

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CIVIL  
MENCIÓN EN ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA



Tesis de Maestría

Teoría de Probabilidad en el Análisis del Comportamiento de  
Fundaciones Profundas

Pedro A. Arrúa

Agosto de 2006

# **Teoría de Probabilidad en el Análisis del Comportamiento de Fundaciones Profundas**

Directores: Dr. Ing. Emilio R. Redolfi

Dr. Ing. Franco M. Francisca

por

Pedro A. Arrúa

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.  
Maestría en Ciencias de la Ingeniería Civil.  
Mención en Estructuras y Geotecnia

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, para cumplimentar los requerimientos de obtención del grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, mención Estructuras y Geotecnia.

Córdoba, Argentina  
20 de Agosto de 2006

# **Teoría de Probabilidad Aplicada al Análisis del Comportamiento de Fundaciones Profundas**

*Probability Theory Applied on Behavior of Deep Foundations*

## **Resumen**

El Diseño Basado en niveles de Confiabilidad (DBC) brinda mayor certidumbre en la etapa de diseño cuando los parámetros involucrados en el proceso de predicción presentan alta variabilidad. Permite establecer el desempeño del comportamiento estimado a través de las formulaciones tradicionales. En esta Tesis se aplica el DBC a los métodos propuestos por el USACE (1991) y Matlock y Reese (1960) para el cálculo de pilotes sometidos a solicitaciones verticales y horizontales, respectivamente.

Los resultados obtenidos muestran las ventajas de la utilización de herramientas probabilísticas durante la etapa de diseño, respecto a los análisis basados en factores de seguridad totales o parciales.

## **Abstract**

Reliability Based Design (RBD) allows to perform geotechnical analysis and design with high certainty when the involved parameters during the prediction process have important variability. RBD allows to establish the performance of pile behavior by means of traditional formulations.

This thesis presents the RBD of vertical and horizontal loaded piles by using the methods proposed by USACE (1991) and Matlock & Reese (1960) respectively.

Results show the advantages of probabilistic tools during the design stage respect to the analyses based on total or partial safety factors.

## **Agradecimientos**

Numerosas son las personas que han logrado dejar su marca en mi formación como persona y profesional durante estos años de maestría. Muchos han dejado gratos recuerdos que permanecerán en mí con infinita gratitud.

Agradezco a mis Directores Emilio Redolfi y Franco Francisca por el apoyo, compañía y consejos brindados en los buenos y malos momentos. A Roberto Terzariol por dar reparo a la incertidumbre, compartir su vasta experiencia y ser un verdadero amigo en los momentos difíciles. A Carlos Prato y Víctor DeNapoli por el aporte realizado al brindar los datos de sus ensayos sobre pilotes. A Tomás Prato, por ser además de un docente y profesional de excelencia, la persona que brindó la calidez necesaria para sentirse como en casa en los inicios de mi formación. Al plantel docente de la Maestría en Estructuras y Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba, que han contribuido de manera incommensurable a mi formación.

Expreso mi reconocimiento al Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC) y su plantel docente por el apoyo brindado para la realización de esta Tesis. Agradezco de manera especial a la UTN por el apoyo económico brindado el cual ha sido fundamental para poder culminar este trabajo, y en especial a Luis Canali por sus sanos consejos y su permanente apoyo en las tareas de investigación y gestión institucional.

Quiero agradecer especialmente a mi familia: papá y mamá porque sin ellos nada hubiera sido posible. A Carina, Rodrigo y Guada por la bondad de sus consejos y la esperanza de su sonrisa. A Macarena por su infinito amor y ternura constantes que han sido, son y serán el combustible de mí alma para enfrentar la vida con alegría y armonía...“Gracias por tu paciencia”. A Gonzalo Aiassa que por su incondicional amistad, su transparente accionar y permanente compañerismo han hecho de este desafío una senda de alegría. Gracias por la bronca y la risa de cada día.

Pedro A. Arrúa

# Contenido

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| <b>Resumen.....</b>            | <b>ii</b>   |
| <b>Agradecimientos.....</b>    | <b>iv</b>   |
| <b>Contenido.....</b>          | <b>v</b>    |
| <b>Lista de Figuras .....</b>  | <b>viii</b> |
| <b>Lista de Tablas .....</b>   | <b>xvii</b> |
| <b>Lista de Símbolos .....</b> | <b>xix</b>  |

## **Capítulo 1 - Introducción**

|                                            |   |
|--------------------------------------------|---|
| 1.1 Aspectos generales.....                | 1 |
| 1.2 Alcances y objetivos de la tesis ..... | 2 |
| 1.3 Organización de la tesis .....         | 3 |

## **Capítulo 2 - Revisión del comportamiento de fundaciones profundas**

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 2.1 Introducción.....                               | 5  |
| 2.2 Pilotes sometidos a cargas verticales.....      | 6  |
| 2.2.1 Resistencia por la punta .....                | 7  |
| 2.2.2 Resistencia por el fuste .....                | 14 |
| 2.2.3 Asentamientos en pilotes .....                | 24 |
| 2.3 Factores de Seguridad.....                      | 36 |
| 2.4 Pilotes sometidos a cargas horizontales.....    | 37 |
| 2.4.1 Criterios de resistencia lateral última ..... | 42 |
| 2.4.2 Criterio de deformación. Curvas p-y.....      | 56 |
| 2.5 Síntesis y conclusiones.....                    | 73 |

## **Capítulo 3 - Diseño basado en niveles de confiabilidad**

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 3.1 Introducción..... | 76 |
|-----------------------|----|

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 3.2 Análisis Probabilístico.....                        | 77  |
| 3.2.1 Valoración de confiabilidad.....                  | 94  |
| 3.2.2 Método de confiabilidad de primer orden .....     | 98  |
| 3.3 Nivel de Confiabilidad.....                         | 102 |
| 3.3.1 Formato del diseño basado en confiabilidad .....  | 103 |
| 3.3.2 Obtención de factores de demanda y capacidad..... | 105 |
| 3.3.3 Método de estimación puntual.....                 | 106 |
| 3.4 Procedimiento de calibración general.....           | 111 |
| 3.5 Síntesis y conclusiones.....                        | 112 |

#### **Capítulo 4 - Propiedades estadísticas de las propiedades geotécnicas del suelo**

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 Introducción.....                                            | 114 |
| 4.2 Coeficientes de variación en las propiedades del suelo ..... | 115 |
| 4.3 Parámetros resistentes del suelo nominales.....              | 116 |
| 4.4 Medición del error .....                                     | 117 |
| 4.5 Parámetros resistentes del suelo.....                        | 118 |
| 4.5.1 Resistencia al corte no drenado .....                      | 118 |
| 4.5.2 Ángulo de fricción.....                                    | 124 |
| 4.6 Índices característicos del suelo.....                       | 125 |
| 4.6.1 Contenido de humedad Natural.....                          | 126 |
| 4.6.2 Límite líquido y plástico .....                            | 129 |
| 4.6.3 Peso unitario y peso unitario seco .....                   | 132 |
| 4.6.4 Densidad relativa.....                                     | 134 |
| 4.7 Propiedades geotécnicas medidas in situ .....                | 135 |
| 4.8 Conclusiones.....                                            | 137 |

#### **Capítulo 5 - Confiabilidad en pilotes a solicitaciones verticales**

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1 Introducción.....                                                                         | 138 |
| 5.2 Pilotes sometidos a cargas verticales. Diseño Basado<br>en Niveles de Confiabilidad ..... | 138 |
| 5.3 Diseño Basado en Confiabilidad para el<br>método propuesto por el USACE .....             | 143 |
| 5.3.1 Caso de Estudio.....                                                                    | 143 |

|                                                                                                                                               |                                                                              |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.2                                                                                                                                         | Análisis probabilístico de las capacidades .....                             | 147        |
| 5.3.3                                                                                                                                         | Influencia del Factor de Seguridad .....                                     | 151        |
| 5.3.4                                                                                                                                         | Influencia de la variabilidad de las cargas<br>aplicadas al pilote.....      | 155        |
| 5.4                                                                                                                                           | Conclusiones.....                                                            | 158        |
| <br><b>Capítulo 6 - Confiabilidad en pilotes a solicitaciones horizontales</b>                                                                |                                                                              |            |
| 6.1                                                                                                                                           | Introducción .....                                                           | 160        |
| 6.2                                                                                                                                           | Modelo de comportamiento bidimensional .....                                 | 160        |
| 6.2.1                                                                                                                                         | Pilotes instalados en suelos cohesivos .....                                 | 162        |
| 6.2.2                                                                                                                                         | Pilotes instalados en suelos de grano grueso .....                           | 167        |
| 6.2.3                                                                                                                                         | Pilotes instalados en suelos de grano intermedio .....                       | 174        |
| 6.2.4                                                                                                                                         | Variación del módulo de reacción lateral<br>en profundidad .....             | 180        |
| 6.3                                                                                                                                           | Análisis probabilístico y diseño basado en niveles<br>de confiabilidad ..... | 195        |
| 6.3.1                                                                                                                                         | Criterio de resistencia .....                                                | 195        |
| 6.3.2                                                                                                                                         | Criterio de deformación .....                                                | 196        |
| 6.4                                                                                                                                           | Conclusiones.....                                                            | 203        |
| <br><b>Capítulo 7 - Conclusiones y recomendaciones para futuros estudios</b>                                                                  |                                                                              |            |
| 7.1                                                                                                                                           | Conclusiones.....                                                            | 206        |
| 7.2                                                                                                                                           | Recomendaciones para estudios futuros .....                                  | 210        |
| <b>Referencias .....</b>                                                                                                                      |                                                                              | <b>212</b> |
| <br><b>Apéndice I - Diseño basado en confiabilidad aplicado al método de las<br/>funciones de transferencia en pilotes excavados en arena</b> |                                                                              |            |
| A.1                                                                                                                                           | Introducción .....                                                           | 230        |
| A.2                                                                                                                                           | Implementación.....                                                          | 230        |
| A.3                                                                                                                                           | Análisis probabilístico .....                                                | 235        |
| <br><b>Apéndice II - Publicaciones realizadas a partir de este trabajo .....</b>                                                              |                                                                              | <b>240</b> |