

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES**



**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A  
COMPRESIÓN EN LAS EDIFICACIONES DEL CAMPUS UNIVERSITARIO  
CON SUS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS”**

**Por:**

**IRIARTE ORDOÑEZ JESUS ALBERTO**

**SEMESTRE II - 2019**

**TARIJA-BOLIVIA**

Dedico esta Tesis a mis abuelos Lindolfo Ordoñez y Dora Ortega y a mi madre Guadalupe Ordoñez que siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte moral y económica para poder cumplir con mis metas.

A mis tíos por el apoyo que siempre me brindaron día a día en el transcurso de cada año de mi carrera universitaria.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. El problema .....	2
1.2.1. Planteamiento.....	2
1.2.2. Formulación.....	2
1.2.3. Sistematización .....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. General.....	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4. Justificación.....	4
1.4.1. Teórica .....	4
1.4.1. Académica .....	4
1.4.2. Práctica.....	4
1.4.3. Social .....	4
1.5. Alcance de la investigación .....	4
1.5.1. Hipótesis .....	4
1.5.2. Resultados a lograr.....	5
1.5.3. Tipo de investigación y/o estudio .....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Características de los materiales del hormigón .....	6
2.1.1. Cementos .....	6
2.1.2.1. Resistencia del cemento .....	7
2.1.2. Áridos.....	8
2.1.2.1. Arena.....	9

2.1.2.2. Grava.....	9
2.1.2.2.1. Granulometría discontinua .....	10
2.1.2.2.2. Forma y textura superficial de los agregados .....	10
2.1.3. Agua.....	11
2.2. Dosificación del hormigón .....	11
2.2.1. Resistencia a la compresión del hormigón .....	12
2.2.2. Tamaño máximo del árido .....	13
2.2.3. Consistencia del hormigón, porcentaje de vacío y cantidad de agua.....	15
2.2.4. Compactación .....	18
2.2.5. Propiedades del hormigón fresco.....	19
2.2.5.1. Prueba de revenimiento.....	19
2.2.6. Densidad del hormigón.....	19
2.2.7. Variación en el tiempo de la resistencia a compresión .....	20
2.2.8. Conservación de las probetas.....	20
2.2.9. Equivalencia entre distintas edades .....	20
2.2.10. Zona de muestreo.....	21
2.3. Técnicas de ensayos no destructivos .....	21
2.3.1. Distribución de las medidas y errores.....	22
2.3.2. Ensayo del esclerómetro (Martillo de rebote).....	24
2.3.2.1. Ventajas y desventajas del esclerómetro.....	28
2.3.2.2. Factores de corrección .....	30
2.3.3. Ensayo de ultrasonidos .....	34
2.3.3.1. Método de transmisión directa .....	37
2.3.4. Ensayo con la pistola Windsor.....	39
2.3.4.1. Particularidades del ensayo con la sonda .....	41

2.4. Pruebas del hormigón endurecido .....	41
2.4.1. Efecto de la condición de los extremos del espécimen y del cabeceado. ....	41
2.4.2. Influencia de la rapidez de aplicación de carga sobre la resistencia.....	41
2.4.3. Característica mecánica del hormigón.....	41
2.4.4. Requisitos de construcción a cumplir .....	42
2.5. Análisis de regresión .....	42
2.5.1. Conceptos generales .....	42
2.5.1.1. Diagrama de dispersión.....	43
2.5.2. Tipos de regresión.....	44
2.5.2.1. Regresión lineal simple .....	44
2.5.2.2. Regresión lineal múltiple .....	44
2.5.2.3. Regresión no lineal.....	45
2.5.3. Ajuste de curvas.....	45
2.6. Técnicas no destructivas para diagnóstico de elementos constructivo.....	46
3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	48
3.1. Caracterización de los materiales .....	48
3.1.1. Cemento .....	48
3.1.2. Agregado.....	49
3.2. Dosificación por el método ACI.....	55
3.2.1. Dosificación de 21 MPa.....	56
3.2.2. Dosificación de 30 MPa con el uso de ViscoCrete 5-800 .....	58
3.3. Aplicación de los equipos de END en probetas de hormigón y cálculo del error absoluto .....	60
3.3.1. Esclerómetro (ASTM C805-02) .....	60
3.3.1.1. Aplicación del esclerómetro en posición vertical (-90°).....	60

3.3.1.2. Aplicación del esclerómetro en posición horizontal (0°).....	62
3.3.1.3. Variación del índice de rebote (-90° y 0°) .....	63
3.3.2. Ultrasonido (ASTM C 215 – 2002) .....	63
3.3.3. Método de ensayo estándar para la resistencia a la penetración del hormigón endurecido (ASTM C 803 – 2003) .....	65
3.4. Ensayo de rotura de probetas de hormigón a compresión.....	66
3.5. Elaboración de la gráfica de regresión simple y múltiple de los equipos de END con la resistencia a compresión del hormigón.....	69
3.6. Aplicación de los equipos de ensayo no destructivo en los edificios.....	74
3.6.1. Análisis de la aplicación de los equipos de END en los edificios .....	101
4. ANÁLISIS DE RESULTADO .....	107
4.1. Conclusiones .....	107
4.1.1. Características de los materiales del hormigón para la calibración de los equipos a usar en este trabajo de investigación .....	107
4.1.2. Dosificación del hormigón.....	107
4.1.3. Aplicación de los equipos de END en las probetas .....	107
4.1.4. Rotura de probetas .....	108
4.1.5. Gráficas de la regresión simple y múltiple de los equipos de ensayo no destructivo.....	108
4.1.6. Aplicación de los equipos de ensayo no destructivo en los edificios .....	110
4.2. Recomendaciones .....	113
4.2.1. Características de los materiales del hormigón para la calibración de los equipos a usar en este trabajo de investigación .....	113
4.2.2. Dosificación del hormigón.....	113
4.2.3. Aplicación de los equipos de END en las probetas .....	114
4.2.4. Rotura de probetas .....	114

4.2.5. Gráficas de la regresión simple y múltiple de los equipos de ensayo no destructivo.....	114
4.2.6. Aplicación de los equipos de ensayo no destructivo en los edificios .....	115
BIBLIOGRAFÍA .....	117
ANEXO 1. ANÁLISIS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA DOSIFICACIÓN DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	120
Anexo 1.1. Finura del cemento (ASTM C 184).....	121
Anexo 1.2. Determinación de la densidad del cemento hidráulico (ASTM C 188)...	123
Anexo 1.3. Método para extraer y preparar la muestra (ASTM C 75).....	127
Anexo 1.4. Método para el cuarteo de la muestra (ASTM C 702).....	131
Anexo 1.5. Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM C 136).....	133
Anexo 1.6. Método para determinar el material fino menor que 0.075 mm (ASTM 117).....	144
Anexo 1.7. Contenido total de agua de los áridos por secado (ASTM C 566) .....	148
Anexo 1.8. Método para determinar la densidad aparente (ASTM E 30).....	153
Anexo 1.9. Método para determinar la densidad real, la densidad neta, y la absorción de agua en áridos grueso (ASTM C 127) .....	162
Anexo 1.10. Método para determinar la densidad real, la densidad neta, y la absorción de agua en áridos fino (ASTM C 128) .....	170
ANEXO 2. DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN – MÉTODO ACI 211 .....	179
Anexo 2.1. Explicación del procedimiento realizado para la dosificación del hormigón .....	180
Anexo 2.2. Dosificación de 25 MPa.....	188
ANEXO 3. REGISTRO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	191
Anexo 3.1. Explicación de las medidas y errores.....	192

Anexo 3.2. Determinación del índice de rebote utilizando el esclerómetro (ASTM C805-02).....	195
Anexo 3.3. Determinación de la velocidad de pulso a través del hormigón (ASTM C597-02).....	215
Anexo 3.4. Determinación de la resistencia a la penetración en el hormigón endurecido (ASTM C803-03) .....	224
ANEXO 4. ELABORACIÓN DE LA GRÁFICA DE LOS EQUIPOS DE END .....	234
Anexo 4.1. Gráfica de la regresión simple y múltiple del esclerómetro .....	235
Anexo 4.2. Gráfica de la regresión simple no lineal del ultrasonido .....	239
Anexo 4.3. Gráfica de la regresión simple de la P.W.....	242
ANEXO 5. FOTOGRAFÍAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN CADA EDIFICIO DE LA UAJMS .....	244
ANEXO 6. PLANO DE LOS EDIFICIOS QUE SE ANALIZÓ CON LOS EQUIPOS DE END .....	247
ANEXO 7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EDIFICIOS .....	253
Anexo 7.1. Especificación técnica del laboratorio de suelo .....	255
Anexo 7.2. Especificaciones técnicas del bloque de arquitectura .....	283



## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 2.1. Esquema en la elaboración del hormigón .....	6
Tabla 2.2. Relación agua/cemento .....	12
Tabla 2.3. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra .....	13
Tabla 2.4. Tamaños máximos de agregados según el tipo de construcción.....	14
Tabla 2.5. Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación .....	16
Tabla 2.6. Requerimiento aproximado de agua de mezclado .....	17
Tabla 2.7. Valores recomendados para el contenido de aire en el hormigón.....	18
Tabla 2.8. Valores de la relación $f_{cj}/f_{c28}$ .....	21
Tabla 2.9. Factores de corrección de la carbonatación .....	30
Tabla 2.10. Parámetro de la carbonatación .....	33
Tabla 2.11. Efectos de la temperatura en la velocidad del ultrasonido.....	34
Tabla 2.12. Clasificación del hormigón por medio de la velocidad de onda .....	37
Tabla 2.13. Calidad del hormigón según su velocidad .....	38
Tabla 2.14. Puntos en un plano .....	43
Tabla 3.1. Cálculo del módulo de finura del cemento .....	48
Tabla 3.2. Cálculo del peso específico del cemento .....	48
Tabla 3.3. Lugar de procedencia de los áridos.....	49
Tabla 3.4. Extracción y preparación de las muestras. (ASTM C 75).....	50
Tabla 3.5. Cuarteo de la muestra (ASTM C 702) .....	51
Tabla 3.6. Granulometría agregado grueso (ASTM C 136).....	51
Tabla 3.7. Granulometría del agregado fino (ASTM C-136).....	52
Tabla 3.8. Porcentaje de fino en la arena .....	52
Tabla 3.9. Humedad de la grava.....	52
Tabla 3.10. Humedad de la arena.....	53
Tabla 3.11. Densidad aparente de la grava .....	53
Tabla 3.12. Densidad aparente de la arena.....	54
Tabla 3.13. Densidad real, densidad neta, y absorción del agua en áridos grueso .....	54
Tabla 3.14. Densidad real, densidad neta, y absorción del agua en áridos fino.....	55

Tabla 3.15. Característica de los materiales .....	56
Tabla 3.16. Cálculo de la masa de la arena del hormigón de 21 MPa .....	57
Tabla 3.17. Corrección por humedad y absorción de un hormigón de 21 MPa.....	58
Tabla 3.18. Cálculo de la masa de la arena del hormigón de 30 MPa .....	59
Tabla 3.19. Corrección por humedad y absorción de un hormigón de 30 MPa.....	59
Tabla 3.20. Dosificación de 21, 25 y 30 MPa.....	60
Tabla 3.21. Promedio del índice de rebote (-90°) .....	61
Tabla 3.22. Error absoluto del esclerómetro .....	62
Tabla 3.23. Promedio del índice de rebote (0°) .....	62
Tabla 3.24. Promedio de la variación del índice de rebote (-90° y 0°).....	63
Tabla 3.25. Promedio de la velocidad del pulso ultrasonido .....	64
Tabla 3.26. Error absoluto del ultrasonido.....	65
Tabla 3.27. Promedio de la distancia de la sonda que queda en la superficie del hormigón (parte 1) .....	65
Tabla 3.28. Promedio de la distancia de la sonda que queda en la superficie del hormigón (parte 2) .....	66
Tabla 3.29. Ensayo de probetas a compresión (parte 1) .....	66
Tabla 3.30. Ensayo de probetas a compresión (parte 2) .....	67
Tabla 3.31. Resistencia de las probetas que fueron aplicadas con el esclerómetro en posición horizontal .....	68
Tabla 3.32. Resumen del ensayo de probetas a compresión .....	68
Tabla 3.33. Resumen de la resistencia obtenido con los equipos de ensayos no destructivos .....	101
Tabla 3.34. Resumen del informe de ensayos de muestra de hormigón del laboratorio de suelo .....	102
Tabla 3.35. Resumen del informe de ensayos de muestra de hormigón del bloque de arquitectura (parte 1).....	102
Tabla 3.36. Resumen del informe de ensayos de muestra de hormigón del bloque de arquitectura (parte 2).....	103
Tabla 4.1. Análisis del cumplimiento de la hipótesis en el laboratorio de suelo .....	111
Tabla 4.2. Análisis del cumplimiento de la hipótesis en el bloque de arquitectura .....	112

Tabla A1. 1. Cálculo del módulo de finura del cemento .....	122
Tabla A1. 2. Cálculo de la densidad del cemento .....	124
Tabla A1. 3. Serie de tamices escogidos.....	134
Tabla A1. 4. Tamaño de la muestra de ensayo del árido fino.....	136
Tabla A1. 5. Tamaño de la muestra de ensayo del árido grueso.....	137
Tabla A1. 6. Granulometría agregado grueso (ASTM C 136).....	141
Tabla A1. 7. Granulometría agregado fino (ASTM C 136).....	142
Tabla A1. 8. Tamaño de la muestra a ensayar .....	145
Tabla A1. 9. Cálculo del porcentaje de fino.....	147
Tabla A1. 10. Tamaño de mi muestra de árido con masa normal.....	149
Tabla A1. 11. Cálculo del porcentaje de humedad de la grava.....	151
Tabla A1. 12. Cálculo del porcentaje de humedad de la arena .....	152
Tabla A1. 13. Dimensiones de las medidas .....	154
Tabla A1. 14. Cálculo para determinar la densidad aparente del agregado grueso .....	160
Tabla A1. 15. Cálculo para determinar la densidad aparente del agregado fino .....	160
Tabla A1. 16. Cantidad mínima de la muestra según el tamaño máximo nominal.....	164
Tabla A1. 17. Cálculo de la densidad real, densidad neta, y absorción del agua en áridos grueso .....	168
Tabla A1. 18. Cálculo de la densidad real, densidad neta, y absorción del agua en áridos fino .....	177
Tabla A2. 1. Procedimiento de diseño ACI-211 .....	180
Tabla A2. 2. Volumen aparente de agregado grueso por volumen unitario de hormigón .....	182
Tabla A2. 3. Cálculo de la masa de la arena del hormigón de 25 MPa .....	188
Tabla A2. 4. Corrección por humedad y absorción de un hormigón de 25 MPa.....	189
Tabla A3. 1. t Student (parte 1).....	193
Tabla A3. 2. t Student (parte 2).....	194
Tabla A3. 3. Significado de la unidad o símbolo (esclerómetro).....	210
Tabla A3. 4. Determinación del índice de rebote (parte 1).....	211
Tabla A3. 5. Determinación del índice de rebote (parte 2).....	211

Tabla A3. 6. Determinación del índice de rebote (parte 3).....	212
Tabla A3. 7. Determinación del índice de rebote (parte 4).....	212
Tabla A3. 8. Determinación del índice de rebote (parte 5).....	213
Tabla A3. 9. Promedio de la determinación del índice rebote .....	213
Tabla A3. 10. Resumen del promedio de la determinación del índice de rebote.....	213
Tabla A3. 11. Promedio del error absoluto del esclerómetro .....	213
Tabla A3. 12. Análisis del ángulo de aplicación del esclerómetro .....	214
Tabla A3. 13. Significado de la unidad o símbolo (ultrasonido) .....	221
Tabla A3. 14. Velocidad del ultrasonido en el hormigón (parte 1).....	222
Tabla A3. 15. Velocidad del ultrasonido en el hormigón (parte 2).....	222
Tabla A3. 16. Velocidad del ultrasonido en el hormigón (parte 3).....	222
Tabla A3. 17. Velocidad del ultrasonido en el hormigón (parte 4).....	223
Tabla A3. 18. Velocidad del ultrasonido en el hormigón (parte 5).....	223
Tabla A3. 19. Resumen del promedio de la velocidad del ultrasonido.....	223
Tabla A3. 20. Promedio de la velocidad del ultrasonido .....	223
Tabla A3. 21. Promedio del error absoluto .....	223
Tabla A3. 22. Lectura del esclerómetro para calibrar la pistola Windsor.....	232
Tabla A3. 23. Lectura del ultrasonido para calibrar la pistola Windsor .....	232
Tabla A3. 24. Registro de la pistola Windsor .....	232
Tabla A3. 25. Promedio de la aplicación de los equipos de END en la probeta .....	232
Tabla A4.1. Datos para la regresión simple y múltiple del esclerómetro (-90°)/ultrasonido .....	237
Tabla A4. 2. Significado de las etiquetas para esta página .....	237
Tabla A4. 3. Valores de la regresión múltiple (parte 1).....	237
Tabla A4. 4. Valores de la regresión múltiple (parte 2).....	237
Tabla A4. 5. Datos para la regresión simple y múltiple del esclerómetro (0°)/ultrasonido .....	238
Tabla A4. 6. Valores de la regresión múltiple (parte 3).....	238
Tabla A4. 7. Significado de las etiquetas para esta página .....	238
Tabla A4. 8. Coeficiente de determinación.....	238

Tabla A4. 9. Validación de la velocidad del ultrasonido (parte 1) .....	240
Tabla A4. 10. Validación de la velocidad del ultrasonido (parte 2) .....	240
Tabla A4. 11. Validación de la velocidad del ultrasonido (parte 3) .....	240
Tabla A4. 12. Validación de la velocidad del ultrasonido (parte 4) .....	241
Tabla A4. 13. Validación de la velocidad del ultrasonido (parte 5) .....	241
Tabla A4. 14. Dato para la gráfica ultrasonido (1) .....	241
Tabla A4. 15. Dato para la gráfica ultrasonido (2) .....	241
Tabla A4. 16. Dato para la gráfica ultrasonido (3) .....	241
Tabla A4. 17. Dato para la gráfica ultrasonido (4) .....	241
Tabla A4. 18. Resistencia de las probetas de hormigón que fueron analizadas con la pistola Windsor .....	242
Tabla A4. 19. Valores usados para la elaboración de la gráfica de la pistola Windsor .....	243

## ÍNDICE DE FIGURA

Figura 2.1. Revenimiento.....	19
Figura 2.2. Corte longitudinal del esclerómetro C 181 N.....	25
Figura 2.3. Relación de la profundidad de carbonatación y coeficiente de corrección ...	31
Figura 2.4. Equipo de ultrasonido.....	34
Figura 2.5. Vista transversal de la viga durante el análisis con el ultrasonido .....	36
Figura 2.6. Influencia de las barras de acero en la velocidad de pulsos de ultrasonido...	36
Figura 2.7. Ensayo de la pistola Windsor .....	39
Figura 2.8. Forma aproximada de la zona de falla en el hormigón durante ensayo de penetración .....	39
Figura 2.9. Sonda .....	40
Figura 2.10. Nube de puntos .....	43
Figura 2.11. Regresión lineal .....	44
Figura 2.12. Regresión múltiple.....	44
Figura 2.13. Regresión no lineal .....	45
Figura 2.14. Ajuste de curvas.....	46
Figura 3.1. Gráfica del ensayo de probetas a compresión.....	69
Figura 3.2. Regresión simple de la resistencia vs índice de rebote (3-7 días) .....	70
Figura 3.3. Regresión simple de la resistencia vs índice de rebote (10-28 días) .....	70
Figura 3.4. Regresión múltiple de la resistencia vs índice de rebote(-90°)/velocidad (3-7 días).....	71
Figura 3.5. Regresión múltiple de la resistencia vs índice de rebote(-90°)/velocidad (10-28 días).....	71
Figura 3.6. Regresión simple de la resistencia vs índice de rebote(0°) [10-28 días].....	72
Figura 3.7. Regresión múltiple de la resistencia vs índice de rebote(0°)/velocidad (10-28 días).....	73
Figura 3.8. Regresión simple no lineal de la resistencia vs ultrasonido.....	73
Figura 3.9. Regresión simple lineal de la resistencia vs pistola Windsor.....	74
Figura 3.10. Gráfico del promedio de la resistencia en los edificios .....	104
Figura 3.11. Desviación estándar de la resistencia a compresión.....	104
Figura 3.12. Laboratorio de suelo (viga y columna).....	105

Figura 3.13. Arquitectura (viga y columna).....	105
Figura 3.14. Análisis del cumplimiento de la hipótesis .....	106
Figura A1. 1. Fotografías del anexo 1.2.....	125
Figura A1. 2. Fotografías del anexo 1.3.....	130
Figura A1. 3. Cuarteador.....	131
Figura A1. 4. Fotografías del anexo 1.4.....	132
Figura A1. 5. Curva granulométrica del agregado grueso .....	141
Figura A1. 6. Curva granulométrica del agregado fino .....	142
Figura A1. 7. Fotografías del anexo 1.5.....	143
Figura A1. 8. Fotografías del anexo 1.7.....	152
Figura A1. 9. Fotografías del anexo 1.8.....	161
Figura A1. 10. Fotografías del anexo 1.9.....	169
Figura A1. 11. Fotografías del anexo 1.10.....	178
Figura A2. 1. Hoja técnica Sika ViscoCrete 5-800 (parte 1) .....	185
Figura A2. 2. Hoja técnica Sika ViscoCrete 5-800 (parte 2) .....	186
Figura A2. 3. Hoja técnica Sika ViscoCrete 5-800 (parte 3) .....	187
Figura A2. 4. Fotografías del anexo 2.2.....	190
Figura A3. 1. Gráfica del promedio del índice de rebote.....	213
Figura A3. 2. Gráfica del error absoluto del esclerómetro.....	213
Figura A3. 3. Gráfica del ultrasonido.....	223
Figura A3. 4. Gráfica del error absoluto .....	223
Figura A3. 5. Gráfica de la distancia de la sonda (21 MPa) .....	232
Figura A3. 6. Gráfica de la distancia de la sonda (25 MPa) .....	232
Figura A3. 7. Gráfica de la distancia de la sonda (30 MPa) .....	232
Figura A3. 8. Fotografías del anexo 3.....	233
Figura A4. 1. Gráfica del esclerómetro/3-7 días/-90° .....	237

Figura A4. 2. Gráfica del esclerómetro/10-28 días/-90° .....	237
Figura A4. 3. Regresión múltiple (parte 1) .....	237
Figura A4. 4. Regresión múltiple (parte 2) .....	237
Figura A4. 5. Regresión múltiple (parte 3) .....	238
Figura A4. 6. Gráfica del ultrasonido.....	241
Figura A4. 7. Regresión simple de la resistencia vs pistola Windsor .....	243
Figura A5 1. Fotografía de la aplicación de los END en laboratorio de suelo .....	245
Figura A5 2. Fotografía de la aplicación de los END en el bloque de arquitectura.....	246