

# Tabla de contenido

<b>Índice de figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Revestimientos de túneles	1
1.1.2. Hormigón reforzado con fibras	2
1.2. Motivación	4
1.3. Alcance y aporte de la memoria	4
1.4. Objetivos y planteamiento del problema	5
1.5. Estructura de la memoria	5
<b>2. Revisión bibliográfica general</b>	<b>7</b>
2.1. Túneles	7
2.1.1. El Nuevo Método Austriaco de construcción de túneles	7
2.1.2. Fallas típicas en revestimientos de túneles producto de sismos	8
2.1.3. Estimación de las sollicitaciones estáticas sobre el túnel	10
2.1.4. Diseño sísmico de túneles	12
2.2. Modelación numérica por elementos finitos	13
2.2.1. El arte de mallar	15
2.2.2. Conceptos esenciales de OpenSees y sección de fibras	16
2.2.3. Postprocesamiento	17
2.3. Comportamiento de materiales	17
2.3.1. Hormigón proyectado	17
2.3.2. Hormigón reforzado con fibras	20
2.3.3. Suelo	24
2.3.4. Interfaces suelo-estructura	25
2.4. Validación de modelos mediante experimentos	26
2.4.1. Ensayos sobre HRF ¿Isostáticos o hiperestáticos?	26
2.4.2. Instrumentación	27

<b>3. Diseño de los experimentos y construcción de los especímenes</b>	<b>30</b>
3.1. Descripción general de los experimentos . . . . .	30
3.2. Criterios de escalamiento de las probetas . . . . .	31
3.2.1. Características de los túneles de la Línea 6 del Metro de Santiago . . . . .	31
3.2.2. Características de las probetas a escala . . . . .	32
3.3. Construcción de las probetas . . . . .	33
3.3.1. Aspectos generales . . . . .	33
3.3.2. Preparación y armado de los moldajes . . . . .	34
3.3.3. Hormigón utilizado . . . . .	36
3.3.4. Fibras usadas . . . . .	37
3.3.5. Proyección del hormigón . . . . .	38
3.3.6. Desmoldaje . . . . .	39
3.3.7. Extracción, corte y emparejado de cilindros . . . . .	39
3.4. Implementos para el ensaye de vigas con secciones de túnel . . . . .	40
3.4.1. Sistema de carga transversal . . . . .	40
3.4.2. Sistema de carga axial . . . . .	40
3.4.3. Características y disposición de los LVDTs usados . . . . .	41
3.4.4. Características de las celdas de carga (axial y transversal) . . . . .	41
3.4.5. Implementos adicionales . . . . .	42
3.4.6. Adquisición de datos . . . . .	42
3.4.7. Características de las cámaras y accesorios . . . . .	42
3.4.8. Conceptos esenciales de Ncorr (software DIC) . . . . .	43
3.4.9. Patrón aleatorio de correlación de imágenes . . . . .	43
3.4.10. Fotografía esquemática del montaje experimental de los ensayos . . . . .	45
3.5. Implementos para el ensaye de las probetas de caracterización de materiales . . . . .	46
<b>4. Resultados experimentales</b>	<b>47</b>
4.1. Descripción del capítulo y fechas de ensayos . . . . .	47
4.2. Ensayos a tracción de las barras de refuerzo . . . . .	48
4.3. Ensayos a compresión de testigos . . . . .	49
4.4. Ensayos a tracción indirecta (método brasileño) de testigos . . . . .	51
4.5. Ensayos a tracción directa de testigos . . . . .	52
4.6. Ensayo a flexión de viguetas de HRF (EN 14651) . . . . .	53
4.7. Ensayos a flexión con carga axial de probetas largas . . . . .	55
4.7.1. Ensayos de probetas A1 y A2 . . . . .	57
4.7.2. Ensayos de probetas B1 y B2 . . . . .	59
4.7.3. Ensayos de probetas DA1 y DA2 . . . . .	61
4.7.4. Ensayos de probetas DP1 y DP2 . . . . .	63
4.8. Ensayos a flexión con carga axial de probetas cortas . . . . .	66
4.8.1. Ensayos de probetas CA1 y CA2 . . . . .	67
4.8.2. Ensayos de probetas CP1 y CP2 . . . . .	69
4.8.3. Comparación entre refuerzos . . . . .	71

<b>5. Estudios analíticos y numéricos</b>	<b>74</b>
5.1. Descripción general del estudio analítico . . . . .	74
5.2. Modelos de comportamiento de los experimentos. . . . .	74
5.2.1. Modelo de comportamiento de aceros de refuerzo . . . . .	74
5.2.2. Modelo de comportamiento de los hormigones . . . . .	75
5.2.3. Modelo de elementos finitos de ensayos a flexión sin refuerzo (EN14651) . . . . .	76
5.2.4. Modelos de elementos finitos de ensayos sobre probetas a escala 1 a 2. . . . .	77
5.2.5. Comparación simulada entre refuerzo con fibras vs con malla sin marco reticulado para el sostenimiento . . . . .	81
5.3. Modelo de elementos finitos del túnel . . . . .	82
5.3.1. Descripción general del análisis . . . . .	82
5.3.2. Elementos de suelo . . . . .	82
5.3.3. Modelos de comportamiento del suelo . . . . .	83
5.3.4. Elementos del revestimiento . . . . .	85
5.3.5. Materiales del revestimiento . . . . .	86
5.3.6. Elementos de interfaz suelo-revestimiento . . . . .	87
5.3.7. Elementos auxiliares . . . . .	88
5.3.8. Análisis de secciones a escala completa . . . . .	88
5.3.9. Malla de elementos . . . . .	91
5.3.10. Condiciones de borde . . . . .	93
5.3.11. Cargas y secuencia de modelos . . . . .	94
5.4. Resultados . . . . .	95
5.4.1. Aplicación de las cargas de gravedad sobre el suelo no excavado. . . . .	95
5.4.2. Excavación del material interior (Método Alpha) . . . . .	95
5.4.3. Colocación del sostenimiento y revestimiento . . . . .	97
5.4.4. Análisis sísmico de ovalamiento . . . . .	99
5.4.5. Discusión sobre los parámetros ocupados . . . . .	106
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>108</b>
6.1. Campaña experimental . . . . .	108
6.1.1. Conclusiones . . . . .	108
6.1.2. Recomendaciones . . . . .	109
6.2. Modelamiento . . . . .	109
6.2.1. Conclusiones . . . . .	109
6.2.2. Recomendaciones . . . . .	110
6.3. Diseño . . . . .	110
6.3.1. Conclusiones . . . . .	110
6.3.2. Recomendaciones . . . . .	110
<b>Bibliografía</b>	<b>111</b>
.1. Corrección de datos entregados por la máquina universal Instron 600 LX por flexibilidad.	115
.2. Filosofía y ejemplos de ajuste de datos de ensayos . . . . .	116

# Índice de figuras

1. Personas que me ayudaron en mi memoria . . . . .	IV
1.1. Modelo de Wang del efecto sísmico en túneles. . . . .	2
1.2. Secciones del revestimiento de la Línea 6 del Metro. . . . .	5
2.1. Fallas en revestimientos de túneles, Terremoto de Chi Chi, Taiwán, 1999. . . . .	8
2.2. Colapso de la estación de Daikai. . . . .	9
2.3. Descripción gráfica de algunas teorías de empuje. . . . .	10
2.4. Efecto arco y métodos bidimensionales para modelarlo. . . . .	11
2.5. Ejemplos de métodos de análisis sísmico para estructuras enterradas. . . . .	13
2.6. Concepto de elemento de fibras . . . . .	16
2.7. Influencia de la resistencia y acelerante sobre el comportamiento del shotcrete. . . . .	18
2.8. Modelos de plasticidad en hormigón armado. . . . .	19
2.9. Tipologías de fibras y comportamiento del hormigón con fibras . . . . .	21
2.10. Ubicación y descripción de las unidades geológicas de la cuenca de Santiago. . . . .	24
2.11. Comportamiento experimental de las gravas de Santiago. . . . .	25
2.12. Algunos tipos de ensayos de caracterización del HRF. . . . .	27
2.13. Filosofía de la correlación de imágenes digitales (DIC). . . . .	28
2.14. Ejemplos de diferentes patrones para correlación de imágenes. . . . .	28
3.1. Secciones del revestimiento de la Línea 6 del Metro. . . . .	32
3.2. Características de las probetas que simulan secciones de revestimiento de túneles. . . . .	33
3.3. Construcción de los moldajes . . . . .	35
3.4. Granulometría y tamaño máximo de áridos . . . . .	36
3.5. Comparación entre fibras Dramix 3D 65/35 BG y EPC BarChip 48 . . . . .	37
3.6. Implementos y partes de la proyección del hormigón de las probetas. . . . .	38
3.7. Presencia de nidos en aristas al momento de desmoldar . . . . .	39
3.8. Extracción y preparación de testigos para ensayos de caracterización. . . . .	39
3.9. Sistema de carga axial. . . . .	40
3.10. Disposición de LVDTs para probetas largas. . . . .	41
3.11. Disposición de LVDTs para probetas cortas. . . . .	41
3.12. Algunos patrones investigados. Las figuras representan cuadrados de 5 x 5 cm <sup>2</sup> . . . . .	44
3.13. Vigas y muros ensayados previamente con fotogrametría. . . . .	44
3.14. Parámetros de entrada del análisis DIC mediante Ncorr. . . . .	45

3.15. Fotografía esquemática del ensayo a escala 1 a 2 sobre probetas largas. . . . .	45
4.1. Ensayos sobre aceros A630S y AT56-50H. . . . .	48
4.2. Modos de falla de barras de acero ensayadas monotónicamente a tracción. . . . .	49
4.3. Resultados $\sigma$ - $\epsilon$ obtenidos experimentalmente sobre testigos de hormigón con y sin fibras. . . . .	50
4.4. Fotografía de ensayo a compresión. . . . .	50
4.5. Fotografía de ensayo a tracción indirecta a deformación controlada y modos de falla. . . . .	51
4.6. Resultados $P - \delta$ de ensayos a tracción indirecta (método brasileño), y explicación . . . . .	51
4.7. Descripción fotográfica de ensayos a tracción . . . . .	52
4.8. Resultados experimentales de testigos a tracción directa . . . . .	53
4.9. Descripción fotográfica de ensayos EN 14651. . . . .	53
4.10. Resultados carga-deflexión para ensayo EN14651. . . . .	54
4.11. Caracterización EN14651 del HRF . . . . .	54
4.12. Esquema con posición de los LVDTs en ensayos sobre probetas A, B, DA y DP. . . . .	55
4.13. Evolución de la carga axial durante los ensayos a flexión sobre probetas A, B, DP y DA. . . . .	56
4.14. Descripción fotográfica del problema de apoyos. . . . .	56
4.15. Descripción fotográfica del problema de la carga axial. . . . .	57
4.16. Respuesta $P - \delta$ de probetas A1 y A2. [-1mm] . . . . .	57
4.17. Curvaturas para distintos instantes de tiempo, probetas A. . . . .	58
4.18. Corte y cinemática de los ensayos. . . . .	59
4.19. Modos de falla de probetas A1 y A2. [-3mm] . . . . .	59
4.20. Respuesta $P - \delta$ de probetas B1 y B2. . . . .	60
4.21. Curvaturas para distintos instantes de tiempo, probetas B. . . . .	61
4.22. Modos de falla de probetas B1 y B2. . . . .	61
4.23. Respuesta $P - \delta$ de probetas DA1 y DA2. . . . .	62
4.24. Curvaturas para distintos instantes de tiempo, probetas DA. . . . .	63
4.25. Modos de falla de probetas DA1 y DA2. . . . .	63
4.26. Respuesta $P - \delta$ de probetas DP1 y DP2. . . . .	64
4.27. Curvaturas para distintos instantes de tiempo, probetas DP. . . . .	65
4.28. Modos de falla de probetas DP1 y DP2. . . . .	65
4.29. Evolución de la carga axial durante los ensayos a flexión sobre probetas CP y CA. . . . .	66
4.30. Respuesta $P - \delta$ de probetas CA1 y CA2. . . . .	67
4.31. Curvaturas para distintos instantes de tiempo, probetas CA. . . . .	68
4.32. Deformaciones de corte para distintos instantes de tiempo, probetas CA. . . . .	68
4.33. Deslizamiento en la grieta principal de la probeta CA1. . . . .	69
4.34. Desarrollo de grietas de la probeta CA2. . . . .	69
4.35. Respuesta $P - \delta$ de probetas CP1 y CP2. . . . .	70
4.36. Curvaturas para distintos instantes de tiempo, probetas CP. . . . .	70
4.37. Deformaciones de corte para distintos instantes de tiempo, probetas CP. . . . .	71
4.38. Comparación $P$ - $\delta$ entre probetas largas con diferentes refuerzos según carga axial. . . . .	71
4.39. Comparación Energía- $\delta$ entre probetas largas con diferentes refuerzos según carga axial. . . . .	72

5.1. Ajuste de modelos de aceros AT56-50H y A630S a experimentos en tracción. . . . .	75
5.2. Ajuste de modelos de hormigones a experimentos uniaxiales en compresión. . . . .	76
5.3. Ajuste numérico sobre ensayos EN14651. . . . .	77
5.4. Ajuste numérico sobre ensayos A1 y A2. . . . .	77
5.5. Ajuste numérico sobre ensayos B1 y B2. . . . .	78
5.6. Ajuste de ensayos DA1 y DA2. . . . .	79
5.7. Ajuste de ensayos DP1 y DP2. . . . .	80
5.8. Ajuste sobre ensayos CA1 y CA2. . . . .	80
5.9. Ajuste sobre ensayos CP1 y CP2. . . . .	81
5.10. Comparación simulada entre malla y fibras . . . . .	81
5.11. Funciones de interpolación para elementos cuadrilaterales bicuadráticos . . . . .	83
5.12. Descripción espacial, fotográfica y estratigráfica de la línea 6 y de la grava de Santiago	83
5.13. Modelo n-dimensional PDMY02 . . . . .	84
5.14. Comportamiento simulado de la grava de Santiago. . . . .	84
5.15. Detallamiento del sostenimiento y revestimiento . . . . .	86
5.16. Modelos de materiales ocupados. . . . .	86
5.17. Elementos de interfaz suelo-revestimiento ocupados. . . . .	87
5.18. Diagrama de los elementos auxiliares (vigas rígidas) . . . . .	88
5.19. Secciones del revestimiento de la Línea 6 del Metro. . . . .	88
5.20. Diagramas $\phi - M$ con cargas axiales bajas para diferentes sostenimientos. . . . .	89
5.21. Diagramas $\phi - M$ con cargas axiales bajas para los diferentes revestimientos completos.	89
5.22. Diagramas de interacción para los diferentes sostenimientos y secciones completas. . . . .	90
5.23. Análisis seccional incorporando desfase de cargas sostenimiento-revestimiento . . . . .	90
5.24. Comparación entre los diferentes tipos de mallados investigados inicialmente. . . . .	91
5.25. Mallado escogido para posteriores análisis. . . . .	92
5.26. Histogramas con indicadores generales de la calidad geométrica del mallado usada. . . . .	93
5.27. Tensiones iniciales en el suelo sin excavar, en Pa . . . . .	95
5.28. Tensiones y desplazamientos en el suelo en la fase de excavación ( $\alpha = 0,5$ ) . . . . .	96
5.29. Líneas de flujo de partículas, $\alpha_1=0.5$ . . . . .	96
5.30. Esfuerzos sobre el sostenimiento en la fase estática, hipótesis No-slip . . . . .	97
5.31. Esfuerzos sobre el sostenimiento en la fase estática, hipótesis Full-slip . . . . .	98
5.32. Interacción M-N para cargas estáticas. . . . .	98
5.33. Análisis por desangulación según el Manual de carreteras Vol. 3. . . . .	100
5.34. Análisis de sitio en OpenSees. . . . .	100
5.35. Factores de interacción R como función de las desangulaciones . . . . .	101
5.36. Factores de interacción R como función de las desangulaciones . . . . .	101
5.37. Formas de deformada del suelo y la estructura . . . . .	102
5.38. Esfuerzos sobre el sostenimiento en la fase sísmica, hipótesis No-slip . . . . .	103
5.39. Esfuerzos sobre el revestimiento en la fase sísmica, hipótesis No-slip . . . . .	103
5.40. Esfuerzos sobre el sostenimiento en la fase sísmica, hipótesis Full-slip . . . . .	104
5.41. Esfuerzos sobre el revestimiento en la fase sísmica, hipótesis Full-slip . . . . .	104
5.42. Esfuerzos totales, hipótesis No-slip . . . . .	105

5.43. Esfuerzos totales, hipótesis Full-slip . . . . .	105
5.44. Interacción M-N para cargas sísmicas. . . . .	105
5.45. Demandas de curvatura sísmicas . . . . .	106
1. Ajuste del sensor de la máquina universal vía el compresómetro con LVDTs. . . . .	115
2. Señales de salida crudas de los instrumentos. . . . .	116
3. Señales de salida semiprocesadas de los instrumentos. . . . .	116
4. Corrección de datos por medición incorrecta de carga transversal. . . . .	117
5. Corrección de datos por no medición de desplazamientos iniciales. Probeta A2. . . . .	117

# Índice de tablas

2.1. Vínculos causa/efecto de daño en el túnel. . . . .	9
2.2. Algunas normas de ensayo del hormigón con fibras. . . . .	22
2.3. Estado del arte en el diseño con HRFA. . . . .	23
3.1. Normas de referencia para el diseño de los experimentos. . . . .	31
3.2. Dimensiones y error de escalamiento a 1 a 2 . . . . .	32
3.3. Especificaciones generales de las probetas para caracterizar a los materiales . . . . .	34
3.4. Especificaciones generales de las probetas que simulan secciones de túneles . . . . .	34
3.5. Especificaciones generales de los testigos a ensayar . . . . .	35
3.6. Materiales para el hormigón. . . . .	36
3.7. Diseño del hormigón utilizado. . . . .	36
3.8. Fibras usadas. . . . .	37
3.9. Material audiovisual con el proceso de construcción de las probetas. . . . .	38
3.10. Características de cámaras disponibles . . . . .	42
3.11. Experimento comparativo entre técnicas de moteado para análisis DIC. . . . .	43
4.1. Fechas de ensayos . . . . .	47
4.2. Valores característicos aproximados de aceros. . . . .	48
4.3. Indicadores de los hormigones ensayados a compresión . . . . .	49
4.4. Valores característicos de tracción . . . . .	52
4.5. Caracterización de resultados de ensayos EN 14651. . . . .	54
4.6. Refuerzos y cargas axiales para cada ensayo. Longitud entre apoyos de 1300 mm. . . . .	55
4.7. Datos y observaciones de los experimentos A1 y A2. . . . .	57
4.8. Datos y observaciones de los experimentos B1 y B2. . . . .	59
4.9. Datos y observaciones de los experimentos DA1 y DA2. . . . .	61
4.10. Datos y observaciones de los experimentos DP1 y DP2. . . . .	63
4.11. Refuerzos y cargas axiales para cada ensayo. Longitud entre apoyos de 500 mm. . . . .	66
4.12. Datos y observaciones de los experimentos CA1 y CA2. . . . .	67
4.13. Datos y observaciones de los experimentos CP1 y CP2. . . . .	69
4.14. Indicadores de ductilidad . . . . .	72
4.15. Largos de rótulas plásticas $l_p$ estimados . . . . .	72
5.1. Parámetros de ajuste del modelo ReinforcingSteel para aceros ensayados. . . . .	75

5.2. Parámetros de ajuste del modelo <b>ConcreteCM</b> para hormigones ensayados a compresión.	75
5.3. Parámetros de ajuste del modelo <b>ConcreteCM</b> para hormigones ensayados a flexotracción.	76
5.4. Parámetros usados para el modelo de material bidimensional Multi-Yield . . . . .	85
5.5. Desplazamientos verticales máximos como función de $\alpha$ . . . . .	97

# Símbolos y abreviaciones

FRC Fibre reinforced concrete

HRF Hormigón reforzado con fibras

HRFA Hormigón reforzado con fibras de acero

NATM New Austrian Tunnelling Method