

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Proyecto “Smart Open Pit Slope Management Project”	1
1.2 Formulación del problema	2
1.3 Hipótesis de trabajo.....	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 General.....	4
1.4.2 Específicos	4
1.5 Importancia de la tesis	5
1.6 Metodología y plan de trabajo	6
1.7 Apartados de la tesis.....	7
2. ANTECEDENTES	9
2.1 Presión de poro	9
2.2 Instrumentación utilizada para el monitoreo de presión de poros	11
2.2.1 Piezómetros de tubería.....	13
2.2.2 Piezómetro de cuerda vibrante	16
2.3 Instalación de piezómetros.....	17
2.3.1 Método Paquete de arena (método tradicional).....	18
2.3.2 Método de Fully Grouted (relleno completo).....	19
2.4 Tipos de lechadas	21
2.4.1 Lechada de bentonita	21
2.4.2 Lechada cemento – bentonita	21
2.4.3 Diseño de la mezcla de la lechada	22
2.5 Conclusión	23
3. LA NUEVA TECNOLOGÍA ENSM.....	25
3.1 Introducción.....	25
3.2 Smart Marker (SM).....	25
3.3 Networked Smart Markers (NSM)	26
3.4 Enhanced Networked Smart Markers (ENSM).....	29
3.5 Conclusiones.....	32
4. SELECCIÓN DEL SENSOR	33
4.1 Introducción.....	33
4.2 Sensores electrónicos de presión	33
4.3 Requisitos del sensor a implementar en el Marcador.....	37

4.4	Elección del sensor	38
4.5	Validación del sensor	40
4.6	Conclusiones.....	40
5.	SELECCIÓN DEL FILTRO.....	42
5.1	Introducción.....	42
5.2	Requerimientos para la selección del filtro.....	42
5.3	Elección del filtro	43
5.4	Validación del filtro	45
5.4.1	Prueba 1. Resistencia a la lechada	45
5.4.2	Test 2. Influencia del filtro en la medición de presión de agua	48
5.5	Conclusiones.....	51
6.	IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR Y EL FILTRO EN EL MARCADOR	52
6.1	Introducción.....	52
6.2	Implementación del sensor de presión de poros.....	52
6.3	Implementación del filtro	54
6.4	Conclusiones.....	55
7.	DISEÑO DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS MARCADORES EN TERRENO	56
7.1	Introducción.....	56
7.2	Método Fully Grouted.....	56
7.3	Identificación de factores clave en el diseño de instalación de los Marcadores.....	58
7.3.1	Permeabilidad de la lechada	58
7.3.2	Tiempo de respuesta	60
7.4	Consideraciones en la instalación de los ENSM	62
7.4.1	El tipo y elaboración de la lechada	62
7.4.2	El método de instalación de la lechada	63
7.4.3	Otras consideraciones	64
7.4.4	Recomendaciones finales.....	65
7.5	Conclusiones.....	65
8.	PROPUESTA DE INFRAESTRUCTURA.....	66
8.1	Requerimientos previos de la instalación	66
8.2	Método de instalación	66
8.3	Conclusiones.....	70
9.	DISEÑO DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.....	71
9.1	Introducción.....	71
9.2	Pruebas sobre lechada	71

9.2.1	Elaboración de lechada y observación de su comportamiento.....	71
9.2.2	Análisis de la permeabilidad y el grado de saturación de la lechada.....	75
9.3	Pruebas sobre los ENSM	77
9.3.1	Ensayo del método de instalación de los Marcadores (ENSM)	77
9.3.2	Análisis del tiempo de respuesta de los Marcadores durante la instalación 78	
9.3.3	Análisis del tiempo de respuesta de los Marcadores después de la estabilización.....	79
9.4	Conclusiones.....	81
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
10.1	Conclusiones	82
10.2	Recomendaciones	84
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	ANEXOS	88
Anexo A	Publicación coescrita en el MassMin 2016.....	88
Anexo B	Publicación coescrita y presentada en el WIM 2016	104
Anexo C	Publicación coescrita en el Minin 2016.....	116
Anexo D	Poster coelaborado en el MassMin 2016	125
Anexo E	Características Sensor OEM TI-1 (WIKA, 2016)	126
Anexo F	Características del Sensor OEM TTF-1 (WIKA, 2016)	131
Anexo G	Procedimiento para test del filtro realizado en Brisbane, Australia.....	136
Anexo H	Ficha de datos de la pruebas de laboratorio del filtro	139
Anexo I	Instalación del método de Fully Grouted	140
Anexo J	Componentes para la infraestructura de instalación de los ENSM.....	143

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación entre tipos de piezómetros.	12
Tabla 2.2 Proporciones de Cemento/bentonita/agua para dos mezclas de lechada (Modificada de Mikkelsen y Green, 2003)	23
Tabla 4.1 Conversiones entre diferentes unidades de presión. (Modificada de Creus, 2010)	35
Tabla 4.2 Características de los sensores preseleccionados (Elaboración propia).....	39
Tabla 5.1 Comparación entre tipos de filtros (Elaboración propia).....	43
Tabla 7.1 Proporciones de Cemento/bentonita/agua para dos mezclas de lechada (Modificada de Mikkelsen y Green, 2003)	57
Tabla 7.2 Permeabilidad (k) de algunas lechadas (Vaughan, 1973).	58
Tabla 8.1 Tabla comparativa entre Wire line y la máquina de perforación para el descenso de los Marcadores (Modificado de doc. Int, 2016).....	67
Tabla 8.2 Tabla comparativa entre el PVC y la manguera de plástico flexible para el engrautado (Modificado de doc. Int)	68

Tablas Anexos

Tabla H 1 Ficha de datos de las prueba de Influencia del filtro en la medición de presión de agua (Elaboración propia, 2015)	139
Tabla I 1 Indicaciones de dos maneras de instalación del método de Fully Grouted (Elaboración propia, 2016)	140
Tabla J 1 Características de las cuerdas y cordil (From http://www.teufelberger.com/en/products/climbing-recreation/static-ropes/kmiii.html#)	143
Tabla J 2 Capacidad de carga nominal de trabajo del trípode	144

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Perfil en condiciones hidrostáticas en el que la presión de poro varía linealmente con la cota (Escuder et. al., 2009).....	10
Figura 2.2 Variación de la presión de poros en la vertical en condiciones hidrodinámicas (Escuder et al., 2009).....	11
Figura 2.3 Esquema de un piezómetro con sonda de hidronivel (sisgeo.com, 2016)	14
Figura 2.4 Piezómetro Standpipe (sisgeo.com, 2016).....	15
Figura 2.5 Tipos de sensores de cuerda vibrante (Moreno y Martínez, 2016)	16
Figura 2.6 Esquema de un piezómetro de cuerda vibrante (Moreno y Martínez, 2016).	16
Figura 2.7 Posibles instalaciones de piezómetros en sondajes. (Read et al., 2009).....	18
Figura 2.8 Método de Fully Grouted para multipiezómetros de cuerda vibrante (Ekkerd, 2011).....	20
Figura 3.1 Smart Marker (Steffen & Kuiper, 2012)	26
Figura 3.2 Networked Smart Marker (Sánchez et. al., 2016)	26
Figura 3.3 Esquema de funcionamiento de los NSM (Widzyk-Capehart et.al., 2016b)..	27
Figura 3.4 Esquema de la instalación de los Marcadores en una mina (Widzyk-Capehart et.al., 2015)	27
Figura 3.5 Ubicación del sistema de monitoreo en ambas pruebas de terreno (Widzyk-Capehart et.al., 2016c).....	28
Figura 3.6 Diagrama 3D de las medidas obtenidas por los marcadores instalados (Widzyk-Capehart et.al., 2016c).....	29
Figura 3.7 Diagrama del objetivo de estudio de deformación del terreno de los marcadores (Widzyk-Capehart et.al., 2016a).....	29
Figura 3.8 Prototipo genérico de Enhanced Networked Smart Marker (Foto de Sánchez, E.).....	30
Figura 3.9 Resultados obtenidos en una prueba de filtrado de señal de un acelerómetro	31
Figura 3.10 Prototipo del nuevo ENSM con sensor de presión de poros (Sánchez et. al., 2016).....	31
Figura 4.1 Diferencia entre presión absoluta y relativa (Wika, 2010).....	36
Figura 4.2 Rangos de medición, de sobrepresión y de destrucción de un sensor (Gaßmann y Gries, 2010).....	36
Figura 4.3 Sensores preseleccionados (a) OEM-TI-1 y (b) OEM TTF-1 (WIKA, 2015)..	38
Figura 5.1 Malla de acero inoxidable de 48µm de diámetro de abertura.....	44
Figura 5.2 Malla de acero inoxidable de 48µm junto con el adaptador. (a) se puede ver los tres componentes por separado. (b) el filtro ha sido incorporado al adaptador grande, faltando por incorporar la pieza negra pequeña (Elexon, 2016).....	44
Figura 5.3 Esquema de instalación de la malla metálica de 48µm en la base del PVC de 103mm (Elaboración propia, 2016).....	45
Figura 5.4 Esquema de instalación del PVC de 18 mm con el filtro instalado en el PVC de 103mm (Elaboración propia, 2016).....	46
Figura 5.5 Apreciación de gota de agua saliendo a través del filtro en el primer montaje (Foto de Sánchez, E., 2015).....	47
Figura 5.6 Apreciación de gota de agua saliendo a través del tubo con filtro en el segundo montaje (Foto de Sánchez, E., 2015).....	47
Figura 5.7 Esquema de instalación del montaje del segundo test (Elaboración propia, 2016).....	48

Figura 5.8 Instalación completa con medidor de altura de agua y medidas tomadas en el PVC (Fotos de Sánchez, E., 2015).	49
Figura 5.9 Representación gráfica altura del agua vs tiempo (Elaboración propia).	50
Figura 6.1 componentes electrónicos del Marcador.....	52
Figura 6.2 Esquema de conexión a proceso de un sensor de presión (bloginstrumentacion.com, 2016)	53
Figura 6.3 Zona de conexión de procesos conectada con el exterior del Marcador (Elexon, 2016).	53
Figura 6.4 Vista posterior del transductor incorporado en el orificio roscado del Marcador (Elexon, 2016).	54
Figura 6.5 Filtro incorporado en el sensor mediante un adaptador (Elexon, 2016).	54
Figura 6.6 Sensor de presión de poros y filtro incorporados en el Marcador (Elexon, 2016).	55
Figura 7.1 Relación entre la permeabilidad y la relación de vacíos y la presión de confinamiento. (Contreras, 2008)	59
Figura 7.2 Relación de la resistencia a la compresión no confinada con la concentración de agua-cemento (Contreras, 2008)	60
Figura 7.3 Tiempo de respuesta de paquete de arena vs Fully Grouted (Vaughan, 1969)	61
Figura 8.1 Mecanismo de amarre de los marcadores a la cuerda central (Elexon, 2016)	67
Figura 8.2 Esquema del método de instalación de los Marcadores con Wire line y tubería de plástico flexible (Modificado de doc.int., 2016)	69
Figura 8.3 Esquema en planta del método de instalación de los Marcadores con Wire line y tubería de plástico flexible ((Modificado de doc.int.)	70
Figura 9.1 Elaboración de la lechada (a) Pesaje y (b) mezclado de materiales(Foto de Sánchez, E.).....	72
Figura 9.2 Mezclas de lechadas elaboradas a) con bentonita cálcica y b) con bentonita sódica (Fotos de Sánchez, E.).	73
Figura 9.3 Vertido de lechada sódica por tubo de 12mm (Foto de Sánchez, E.).	74
Figura 9.4 Superficie de los moldes de lechada a los tres días a) con bentonita sódica y b) con bentonita cálcica.....	74
Figura 9.5 Corte longitudinal y transversal de los dos moldes a los siete días	75
Figura 9.6 Equipo triaxial de carga variable a utilizar en el ensayo de permeabilidad de pared flexible.	76
Figura 9.7 Esquema del montaje del ensayo de instalación de los Marcadores (Elaboración propia).....	78
Figura 9.8 Esquema del montaje del ensayo de análisis de tiempo de respuesta después de la estabilización (Elaboración propia).....	80

Figuras Anexos

Figura I 1 Esquema 1 de instalación de CV mediante el método de Fully Grouted.....	141
Figura I 2 Esquema 2 de instalación de CV mediante el método de Fully Grouted.....	142
Figura J 1 Trípode SKED-EVAC	144