformaciones co-rotadas. Obviamente esto último ha forzado a la realización de un numero de operaciones considerablemente mayor que en el caso de magnitudes no co-rotadas pero con un beneficio adicional que las justifica. Al propio modelo plástico, en el capítulo 4 a través de las ecuaciones ecuaciones (4.6-1) y (4.6-2), basado en trabajos previos<sup>24</sup> realizados sobre un modelo de estado crítico para condición saturada, se lo ha reformulado para incluir la no linealidad geométrica y modificado para

contemplar los efectos de la succión producida en un suelo no saturado. En la modificación mencionada, se ha evitado caer en plasticidad no asociada aunque sin embargo, en un futuro, esto puede ser una opción. Por otra parte, algunos trabajos muestran que el efecto cinemático e isotrópico de la succión debería ir disminuyendo para valores altos de la misma. Este efecto no ha sido tenido en cuenta aquí y quizás merite un ajuste en las modificaciones propuestas.

#### **8.4 SOBRE EL MODELO NO LINEAL PARA CONSOLIDACIÓN.**

Juntando el modelo no lineal para materiales en general con el modelo de consolidación para suelos no saturados, se ha conseguido a lo largo de este trabajo un modelo que es capaz de resolver el problema geotécnico mencionado cuando intervienen grandes desplazamientos de la masa de suelo. En el capítulo 4, apartado 4.2, se ha detallado el modelo general con varias opciones devolviendo, todas ellas, buenos resultados. Quizás deba trabajarse un poco más este tema y verificar ventajas relativas entre las diferentes propuestas, si las hubiere.

#### **8.5 SOBRE EL ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL.**

Otra de las hipótesis propuestas es la de desarrollar un código tridimensional para la resolución de los problemas planteados. Esto también se ha logrado y demostrado en los ejemplos desarrollados en el apartado 6.4. Cabe aclarar que el tipo de elementos elegido, paralelepípedo de 20 nodos y 8 puntos de integración, consume considerables recursos computacionales por lo que se puede probar a futuro con elementos de 8 nodos y un punto de integración.

#### **8.6 SOBRE EL PROGRAMA FECCUND.**

En el apartado 5.2 se ha hecho una descripción breve del programa FECCUND (Finite Element Consolidation Code Using a Nonlinear Development) desarrollado en el Departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNNE.

Además de lo ya dicho sobre el mismo, se quiere indicar el estado en el que se encuentra actualmente con lo agregados de esta tesis: se pueden resolver problemas de consolidación de suelos considerando la variación de la saturación (entre otras variables) con la succión, con no linealidad física (plasticidad con endurecimiento en función de la succión) y geométrica (hipoelástica, teniendo en cuenta tensores constitutivos simétricos o no) en tres dimensiones. También se pueden resolver problemas estructurales tridimensionales no lineales con el crite-

rio de Von Mises y en cuanto a suelos saturados, se ha mejorado el algoritmo para modelar grandes deformaciones. Finalmente y por ahora restringido a elasticidad con no linealidad geométrica, cuestiones relativas a materiales ortotrópos también pueden ser atacadas.

Como se dijera, el lenguaje utilizado es el Fortran, y se han elaborado interfaces con el programa GID<sup>33</sup> para la generación de mallas y para la interpretación de resultados. Sobre esto último, se ha agregado una rutina para llevar las variables secundarias a los nodos según la formulación indicada en la referencia [23] habida cuenta que el mencionado pos procesador no lo realiza.

## **8.7 SOBRE LOS EJEMPLOS PRÁCTICOS RESUELTOS.**

Los ejemplos prácticos utilizados para la comparación de resultados fueron tomados, en muchos casos, de reconocidas publicaciones (que resolvieron los problemas, muchas veces, con otros enfoques) por lo que la coincidencia de las soluciones numéricas de esta Tesis con las de dichas publicaciones, autoriza a decir que el modelo matemático aquí desarrollado es adecuado para la simulación de los problemas abordados.

Las características de los materiales utilizados en algunos ejemplos no responden a valores correspondientes a materiales reales. Sin embargo, estos permiten visualizar las diferentes respuestas que brindan los análisis, por ejemplo, de pequeñas (linealidad geométrica) y grandes deformaciones (no linealidad geométrica), forzando al programa computacional desarrollado en esta Tesis a resolver problemas altamente no lineales. Sirva como muestra, los casos resueltos en la sección 7.2.6 para materiales ortotrópicos y el caso de la sección 7.2.4 o la 7.5.2 correspondiente a consolidación. Para ellos, se ha buscado materiales que, aunque no sean reales, permitan remarcar la capacidad del código con relación a ese tema. No son estos los únicos casos, pero sí los más paradigmáticos.

## **8.8 RECOMENDACIONES PARA DESARROLLOS POSTERIORES.**

Son muchas las posibles ampliaciones al trabajo realizado aquí. Como se indicara al inicio, muchas de ellas están actualmente siendo enfrentadas por el personal del Departamento en diferentes ámbitos y con resultados iniciales promisorios.

Se tratará de mencionar sin un orden determinado, cuales serían algunos de estos futuros desarrollos:

- Plasticidad para materiales ortotrópicos: Se deja la posibilidad de deducir y aplicar funciones de fluencia no isotrópicas, para el tipo de suelo que se desee estudiar, en términos de las tensiones co-rotadas de Kirchhoff, de manera de poder extender la representación de la respuesta no isotrópica del material también al campo plástico. El criterio de plastificación utilizado en este trabajo, de Estados Críticos Modificado, establece una función isotrópica de fluencia
- Plasticidad no asociada para suelos: En el capítulo 4 se ha indicado una modificación del criterio de plasticidad para suelos saturados por inclusión de la succión pero evitando caer en plasticidad no asociada para evitar módulos elastoplásticos no simétricos y cumplir con el principio de máxima disipación plástica. Una alternativa a desarrollar en el futuro, sería trabajar con una función potencial plástico diferente de la función de tensiones y que no dependa de la succión<sup>41</sup>. Se deberá cotejar si este tipo de modelado se justifica en relación a los costos computacionales y resultados.
- Modelo Plástico: Es conveniente seguir revisando el modelo propuesto en función de nuevos resultados de laboratorio y de la estabilidad de resultados del modelo numérico. Se ha podido notar una influencia muy notoria en el valor de cálculo de variables como la presión de aire y la succión misma para algunos cambios en la expresión de la función de fluencia con lo que, por lo menos a priori, merita un análisis mas profundo del problema. Además y como se ha indicado en el párrafo 4.8, se debe desarrollar el modelo para espacios co-rotados.
- Consolidación de suelos no saturados no lineal: El modelo presentado en el capítulo 4 apartado 4.2, debe seguir probándose a los efectos de decidir cual alternativa de formulación de tensiones es más adecuada.
- Estabilidad de taludes: El modelo no lineal de consolidación de suelos no saturados puede emplearse para realizar verificaciones de estabilidad de taludes por medio de Elementos Finitos. Este tema es de gran importancia para las regiones nordeste y noroeste de la Argentina.

- Problemas de polución: Es factible extender el modelo aquí logrado para cubrir problemas de propagación de contaminantes a través de la masa de suelo. Para esto, habrá que considerar variaciones térmicas y agregar a los vacíos o poros de suelo además de los ya considerados agua y aire, los contaminantes que generalmente se consideran miscibles en agua. Así, el sistema de ecuaciones verá aparecer nuevas variables como la temperatura y las concentraciones de contaminantes en agua y aire (cuando son solubles)<sup>63</sup>.
- Ablandamiento del suelo: Si se desea estudiar el problema plástico en el terreno del ablandamiento, deberá tenerse en cuenta que el método de solución propuesto aquí (apartado 5.5) debe ser reemplazado por algún otro, pudiendo ser, por ejemplo, control de desplazamientos<sup>6</sup>, etc.
- Elementos tridimensionales de 8 nodos: Para disminuir el requerimiento computacional que significa usar elementos de 20 nodos, puede en un futuro probarse elementos de 8 nodos con un punto de integración. Pero deberá tenerse en cuenta que al resolverse un problema mixto (recuérdese que las presiones de poros son tensiones) debe atenderse el cumplimiento de la condición de Babuska-Brezzi<sup>5</sup>.

---

## REFERENCIAS

1. ALONSO E. E., GENS A., AND JOSA A. (1999). *A constitutive model for partially saturated soils*. *Geotechnique*, **40**(3), 405–430.
2. ATKINSON, J. H. and BRANSBY, P. L. (1978). *The mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanics*. University Series in Civil Engineering. McGraw Hill, New York, USA.
3. AWRUCH, A. M. y DI RADO, H. A. (1997) *Introducción al Método de los Elementos Finitos*. Pp. 413. E.U.D.E.N.E. Argentina.
4. BARBOUR, S. L. (1998). *Nineteen Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-Water characteristic curve: a historical perspective*. *Can. J. Geotech. J.* **35**:873-894. Canada.
5. BARDET (1996). *Finite Element Analysis of two - phase Instabilities for Saturated Porous Hypoelastic Solids under Plane Strain Loading*. Engineering Computations, LA, USA.
6. BATHE K. J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice – Hall.
7. BATHE K. J and CIMENTO, A. P. (1984). *Some Practical Procedures for the solution of Nonlinear Finite Element Equations*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.
8. BATHE K. J and OZDEMIR, H. (1976). *Elastic-Plastic Large Deformation Static and Dynamic Analysis*. Computers & Structures. Pergamon Press.
9. BELYTSCHKO, T.; LIU, W. K. and MORAN, B. (2000). *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. John Wiley & Sons. England.
10. BENEYTO PABLO A. (Director: DI RADO, H. ARIEL) (2003). *Análisis de consolidación de suelos regionales en estados de saturación parcial mediante simulación numérica utilizando el MEF*. Tesis de Magister en Ingeniería. Carrera de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional del Nordeste Resistencia. Argentina.
11. BENEYTO P. A., DI RADO H. A., MANZOLILLO J. E., AWRUCH A. M. (2003) *Simetría en la formulación del modelado numérico en suelos no saturados: beneficios y desventaja*. *Mecánica Computacional (AMCA-IACM)*, v. XXII, pp. 258-271 (ISSN 1666-6070).
12. BENEYTO P. A.; DI RADO H. A.; MANZOLILLO J. E.; AWRUCH, A. M. (2002) *Some Topics on Regional Soil Consolidation. Unsaturated Analysis*. Ed: J. Geer, D.

- Kittl & D. Mook. American Academy of Mechanics (Philadelphia USA). ISSN: Vol. 9. pp 401-405
13. BENEYTO P. A., DI RADO H. A., MROGINSKI J. L., AWRUCH A.M. (2005). *Un modelo Basado en la Combinación de estados para el Análisis de la Consolidación de suelos no Saturados*. Mecánica Computacional (AMCA-IACM), v. XXIV, pp. 515-529 (ISSN 1666-6070).
  14. BIOT, M. A. (1941). *General Theory of three - dimensional consolidation*. Journal of Applied Physics.
  15. BIOT, M. A. (1956) *Theory of deformation of a porous viscoelastic anisotropic solid*. Journal of Applied Physics.
  16. BLIGHT G. E. (1971) *Flow of air through solids*. ASCE J. Soil Mech. Found. Eng. Div. Vol. 97. SM4. pp. 607-624.
  17. BOLZON G, SCHREFLER B.A., AND ZIENKIEWICZ O. C. (1996). *Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states*. Geotechnique, 46 (2), 279–289.
  18. BORJA, R. I.; TAMAGNINI, C.; ALARCÓN, E. (1995). *A mathematical framework for finite strain elastoplastic consolidation. Part 1: Balance laws, variational formulation, and linearization*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Elsevier Science.
  19. BORJA, R. I.; TAMAGNINI, C.; ALARCÓN, E. (1998). *Elasto-Plastic Consolidation at Finite Strain. Part 2: Finite Element Implementation and Numerical Examples*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Elsevier Science.
  20. BRAUDELL H.J., ABOUAF J. L., CHENOT J. L. (1986). *An Implicit Incrementally Objective Formulation for the Solution of Elastoplastic Problems at Finite Strain by the FEM*. Computers and Structures. 24(6):825–843.
  21. BROOKS R. H. and COREY A. T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University. Hydrol. pp. 3-27.
  22. CARTER, P.; BOOKER, J. R. and SMALL, J. C. (1979). *The analysis of finite elastoplastic consolidation*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
  23. DI RADO, H. A. (Director: AWRUCH, A. M.) (1997) *Simulación Numérica de Procesos de Consolidación de Suelos Usando el Método de los Elementos Finitos*. Tesis de Magíster en Mecánica Aplicada al Análisis y Proyecto de Estructuras. Universidad Nacional del Nordeste.
  24. DI RADO, H. A.; AWRUCH, A. M. & BENEYTO, P. A. (1998) *Consolidation in Saturated Porous Media. Implementation and Numerical Problems*. Computational Mechanics. New Trends and Applications. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) and Fourth World Congress on Computational Mechanics. Buenos Aires. Argentina.
  25. DI RADO, H. A.; AWRUCH, A. M.; BENEYTO P. A. & MANZOLILLO, J. E. (1999) *Tópicos en el Análisis no Lineal Físico y Geométrico. Aplicaciones a Consoli-*



- dación de Suelos*. Sexto Congreso Argentino de Mecánica Computacional (MECOM 99). Mendoza. Argentina.
26. DI RADO, H. A.; AWRUCH, A. M.; BENEYTO P. A.; MANZOLILLO, J. E. (1999) *Análisis de Fundaciones Directas Usando el Método de Los Elementos Finitos*. Centro de Información Tecnológica (CIT). Revista Internacional Indexada. ISSN: 0716-8756 Volumen 10 N° 6 pp.165-175. Chile.
  27. FREDLUND, D. G., MORGENSTERN N. R. (1977). *Stress state variables for unsaturated soils*. ASCE J. Geotch. Eng. Div. **103**, 447-466.
  28. FREDLUND, D. G., MORGENSTERN N. R. & WIDGER R. A. (1978). *The shear strength of unsaturated soils*. Canadian Geotechnical Journal, **15**, 313-321.
  29. FREDLUND, D. G., RAHARDJO H. (1993). *Soils Mechanics for unsaturated soils*. Wiley & Sons Inc.
  30. FREDLUND, D. G. & XING, A. (1994). *Equations for the soil-water characteristic curve*, Canadian Geotechnical Journal. 31. 521-532
  31. GHABOUSSI, J. & KIM K. (1984). *Quasi-static and Dynamic Analysis of Saturated and Partially Saturated Soils*. Mechanics of Engineering Materials, 14, 277-296, John Wiley.
  32. GAWIN, D.; BAGGIO, P. Y SCHREFLER, B. A. (1995). *Coupled heat, water and gas flow in deformable porous media*, Int. Journal for numerical methods in fluids, vol 20, 969-987. John Wiley & Sons, London, U.K.
  33. GID<sup>®</sup> Version 7.2 *The personal pre and pos processor*. International Center for Numerical Methods (CIMNE). UPC. España.
  34. GOLUB, G. H. and VAN LOAN, C. F. (1984). *Matrix Compretatiars*. John Hopkins University Press, Baltimore, USA.
  35. HASSANIZADEH S., GRAY W. (1979). *General conservation equation for multi-phase systems: 1. Averaging procedure*. Advances in water resources. 2, 131-144
  36. HASSANIZADEH S., GRAY W. (1979). *General conservation equation for multi-phase systems: 2. Mass, Momenta, Energy and Entropy equations*. 2, 191-203
  37. HASSANIZADEH S., GRAY W. (1980). *General conservation equation for multi-phase systems: 3. Constitutive theory for porous media flow*. 3, 25-40
  38. HILL, R. (1950). *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford U. Press, U. K.
  39. HUGHES, T. J. R. & WINGET, J. M. (1980). *Finite rotations effects in numerical integration of rate constitutive equations arising in large deformation analysis*. International Journal for Numerical Methods in Engineering.
  40. KHALILI, N. & KHABBAZ, M. H. (1995). *On the theory of three-dimensional consolidation in unsaturated soils*. Unsaturated soils. Alonso & Delage.
  41. KHALILI, N. & LORET, B. (2001). *An elasto-plastic model for non-isothermal analysis of flow and deformation in unsaturated porous media: formulation*. International Journal of solid and structures. Pergamon.

42. KANCHI, M. B.; ZIENKIEWICZ, O. C. and OWEN, D. J. (1978). *The visco-plastic approach to problems of plasticity and creep involving geometrical non-linear effects*. International Journal for Numerical Methods in Engineering. John Wiley & Sons.
43. KIM, C. S.; LEE, T. S.; ADVANI, S. H. and LEE, J. K. (1993). *Hygrothermomechanical evaluation of porous media under finite deformations: Part I - finite element formulation*. International Journal for Numerical Methods in Engineering.
44. KIM, C. S.; LEE, T. S.; ADVANI, S. H. and LEE, J. K. (1993). *Hygrothermomechanical evaluation of porous media under finite deformation; Part II: Model validation and field simulation*. International Journal for Numerical Methods in Engineering.
45. LAMBE, T. W. (1958). *The engineering behavior of compacted clays*. ASCE J. Soil Mech. Div. **84**, 1655, 1-35.
46. LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. (1979). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, USA.
47. LEWIS, R. W. and SCHREFLER, B. A. (1987). *The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media*. J. Wiley & Sons, New York.
48. LEWIS, R. W., SCHREFLER, B. A. AND RAHMAN, N. A. (1998). *A Finite Element Analysis of Multiphase Immiscible Flow in Deforming Porous Media for Subsurface Systems*. Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol. 14, 135-149. J. Wiley & Sons, New York.
49. LU NING, WAYLLACE A., CARRERA J. & LIKOS W. J. (2006). *Constant Flow Method for Concurrently Measuring Soil-Water Characteristic Curve and Hydraulic Conductivity Function*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 29, No. 3. West Conshohocken, PA.
50. MALVERN, L. E. (1969). *Introduction to the Mechanics of a Continuum Medium*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
51. MAHNKEN, ROLPH (2005) *Anisotropy in Geometrically non linear Elasticity with Generalized Seth-Hill Strain Tensor Projected to Invariant Subspace*. Commun. Numer. Meth. Engng. (in press) Online in Wiley Interscience.
52. MANOHARAN & DASPGUTA (1995). *Consolidation Analysis of Elastoplastic Soil*. Computers & Structures.
53. MANZOLILLO, J. E. (Director: DI RADO, H. ARIEL) (2003). *Mecánica No Lineal Aplicada a Problemas Geotécnicos Regionales*. Tesis de Magister en Ingeniería. Carrera de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional del Nordeste Resistencia. Argentina.
54. MANZOLILLO, J. E.; DI RADO, H. A.; AWRUCH, A. M. & BENEYTO, P. A. (2000) *Análisis No Lineal en Problemas de Alta Compresibilidad. Simulación por el M.E.F.* 9º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica - IV Congreso Nacional de Energía (COCIM – CONAE 2000). Valparaiso, Chile.
55. MAOSONG HUANG and ZIENKIEWICZ, O. C. (1998) *New Unconditionally Stable Staggered Solution Procedures For Coupled Soil – Pore Fluid Dynamic Problems*. International Journal for Numerical Methods in Engineering. John Wiley & Sons.

56. MASTERS I., PAO W. K. S. AND LEWIS R (2000). *Coupling temperature to a double porosity model of deformable porous media*. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 49, 421-438
57. NAYAK, G. C. and ZIENKIEWICZ, O. C. (1972) *Elasto Plastic stress analysis. A generation of various constitutive relations including strain softening*. International Journal for Numerical Methods in Engineering.
58. OWEN, D. R. J. and HINTON, E. (1980) *Finite Elements in Plasticity; Theory and Practice*. Pineridge Press Limited, Swansea, U. K.
59. PRAGHER, W. (1961) *Introduction to Mechanics of Continua*. Ginn and Company.
60. PUPPALA A. J., PUNTHUTAECHA K. & VANAPALLI S. K. (2006). *Soil-Water Characteristic Curves of Stabilized Expansive Soils*. Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE.
61. SIMO, J. C. and HUGHES, T. J. R. (1998) *Computational Inelasticity*. Springer – Verlag. New York, Inc.
62. SMITH & GRIFFITHS (1988) *Programming the Finite Element Method*. John Wiley & Sons, U.K.
63. SCHREFLER B.A. (2001). *Computer modeling in environmental geomechanics*. Computers and structures, 79, 2209-2223
64. SUN D. A., MATSOUKA H., CUI H. B. AND XU Y. F. (2003). *A three dimensional elastoplastic model for unsaturated compacted soils with different initial densities*. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 27, 1079-1098
65. TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1986). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. Edit. El ateneo.
66. VILADKAR, M. N.; NOORZAEI, J. and GODBOLE, P. N. (1995) *Convenient forms of yield criteria in elasto-plastic analysis of geological materials*. Computer & Structures. Pergamon.
67. XIKUI LI, R.H. THOMAS, AND YIQUN FAN (1999) *Finite element method and constitutive modeling and computation for unsaturated soils*. Computational. Methods Applied Mech. Engrg., 169, 135–159.
68. YANG D. Q., RAHARDJO H., LEONG E. C. AND CHOA V. *Coupled model for heat, Moisture, Air Flow and deformation Problems in Unsaturated Soils*. Journal of engineering mechanics vol 124, n12, 1331-1338 (1998)
69. ZIENKIEWICZ, O. C. and CORMEAU, I. C. (1974) *Visco-Plasticity and creep in elastic solids. A unified numerical solution approach*. International Journal for Numerical Methods in Engineering.
70. ZIENKIEWICZ, O. C.; HUMPHESON, C. & LEWIS, R. W. (1975) *Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics*. Geotechnique.
71. ZIENKIEWICZ, O. C.; HUMPHESON, C. & LEWIS, R. W. (1977) *A unified approach to soil mechanics problems (including plasticity and viscoplasticity)*. In: Finite Elements in Geomechanics (Edited by Gudehus). John Wiley & Sons, London, U.K.

72. ZIENKIEWICZ, O. C. and SHIOMI, T. (1984) *Dynamic behavior of saturated porous media; the generalized BIOT formulation and its numerical simulation*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
73. ZIENKIEWICZ, O. C. y TAYLOR, R. L. (1994). *El Método de los Elementos Finitos*. McGraw – Hill.

--- \*\*\* ---



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE**

**Departamento de Mecánica Aplicada.**

**Facultad de Ingeniería.**

---

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE  
PROBLEMAS CON NO LINEALIDAD  
FÍSICA Y GEOMÉTRICA.  
ANÁLISIS DE CONSOLIDACIÓN DE  
SUELOS NO SATURADOS.**

**Por**

**Héctor Ariel Di Rado.**

Tesis presentada al cuerpo docente de la Carrera de  
DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
EN EL ÁREA DE LA INGENIERÍA  
como requerimiento parcial para acceder al grado académico de

---

**DOCTOR DE LA UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL NORDESTE**

en el  
Área de la Ingeniería.

---

**Director:**

**Prof. Dr. Ingeniero Armando M. Awruch.**

Tribunal:

Prof. Dr. Ingeniero Fernando Schnaid.

Prof. Dr. Ingeniero Oscar Möller.

Prof. Dr. Ingeniero Victorio Sonzogni.

Resistencia, Noviembre de 2006.