



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Costo – efectividad de dos combinaciones de métodos de control de gradiente térmico en elementos de concreto masivo de infraestructura minera a más de 3000 m.s.n.m.

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Civil

AUTORES

Beny Nancy SOBREVILLA ARANA

Renzo Jesús Fabián ABANTO QUEVEDO

ASESOR

Dr. Omart Demetrio TELLO MALPARTIDA

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Sobrevilla, B. (2021). *Costo – efectividad de dos combinaciones de métodos de control de gradiente térmico en elementos de concreto masivo de infraestructura minera a más de 3000 m.s.n.m.*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Civil]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios: dos autores / un asesor

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Beny Nancy Sobrevilla Arana
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72661272
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5647-8615
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Renzo Jesús Fabián Abanto Quevedo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	71324260
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0580-7941
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Omart Demetrio Tello Malpartida
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08644876
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5043-6510
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Félix Santiago Sánchez Benites
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07171669
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Luis Miguel Morán Yáñez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06118148
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jorge Escalante Contreras
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	28286636
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica

Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Moquegua Provincia: Mariscal Nieto Distrito: Torata Latitud: -17.1043 Longitud: -70.6199
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2019-2020
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería, Tecnología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.00.00 Ingeniería civil https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.00 Ingeniería de la construcción https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.03



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

Siendo las 10:00 horas del día Jueves 07 de Octubre del 2021 y conforme a la Directiva General de Sustentación de Tesis en la Modalidad No Presencial, aprobada con Resolución Rectoral N° 01242-R-20, usando la Plataforma Virtual Google Meet, en presencia del Vicedecano Académico de la Facultad, Dr. Jaime César Mayorga Rojas y los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. FÉLIX SANTIAGO SÁNCHEZ BENITES	Presidente
Dr. LUIS MIGUEL MORÁN YÁÑEZ	Miembro
Mg. JORGE ESCALANTE CONTRERAS	Miembro

Reunidos en Acto Académico Virtual Público de Sustentación de la TESIS titulada: «**COSTO-EFECTIVIDAD DE DOS COMBINACIONES DE MÉTODOS DE CONTROL DE GRADIENTE TÉRMICO EN ELEMENTOS DE CONCRETO MASIVO DE INFRAESTRUCTURA MINERA A MÁS DE 3000 M.S.N.M.**» presentada por los Bachilleres **BENY NANCY SOBREVILLA ARANA** y **RENZO JESÚS FABIÁN ABANTO QUEVEDO**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, asesorados por el Dr. Omart Demetrio Tello Malpartida.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a los Bachilleres las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a : ***Satisfacción del Jurado***

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue: **15 (Quince)**

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**, a Doña **BENY NANCY SOBREVILLA ARANA** y a Don **RENZO JESÚS FABIÁN ABANTO QUEVEDO**.

Siendo las 11:30 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 07 de octubre de 2021

Dr. FÉLIX SANTIAGO SÁNCHEZ BENITES

PRESIDENTE

Dr. LUIS MIGUEL MORÁN YÁÑEZ

MIEMBRO

Mg. JORGE ESCALANTE CONTRERAS

MIEMBRO



UNMSM

Firmado digitalmente por SANTOS
RODRIGUEZ Ricardo Ramiro FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 21.10.2021 15:03:33 -05:00

Mg. RICARDO RAMIRO SANTOS RODRIGUEZ

DIRECTOR

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Dedicatoria

A nuestras familias, amigos y profesores.

Resumen

La investigación tuvo como objetivo establecer la relación costo – efectividad de dos combinaciones de métodos de control de gradiente térmico en elementos de concreto masivo de infraestructura minera; para así conocer la combinación que, con un menor costo sea más efectiva controlando el diferencial térmico. El tipo de investigación fue experimental; tomando como población los elementos de infraestructura minera del proyecto Quellaveco, se aplicó un muestreo no probabilístico verificando que cumpliesen con los criterios de exclusión, seleccionándose así cuatro cimentaciones, cuyos volúmenes oscilaban entre 900 a 1900 m³ y un Muro de Túnel de Recuperación de 221 m³. El procedimiento seguido tuvo como primer paso el estudio del comportamiento termodinámico teórico de los cinco elementos; luego de ello, se aplicó la Combinación 01 a tres elementos y la Combinación 02 a dos elementos, evaluando experimentalmente el comportamiento termodinámico que seguidamente fue comparado con el comportamiento teórico. De esta comparación, se estableció la efectividad de cada método en función a la cantidad de grados del gradiente térmico controlados y de forma paralela, se determinó lo costos de implementación y operación de la combinación aplicada. Finalmente, conociendo los grados controlados y costos en cada elemento en función a la combinación aplicada, se compararon los ratios de costo – efectividad. Con la Combinación 01 se obtuvo, como ratio más competitivo el de 0.29, y con la Combinación 02, 0.57. Bajo estos resultados, se concluyó que la Combinación 01 ofrece mayor efectividad en el control de gradiente térmico a un costo menor; en comparación con la Combinación 02.

Palabras clave: Concreto masivo, métodos de control de gradiente, comportamiento térmico, costo – efectividad.

Abstract

The aim of the research was to prove the cost-effectiveness of two combinations of thermal gradient control methods in massive concrete elements of mining infrastructure, to know the combination that with a lower cost is more effective in controlling the thermal differential. The type of research was experimental; taking as population the mining infrastructure elements of the Quellaveco project, a non-probabilistic sampling was applied verifying that they met the exclusion criteria, four foundations were selected, with volumes of 900 to 1900 m³ and a 221 m³ of a Tunnel Wall. The procedure followed had as a first step the study of the theoretical thermodynamic behaviour of the five elements; after that, the Combination 01 was applied to three elements and Combination 02 to two elements, evaluating the experimentally thermodynamic behaviour which was then compared with the theoretical behaviour. From this comparison, the effectiveness of each method was proven according to the number of controlled thermal gradient degrees and, in parallel, the implementation and operation costs of the applied combination were calculated. Finally, knowing the controlled degrees and costs in each element according to the applied combination, the cost-effectiveness ratios were compared. The most competitive ratio was 0.29 with Combination 01 and 0.57 with Combination 02. Based on these results, it was concluded that Combination 01 offers greater effectiveness in thermal gradient control at a lower cost compared to Combination 02.

Keywords: Mass concrete, gradient control methods, thermal behaviour, cost-effectiveness.

Tabla de Contenidos

Dedicatoria.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Tabla de Contenidos	v
Capítulo 1 Introducción	2
Realidad Problemática.....	2
Formulación del Problema.....	3
Justificación.....	3
Limitaciones	4
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos	5
Hipótesis	5
Hipótesis General.	5
Hipótesis Específica.	5
Capítulo 2 Marco Teórico.....	6
Antecedentes.....	6
Teorías	13
Concreto masivo.....	13
Comportamiento Térmico del concreto Masivo.....	15
Efectos del gradiente y temperatura máxima.	18
Métodos de control de gradiente térmico.	19
Métodos prevaciado.....	19
Métodos posvaciado.....	19
Costo efectividad.....	20
Técnicas de estimación de costos.	20
Definición de efectividad.	21
Definición de Términos	21
Capítulo 3 Metodología	22
Tipo y diseño de investigación	22
Variables y Operacionalización.....	22
V.I. (causa):.....	22
V.D. (efecto):	22
Población, muestra y muestreo	25
Unidad de estudio.....	25

Población.....	25
Muestra.....	25
Cimentación de Molino de Bolas 01.....	26
Cimentación de Molino de Bolas 02.....	31
Cimentación de Molino SAG 02.....	33
Cimentación de Túnel de Recuperación (Etapa 01).....	35
Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01).	40
Técnica e instrumentos de recolección y análisis de datos	42
Procedimiento.....	43
Presupuesto.	46
Mano de obra (M.O.).	46
Equipos y herramientas (EQP).....	47
Materiales (MAT.).	48
Subcontratos (SUB.).	49
Gastos Generales (GG.).	49
Estimación del comportamiento termodinámico de las unidades de estudio.	49
Análisis de datos	58
Aspectos éticos	58
Capítulo 4 Desarrollo de la Investigación.....	59
Cimentación de Molino de Bolas 01	59
Modelo Teórico.	59
Métodos de control de gradiente térmico implementados.....	62
Microclima.....	62
Turbocalefactores.....	64
Vaciado por celdas.....	66
Protección superficial.....	68
Datos de campo registrados.....	68
Ubicación de termocuplas.....	68
Lectura de termocuplas	69
Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.	71
Mano de obra (M.O.).	71
Equipos (EQP.).	71
Materiales.....	76
Cálculo del costo – efectividad.	80
Cimentación de Molino de Bolas 02	80
Modelo Teórico.....	80
Métodos de control de gradiente térmico implementados.....	80

Microclima.....	80
Turbocalefactores.....	81
Vaciado por celdas.....	82
Protección superficial.....	84
Datos de campo registrados.....	84
Ubicación de termocuplas.....	84
Lectura de termocuplas.....	85
Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.	86
Cálculo del costo – efectividad.	86
Cimentación de Molino SAG 02	86
Modelo Teórico.....	86
Métodos de control de gradiente térmico implementados.....	86
Microclima.....	87
Turbocalefactores.....	88
Vaciado por celdas.....	90
Protección superficial.....	92
Datos de campo registrados.....	92
Ubicación de termocuplas.....	92
Lectura de termocuplas.....	93
Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.	94
Cálculo del costo – efectividad.	94
Cimentación Túnel de Recuperación (Etapa 01).	95
Modelo Teórico.....	95
Métodos de control de gradiente térmico implementados.....	95
Microclima.....	95
Turbocalefactores.....	97
Vaciado por celdas.....	99
Protección superficial.....	100
Datos de campo registrados.....	100
Ubicación de termocuplas.....	100
Lectura de termocuplas.....	101
Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.	102
Cálculo del costo – efectividad.	102
Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01).	102
Modelo Teórico.....	102
Métodos de control de gradiente térmico implementados.....	103
Microclima.....	103

Turbocalefactores.....	104
Vaciado por celdas.....	106
Protección superficial.....	106
Datos de campo registrados.....	106
Ubicación de termocuplas.....	106
Lectura de termocuplas.....	107
Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.....	108
Cálculo del costo – efectividad.....	108
Capítulo 5 Resultados	109
Cimentación de Molino de Bolas 01	109
Comportamiento térmico del elemento.....	109
Modelo teórico del comportamiento térmico.....	109
Modelo experimental del comportamiento térmico.....	110
Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.....	110
Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.....	111
Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.....	111
Cimentación de Molino de Bolas 02	112
Comportamiento térmico del elemento.....	112
Modelo teórico del comportamiento térmico.....	112
Modelo experimental del comportamiento térmico.....	113
Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.....	113
Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.....	114
Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.....	114
Cimentación de Molino SAG 02	115
Comportamiento térmico del elemento.....	115
Modelo teórico del comportamiento térmico.....	115
Modelo experimental del comportamiento térmico.....	116
Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.....	116
Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.....	117
Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.....	117
Cimentación de Túnel de Recuperación (Etapa 01)	118
Comportamiento térmico del elemento.....	118
Modelo teórico del comportamiento térmico.....	118
Modelo experimental del comportamiento térmico.....	119

Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.	119
Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.	120
Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01).....	121
Comportamiento térmico del elemento.	121
Modelo teórico del comportamiento térmico.	121
Modelo experimental del comportamiento térmico.	122
Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.	122
Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.....	123
Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.	123
Resultados generales.....	124
Comportamiento térmico de los elementos.	124
Efectividad de las combinaciones de métodos de control del gradiente térmico.	127
Costos de implementación y operación de las combinaciones de métodos	128
Relación costo – efectividad del control del gradiente térmico.	129
Capítulo 6 Discusión de Resultados.....	131
Discusión	131
Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones	133
Conclusiones.....	133
Recomendaciones	134
Referencias.....	135
Anexos	139

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Componentes de la pregunta de investigación.</i>	3
Tabla 2 <i>Operacionalización de Variable Independiente</i>	23
Tabla 3 <i>Operacionalización de Variable Dependiente</i>	23
Tabla 4 <i>Matriz de consistencia</i>	24
Tabla 5 <i>Formulación del diseño K-CS-221-QA-DM-157.</i>	39
Tabla 6 <i>Tarifas de posesión y mantenimiento de equipos para control térmico (en USD).</i>	73
Tabla 7 <i>Tarifas de posesión, mantenimiento y combustible de equipos para control térmico (en S/).</i> ..	74
Tabla 8 <i>Costos de posesión, mantenimiento y combustible de equipos para control térmico.</i>	75
Tabla 9 <i>Costos de compra de materiales.</i>	77
Tabla 10 <i>Costos de compra de materiales en dólares.</i>	77
Tabla 11 <i>Costo total de compra de materiales, en dólares.</i>	79
Tabla 12 <i>Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Cimentación de Molino de Bolas 01.</i>	79
Tabla 13 <i>Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Cimentación de Molino de Bolas 02.</i>	86
Tabla 14 <i>Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Cimentación de Molino SAG 02.</i>	94
Tabla 15 <i>Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Cimentación de Túnel de Recuperación (Etapa 01).</i>	102
Tabla 16 <i>Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Muro de Túnel de Recuperación</i>	108

Lista de figuras

Figura 1. Efecto de la temperatura de colocación y el tiempo en el aumento adiabático de temperatura para concretos masivo con contenido de cemento Tipo I de 223 kg/m ³	17
Figura 2. Molinos de bolas en posición final	26
Figura 3. Molino de Bolas.	27
Figura 4. Cimentación de Molino de Bolas	28
Figura 5. Propiedades físicas y formulación del diseño K-CS-221-QA-DM-106.	30
Figura 6. Molino de Bolas 01y 02, de rojo la cimentación del Molino de Bolas 02.....	32
Figura 7. Molino SAG, de rojo se resalta la cimentación.	33
Figura 8. Planta de cimentación de Molino SAG, cimentación resaltada en línea roja.	34
Figura 9. Túnel de Recuperación y Muro Etapa 01.	35
Figura 10. Modelo 3D de Stockpile.	36
Figura 11. Modelo 3D de Stockpile, se observa el ‘Túnel de recuperación’ con aberturas en la parte superior para el ingreso del material a las fajas de transporte.....	37
Figura 12. Túnel de Recuperación.	37
Figura 13. Planta de cimentación de túnel de recuperación, etapa I	38
Figura 14. Modelo 3D del túnel de recuperación y muro.	40
Figura 15. Planta de muros de túnel de recuperación, en amarillo la Etapa 01.	41
Figura 16. Vista general de una termocupla.	42
Figura 17 y 18. Termocupla instalada previo al vaciado, el sensor está ubicado a la profundidad requerida y el cable protegido del concreto mediante cinta roja.....	42
Figura 19. Flujo de procesos.	45
Figura 20. Efecto de la temperatura de colocación y la exposición superficial en la edad a temperatura máxima para cemento Tipo I en concreto.	51
Figura 21. Flujo de calor entre el aire y el concreto por diferencia entre la temperatura de colocación y la temperatura del aire ambiente.	52
Figura 22. Incremento de la temperatura de los elementos de concreto que contienen 376 lb/yd ³ (223 kg/m ³) de cemento para diferentes temperaturas de colocación.	53
Figura 23. Ratio de generación de calor afectada por finura del cemento Wagner (ASTM C 115) para la pasta de cemento curada a 75 °F (23,8 °C).	54
Figura 24. Aumento de la temperatura del concreto masivo que contiene 376 lb/yd ³ (223 kg/m ³) para varios tipos de cemento.....	55
Figura 25. Plano isométrico y en elevación de estructura de microclima para el vaciado de la cimentación del Molino de Bolas 1.....	63
Figura 26. Fotografía de microclima ejecutado en campo para Cimentación de Molino de Bolas 01.	64

Figura 27. Plano en planta de distribución perimetral de los 11 turbocalefactores empleados para el vaciado de la Cimentación de Molino de Bolas 01.....	65
Figura 28. Detalle de espacio para turbocalefactores en estructura de microclima. A la izquierda detalle en plano y a la derecha en campo.....	66
Figura 29. Secuencia de vaciado por celdas de la Cimentación de Molino de Bolas 01	67
Figura 30. Protección térmica superficial de poliestireno en cimentación de Molino de Bolas 01, previo a la cubierta final de polietileno.....	68
Figura 31. Plano en planta de ubicación de termocuplas en cimentación del Molino de Bolas 01.	69
Figura 32. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en la Cimentación del Molino de Bolas 01.	70
Figura 33. Esquema en elevación de dimensiones de toldo para microclima empleado en Cimentación de Molino de Bolas 01.	78
Figura 34. Plano isométrico y en elevación de estructura de microclima para el vaciado de la Cimentación de Molino de Bolas 02.....	81
Figura 35. Plano en planta de distribución perimetral de los 11 turbocalefactores empleados para el vaciado de la Cimentación de Molino de Bolas 02.....	82
Figura 36. Secuencia de vaciado por celdas de la cimentación del molino de bolas 2	83
Figura 37. Plano en planta de ubicación de termocuplas en cimentación del molino de bolas 02.	84
Figura 38. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en la Cimentación del Molino de Bolas 02.	85
Figura 39. Plano isométrico y en elevación de estructura de microclima para el vaciado de la Cimentación del Molino SAG 02.....	87
Figura 40. Fotografía de microclima implementado en campo para Cimentación de Molino SAG 02.	88
Figura 41. Distribución en planta de turbocalefactores en el perímetro de la Cimentación del Molino SAG 02	89
Figura 42. Detalle de espacio para turbocalefactores en estructura de microclima.	90
Figura 43. Secuencia de vaciado por celdas de la Cimentación del Molino SAG 02.....	91
Figura 44. Plano en planta de ubicación de termocuplas en cimentación del molino de SAG 02.	92
Figura 45. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en la Cimentación del Molino de SAG 02.	93
Figura 46. Plano isométrico y en elevación de estructura de microclima para el vaciado de la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01).....	96
Figura 47. Fotografía de microclima ejecutado en campo para la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01).....	96
Figura 48. Distribución en planta de turbocalefactores en el perímetro de la etapa 1 de la cimentación del túnel de recuperación.	98

Figura 49. Secuencia de vaciado por celdas de la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01)	99
Figura 50. Plano en planta de ubicación de termocuplas en Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01)	100
Figura 51. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01)	101
Figura 52. Plano en elevación de estructura de microclima para el vaciado del Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01)	103
Figura 53. Fotografía de microclima ejecutado en campo para el Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01)	104
Figura 54. Distribución en planta y elevación de turbocalefactores en el perímetro de la etapa 1 del muro cimentación del túnel de recuperación.	105
Figura 55. Plano isométrico de ubicación de termocuplas en etapa 01 del muro de túnel de recuperación.	106
Figura 56. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en el Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01)	107
Figura 57. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en la Cimentación del Molino de Bolas 01	109
Figura 58. Costos de implementación y operación de la Combinación 01 aplicada en la Cimentación de Molino de Bolas 01	111
Figura 59. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en la Cimentación del Molino de Bolas 02	112
Figura 60. Costos de la implementación y operación de la combinación de métodos aplicados a la Cimentación del Molino de Bolas 02	114
Figura 61. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en la Cimentación del Molino SAG 02	115
Figura 62. Costos de la implementación y operación de la combinación de métodos aplicados a la Cimentación del Molino SAG 02	117
Figura 63. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01)	118
Figura 64. Costos de la implementación y operación de la combinación de métodos aplicados a la Cimentación del Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01)	120
Figura 65. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en el Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01)	121
Figura 66. Costos de la implementación y operación de la combinación de métodos aplicados al Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01)	123
Figura 67. Valores del comportamiento térmico teórico de los elementos	124

Figura 68. Valores del comportamiento térmico experimental, en función a los métodos de control aplicados por elemento.	125
Figura 69. Diferencial de valores entre el modelo térmico teórico y el modelo experimental.	126
Figura 70. Efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico.....	127
Figura 71. Incidencia en costos de los recursos invertidos para las combinaciones aplicadas.	128
Figura 72. Costos de la implementación y operación de las combinaciones de métodos aplicados a cada elemento, expresado en dólares.	128
Figura 73. Costos de la implementación por m ³ versus el gradiente térmico controlado, expresado en dólares invertidos para controlar un grado del gradiente.	129

Capítulo 1

Introducción

Realidad Problemática

En el Perú, la participación de la construcción dentro del Producto Bruto Interno (PBI) ha llegado a niveles cercanos al 7% al igual que en otros países en desarrollo, mientras que en países industrializados se ha alcanzado valores del 10% aproximadamente. Uno de los materiales más importantes y que concentra un porcentaje notable con respecto al PBI nacional es el concreto, debido a su uso persistente en obras de diversa índole.

Dado el uso de este material en distintos escenarios, posee diversas características y comportamientos influenciados por varios factores como el tipo de mezcla empleado, las condiciones de almacenamiento de los insumos, la cantidad de cemento, las condiciones de vaciado, el tipo y geometría de elemento a vaciar, entre otros.

En tal sentido, existen diversos tipos de concreto a fin de lograr un adecuado comportamiento de acuerdo con la necesidad de cada uno. Por ejemplo, en proyectos con vaciados de concreto de grandes dimensiones se generan altos gradientes de temperatura que, de no ser controlados, producen esfuerzos de deformación, tracción y fisuración, reduciendo su permeabilidad y durabilidad. (Gutiérrez H., 2017)

Zeña M. (2015), afirma que debido a las variaciones de temperatura entre el día y la noche en la Sierra peruana se genera un elevado gradiente térmico entre el interior del concreto y la superficie expuesta, durante vaciados masivos de concreto sin una protección adecuada. A su vez, a causa de restricciones volumétricas externas durante el periodo de enfriamiento, se puede generar el agrietamiento de la masa total. Por lo que es necesario reducir lo más posible este gradiente térmico y las restricciones volumétricas externas.

Formulación del Problema

Se plantea la siguiente interrogante: ¿Cuál es la relación costo-efectividad de las combinaciones para el control de gradiente térmico en elementos de concreto masivo de infraestructura minera a más de 3000 m.s.n.m.?

A continuación, se muestra en la Tabla 1, se muestran los componentes que se identificaron para la formulación del problema.

Tabla 1

Componentes de la pregunta de investigación.

<i>Componentes</i>	<i>Descripción</i>
Términos de pregunta	Cuál
Variable 1	Combinaciones de métodos de control de gradiente térmico
Términos de relación entre variables	Relación
Variable 2	costo – efectividad de las combinaciones de métodos para el control del gradiente térmico
Unidad de estudio	elementos de concreto masivo
Dónde	infraestructura minera a más de 3000 m.s.n.m

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Justificación

Actualmente, en el Perú, se desarrollan proyectos de gran infraestructura, en donde es probable que se coloquen grandes volúmenes de concreto. M. Zeña (2015); menciona que debido a un elevado gradiente térmico entre el interior del concreto y la superficie expuesta, en el periodo de enfriamiento en un concreto masivo, se puede generar el agrietamiento de la masa total en grandes volúmenes de concreto. En tal sentido, la presente propuesta contribuye con presentar métodos para reducir al mínimo la diferencia entre la temperatura máxima del concreto y la del ambiente.

Adicional a ello, el análisis de costos de implementación de métodos para reducir la evolución de la temperatura que impacten en el comportamiento termodinámico del concreto masivo permitirá conocer recomendaciones que puedan implementarse en función a los costos asociados.

Por otro lado, ampliar el estado de arte respecto al estudio de concreto masivo y su comportamiento termodinámico, posibilitará encauzar posteriores investigaciones. Además, a nivel metodológico, se podrá disponer de comparativos de costos de los métodos y su efectividad en la disminución de gradientes.

Finalmente, los resultados podrán contribuir con la toma de decisiones respecto al manejo del concreto masivo, asegurando que mantenga gradientes bajos que mejoren la permeabilidad y duración de la estructura.

Limitaciones

El desarrollo de la investigación se limita a estudiar el comportamiento térmico del concreto masivo en las etapas de vaciado y curado; no se considera como parte del alcance, el análisis de las etapas de diseño y elaboración de mezcla dado a que no se tuvo participación directa en la ejecución de estas etapas; en tal sentido, a fin de asegurar la validez del estudio se estipula en el contrato con el proveedor que abastecerá el concreto, los parámetros y ensayos respectivos que debía cumplir la mezcla entregada en obra.

Por otro lado; por limitación de tiempo, solo se considera como parte del estudio los vaciados ejecutados hasta el mes de agosto de 2019. Por ello, a fin de validar la investigación pese a esta restricción, se verificó que la cantidad de datos recolectados (número de vaciados y registro de temperaturas) sean suficientes para realizar un correcto análisis del comportamiento térmico.

Finalmente, el tema abarcado en la investigación presenta limitaciones de acceso a la información, por tal motivo se tomó como muestra únicamente los vaciados en cimentaciones ubicadas en el proyecto Quellaveco; proyecto en el que existe una relación laboral.

Objetivo General

- Determinar la relación costo-efectividad de las combinaciones de métodos de control del gradiente térmico en elementos de concreto masivo de infraestructura minera a más de 3000 m.s.n.m.

Objetivos Específicos

- Determinar los costos de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico por cada metro cúbico de un elemento de concreto masivo.
- Determinar la efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico.

Hipótesis**Hipótesis General.**

- La relación costo-efectividad de las combinaciones de métodos de control del gradiente térmico; fluctúa entre \$0.5 a \$1 de inversión por cada metro cúbico de un elemento de concreto masivo, para controlar un grado del gradiente de temperatura.

Hipótesis Específica.

- Los costos asociados a la implementación y operación de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico fluctúan en $\$20 \pm 5$; por cada metro cúbico de un elemento de concreto masivo.
- La efectividad de la combinación de los métodos de control de gradiente térmico se expresa en una reducción de la temperatura en promedio de 30°C.

Capítulo 2

Marco Teórico

Antecedentes

En estructuras de concreto masivo, el calor de hidratación del cemento puede generar grandes aumentos de temperatura que conlleven a problemas de fisuración y reducción de la durabilidad de la estructura, problemática cuyo estudio se remonta a la década de 1930 durante la construcción de grandes presas de concreto en Estados Unidos. En la actualidad las recomendaciones para el control de este comportamiento térmico se basan en el control de la mezcla de concreto, métodos de enfriamiento pre y posvaciado y aislamiento superficial (ACI 207.2R, 2007).

Con el objetivo de verificar que el control del aumento de temperatura en el concreto masivo previene el agrietamiento de la estructura, G. Ayala et al. (1997), compararon los resultados del comportamiento térmico obtenido en campo con los resultados teóricos basados en un modelo de elementos finitos de la construcción de la cortina de la presa Zimapán en México, de altura aproximada de 200 m, ancho de 21m en la base y 5m en la corona, y vaciada en capas de entre 1.5 a 3m de espesor con un sistema de enfriamiento por medio de tuberías embebidas. Los resultados del estudio demostraron que, a pesar de mantener la temperatura interior menor a la temperatura máxima admisible, el sistema de enfriamiento por tuberías no fue efectivo en disminuir el gradiente térmico al interior pues los esfuerzos de tensión generados solo disminuyeron un 4% respecto al escenario sin control térmico, por lo que la cortina presentó gran cantidad de grietas. De esta experiencia, Ayala concluye que no solo es suficiente controlar la temperatura máxima para evitar el agrietamiento, sino que es vital controlar el gradiente térmico y que, en caso de usarse un sistema de enfriamiento por tuberías embebidas, este debe ser diseñado de manera que se asegure el control de ambos factores.

De manera similar; H. Gutierrez (2017) analizó la relación del gradiente térmico del concreto masivo con el fisuramiento, para lo cual realizó el estudio teórico-práctico basado en el método

del ACI de losas con volúmenes de 1500 a 3000 m³ de concreto. Al aplicar métodos de preenfriamiento como el uso de hielo para disminuir la temperatura del agua de mezcla, y de post enfriamiento como la colocación de concreto en diferentes capas (vaciado por celdas), obtuvo un promedio de 20°C de gradiente térmico, sin embargo, a pesar de estar dentro del rango permitido por la norma, se presentó fisuramiento en los elementos analizados dado que la temperatura máxima fue superior a lo recomendado por el ACI. De los resultados, observó que, según mayor temperatura de colocación, mayor era la temperatura máxima que alcanzaba el elemento y mayor el número de fisuras que presentaba, por lo que, no solo es suficiente controlar el gradiente térmico sino también controlar factores tales como la temperatura de colocación del concreto que está relacionado con la temperatura máxima y gradiente térmico del elemento, a fin de minimizar el fisuramiento en elementos de concreto masivo.

Adicional al agrietamiento de los elementos de concreto masivo, E. Carillo (2001) estudió los efectos del comportamiento térmico de los concretos masivos y el uso de cementos con puzolana en la resistencia a compresión a temprana edad y a largo plazo. Para esto ensayó a compresión testigos de concreto de cementos con 0, 15 y 35% de contenido de puzolana, curados mediante el método de *'match curing'* simulando el comportamiento térmico de concretos masivos colocados a 10°C y 40°C de temperatura inicial. Luego comparó los resultados con las resistencias a compresión obtenidas en testigos de cada tipo de cemento, pero curados simulando un comportamiento térmico de una estructura no masiva con temperatura de colocación inicial de 23°C, obteniendo como resultado que todos los concretos sometidos a elevadas temperaturas de fraguado presentan una reducción de resistencia a la compresión a partir del día 14 comparados con un concreto con fraguado normal, presentando este último una resistencia a la compresión de entre 20 y 60% mayor para concretos de cemento portland (0% puzolana), 25 a 45% mayores para cementos con 15% puzolana y de 0 a 32% para concretos de cementos con 35% de puzolana. De esta manera la autora concluye que las elevadas

temperaturas desarrolladas por elementos de concreto masivo perjudican la resistencia a compresión a temprana edad y largo plazo.

Para controlar este comportamiento térmico de los concretos masivos, es necesario en primer lugar estimar la magnitud de la temperatura y gradiente máximos, con este fin existen diversos métodos teóricos, cuya confiabilidad ha sido evaluada en varias ocasiones mediante la contrastación con resultados reales de proyectos.

En 2013, P. Babul analizó la precisión del método de determinación de la probabilidad de fisuración presentado por la guía “Pautas para el Control de Fisuración en Concreto Masivo 2008” del Instituto del Concreto de Japón (JCI, por sus siglas en inglés) mediante la comparación de los resultados teóricos del método aplicado a un bloque de concreto de $1.07\text{m} \times 1.07\text{m} \times 1.07\text{m}$, con los resultados teóricos y experimentales del trabajo realizado por A. Lawrence (2009). Este último elaboró un modelo de elementos finitos de los esfuerzos térmicos internos de un bloque de $1.07\text{m} \times 1.07\text{m} \times 1.07\text{m}$ y realizó dos vaciados de este para verificar la validez de los resultados de su modelo. Al realizar el cálculo teórico, obtuvo probabilidades de fisuración entre 20% a 40%, sin embargo A. Lawrence obtuvo probabilidades de fisuración teóricas de 99 y 100% que coincidan con los resultados experimentales pues los bloques se fisuraron. Del análisis de las causas de las desviaciones de los resultados del método del JCI, concluye que la razón fue la simplificación del modelo de comportamiento térmico y que se requiere un cálculo más detallado para obtener predicciones usando el método del JCI.

De manera similar, M. Zeña (2015) verificó la validez del modelo teórico del incremento de temperatura en elementos estructurales de concreto masivo según el método del ACI 207.2 contrastándolo con los valores registrados por termocuplas durante el vaciado y endurecimiento de 2 losas de cimentación masivas. Usando condiciones de contorno (temperatura de vaciado, temperatura ambiental mínima y máxima, entre otros) similares a las reales, obtuvo una temperatura máxima de entre 4 a 16 °C (6 a 29%) mayor a la obtenida experimentalmente, y un

gradiente máximo de temperatura de 6 a 10 °C (25 a 26%) mayor, aunque en este último caso el valor teórico fue asumido, no calculado. Estas diferencias se debieron en su mayor parte a que las condiciones de contorno reales variaron con respecto a lo considerado en el modelo teórico, por lo que concluye que el método propuesto por el ACI es válido sin embargo precisa que este método es conservador dado que no considera el aporte del refuerzo de acero ni resistencias a la compresión elevadas.

Según lo indicado anteriormente, las recomendaciones para el control del comportamiento térmico del concreto masivo se basan en el control de la mezcla de concreto, métodos de enfriamiento pre y posvaciado y aislamiento superficial. Respecto a la primera, A. Bourchy et al. (2018) desarrollaron una herramienta para optimizar las mezclas de concreto masivo manteniendo los requisitos de resistencia y disminuyendo el potencial de calor de hidratación, para lo cual estudió los efectos del tipo y porcentaje de adiciones en la mezcla, el tipo de cemento, relación agua cemento y la cantidad de aditivos en estos dos parámetros mediante la elaboración de 30 mezclas de concreto cada una con una combinación distinta de las variables mencionadas. De cada mezcla se registró su calor de hidratación mediante el ensayo del calorímetro cuasi adiabático y la resistencia a compresión mediante ensayo mecánico a los 2 y 28 días, obteniendo como resultados que, para un mismo tipo de cemento y relación adición-cemento, la reducción del calor de hidratación es mayor (12 a 75%) mediante el uso de adiciones como la escoria y la ceniza volante aunque no tan significativa (4 a 12%) en el caso del micro sílice, De igual manera, obtuvo mayores resistencias a compresión con el uso de escoria y ceniza volante (12 a 60% más) aunque a mayor relación adición cemento, la resistencia se reducía. Finalmente concluye que la relación agua cemento y la cantidad de aditivos tiene poca influencia en el calor de hidratación y resistencia a compresión comparado con el tipo de cemento, tipo de adiciones y relación cemento-adición. De igual manera recomienda estudiar más combinaciones de mezclas para incluir un mayor rango de variación en estas variables.

Por otro lado, A. Tasri y A. Susilawati (2019) investigaron la efectividad del método de control térmico posvaciado de enfriamiento por tuberías embebidas, en el cual el concreto es enfriado mediante la circulación de agua fría tuberías al interior del elemento. Su análisis se enfocó en la variación del esfuerzo y el gradiente térmicos generado por la temperatura del agua y el espaciamiento entre tuberías, para lo cual diseñaron un modelo numérico del enfriamiento mediante tuberías para un cilindro de concreto de 2.5m de diámetro y 1m de largo, que luego validaron comparando los resultados teóricos con los resultados experimentales obtenidos por Y. Balam y P.Graham en 2003 para el mismo elemento, corroborando de esta manera la adecuada precisión de su modelo y tras lo cual simulaban variaciones entre el espaciamiento de las tuberías y de la temperatura del agua de enfriamiento en el mismo elemento cilíndrico. Obtuvo como resultado de estas simulaciones que la temperatura máxima se da en el punto equidistante al eje de dos tuberías paralelas y el esfuerzo térmico máximo se da en los puntos colindantes con las tuberías. Para el caso de un espaciamiento de tuberías constante de 2m, obtuvo una reducción del esfuerzo interno máximo a medida que la temperatura del agua se acercaba a la temperatura de colocación del concreto de 30°C, siendo 7 MPa menor para una temperatura de agua de 25°C, sin embargo, la temperatura máxima aumentaba ligeramente a menor temperatura del agua, hasta una variación 2°C de temperatura máxima para temperaturas de agua de 10 y 30°C. Por otro lado, en el caso de la temperatura del agua constante de 20°C, a medida que disminuía el espaciamiento entre tuberías, el esfuerzo térmico máximo era menor, 9 MPa para un espaciamiento $L=1\text{m}$ y 16 MPa para $L=3\text{m}$, de igual manera la temperatura máxima disminuía a menor espaciamiento, 58°C para $L=1\text{m}$ y 71 °C para $L=3\text{m}$. De estos resultados concluye que, a menor temperatura del agua, menor es la temperatura máxima que alcanza el elemento, pero mayor es el esfuerzo térmico interno, mientras que el espaciamiento menor entre tuberías disminuye tanto el esfuerzo como la temperatura máximos, por lo tanto, la efectividad de este método de control depende del correcto cálculo de estos dos parámetros.

En el 2014 Valarezo M., con el fin de determinar la efectividad de los métodos recomendados para el control de temperatura en estructuras masivas, evaluó la variación de temperatura interna durante el vaciado y endurecimiento de un bloque de concreto de 3000 m³ situado en el proyecto hidroeléctrico ‘Coca Codo Sinclair’ – Ecuador. Este bloque contaba con la aplicación de métodos de control térmico tales como, uso de cemento puzolánico en el concreto, circulación de agua fría a través de tuberías embebidas, encofrados de acero y el uso de una manta protectora para aislamiento superficial. El autor verifica la eficacia de esta combinación mediante la comparación de la temperatura y el gradiente obtenido de forma experimental, con los valores teóricos máximos de diseño. Se obtuvo una temperatura máxima del núcleo de 49 °C y un gradiente térmico máximo de 15°, siendo los valores teóricos, calculados por el método del ACI 207R, de 60°C como temperatura máxima y 20° como gradiente máximo. De esta manera concluye que el buen comportamiento termodinámico del elemento en campo con respecto a lo esperado teóricamente se debe a la implementación de los métodos de control pre y posvaciado.

Los métodos de control de temperatura evaluados por M. Valarezo implican un alto costo y tiempo de implementación, por lo que S. Han (2018) plantea el sistema de vaciado por capas como alternativa de menor costo e inversión de recursos y tiempo para el control térmico en cimentaciones de concreto masivo, dado que con este método el espesor de cada capa se vuelve la menor dimensión del elemento masivo y el área expuesta aumenta por lo que la difusión del calor interno del elemento es mayor evitando temperaturas y gradientes máximos perjudiciales. Para la evaluación de este sistema, el autor diseñó un modelo de elementos finitos para el comportamiento térmico el cuál validó con los resultados analíticos del vaciado de un elemento de concreto de 1mx1mx1m aislado en 5 de sus caras y expuesto al ambiente en la cara superior. Con este modelo simuló los comportamientos térmicos de un bloque de 1mx1mx1m con mezclas de concreto con y sin puzolanas (escoria, ceniza volante, metacaolín), sin control térmico y con métodos de control térmico de aislamiento superficial, enfriamiento por tuberías embebidas y vaciado por capas. Los resultados para el escenario de concreto sin control térmico

obtuvieron una temperatura y gradiente máximo de 82°C y 45°C respectivamente para concreto sin puzolanas; y de 75°C y 35°C respectivamente para concreto con puzolanas. Con aislamiento superficial la reducción fue de entre 2 a 21% para la temperatura máxima y de 15 a 43% para el gradiente, siendo la mayor reducción para concreto con puzolanas, en el caso de concreto sin puzolanas los valores de temperatura máxima estuvieron por encima de lo admisible. Con sistema de tuberías embebidas, la reducción de la temperatura fue de entre 19 a 46% y de gradiente fue de 35 a 68%, ambos valores se mantuvieron por debajo del umbral aceptable. Por último, con el sistema de vaciado por capas, la reducción de temperatura máxima fue de 10 a 35%, y de 29 a 59% para el gradiente, los valores se mantuvieron en el límite del umbral aceptable. De estos resultados concluye que el sistema de vaciado por capas es una alternativa adecuada para el control térmico, pues no tiene las desventajas de la sostenida temperatura máxima que genera el aislamiento superficial ni tampoco la generación de grietas por esfuerzo térmico en las zonas alrededor de las tuberías embebidas, sin embargo, se requiere mayor estudio de la influencia de las juntas horizontales entre capa y capa.

Otro método de control alternativo de menor costo es el propuesto por Ju-Hyung Ha et al. (2013), quienes plantearon elaborar un sistema automatizado de control de temperatura que ahorre tiempo y costo mediante la recirculación de agua de curado a través de mantas sobre el concreto, propulsado por un par de electrobombas activadas por sensores de temperatura instalados en el elemento de concreto cuando se registra una variación de temperatura. Cuando el gradiente térmico entre el núcleo y la superficie del elemento se acercaba al valor máximo, una electrobomba impulsaba agua calentada a la superficie mientras la otra electrobomba succionaba el agua enfriada, así hasta disminuir el gradiente. Este sistema fue puesto a prueba dentro del laboratorio en un elemento de concreto reforzado de 3m x 2m x 5m y en campo, en una cimentación de 54.7m x 15.5m x 2.6m (2500 m³) para turbina de una central térmica. En el primer caso se obtuvo 0 fisuras en el elemento, mientras que en el segundo caso se obtuvieron 6 fisuras de menos de 0.1mm de grosor, lo cual es un número muy pequeño considerando las

dimensiones de elemento. Así mismo, se logró mantener el gradiente térmico por debajo del valor máximo durante todo el tiempo de curado, sin embargo, este sistema no controla directamente la temperatura máxima del núcleo por lo que se concluye que es una alternativa viable y más eficiente que los métodos tradicionales siempre y cuando se complementa con métodos de control de temperatura prevaciado.

Los métodos en mención, de acuerdo con las tesis revisadas, constituyen formas de controlar el gradiente de temperatura. Sin embargo, no existen investigaciones que estimen la inversión generada al implementar estos métodos.

Teorías

Concreto masivo.

Se define, según la norma ACI 301S-16, como “cualquier volumen de concreto estructural en el cual una combinación de las dimensiones del miembro a construir, las condiciones de frontera, las características de la mezcla de concreto, y las condiciones ambientales puedan conducir a esfuerzos térmicos indeseables, fisuración, reacciones químicas perjudiciales, o reducción de la resistencia a largo plazo como consecuencia de una elevada temperatura en el concreto debida al calor de hidratación”.

De acuerdo con la definición anterior, la principal característica que diferencia al concreto masivo del resto de concretos estructurales es el comportamiento térmico que puede afectar desfavorablemente las propiedades estructurales del elemento. Este comportamiento térmico, al igual que otras propiedades del concreto, está determinado por las proporciones y características físico - químicas de los componentes de la mezcla (cemento, áridos, aditivos y agua), así como el transporte, colocación y curado de esta. (Mamlouk, 2013)

La aplicación del concreto masivo, en la actualidad, se extiende a losas de cimentación, pilotes, muros de elevación, puentes, entre otros.

Comportamiento Térmico del concreto Masivo.

El ACI 207.2R “*Report on Thermal and Volume Changes*”, indica que existe un comportamiento masivo del concreto cuando la distancia promedio a través de la cual el calor se disipa del concreto sea mayor o igual a 1.2 (relación entre volumen y área de disipación). El comportamiento térmico del concreto masivo hace referencia a cambios de temperatura del concreto desde su colocación (temperatura inicial) hasta que alcanza su temperatura estable final. Los vaciados de elementos de concreto masivo poseen un comportamiento adiabático; debido, principalmente, a sus grandes dimensiones y a su baja capacidad de intercambio de calor.

Este tipo de comportamiento no permite una adecuada transferencia y liberación del calor generado por reacciones químicas internas, principalmente en el núcleo, como consecuencia de la hidratación del cemento. Lo que ocasiona diferenciales térmicos en diversos puntos del elemento vaciado, que aunados a las restricciones existentes pueden generar tensiones que originen la aparición de fisuras.

El comportamiento térmico de un elemento de concreto masivo, es monitoreado principalmente en tres aspectos:

- Temperatura en el núcleo de elemento, monitoreada mediante termocuplas, no debe alcanzar valores mayores a los 70 °C u 80 °C. Esto con el objeto de evitar la formación de etringita diferida (*Delayed Ettringite Formation*, DEF).
- Tiempo en que alcanza la temperatura pico en el núcleo del elemento, con el objetivo de tomar acciones a lo largo de ese intervalo.
- El gradiente térmico generado entre la superficie y el núcleo; matemáticamente se establece un diferencial térmico admisible (ΔT), mediante el método de cálculo establecido en el ACI 207.2R- 07. Factores que influyen en el comportamiento térmico.

Las dimensiones del elemento, específicamente **la relación entre el volumen y el área de disipación** (V/S); se considera que si esta relación es menor a $1.2 \text{ ft}^2/\text{día}$ o $0.11 \text{ m}^2/\text{día}$ es probable que el concreto no deba considerarse como masivo debido a que cuenta con un área de disipación suficiente para disipar el calor generado en ese volumen de concreto masivo.

El **coeficiente de dilatación térmica** es la relación entre el cambio relativo de longitud que se produce cuando un elemento recibe o pierde calor. Este coeficiente se expresa en unidades $^{\circ}\text{C}^{-1}$ y en el caso del concreto su valor oscila entre 7.4 y $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (ACI 2017.2R).

El **calor específico** se refiere a la cantidad de calor que hay que suministrar a una unidad de masa de un material para aumentar en una unidad su temperatura, por lo que se expresa en $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$. Para el concreto este valor oscila entre 0.20 a $0.25 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ (ACI 2017.2R).

La **conductividad térmica** expresa la capacidad de un material de transferir su calor a otro material con el que esté en contacto.

La **difusividad térmica** indica la velocidad con la que un elemento transfiere calor en relación con el calor almacenado por unidad de volumen, hasta alcanzar el equilibrio térmico. Es directamente proporcional a la conductividad térmica, pero a diferencia de esta, depende del calor específico y densidad del material. Esto nos indica que mientras más denso sea un material, más tiempo le tomará alcanzar el equilibrio térmico. Concretos masivos con un alto índice de difusividad térmica tendrán mayor facilidad de perder o ganar calor.

La **temperatura de colocación** debe tenerse en consideración en caso sea diferente a la temperatura ambiental, se puede apreciar el efecto de este factor en la Figura 1.

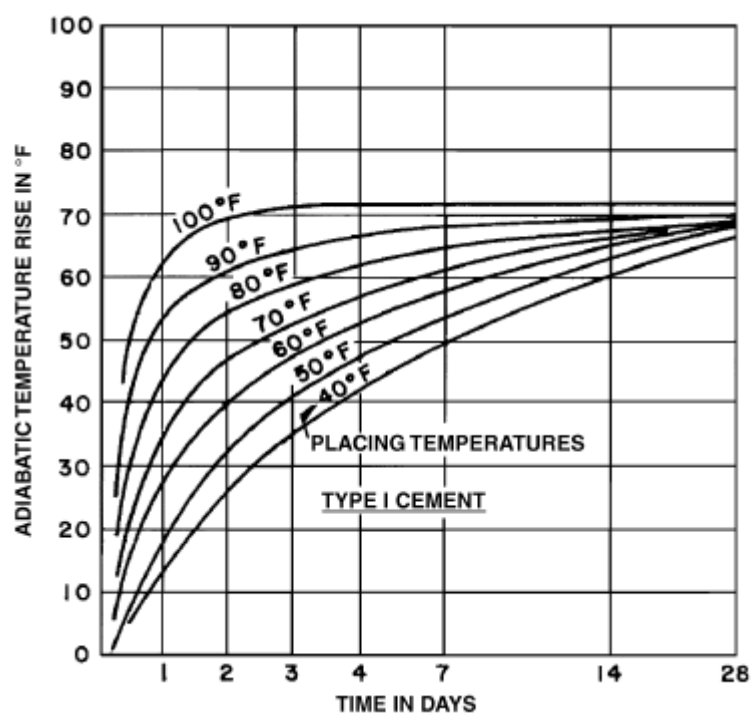


Figura 1. Efecto de la temperatura de colocación y el tiempo en el aumento adiabático de temperatura para concretos masivo con contenido de cemento Tipo I de 223 kg/m³.

Fuente: Fig. 4.3 - ACI 207.2R-07

El **Calor de Hidratación**, es aquel liberado por la reacción entre el agua y cemento presentes en la mezcla del concreto. Cuando el calor de hidratación no es rápido y uniformemente disipado, la temperatura del elemento de concreto aumenta considerablemente (ACI 207.1R). y genera un cambio de volumen proporcional al coeficiente de expansión térmica del concreto.

La Temperatura Ambiental y Gradientes Térmicos

La diferencia de temperatura entre dos puntos internos distintos del elemento de concreto se denomina 'gradiente térmico'. La temperatura de las superficies del elemento es casi igual a la temperatura ambiental pues intercambian calor continuamente hasta alcanzar el equilibrio térmico, debido esto la variación de temperatura de la superficie del elemento es igual a la variación de temperatura ambiental siempre que no se use algún aislamiento térmico o equipos

para el calentamiento o enfriamiento de la superficie. En el caso de los climas andinos, esta variación es considerable, por ejemplo, de 25°C en el día a -2°C por la noche, por lo cual se restringe el contacto de la superficie del elemento con el ambiente mediante aislamientos térmicos tales como mantas térmicas o planchas de poliestireno.

Adicionalmente, los climas andinos suelen caracterizarse por su **bajo contenido de humedad** en el aire, lo cual contribuye al secado superficial del elemento e indirectamente con el gradiente térmico y grado de fisuración, por lo cual también puede ser necesario emplear aislamiento superficial para evitar sus efectos.

Entonces, a medida que la temperatura interior del concreto masivo aumenta debido al calor de hidratación, el concreto superficial puede estar enfriándose. Si este gradiente térmico es suficientemente grande, se generarán esfuerzos de tracción internos proporcionales a las propiedades del concreto como el módulo de elasticidad, coeficiente de dilatación térmica, entre otros.

Efectos del gradiente y temperatura máxima.

La importancia dada a los gradientes o diferenciales de temperatura radica en los cambios de volumen que estos gradientes generan en los elementos de concreto, puesto que el concreto puede fisurarse cuando los esfuerzos internos producidos por los cambios de volumen superan la resistencia a la tracción del elemento. El cual no sería un problema si la estructura fuera libre de deformarse en todas las direcciones, sin embargo, la superficie de fundación y el encofrado lo restringen; ocasionando esfuerzos de tensión internos en el elemento.

Estos esfuerzos internos, a su vez, no serían de importancia si el concreto no se endureciera y aumentara su módulo de elasticidad a medida que se hidrata el cemento. A medida que aumenta la dureza del concreto, se limita su resistencia a la tracción y cuando esta es superada por los esfuerzos de tensión internos producto del cambio restringido de volumen, se producen fisuras en el elemento.

Por otro lado, en caso la temperatura máxima supere los 70 °C, existe el riesgo de formación de etringita diferida; que, de acuerdo con lo señalado en el acápite 6.22 “Delayed Ettringite” del reporte ACI 201.2R-16 “*Guide to Durable Concrete*”, desencadena reacciones químicas que pueden presentarse meses o años después del vaciado, poniendo en riesgo la durabilidad del elemento.

Métodos de control de gradiente térmico.

Métodos prevaciado.

- Reducción de la cantidad de cemento en la mezcla y elección del tipo de cemento. O reemplazo de este material por puzolanas en la mezcla.
- Uso de agregado grueso y de alta resistencia, que aportan a la resistencia a la compresión y reducen la necesidad de cemento en la mezcla.
- Reducción de contenido de agua en la mezcla y con ello la cantidad de cemento para mantener una relación agua cemento óptima.
- Uso de aditivos retardantes y plastificantes, que reducen el calor de hidratación a edades tempranas y la necesidad de agua en la mezcla.
- Preenfriamiento de los materiales de la mezcla, tales como el agua y los agregados, lo que logra una temperatura de colocación o inicial más baja.

Métodos posvaciado.

- En climas cálidos, se sugiere la **restricción de operaciones de colocación en períodos fríos** por la noche o durante horas de temperatura baja.
- Enfriamiento al interior del elemento es mediante la **circulación de agua fría por tuberías embebidas en el elemento.**

- El **método de vaciado por celdas**, el cual consiste en secuenciar vaciados de elementos de amplias dimensiones; dividiendo el proceso total en vaciados por celdas, con el objetivo de que el llenado y la generación de calor sea uniforme y evitar así juntas frías.
- El **método de uso de microclima**, el cual consiste en el aislamiento de superficies mediante el despliegue de toldos de protección en conjunto con calefactores; para así minimizar las diferencias térmicas entre el interior y el exterior del hormigón.
- El **método de protección superficial** consiste control de la temperatura y evaporación de las superficies del elemento mediante la colocación superficial de elementos que eviten la rápida evaporación de agua de la superficie.

La **combinación de métodos** hace referencia a la aplicación simultánea de dos o más métodos durante y después de efectuado el vaciado.

Costo efectividad.

Técnicas de estimación de costos.

El PMBOK, en sus 6° edición, define a la **estimación paramétrica** como aquella herramienta para la estimación de costos que hace uso de datos históricos y parámetros; logrando una mayor exactitud en la estimación en función a los datos que utilice el modelo. Este tipo de herramienta puede ser usado en combinación con otros métodos de estimación; como por ejemplo la estimación ascendente.

La **estimación ascendente** se define como aquella herramienta que, mediante la acumulación de cada componente de nivel inferior se genera un monto total. La exactitud del resultado está supeditada a los resultados de cada paquete que forman parte del acumulado.

Definición de efectividad.

Consiste en el logro de los objetivos trazados, dentro del tiempo y costos más razonables posibles. Supone obtener un buen resultado, con gran exactitud y sin ningún desperdicio de tiempo o dinero. El concepto de efectividad involucra la eficiencia y la eficacia.

Definición de Términos

Concreto Masivo: Es aquel elemento vaciado de concreto en el cuál por las dimensiones del elemento, obligan a tomar especial cuidado con los efectos de generación de temperatura y cambios de volumen de la masa de concreto.

Diferencial térmico teórico: Diferencia de temperatura entre la temperatura teórica del núcleo y la temperatura teórica de la superficie del elemento.

Diferencial térmico experimental: Diferencia de temperatura entre la temperatura del núcleo y la temperatura de la superficie del elemento; ambas lecturas obtenidas de las termocuplas.

Diferencial térmico admisible: También conocido como gradiente máximo admisible; consiste en la diferencia máxima, entre la temperatura del núcleo y temperatura superficial, que un elemento puede soportar sin conllevar a un alto riesgo de fisuración.

Dataloggers: Dispositivo electrónico que registra datos; por medio de sensores, a través del tiempo.

Etringita Diferida (DEF): Compuesto generado debido a las altas temperaturas en el núcleo del elemento durante la etapa inicial de endurecimiento, con el paso del tiempo genera fisuración y pérdida de la resistencia del concreto

Gradiente térmico: Diferencial térmico entre el núcleo del elemento y la temperatura superficial del mismo.

Capítulo 3

Metodología

Tipo y diseño de investigación

Se consideró un enfoque mixto, debido a que se contrastó la hipótesis mediante resultados cuantitativos (lecturas de las termocuplas); los mismos que se interpretaron de forma cualitativa (interpretación de las lecturas). Así mismo, se aplicó un Nivel de Investigación Correlacional y Exploratoria ya que se identificó, describió y cuantificó variables para explicar la relación entre estas mediante una Investigación de Tipo Aplicativa.

El diseño de investigación fue experimental – cuasi experimental; debido a que los elementos de estudio no fueron asignados aleatoriamente, sino en función a la fecha de culminación de vaciados y al acceso a la información respectiva.

Variables y Operacionalización

V.I. (causa): Combinaciones de métodos de control de gradiente térmico.

V.D. (efecto): Costo - efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico.

La Tabla 2 describe la definición conceptual de la Variable Independiente, las dimensiones y subdimensiones que la conforman y los indicadores expresados en los tipos de combinaciones de métodos de control de gradiente. En la Tabla 3 se muestra información similar respecto a la Variable Dependiente, las cuales se dividen en dos dimensiones diferentes y cuyos indicadores son numéricos.

Tabla 2

Operacionalización de Variable Independiente

Variable Independiente	Definición Conceptual	Dimensiones	Subdimensiones	Indicadores
Combinaciones de métodos de control de gradiente térmico	Acciones implementadas con el fin de manipular el gradiente térmico generado entre el interior y el exterior de un elemento de concreto masivo.	Métodos experimentales	Combinación de métodos experimentales	Vaciados por celdas y microclima.
				Vaciados por celdas, microclima y protección superficial.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

Operacionalización de Variable Dependiente

Variable Dependiente	Definición Conceptual	Dimensiones	Subdimensiones	Indicadores
Costo - efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico.	Inversión en dólares por cada metro cúbico de un elemento de concreto masivo, para controlar un grado centígrado del gradiente térmico.	Costos Totales de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico por metro cúbico de un elemento.	Costos directos, asociados a los métodos de control de gradiente térmico.	Costo para la implementación y operación del sistema vaciados por celdas y uso de microclima.
				Costo para la implementación y operación del sistema vaciados por celdas, uso de microclima y protección superficial.
		Efectividad del control del gradiente térmico, expresado en la diferencia de grados centígrados entre el gradiente teórico y el experimental.	Modelo teórico del comportamiento termodinámico del elemento de concreto masivo.	Modelo teórico del comportamiento térmico, expresado en gradiente máximo, gradiente máximo admisible, T° máxima de núcleo y edad en que se alcanza.
			Modelo experimental del comportamiento termodinámico del elemento de concreto masivo.	Gradiente máximo de temperatura experimental entre el núcleo y la superficie, dicho gradiente no debe exceder el gradiente máximo admisible.
				Temperatura máxima experimental del concreto después de su colocación (núcleo).
				Edad experimental en que el núcleo alcanza su máxima temperatura.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Se adjunta la matriz de consistencia.

Tabla 4
Matriz de consistencia

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES DE V.I	INDICADORES DE V.I
¿Cuál es la relación costo-efectividad de las combinaciones para el control de gradiente térmico en elementos de concreto masivo	Determinar la relación costo-efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico en elementos de concreto	La relación costo-efectividad de las combinaciones de métodos de control del gradiente térmico; fluctua entre \$0.5 a \$1 de	Combinaciones de métodos de control de gradiente	Métodos experimentales.	Vaciados por celdas y microclima. Vaciados por celdas, microclima y protección superficial.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES DE V.D	INDICADORES DE V.D
P.E. N°1: ¿Cuáles son los costos asociados a la implementación y operación de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico?	O.E. N°1 Determinar los costos de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico por cada metro cúbico de un elemento de concreto masivo.	- Los costos asociados a la implementación y operación de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico fluctúan en $\$20 \pm 5$; por cada metro cúbico de un elemento de concreto masivo.	Costo - efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico.	Costos Totales de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico por metro cúbico de un elemento.	Costo (M.O.+ EQ +MAT) para la implementación y operación del sistema vaciados por celdas y uso de microclima. Costo (M.O.+ EQ +MAT) para la implementación y operación del sistema vaciados por celdas, uso de microclima y protección superficial.
P.E. N°2: ¿Cuál es la efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico?	O.E. N°2 Determinar la efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico.	- La efectividad de la combinación de los métodos de control de gradiente térmico se expresa en una reducción de la temperatura en promedio de 30°C.		Efectividad del control del gradiente térmico, expresado en la diferencia de grados centígrados entre el gradiente teórico y el experimental.	Modelo teórico del comportamiento térmico, expresado en gradiente máximo, gradiente máximo admisible, T ° máxima de núcleo y edad en que alcanza esta. Gradiente máximo de temperatura experimental entre el núcleo y la superficie, dicho gradiente no debe exceder el gradiente máximo admisible. Temperatura máxima experimental del concreto después de su colocación (núcleo). Edad experimental en que el núcleo alcanza su máxima temperatura.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Población, muestra y muestreo

Unidad de estudio.

Se consideró como unidad de estudio los elementos de concreto masivo vaciados en obra.

Población.

El universo fueron todos los elementos vaciados de concreto en el Perú; se tomó como población aquellos elementos pertenecientes a infraestructura minera del proyecto Quellaveco. Así mismo, se estableció como población objetivo aquellos elementos que cumplan con los criterios de inclusión y exclusión. Finalmente, se consideró como la muestra a aquellos elementos que culminaron de vaciarse hasta el mes de agosto de 2019, debido al tiempo que se estipuló para la recopilación de datos de la presente investigación. En estos últimos se realizó el estudio del comportamiento térmico.

Muestra.

Se usó la técnica de muestreo no probabilístico, seleccionando la muestra por conveniencia y cumpliendo con los criterios de inclusión que consistían en la elección de elementos de infraestructura minera del proyecto Quellaveco, vaciados a más de 3000 m.s.n.m. cuya relación entre volumen y área de disipación fuera mayor o igual a 1.2.

Así mismo, se excluyó aquellos elementos vaciados después de agosto del 2019 y aquellos en que se implementaron tuberías embebidas como método de enfriamiento. Lo primero, con la finalidad de establecer un tiempo de recolección y procesamiento de datos adecuados; lo segundo, debido a que no existió una muestra representativa ni se tomó los datos adecuadamente.

Finalmente, se consideró como muestra a los siguientes elementos:

1. Cimentación de Molino de Bolas 01

2. Cimentación de Molino de Bolas 02
3. Cimentación de Molino SAG 02
4. Cimentación de Túnel de Recuperación (Etapa 01)
5. Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Cimentación de Molino de Bolas 01.



Figura 2. Molinos de bolas en posición final

Fuente: Consorcio Las Bambas.

En la Figura 2 se muestran molinos de bolas, los cuales son necesarios para la etapa del procesamiento de minerales es la molienda del material procesado en minería, donde se reduce el tamaño de las rocas extraídas del terreno a un tamaño adecuado para efectuar otros procesos como el concentrado y la lixiviación. Con este fin, se emplean equipos como chancadores primarios de mandíbula, molinos de bolas, molinos SAG, entre otros.

En el caso de los molinos de bolas, el molido del material se logra por el impacto de bolas metálicas con las rocas al interior de un tambor que rota a gran velocidad. Por el volumen de material que se procesa en una mina, estos molinos tienen un gran tamaño y requieren una gran estructura de concreto para su apoyo.

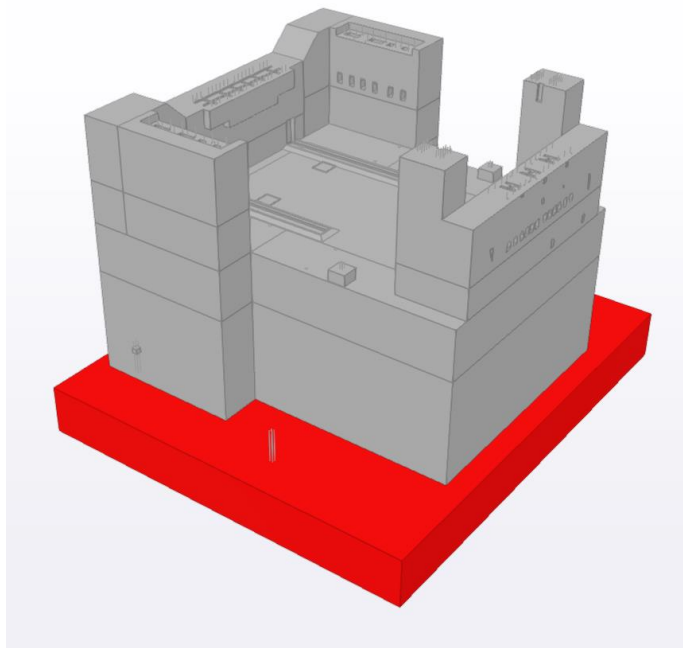


Figura 3. Molino de Bolas.

Fuente: Información del proyecto

En la Figura 3, se muestra el modelo 3D del Molino de Bolas, se resalta en color rojo la cimentación del elemento.

En el caso del proyecto en análisis, se tienen dos molinos de bolas de idénticas características y por lo tanto sus estructuras de apoyo tienen las mismas dimensiones. Sin perjuicio de lo anterior, se analizarán como dos muestras diferentes puesto que los métodos de control de gradientes aplicados en cada uno fueron diferentes como se detallará más adelante.

Dimensiones del elemento vaciado.

Largo	=	27.4 m
Ancho	=	23.50 m
Alto	=	3.00 m
Volumen	=	1931.7 m ³

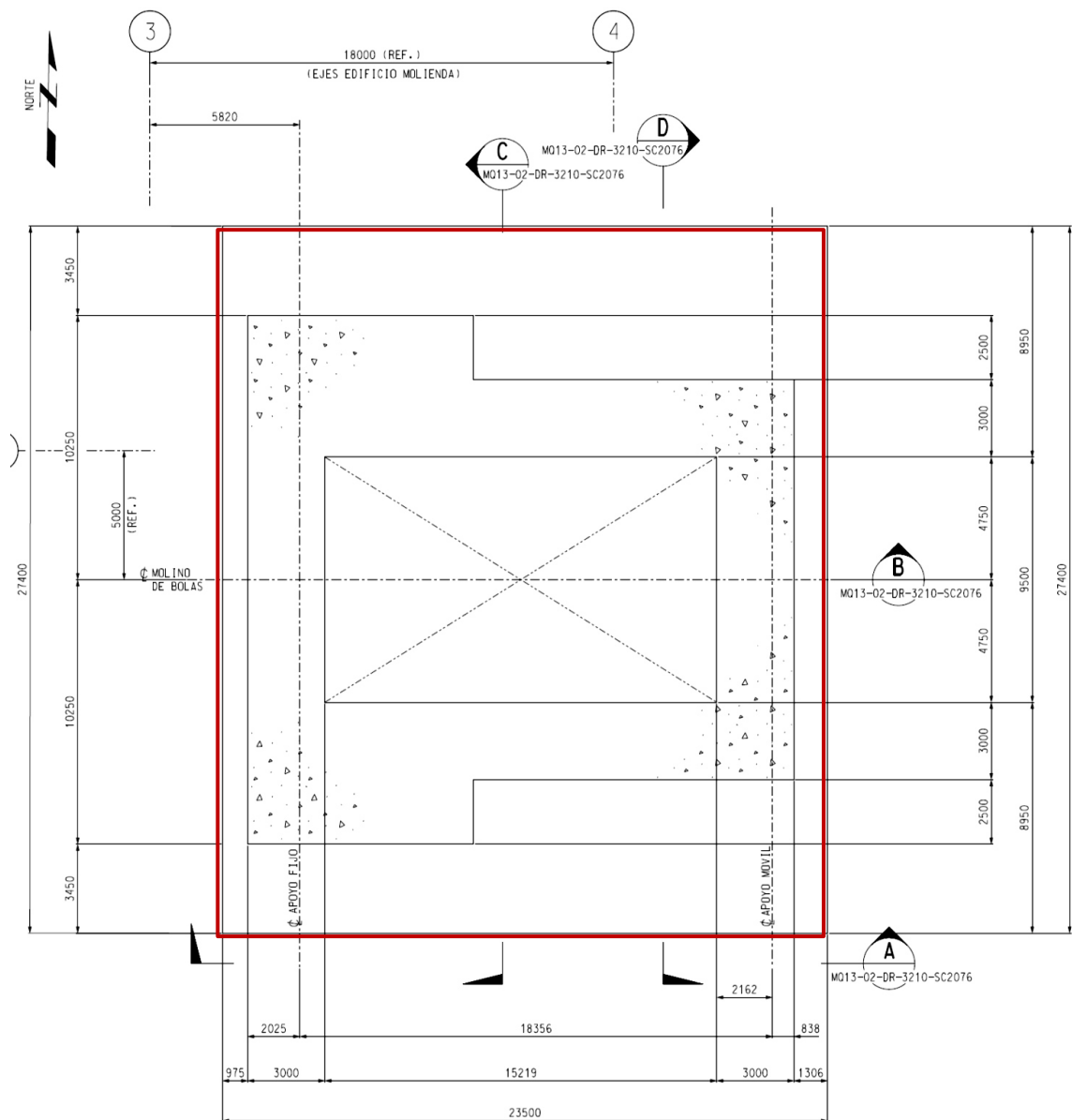


Figura 4. Cimentación de Molino de Bolas

Fuente: Información del proyecto

En la Figura 4 se muestra la vista en planta de la cimentación de molino de bolas, enmarcado en rojo, con sus respectivas cotas.

Características del concreto a utilizar.

El diseño de mezcla a usar en el vaciado corresponde al diseño con código K-CS-221-QA-DM-106 de la empresa 'Supermix' cuyas características se describen a continuación:

- Resistencia a la compresión (f'_c): 350 kg/cm²
- Tipo de cemento: IP
- Asentamiento: 5 a 7"
- Tamaño del agregado grueso: Huso 467
- Contenido de aire incorporado: 4.5% $\pm$ 1.5%.

Las proporciones de la mezcla y las propiedades físicas de los componentes se muestran en la Tabla 5.

N°	Material		Procedencia	Propiedades Físicas del Agregado, Cemento y Aditivo							Formulación del Concreto			
				Peso Específico (kg/m³)	Absorción (%)	MF	Peso Unitario Suelto (kg/m³)	Peso Unitario Compactado (kg/m³)	Humedad (%)	Malla > 200	Peso sss (kg)	Volumen absoluto (m³)	Peso corregido por humedad (kg)	Peso de la tanda (kg)
1	Cemento Tipo IP		Yura S.A.	2880							490	0.1701	490	14.700
2	Agua		Quellaveco	1000							180	0.1798	179	5.376
3	Arena Gruesa	100.00%	Cantera Gabi I	2474	3.33	3.22	1491	1628	4.70	4.77	574	0.2318	581	17.442
4	Piedra Huso 4 - TMN 1 1/2"	35.00%	Cantera Gabi I	2582	1.74	8.00	1481	1587	0.35	0.51	342	0.1324	337	10.112
4	Piedra Huso 67 - TMN 3/4"	65.00%	Cantera Gabi I	2566	2.29	6.77	1470	1558	1.90	0.93	631	0.2459	628	18.852
5	Viscocrete 4500 PE	0.60%	Sika	1090							2.940	0.0027	2.94	0.0882
6	Sikatarad 450	0.50%	Sika	1140							2.450	0.0021	2.45	0.0735
7	Sika Aer	0.025%	Sika	1020							0.123	0.0001	0.12	0.0037
8	% Aire Atrapado	5.00%										0.0500		
Peso Total (kg.)											2221.56	1.0150	2221.56	66.65

Figura 5. Propiedades físicas y formulación del diseño K-CS-221-QA-DM-106.

Fuente: Información del proyecto

El detalle completo de las características de este diseño de concreto se encuentra en el Anexo 01.

Fecha y Hora de Inicio del Vaciado.

- Inició a las 3:00 p.m. del 04/07/2019 y culminó aproximadamente a las 9:30 a.m. del 05/07/19 (incluyendo el acabado).

Velocidad programada de vaciado.

- Se contempló una velocidad de vaciado promedio de 144 m³/hora en promedio.

Métodos de control de gradiente térmico utilizados:

- Vaciado por celdas, aislamiento térmico de la superficie, uso de microclima y turbo calefactores.

Fecha y hora de inicio y fin del registro de temperaturas.

- Desde las 22:00 del 04/07/19 hasta las 11:45 del 23/07/19. Se emplearon 6 termocuplas con dataloggers para registrar las temperaturas del elemento y un termómetro electrónico para registrar la temperatura ambiental, que en este caso correspondía a la temperatura dentro del microclima.

Cimentación de Molino de Bolas 02.

Dimensiones del elemento vaciado.

Largo = 27.4 m

Ancho = 23.50 m

Alto = 3.00 m

Volumen = 1931.7 m³

En la Figura 6, se muestran los modelos 3D de los Molinos de Bolas 01 y 02, resaltándose de rojo la cimentación del Molino 02.

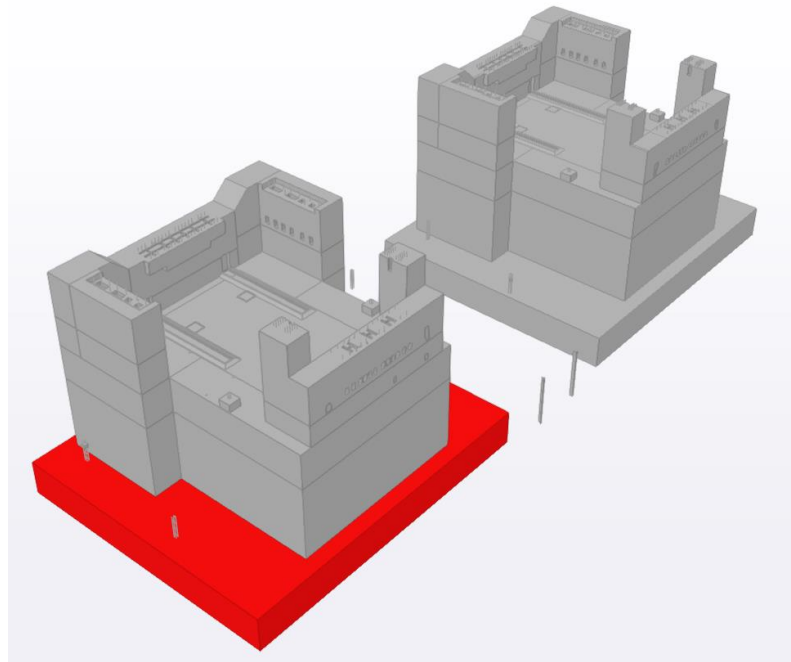


Figura 6. Molino de Bolas 01 y 02, de rojo la cimentación del Molino de Bolas 02.

Fuente: Información del proyecto

Características del concreto a utilizar.

El diseño de mezcla a usar en el vaciado corresponde al diseño con código K-CS-221-QA-DM-106 de la empresa ‘Supermix’ cuyas características se describen para la muestra anterior. El detalle completo de las características de este diseño de concreto se encuentra en el Anexo 01.

Fecha y Hora de Inicio del Vaciado.

- Inició a las 6:00 p.m. del 28/05/2019 y culminó aproximadamente a las 12:00 m del 29/05/19 (incluyendo el acabado).

Velocidad programada de vaciado.

- En ambos casos se contempló una velocidad de vaciado promedio de 144 m³/hora en promedio.

Métodos de control de gradiente térmico utilizados:

- Vaciado por celdas, uso de microclima y turbo calefactores. No se usó aislamiento térmico de la superficie.

Fecha y hora de inicio y fin del registro de temperaturas.

- Desde las 09:15 del 29/05/19 hasta las 17:00 del 21/06/19. Se emplearon 6 termocuplas con dataloggers para registrar las temperaturas del elemento. La temperatura ambiental no se registró.

Cimentación de Molino SAG 02.

SAG es el acrónimo de ‘*Semi Autogenous Grinding*’ o molido semiautógeno. Autógeno significa que usa el impacto de las propias rocas entre si durante la rotación para moler el material, sin embargo, los molinos SAG son semiautógenos porque también incorporan bolas de metal para reforzar el proceso. El material molido por los molinos SAG luego pasa a los molinos de bolas para ser pulverizarlo.

En la Figura 7 se muestra el modelo 3D del Molino SAG, resaltándose de rojo su cimentación.

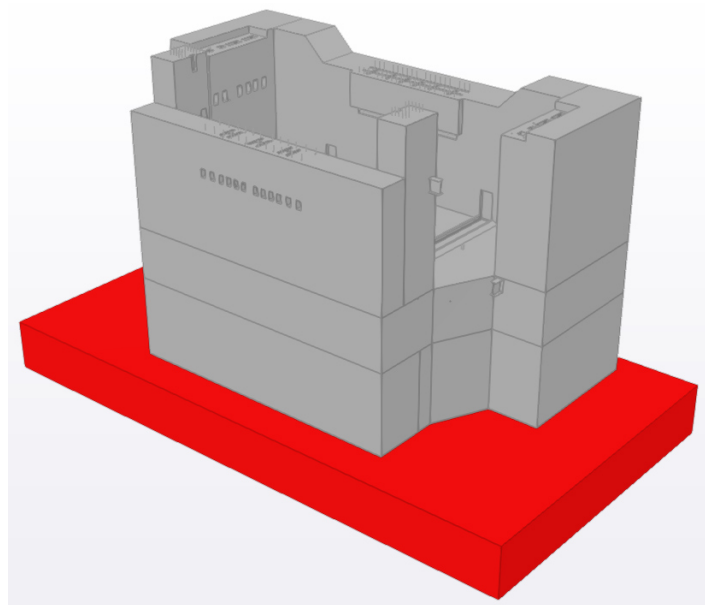


Figura 7. Molino SAG, de rojo se resalta la cimentación.

Fuente: Información del proyecto

Dimensiones del elemento vaciado.

Largo = 34.00 m

Ancho = 18.50 m

Alto = 3.00 m

Volumen = 1887 m³

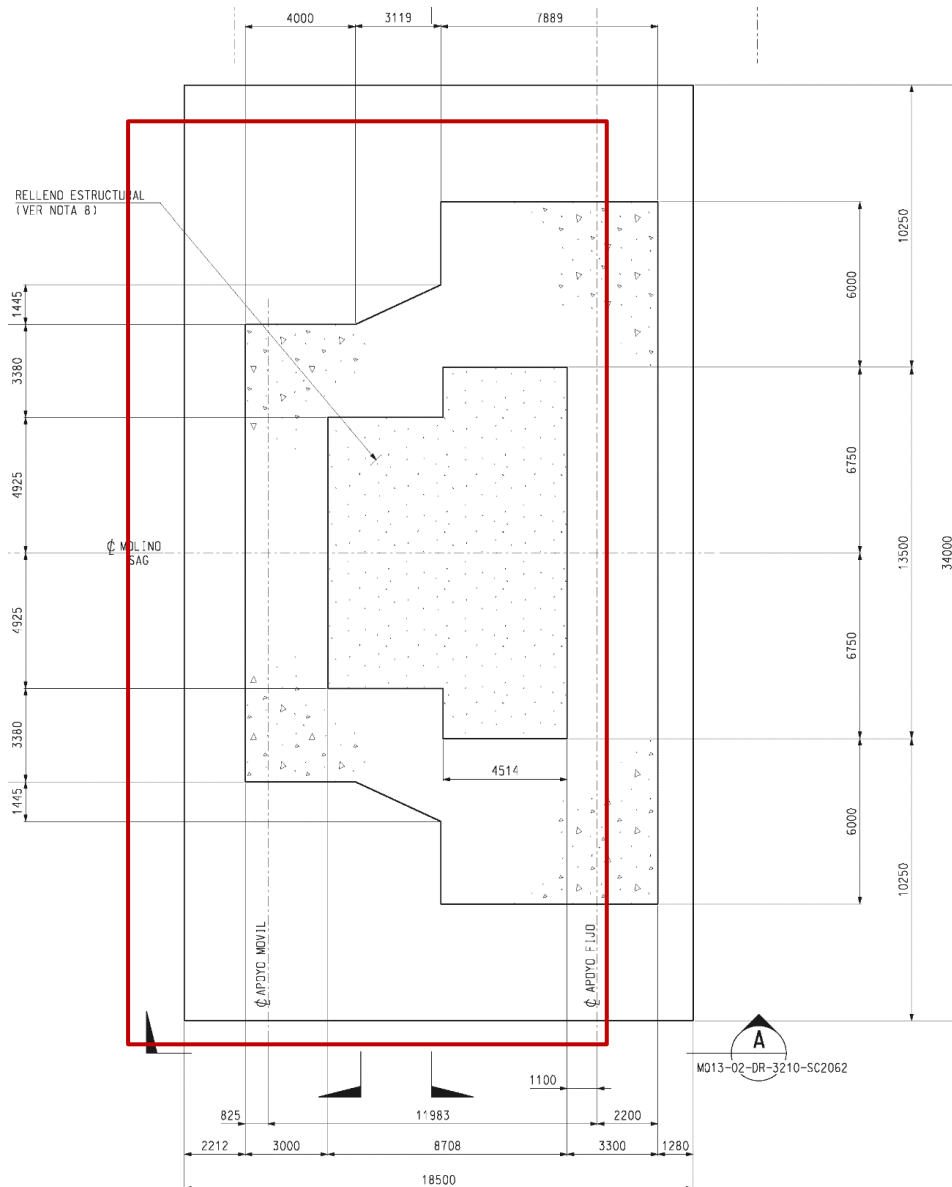


Figura 8. Planta de cimentación de Molino SAG, cimentación resaltada en línea roja.

Fuente: Información del proyecto

En la Figura 8 se muestra una vista en planta de la cimentación de Molino SAG.

Características del concreto a utilizar

El diseño de mezcla a usar en el vaciado corresponde al diseño con código K-CS-221-QA-DM-106 de la empresa 'Supermix' cuyas características se describió anteriormente.

Fecha y Hora de Inicio del Vaciado.

Inició a las 14:00 del 21/06/19 y culminó aproximadamente a las 12:00 del 22/06/19 (incluyendo el acabado).

Velocidad programada de vaciado.

Se contempló una velocidad de vaciado promedio de 100 m³/hora en promedio.

Métodos de control de gradiente térmico utilizados:

Vaciado por celdas, aislamiento térmico de la superficie, uso de microclima y turbo calefactores.

Fecha y hora de inicio y fin del registro de temperaturas.

Desde las 23:00 del 21/06/19 hasta las 10:00 del 30/06/19. Se emplearon 6 termocuplas con dataloggers para registrar las temperaturas del elemento y un termómetro electrónico para registrar la temperatura ambiental, que en este caso correspondía a la temperatura dentro del microclima.

Cimentación de Túnel de Recuperación (Etapa 01).

Figura 9. Túnel de Recuperación y Muro Etapa 01.

Fuente: Información del proyecto.

En la Figura 9 se muestra el Túnel de recuperación y a la derecha el Muro en Etapa 01, cubierto por el microclima (mantas azules).

En las minas, el material rico en mineral es excavado en bloques de gran tamaño, los cuales pasan a un ‘Chancador Primario’ para reducirlos a un tamaño más manejable. Este material luego es transportado a través de una faja hasta un depósito especial denominado ‘Stockpile’ para su posterior derivación a otras etapas del procesamiento de minerales.

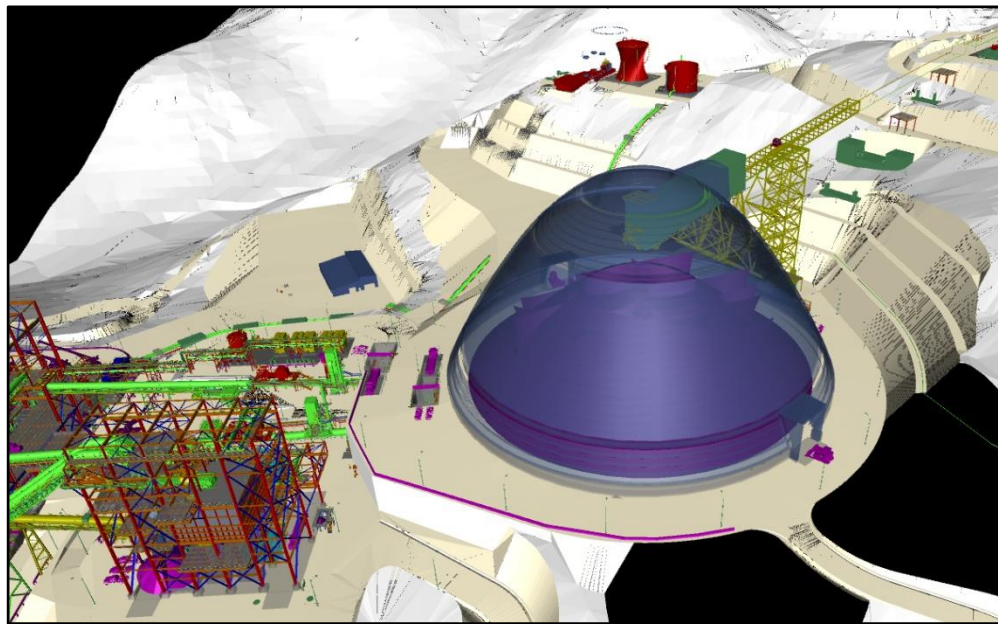


Figura 10. Modelo 3D de Stockpile.

Fuente: Información del proyecto

En la Figura 10 se muestra el Stockpile, se observa también la faja que descarga el material y el acopio de este dentro del domo geodésico; el mismo que suele tener un gran tamaño (41 m de altura por 112 m de diámetro para el proyecto en estudio) cerrado al ambiente para prevenir la salida del polvo. En la base del domo se ubica una estructura denominada ‘túnel de recuperación’, como se muestra en la Figura 11, por donde se capta el material depositado a través de unas tolvas alimentadoras y se transporta a través de unas fajas al área de molienda.

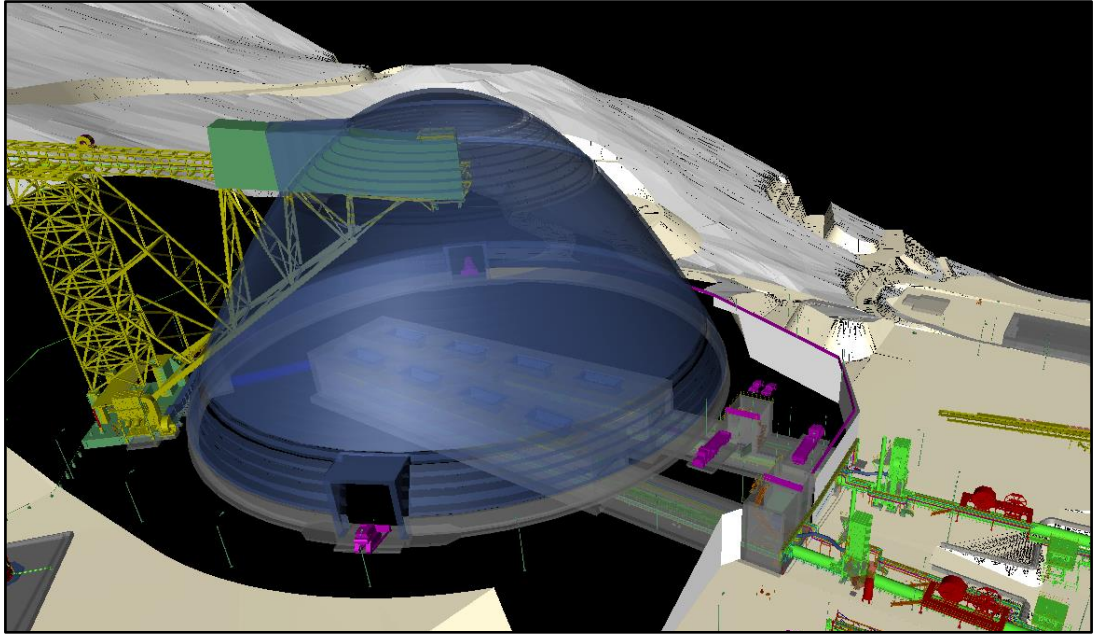


Figura 11. Modelo 3D de Stockpile, se observa el ‘Túnel de recuperación’ con aberturas en la parte superior para el ingreso del material a las fajas de transporte.

Fuente: Información del proyecto

En la Figura 12, se muestra un modelo 3D del Túnel de Recuperación, se resalta de rojo la Etapa 01 de la cimentación. Así mismo, en la Figura 13 se muestra una vista en planta de esta.

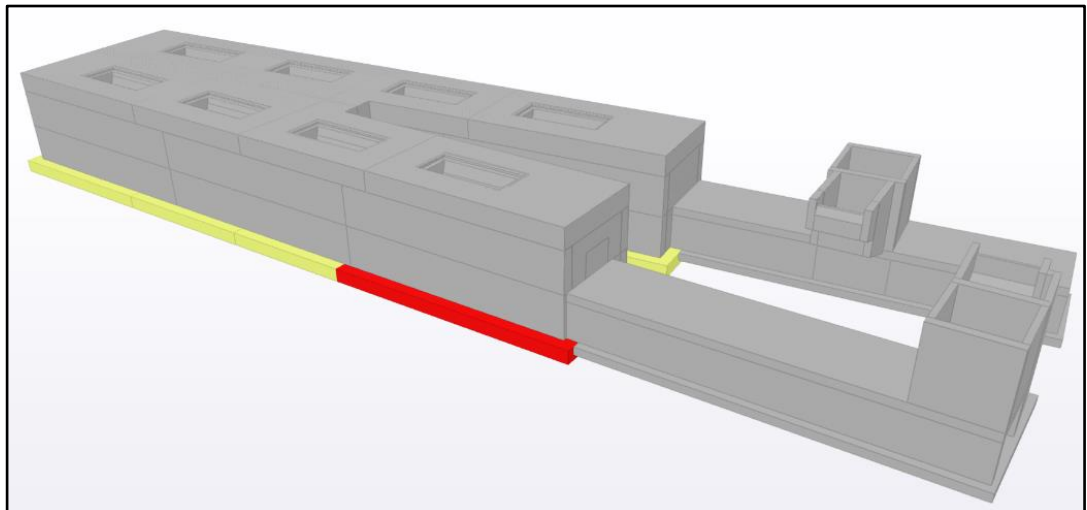


Figura 12. Túnel de Recuperación.

Fuente: Información del proyecto

Dimensiones del elemento vaciado

Largo promedio	=	33.14 m
Ancho promedio	=	16.00 m
Alto	=	1.70 m
Volumen	=	902.00 m ³

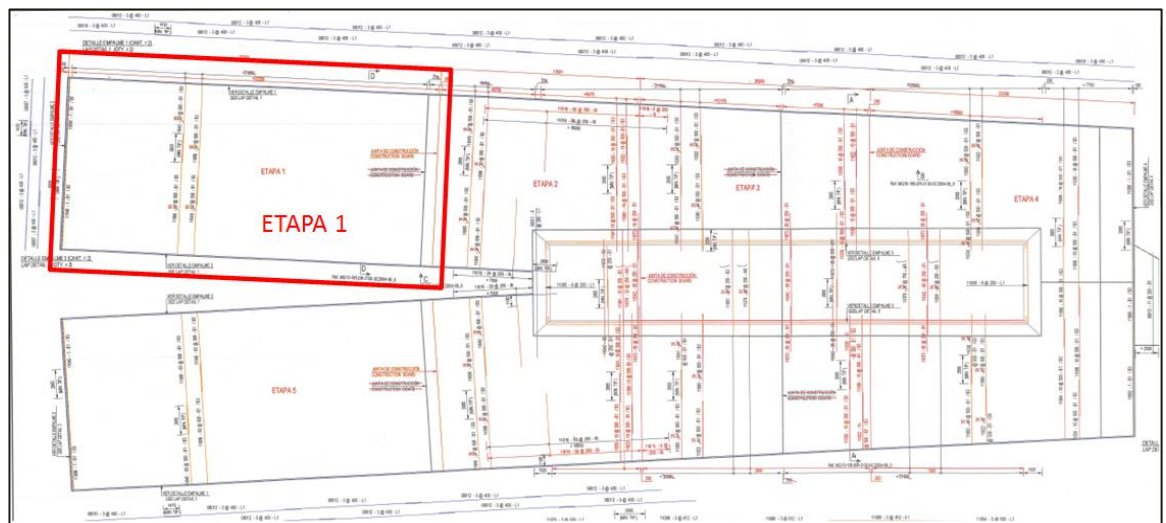


Figura 13. Planta de cimentación de túnel de recuperación, etapa I

Fuente: Información del proyecto

Características del concreto a utilizar.

El diseño de mezcla a usar en el vaciado corresponde al diseño con código K-CS-221-QA-DM-157 de la empresa ‘Supermix’, cuyas características se describen a continuación:

- Resistencia a la compresión ($f'c$): 350 kg/cm²
- Tipo de cemento: IP
- Asentamiento: 6 a 8"
- Tamaño del agregado grueso: Huso 467
- Contenido de aire incorporado: 4.5%+-1.5%.

Las proporciones de la mezcla se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Formulación del diseño K-CS-221-QA-DM-157.

Materiales	Peso (Kg).
Cemento IP.	460
Agua.	180
Arena.Gabi I	628
Piedra H4 Chancada Gabi I.	330
Piedra H67 Chancada Gabi I.	609
Viscocrete 4500 PE	3.910
SikaTard 450 PE	2.300
SikaAer	0.124

Nota. Fuente: Información del proyecto.

El detalle completo de las características de este diseño de concreto se encuentra en el Anexo 02.

Fecha y Hora de Inicio del Vaciado.

Inició a las 18:00 del 15/06/19 y culminó aproximadamente a las 04:00 del 16/06/19. El acabado inició 2 horas después de iniciada la colocación y culminó 4 horas después de que esta terminara.

Velocidad programada de vaciado.

Se contempló una velocidad de vaciado promedio de 90 m³/hora en promedio, empleando 3 bombas telescópicas de concreto.

Métodos de control de gradiente térmico utilizados:

Vaciado por celdas, aislamiento térmico de la superficie, uso de microclima y turbo calefactores.

Fecha y hora de inicio y fin del registro de temperaturas.

Desde las 23:00 del 15/06/19 hasta las 12:00 del 24/06/19. Se emplearon 6 termocuplas con dataloggers para registrar las temperaturas del elemento y un termómetro electrónico para registrar la temperatura ambiental.

Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01).

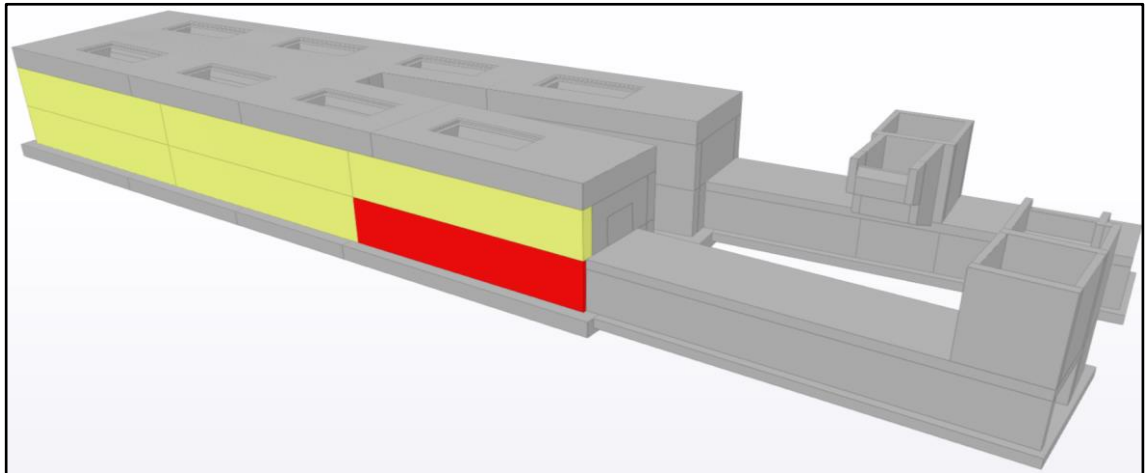


Figura 14. Modelo 3D del túnel de recuperación y muro.

Fuente: Información del proyecto

En la Figura 14, se muestra en rojo la Etapa 01 del Muro del Túnel de Recuperación. Por otro lado, en la Figura 15 se muestra una vista en planta de la sectorización de vaciados de los muros del Túnel de Recuperación; se resalta en amarillo la Etapa 01.

Dimensiones del elemento vaciado.

Largo promedio	=	27.30 m
Ancho promedio	=	1.50 m
Alto	=	5.40 m
Volumen	=	221.13 m ³

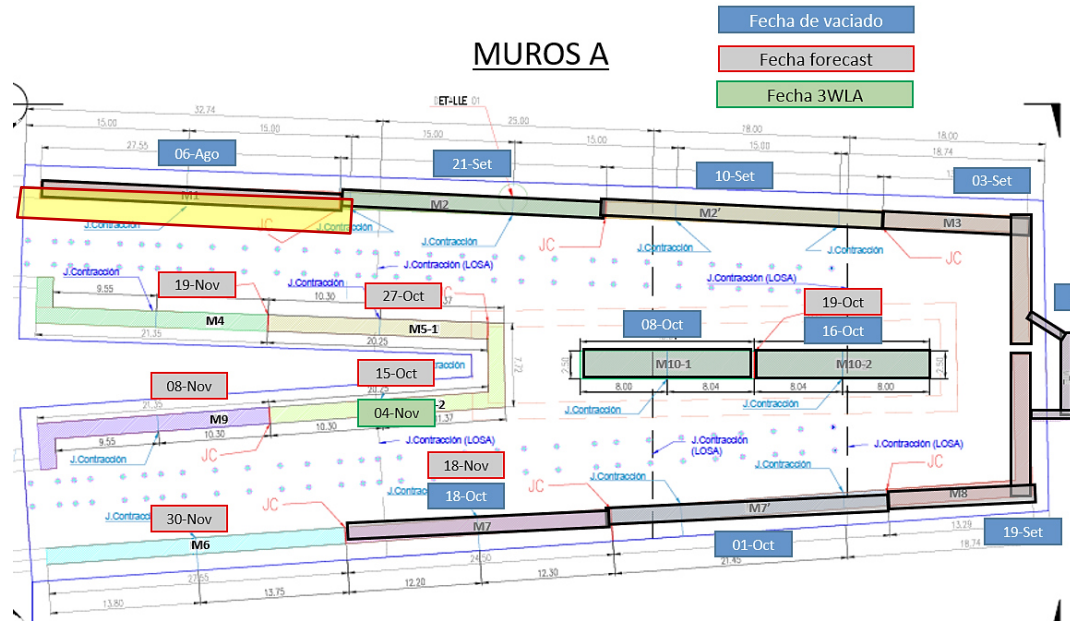


Figura 15. Planta de muros de túnel de recuperación, en amarillo la Etapa 01.

Fuente: Información del proyecto

Características del concreto a utilizar.

El diseño de mezcla a usar en el vaciado corresponde al diseño con código K-CS-221-QA-DM-157 de la empresa 'Supermix' cuyas características se describieron para la muestra anterior. El detalle completo de las características de este diseño de concreto se encuentra en el Anexo 02.

Fecha y Hora de Inicio del Vaciado.

Inició a las 12:48 del 06/08/19 y culminó aproximadamente a las 21:10 del mismo día.

Velocidad programada de vaciado.

Se contempló una velocidad de vaciado promedio de 30 m³/hora en promedio.

Métodos de control de gradiente térmico utilizados.

Vaciado por celdas y uso de microclima y turbo calefactores.

Fecha y hora de inicio y fin del registro de temperaturas.

Desde las 19:15 del 06/08/19 hasta las 07:30 del 18/08/19. Se emplearon 2 termocuplas con dataloggers para registrar las temperaturas del elemento y un termómetro electrónico para registrar la temperatura ambiental.

Técnica e instrumentos de recolección y análisis de datos

En el caso de las temperaturas, se utilizó la Técnica de Observación Experimental y registro de datos de campo mediante la recolección de datos de temperatura. Por ello, se instalaron termocuplas en el núcleo del concreto y termocuplas a 2" (50mm) de profundidad desde la superficie superior en cada elemento definido en la muestra con la finalidad de obtener registros de las temperaturas mediante sensores. Como se muestran en las Figuras 16, 17 y 18.



Figura 16. Vista general de una termocupla.

Fuente: Información de dominio público.



Figura 17 y 18. Termocupla instalada previo al vaciado, el sensor está ubicado a la profundidad requerida y el cable protegido del concreto mediante cinta roja.

Fuente: Información del proyecto.

Estos sensores electrónicos tienen una capacidad mínima de medición de -50°C a 200°C , con una precisión de 0.5°C ; las temperaturas se controlaron a intervalos de 15 minutos, quedando registradas en una base de datos. Posteriormente para el análisis se consideró la estadística descriptiva y la técnica de comparación cuantitativa.

Para la recolección de datos respecto a los costos, se cuantificó los recursos utilizados y se calculó en función a estimaciones paramétricas - ascendentes. Para el análisis, también se utilizó la estadística descriptiva y la técnica de comparación cuantitativa.

Procedimiento

A continuación, se detallan, las actividades ejecutadas para en el proyecto:

1. Se recolectó información de los elementos; especificaciones técnicas (materiales de mezcla), diseño de mezcla, planos, proceso constructivo, información del lugar de vaciado y sus condiciones ambientales.
2. Se revisó y analizó normativa existente para verificar los parámetros que se deben cumplir en cuanto a vaciados masivos, así como experiencias y estudios anteriores.
3. Se realizó un estudio teórico del comportamiento termodinámico del concreto a fin de conocer la temperatura máxima, el gradiente máximo y el tiempo en que se ha de desarrollar.
4. Para el vaciado se implementó la combinación de los métodos propuestos, tales como: Vaciado por celdas, uso de microclima y protección superficial (El detalle de la implementación y operación serán descritos en el Capítulo 3). Esto con la finalidad garantizar la reducción del gradiente de temperatura.
5. El suministro y la entrega del concreto premezclado estuvo a cargo del Subcontratista SUPERMIX, de acuerdo con el diseño de mezcla aprobado.

6. Se realizó mediciones de temperatura desde la colocación del concreto y durante su fraguado, mediante higrómetros, termómetros y termocuplas. Las temperaturas se controlarán en intervalos de 15 minutos.
7. De forma paralela se estimó los costos de la aplicación de la combinación de métodos de control de gradiente térmico.
8. Luego de haber recopilado las lecturas de las termocuplas, se cuantificó el gradiente obtenido de forma práctica mediante las mediciones de temperatura y se comparó con el gradiente estimado de forma teórica.
9. Finalmente, se verificó la relación entre los costos de implementación de los métodos de reducción del gradiente térmico y la variación del gradiente respecto al modelo teórico. Esto con la finalidad de establecer el costo asociado a cada grado de temperatura del gradiente que se controló con determinado método o combinación de estos.

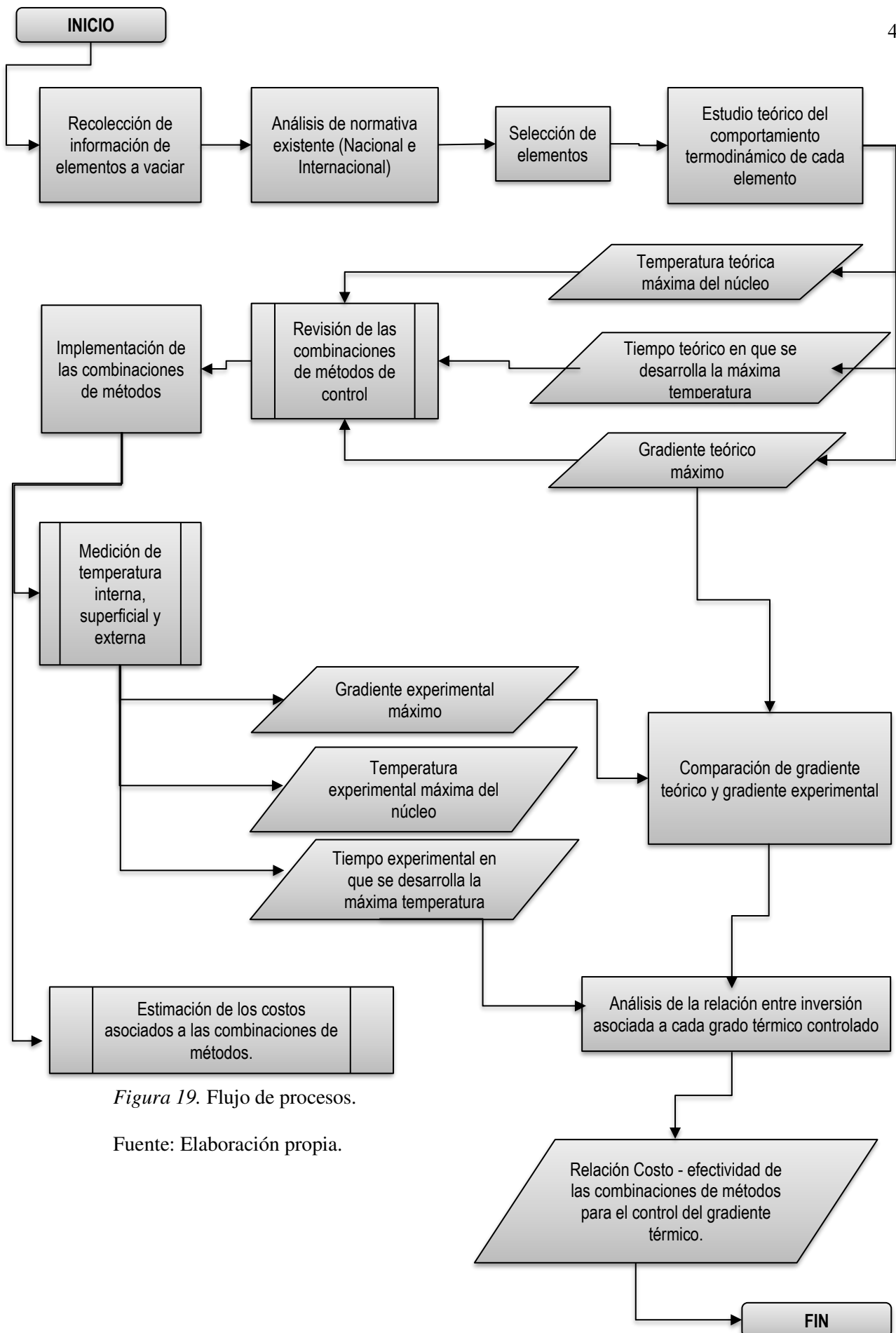


Figura 19. Flujo de procesos.

Fuente: Elaboración propia.

Presupuesto.

El costo asociado a la implementación y operación de los métodos de control térmico en cada muestra se obtiene de la suma del costo asociado a cada rubro (Mano de obra, equipos, materiales, subcontratos y costos indirectos) que se determina según los siguientes procedimientos de control de costos en el proyecto:

Mano de obra (M.O.).

1. Como parte del proceso de gestión de mano de obra, cada obrero contratado bajo el “Régimen Laboral Especial de Construcción Civil” (RCC) debe registrar en un sistema el detalle de las horas trabajadas en cada actividad durante el día. A este registro se le denomina ‘tareo’.
2. De estos registros se extrae y consolida las horas hombre (HH) registradas para las actividades de implementación y operación de controles térmico del elemento.
3. Los registros de horas hombre trabajadas o tareos se ingresan periódicamente a un sistema informático que permite calcular los pagos correspondientes a cada trabajador. De este sistema se obtiene el costo total acumulado de mano de obra (jornal, leyes sociales, equipos de protección personal, alimentación, transporte, exámenes médicos, entre otros) y las horas hombre gastadas.
4. El costo total acumulado de mano de obra mano, dividido entre el total de horas hombre da como resultado el costo promedio por hora hombre.
5. Por último, el total de HH utilizadas para la implementación y operación de los controles térmicos control se multiplica por el costo promedio de HH calculado para obtener el costo total por mano de obra de esta actividad.

Equipos y herramientas (EQP).

1. Los equipos y herramientas usados para todas las actividades relacionadas al vaciado de concreto son listados en un documento de ‘procedimiento de trabajo’. De este listado se determina los equipos y herramientas requerido para la implementación y operación de los métodos de control térmico.
2. El costo de alquiler de cada equipo y herramienta se obtiene del sistema informático de gestión del proyecto, pudiendo ser una tarifa por hora, día, mes o compra en lugar de alquiler.
3. Todas las tarifas de alquiler se estandarizan a una tarifa diaria considerando 10 horas diarias (máxima cantidad de horas en una jornada) y 30 días al mes para la conversión.
4. El costo total de mantenimiento de equipos utilizados se obtiene del sistema informático de gestión del proyecto, el cual se prorratea en 8 vaciados masivos y proporcionalmente a la cantidad de equipos empleados.
5. En caso el costo del equipo o herramienta corresponda a una compra, se considera un valor de residual de 20% al final del proyecto y 12 meses de uso, por lo que el costo mensual prorrateado sería:

$$\text{Costo mensual} = \frac{(1 - 20\%) * \text{Valor de compra}}{12}$$

$$\text{Costo mensual} = \frac{1}{15} * (\text{Valor de compra})$$

6. La cantidad de días de uso de los equipos y herramienta se determinará según los días de trabajo registrados por la mano de obra en la sección anterior y los días de control térmico que figuran en los registros de las termocuplas.

7. En caso el equipo requiera combustible para su funcionamiento, el ratio promedio de consumo horario de combustible y el costo del galón de combustible se obtienen del sistema de gestión del proyecto.
8. Adicionalmente, se calcula el costo de movilización y desmovilización de los equipos y herramientas mediante la estimación del número de viajes necesarios para su transporte, multiplicado por el costo por viaje obtenido del tarifario de transporte del proyecto.
9. Por último, el total de días utilizados para la implementación y operación de los controles térmicos se multiplica por el costo promedio diario de alquiler calculado, a esto se adiciona el costo del combustible y de la movilización y desmovilización para obtener el costo total por equipos y herramientas de esta actividad.

Materiales (MAT.).

1. Los materiales usados para todas las actividades relacionadas al vaciado de concreto son listados en un documento de ‘procedimiento de trabajo’, de este listado se determina los materiales requeridos para la implementación y operación de los métodos de control térmico.
2. Estos materiales pueden ser de un solo uso (consumibles) o reusables, según lo cual su costo será el total registrado en las facturas de compra o el costo registrado en las facturas entre el número de reusos, que según información del proyecto es en promedio 8 veces.
3. Las cantidades empleadas de cada material se calcularán en función de las dimensiones del elemento de concreto.
4. Adicionalmente, se calcula el costo de movilización y desmovilización de los materiales mediante la estimación del número de viajes necesarios para su transporte, multiplicado por el costo por viaje obtenido del tarifario de transporte del proyecto.

5. Por último, la cantidad empleada de cada material se multiplica por el costo unitario calculado y se le adiciona el costo de movilización y desmovilización para obtener el costo total por materiales de esta actividad.

Subcontratos (SUB.).

No se tuvo subcontratos para la implementación y operación de los métodos de control térmico en ninguna de las muestras del proyecto.

Gastos Generales (GG.).

No se requirió mayor infraestructura ni personal de soporte de operación para la implementación y operación de los métodos de control térmico en ninguna de las muestras del proyecto.

Estimación del comportamiento termodinámico de las unidades de estudio.

1. Se calcula el número de días en que el núcleo alcanza su máxima temperatura. Para ello se calcula la relación entre volumen y área de disipación (V/S) por metro lineal; considerando que, para encofrados de madera, se deberá aumentar 20 pulgadas de concreto equivalente adicionales en cada cara lateral en el cálculo del volumen. (ACI 207.2R, 2007).

- 1.1. El reporte ACI 207.2R, basa el cálculo en ábacos donde se asume una relación de V/S de 1.2 ft²/day (0.11 m²/día). Por ello, de obtenerse una relación diferente; el mismo reporte señala que debido a que esta relación es modificada por una mayor o menor difusividad del concreto (h²), se sugiere multiplicar el V/S real por 1.2 ft²/day o 0.11 m²/día y dividirlo entre la difusividad del concreto.

$$\left(\frac{V}{S}\right)' = \frac{\frac{V}{S} * 0.11}{h^2} \quad (\text{ACI 207.2R});$$

$$h^2 = \frac{K}{c_h \times \rho} = 0.09 \text{ m}^2/\text{día} \quad (\text{ACI 207, 1993})$$

$$h^2 = \text{Difusividad, ft}^2/\text{h (m}^2/\text{h)}$$

K = Conductividad térmica, BTU/ft.h. °F(kcal/m.h. °C)

C_h = Calor específico, BTU/lb. °F(kcal/kg. °C)

ρ = densidad del concreto lb/ft³ (kg/m³)

Para el cálculo de la cantidad de días en que se alcanzará la temperatura máxima en el núcleo, se realizan los siguientes pasos:

Se identifica los siguientes valores:

T_{col} = Temperatura de colocación del concreto

T_{amb} = Temperatura del ambiente, en base a datos anuales

T_M = Temperatura del terreno

T_A = Temperatura mínimo promedio

Se considera que: $T_{col} > T_{amb}$, calor disipado; $T_{amb} > T_{col}$, calor absorbido

- 1.2. Posterior a ello, con el uso del ábaco mostrado en la Figura 20; considerando los valores de V/S y T_{col} , se calcula el número de días en que el elemento alcanzará su máxima temperatura.

La Figura 20 considera, Temperatura del aire = Temperatura de colocación.

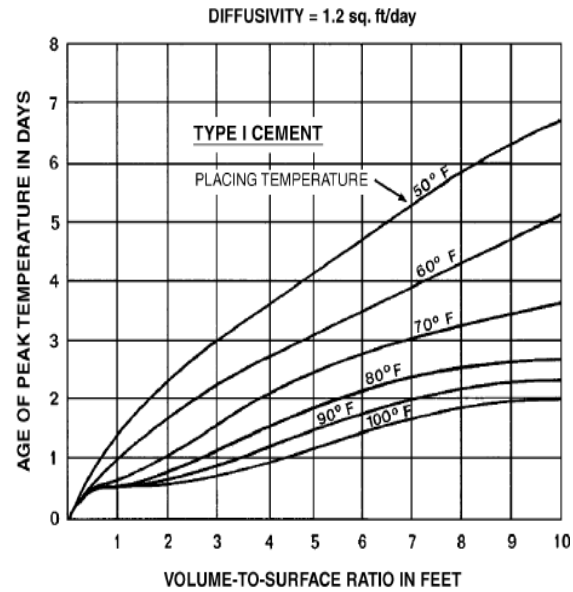


Figura 20. Efecto de la temperatura de colocación y la exposición superficial en la edad a temperatura máxima para cemento Tipo I en concreto.

Fuente: Fig.4.4, ACI 207.2R-07

2. Como siguiente paso, se calcula la temperatura de vaciado efectivo (T_{pl}), mediante la fórmula siguiente:

$T_{pl} = T_{col} + C (T_{amb} - T_{col})$, siendo C: % de calor disipado o absorbido

- 2.1. Para hallar el porcentaje mencionado se hace uso del ábaco mostrado en la Figura 21, en función del ratio V/S y el número de días en que se alcanza la máxima temperatura.

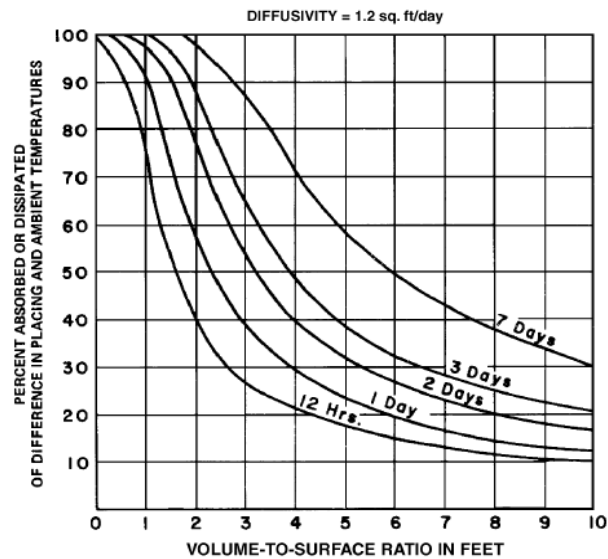


Figura 21. Flujo de calor entre el aire y el concreto por diferencia entre la temperatura de colocación y la temperatura del aire ambiente.

Fuente: Fig.4.6, ACI 207.2R-07

3. Para el cálculo de la temperatura mínima (T_{min}), a obtenerse en una ventana de 7 días, se hace uso de la siguiente fórmula:

$$T_{min} = T_A + \frac{2(T_M - T_A)}{3} \sqrt{\frac{V/S}{96}} \quad (\text{Ecuación 4-4 ACI 207.2R-07})$$

4. Para el cálculo del incremento de la temperatura máxima. Dado que los ábacos se basan en elementos que contienen 376 lb/yd³ o 223 kg/m³, fineza Wagner de 1790 m²/gr; el ACI 207.2R-07, pp13; indica que deben efectuarse correcciones de acuerdo con el tipo y cantidad de cemento, por lo que se calculan factores de corrección por tipo de cemento; diferencia de fineza, calor de hidratación y contenido de cemento.

- 4.1. Se calcula, primero, el incremento de la temperatura en °F, sin ningún tipo de corrección y considerando $(V/S)'$ y T_{col} (°F). Mediante el ábaco de la Figura 22.

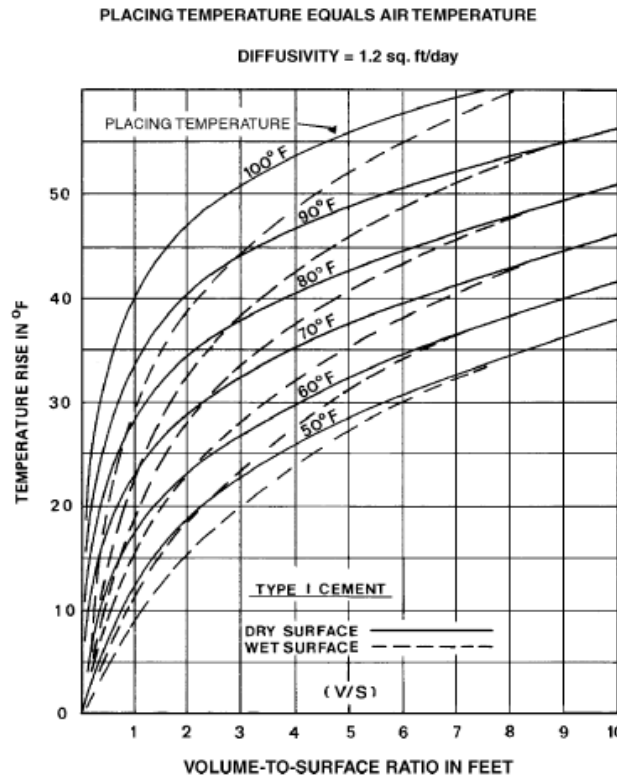


Figura 22. Incremento de la temperatura de los elementos de concreto que contienen 376 lb/yd³ (223 kg/m³) de cemento para diferentes temperaturas de colocación.

Fuente: Fig.4.5, ACI 207.2R-07

- 4.2. La fineza se verifica en el certificado de calidad del cemento. En caso la fineza del cemento haya sido medida mediante el aparato de Blaine; se debe efectuar lo indicado por el ASTM C 115, en el cual a efectos de encontrar un valor proporcional al obtenido por el turbidímetro de Wagner; se considera la siguiente relación: $\text{Wagner} = \text{Blaine} / 1.8$.

Haciendo uso de la Figura 23, en función a la fineza de cemento real expresada mediante el turbidímetro de Wagner y la fineza de cemento asumida para los ábacos mostrados en el Reporte ACI 207.2 (1790 m²/gr); se verifica la generación de calor, expresada en porcentaje para cada tipo de cemento.

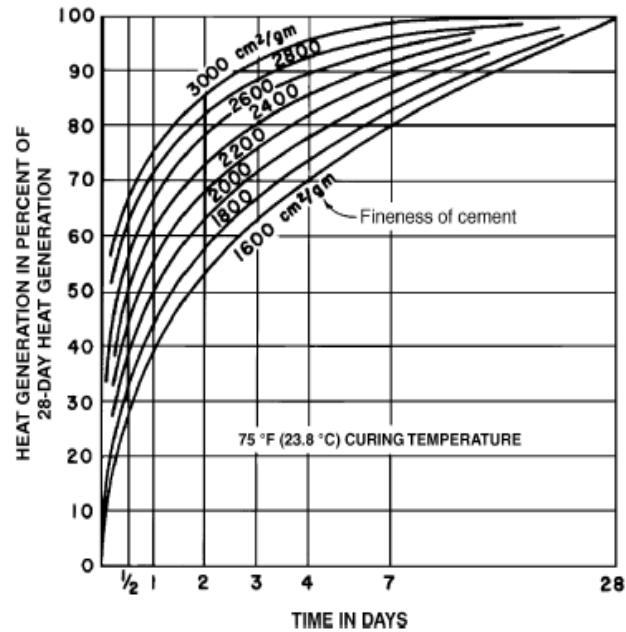


Figura 23. Ratio de generación de calor afectada por finura del cemento Wagner (ASTM C 115) para la pasta de cemento curada a 75 °F (23,8 °C).

Fuente: Fig.4.2, ACI 207.2R-07

Con los valores obtenidos se calcula un factor de corrección por diferencia de finura (F'), expresado en el valor obtenido por cemento real sobre el valor obtenido para el cemento asumido en los ábacos.

- 4.3. Para el cálculo de la diferencia de temperatura a causa del calor de hidratación (H_a); se verifican los valores del calor de hidratación del cemento a 28 días, en el caso del cemento asumido en los ábacos se considera un valor de 87 cal/g.

Seguidamente, con el uso del ábaco mostrado en la Figura 24, se identifica el aumento adiabático del calor para el escenario de 28 días y para la cantidad de días en que se alcanza la máxima temperatura.

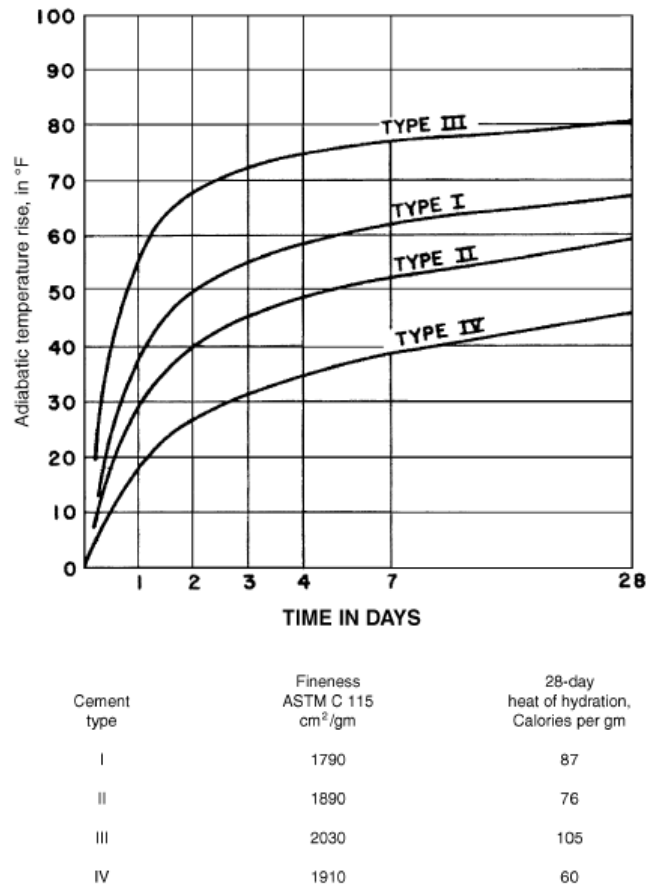


Figura 24. Aumento de la temperatura del concreto masivo que contiene 376 lb/yd³ (223 kg/m³) para varios tipos de cemento.

Fuente: Fig.4.1, ACI 207.2R-07

Con los datos obtenidos, se calcula el H_a ; mediante la fórmula siguiente:

$$H_a = \frac{1.8 \cdot h_g \cdot w_c}{0.22 \cdot 150 \cdot 27} \quad (\text{Ecuación 4-2 ACI 207.2R-07})$$

Donde:

0.22 : Calor específico del concreto en cal/g·°C

150 : Densidad del concreto en lb/ft³

1.8 : Factor de conversión de °C a °F

27 : Conversión de yd³ a ft³

h_g : generación calor del cemento a los 28 días por el calor de hidratación en cal/g

w_c : peso del cemento en lb/yd³

Considerando un contenido de cemento de 376 lb/yd³: $H_a = 0.76 h_g$

$$H_a = \frac{\left(0.76 \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Calor de} \\ \text{hidratación} \\ \text{asumido} \end{array} - \begin{array}{c} \text{Calor de} \\ \text{hidratación} \\ \text{real} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Aumento adiabático} \\ \text{cuando alcanza la} \\ \text{máxima temperatura.} \end{array} \right)}{\text{Aumento adiabático del calor en 28 días}}$$

4.4. El incremento adiabático de la temperatura en el día que alcanza la temperatura pico para 376 lb/yd³ (223 kg/m³) de cemento tipo I, se obtiene multiplicando el factor F' a lo obtenido por el Aumento adiabático cuando alcanza la máxima temperatura más el calor de hidratación (H_a)

4.5. Seguidamente se calcula la corrección al incremento de temperatura (Δ) hallado en 4.1.

Para ello; se multiplica el Incremento de temperatura para cemento Tipo I por el incremento adiabática calculado en 4.4, dividiendo el resultado entre el aumento adiabático de calor alcanzado para la cantidad de días en que alcanza su máxima temperatura.

4.6. Finalmente, se realiza una corrección en función al contenido de cemento (T_{C+F}); para ello se identifica en la Hoja Técnica la cantidad de cemento real en mezcla, la cantidad de cemento asumido en los ábacos es de 223 kg/m³

El valor de T_{C+F} ; se halla multiplicando Δ por la cantidad de cemento real, dividido entre la cantidad de cemento asumida.

5. Para el cálculo de la temperatura máxima en el núcleo, se hace uso de la fórmula siguiente:

$$T_F = (T_{pl} + T_{C+F})$$

6. Luego de ello, para el cálculo de la variación de temperatura máxima efectiva T_E :

$$T_E = (T_{pl} + T_{C+F}) - T_{min}$$

7. Finalmente, para el cálculo del gradiente térmico teórico (ΔT) entre la superficie y el núcleo: $\Delta T = T_{max} - (T_{amb} + 15^\circ C)$, se considera a la temperatura superficial del elemento (temperatura tomada a 5 cm del límite superior) como la suma de la temperatura ambiental más $15^\circ C$; este valor considerando los resultados obtenidos por Marco Zeña en el 2017.

Considerando un concreto convencional, con un E_c del orden de 250,000 kg/cm² a 300,000 kg/cm², una f_t en el rango de 30 kg/cm² a 50 kg/cm², y un α de 8 a 12 x 10⁻⁶ /°C; el ΔT que puede producir fisuración se encuentra en el rango de 10 °C a 25 °C. Por ello, se ha considerado como límite el valor máximo permisible de 19°C; sin embargo, a fin de tener certeza del valor asumido; se calcula un gradiente admisible teórico para ser contrastado con los 19 °C asumidos como límite.

8. A continuación, se detalla el cálculo del diferencial térmico admisible, antes de la fisuración por esfuerzos térmicos.

$$f_t = K_R * K_f * E_C * \Delta_C \dots \text{(Ecuación 5-2 ACI 207.2R)} \quad (I)$$

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g * E_C}{A_F * E_F}} \dots \text{(Ecuación 5-2 ACI 207.2R)} \quad (II)$$

$$\Delta_C = \frac{\Delta L}{L} = \alpha * \Delta T \quad (III)$$

De las ecuaciones (I) y (III):

$$\Delta T_{admissible} = \frac{f_t}{K_R * K_f * E_C * \alpha}$$

Donde:

f_t : Resistencia a tracción del concreto (kg/cm²)

K_f : Factor de restricción por la fundación

K_R : Factor de restricción por la geometría, se hace uso de la ecuación 4.1 del ACI 207.2R-95.

$$K_R = [(\frac{L}{H} - 2)/(\frac{L}{H} + 1)]^{h/H}$$

Se considera $h=0.5H$; ya que se asume el escenario más extremo. Es decir, en centro del elemento

E_c : Modulo de elasticidad del concreto (kg/cm²),

$$E_c = 15100 * \sqrt{f'_c} \text{ (ACI 318, Ec. 19.2.2.1(b))}$$

Δ_c : Contracción lineal del concreto si no hubiera restricción.

Análisis de datos

Para el análisis de datos se aplicó estadística descriptiva debido a que se organiza, describe y sintetiza información de las muestras analizadas.

Aspectos éticos

En el desarrollo de la investigación se ha aplicado conceptos éticos como: derecho de autor, referencias en función a lo solicitado por la universidad; así mismo, verificación de similitud mediante software Turnitin.

Capítulo 4

Desarrollo de la Investigación

Cimentación de Molino de Bolas 01

Modelo Teórico.

1. Se calculó la relación entre volumen y área de disipación (V/S) por metro lineal; considerando que, para encofrados de madera, se agrega 20 pulgadas de concreto equivalente adicionales en cada cara lateral en el cálculo del volumen. (ACI 207.2R, 2007).

$$\text{Largo (L)} = 27.40 \text{ m}, \quad \text{Ancho (B)} = 23.50 \text{ m}, \quad \text{Alto (h)} = 3.00 \text{ m}$$

$$V = 85.26 \text{ m}^3 \text{ (por metro lineal)}, \quad S = 33.40 \text{ m}^2$$

$$V/S = 2.55 > 0.11 \text{ m}^2/\text{día}, \quad V/S = 8.37 > 1.2 \text{ ft}^2/\text{día}$$

- 1.1. Debido a que se obtuvo una relación diferente; se recalcula el valor de V/S, en función a la difusividad del concreto (h^2).

$$\left(\frac{V}{S}\right)' = \frac{\frac{V}{S} * 0.11}{h^2} = \frac{8.37 * 0.11}{0.09} = 10.24$$

- 1.2. Se identificaron los siguientes valores:

$$T_{\text{col}} = 21 \text{ }^\circ\text{C} = 69.8^\circ\text{F}, \quad T_{\text{amb}} = 10.8 \text{ }^\circ\text{C} = 51.44 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_M = 8 \text{ }^\circ\text{C} = 46.4 \text{ }^\circ\text{F}, \quad T_A = -1.4 \text{ }^\circ\text{C} = 21.48 \text{ }^\circ\text{F}$$

Debido a que $T_{\text{col}} > T_{\text{amb}}$, calor disipado.

- 1.3. Con el uso del ábaco mostrado en la figura 20; considerando los valores de $(V/S)'$ y T_{col} , se obtuvo que la edad en que alcanza su temperatura máxima en el núcleo es a los 3.5 días.

2. Se calculó la temperatura de vaciado efectivo (T_{pl}).

$$T_{pl} = T_{col} + C (T_{amb} - T_{col}) = 18.86 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- 2.1. Para hallar el porcentaje de calor disipado se usó el ábaco mostrado en la figura 21 y en función al ratio (V/S) y el número de días en que se alcanza la máxima temperatura, se obtuvo un valor de 21%.

3. Se calculó la temperatura mínima (T_{min}) en una ventana de 7 días

$$T_{min} = T_A + \frac{2(T_M - T_A)}{3} \sqrt{\frac{V/S}{96}} = 0.65 \text{ }^{\circ}\text{C} = 32.81^{\circ}\text{F}$$

4. Se calculó el incremento de la temperatura máxima. Efectuándose correcciones de acuerdo con el tipo y cantidad de cemento; se hallaron factores de corrección por tipo de cemento; diferencia de fineza, calor de hidratación y contenido de cemento.

- 4.1. Mediante el ábaco de la figura 22, se calculó el incremento de la temperatura en $^{\circ}\text{F}$, sin ningún tipo de corrección. Obteniéndose un valor de 46 $^{\circ}\text{F}$.

- 4.2. Se identificó que la fineza del cemento medida mediante el aparato de Blaine es 4830 cm^2/gr . Se calculó la fineza en función al turbidímetro de Wagner, Wagner = Blaine/1.8. Se obtuvo:

$$\text{Fineza de cemento (REAL)} = 2683.3 \text{ m}^2/\text{gr}$$

$$\text{Fineza de cemento (ÁBACOS)} = 1790 \text{ m}^2/\text{gr}$$

Haciendo uso del gráfico 23; en función a la fineza de cemento, se obtuvo un porcentaje de generación de calor de 88% y para la fineza de cemento asumida para los ábacos, se obtuvo un valor de 66%.

Se calculó un factor de corrección por diferencia de finura (F').

$$F' = 88/66 = 1.33$$

- 4.3. Se calculó la diferencia de temperatura a causa del calor de hidratación (H_a); se tuvo en consideración:

Calor de hidratación del cemento a 28 días:

$$\text{Cemento IP} = 74 \text{ cal/g}$$

$$\text{Cemento asumido en ábacos} = 87 \text{ cal/g}$$

Del gráfico 24, se identificó el aumento adiabático de calor:

$$\text{A 28 días} = 67 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$\text{A 3.5 días} = 56 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Con los datos obtenidos:

$$H_a = \frac{\left(0.76 \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Calor de} \\ \text{hidratación} \\ \text{asumido} \end{array} - \begin{array}{c} \text{Calor de} \\ \text{hidratación} \\ \text{real} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Aumento adiabático} \\ \text{cuando alcanza la} \\ \text{máxima temperatura.} \end{array} \right)}{\text{Aumento adiabático del calor en 28 días}}$$

$$H_a = -8.3 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

- 4.4. Se calculó el incremento adiabático de la temperatura en el día que alcanza la temperatura pico para 376 lb/yd³ (223 kg/m³) de cemento tipo I,

$$1.33 * (-8.3 + 56) = 63.7 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

- 4.5. Se calculó la corrección al incremento de temperatura (Δ) hallado en 4.1.

$$\Delta = 48 * 63.7 / 56 = 52.3 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

- 4.6. Finalmente, se efectuó la corrección en función al contenido de cemento:

$$\text{Cantidad de cemento real en mezcla} = 490 \text{ kg/m}^3$$

Cantidad de cemento asumido en ábacos = 223 kg/m³

$$T_{C+F} = 54.6 * 490 / 223 = 114.90 \text{ }^{\circ}\text{F} = 63.83 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

5. Para el cálculo de la temperatura máxima en el núcleo, se usó la fórmula siguiente:

$$T_F = (T_{pl} + T_{C+F}) = 180.84 \text{ }^{\circ}\text{F} = 82.69 \text{ }^{\circ}\text{C} = T_{MÁX}$$

6. Luego de ello, para el cálculo de la variación de temperatura máxima efectiva T_E :

$$T_E = (T_{pl} + T_{C+F}) - T_{min} = 148.03 \text{ }^{\circ}\text{F} = 82.04 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

7. Finalmente, para el cálculo del gradiente térmico teórico (ΔT):

$$\Delta T = T_{max} - (T_{amb} + 15 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 56.89 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Se calcula el valor máximo permisible del gradiente (ΔT), a partir del cual se puede producir fisuración en el elemento.

Métodos de control de gradiente térmico implementados.

Microclima.

Se instaló una carpa de protección climática de 33.38x33.77m de base y 8m de altura, con armazón de andamios metálicos y toldo de lona plástica. La temperatura del microclima fue monitoreada mediante el uso de un termómetro digital.

La vista isométrica de la estructura del microclima empleado se muestra en la Figura 25, el plano completo se encuentra en el Anexo 03. Por otro lado, en la Figura 26 se muestra un registro fotográfico.

Fuente: Información del proyecto



Figura 26. Fotografía de microclima ejecutado en campo para Cimentación de Molino de Bolas 01.

Turbocalefactores

Se emplearon 11 turbocalefactores, 8 eléctricos y 3 a combustión debido a disponibilidad en obra, con una potencia total mínima de 396 kW. La distribución en planta de estos equipos para asegurar una temperatura uniforme en el microclima se muestra en la Figura 27, mientras que en la Figura 28 se muestra detalles de su ubicación y colocación.

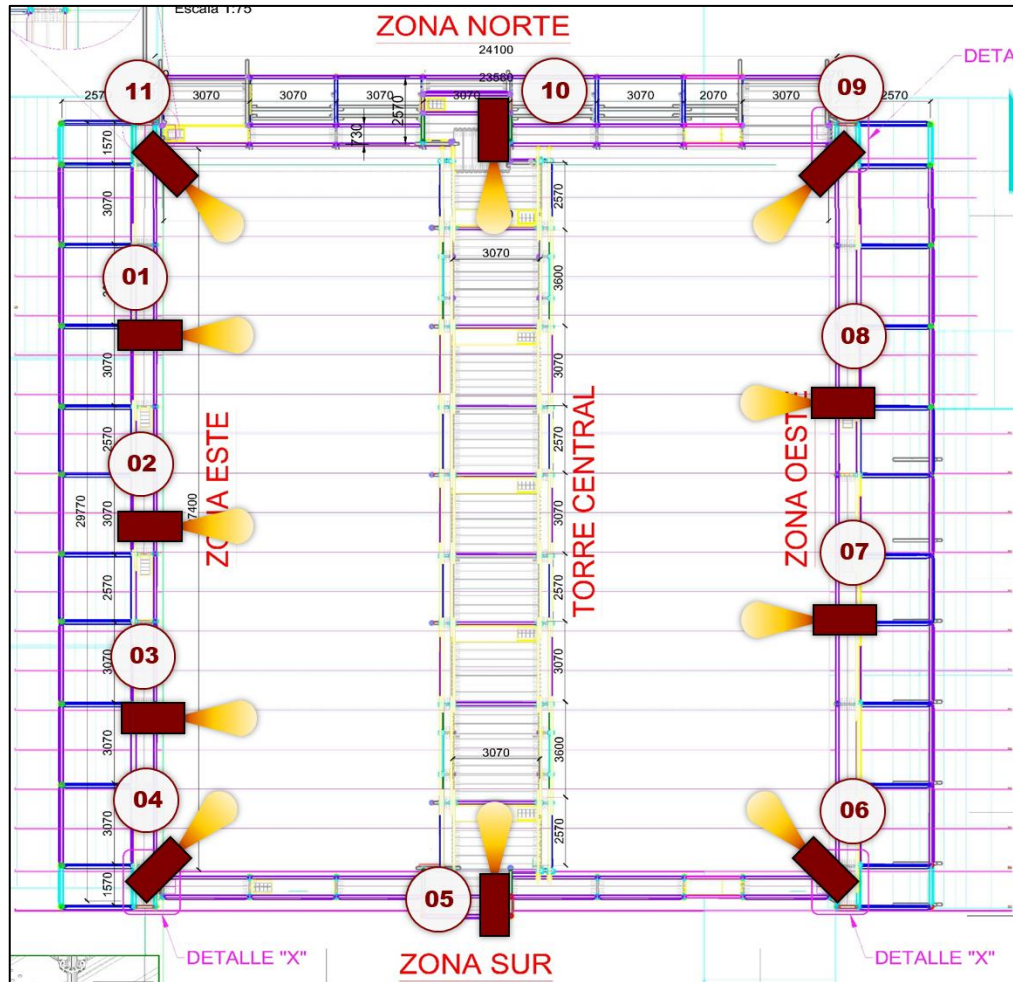


Figura 27. Plano en planta de distribución perimetral de los 11 turbocalentadores empleados para el vaciado de la Cimentación de Molino de Bolas 01

Fuente: Información del proyecto

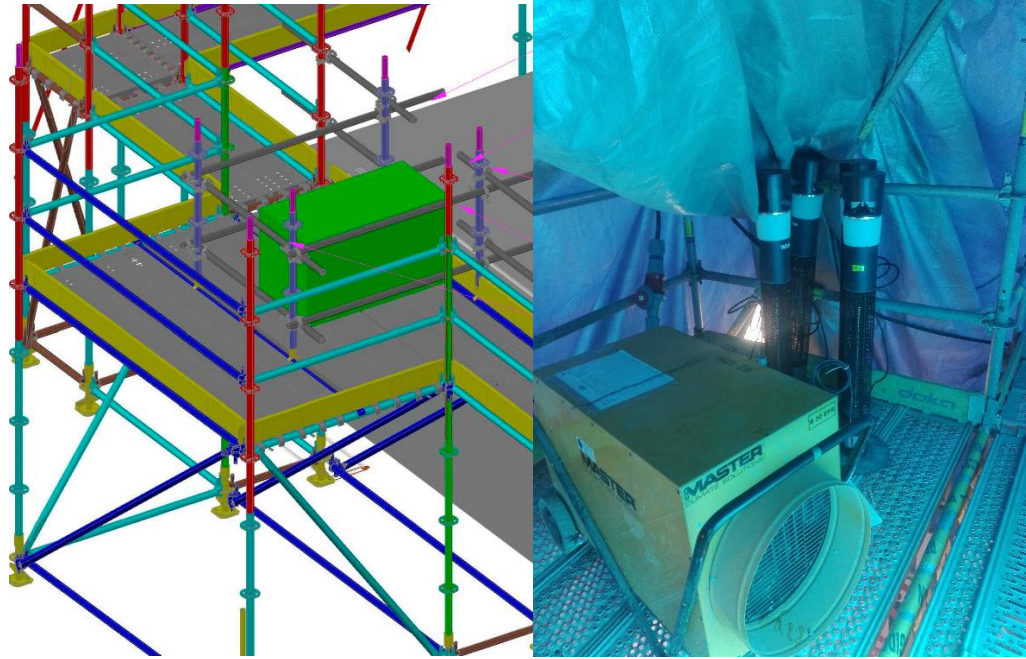


Figura 28. Detalle de espacio para turbocalefactores en estructura de microclima. A la izquierda detalle en plano y a la derecha en campo.

Fuente: Información del proyecto

Vaciado por celdas.

Se siguió una secuencia de vaciado por celdas con una velocidad máxima de ascenso del concreto sobre el encofrado no mayor de 1.77 m/h. El detalle de la secuencia se muestra en la siguiente Figura 29, donde el eje de las filas corresponde a la altura de la cimentación y el eje de las columnas al largo. A lo ancho, no hubo sectorización.

FILA 08	0,2	3,0	3 12,0 850,9 Celdas 36	00:07 00:20 00:27	3 12,0 1030,7 Celdas 44	00:07 01:37 01:44	3 12,0 1210,5 Celdas 52	00:07 02:54 03:01	3 12,0 1384,2 Celdas 60	00:07 04:10 04:17	3 12,0 1533,8 Celdas 67	00:07 05:16 05:23	3 12,0 1659,6 Celdas 73	00:07 06:12 06:19	3 12,0 1761,3 Celdas 78	00:07 06:58 07:05	3 12,0 1839,1 Celdas 82	00:07 07:34 07:41	3 12,0 1892,9 Celdas 85	00:07 08:00 08:07	3 12,0 1922,8 Celdas 87	00:07 08:16 08:23	4 8,9 1931,7 Celdas 88	00:06 08:23 08:29
FILA 07	0,4	2,8	1 24,0 671,2 Celdas 28	00:10 23:00 23:10	1 24,0 839,0 Celdas 35	00:10 00:10 00:20	1 24,0 1018,7 Celdas 43	00:10 01:27 01:37	1 24,0 1198,5 Celdas 51	00:10 02:44 01:37	1 24,0 1372,2 Celdas 59	00:10 04:00 04:10	1 24,0 1521,9 Celdas 66	00:10 05:06 05:16	1 24,0 1647,6 Celdas 72	00:10 06:02 06:12	1 24,0 1749,3 Celdas 77	00:10 06:48 06:58	1 24,0 1827,1 Celdas 81	00:10 07:24 07:34	1 24,0 1880,9 Celdas 84	00:10 07:50 08:00	2 17,9 1910,8 Celdas 86	00:09 08:07 08:16
FILA 06	0,4	2,4	1 24,0 503,4 Celdas 21	00:10 21:50 22:00	1 24,0 647,2 Celdas 27	00:10 22:50 23:00	1 24,0 815,0 Celdas 34	00:10 00:00 00:10	1 24,0 994,8 Celdas 42	00:10 01:17 01:27	1 24,0 1174,5 Celdas 50	00:10 02:34 02:44	1 24,0 1348,2 Celdas 58	00:10 03:50 04:00	1 24,0 1497,9 Celdas 65	00:10 04:56 05:06	1 24,0 1623,6 Celdas 71	00:10 05:52 06:02	1 24,0 1725,4 Celdas 76	00:10 06:38 06:48	1 24,0 1803,2 Celdas 80	00:10 07:14 07:24	2 17,9 1857,0 Celdas 83	00:09 07:41 07:50
FILA 05	0,4	2,0	1 24,0 359,6 Celdas 15	00:10 20:50 21:00	1 24,0 479,4 Celdas 20	00:10 21:40 21:50	1 24,0 623,2 Celdas 26	00:10 22:40 22:50	1 24,0 791,0 Celdas 33	00:10 23:50 00:00	1 24,0 970,8 Celdas 41	00:10 01:07 01:17	1 24,0 1150,6 Celdas 49	00:10 02:24 02:34	1 24,0 1324,2 Celdas 57	00:10 03:40 03:50	1 24,0 1473,9 Celdas 64	00:10 04:46 04:56	1 24,0 1599,6 Celdas 70	00:10 05:42 05:52	1 24,0 1701,4 Celdas 75	00:10 06:28 06:38	2 17,9 1779,2 Celdas 79	00:09 07:05 07:14
FILA 04	0,4	1,6	1 24,0 239,7 Celdas 10	00:10 20:00 20:10	1 24,0 335,6 Celdas 14	00:10 20:40 20:50	1 24,0 455,4 Celdas 19	00:10 21:30 21:40	1 24,0 599,3 Celdas 25	00:10 22:30 22:40	1 24,0 767,0 Celdas 32	00:10 23:40 23:50	1 24,0 946,8 Celdas 40	00:10 00:57 01:07	1 24,0 1126,6 Celdas 48	00:10 02:14 02:24	1 24,0 1300,3 Celdas 56	00:10 03:30 03:40	1 24,0 1450,0 Celdas 63	00:10 04:36 04:46	1 24,0 1575,7 Celdas 69	00:10 05:32 05:42	2 17,9 1677,4 Celdas 74	00:09 06:19 06:28
FILA 03	0,4	1,2	1 24,0 143,8 Celdas 6	00:10 19:20 19:30	1 24,0 215,7 Celdas 9	00:10 19:50 20:00	1 24,0 311,6 Celdas 13	00:10 20:30 20:40	1 24,0 431,5 Celdas 18	00:10 21:20 21:30	1 24,0 575,3 Celdas 24	00:10 22:20 22:30	1 24,0 743,1 Celdas 31	00:10 23:30 23:40	1 24,0 922,8 Celdas 39	00:10 00:47 00:57	1 24,0 1102,6 Celdas 47	00:10 02:04 02:14	1 24,0 1276,3 Celdas 55	00:10 03:20 03:30	1 24,0 1426,0 Celdas 62	00:10 04:26 04:36	2 17,9 1551,7 Celdas 68	00:09 05:23 05:32
FILA 02	0,4	0,8	1 24,0 71,9 Celdas 3	00:10 18:50 19:00	1 24,0 119,9 Celdas 5	00:10 19:10 19:20	1 24,0 191,8 Celdas 8	00:10 19:40 19:50	1 24,0 287,6 Celdas 12	00:10 20:20 20:30	1 24,0 407,5 Celdas 17	00:10 21:20 21:30	1 24,0 551,3 Celdas 23	00:10 22:20 22:30	1 24,0 719,1 Celdas 30	00:10 23:20 23:30	1 24,0 898,9 Celdas 38	00:10 00:37 00:47	1 24,0 1078,7 Celdas 46	00:10 01:54 02:04	1 24,0 1252,3 Celdas 54	00:10 03:10 03:20	2 17,9 1402,0 Celdas 61	00:09 04:17 04:26
FILA 01	0,4	0,4	1 24,0 24,0 Celdas 1	00:10 18:30 18:40	1 24,0 47,9 Celdas 2	00:10 18:40 18:50	1 24,0 95,9 Celdas 4	00:10 19:00 19:10	1 24,0 167,8 Celdas 7	00:10 19:30 19:40	1 24,0 263,7 Celdas 11	00:10 20:10 20:20	1 24,0 383,5 Celdas 16	00:10 21:00 21:10	1 24,0 527,3 Celdas 22	00:10 22:00 22:10	1 24,0 695,1 Celdas 29	00:10 23:10 23:20	1 24,0 874,9 Celdas 37	00:10 00:27 00:37	1 24,0 1054,7 Celdas 45	00:10 01:44 01:54	2 17,9 1228,3 Celdas 53	00:09 03:01 03:10
			2,55		2,55		2,55		2,55		2,55		2,55		2,55		2,55		2,55		2,55		1,90	
			2,55		5,10		7,65		10,20		12,75		15,30		17,85		20,40		22,95		25,50		27,40	
			COL 1		COL 2		COL 3		COL 4		COL 5		COL 6		COL 7		COL 8		COL 9		COL 10		COL 11	

DATOS DEL TIEMPO DE VACIADO

Hora de Inicio del Vaciado Masivo:

18:30 Hrs

Hora de Fin del Vaciado Masivo:

08:29 Hrs

TOTAL DE HORAS DEL VACIADO**13:59 Hrs****NOMENCLATURA PARA CELDAS DE VACIADO**

Tipo de Celda

Volumen de Celda (m3)

Volumen Acumulado (m3)

1	00:10	Duración (min)
23,97	18:30	Hora Inicio (Hrs)
23,97	18:40	Hora Fin (Hrs)
Celdas 1		Número de Celdas

Figura 29. Secuencia de vaciado por celdas de la Cimentación de Molino de Bolas 01

Fuente: Información del proyecto

Protección superficial.

Se utilizó protección térmica en la superficie de concreto del elemento, la cual consistió en 01 capa de polipropileno en contacto con el concreto, sobre este, 02 capas de poliestireno de 2" de espesor cada una, cubiertas con una capa de polietileno para protección contra el tránsito; como se muestra en la Figura 30.



Figura 30. Protección térmica superficial de poliestireno en cimentación de Molino de Bolas 01, previo a la cubierta final de polietileno

Fuente: Información del proyecto

Datos de campo registrados.

Ubicación de termocuplas.

Se emplearon 6 termocuplas con *dataloggers* para el registro de las temperaturas con una frecuencia de 15 minutos, 3 de las termocuplas se ubicaron en el plano del núcleo y 3 a 5cm de la superficie del elemento. La ubicación se muestra en la Figura 31.

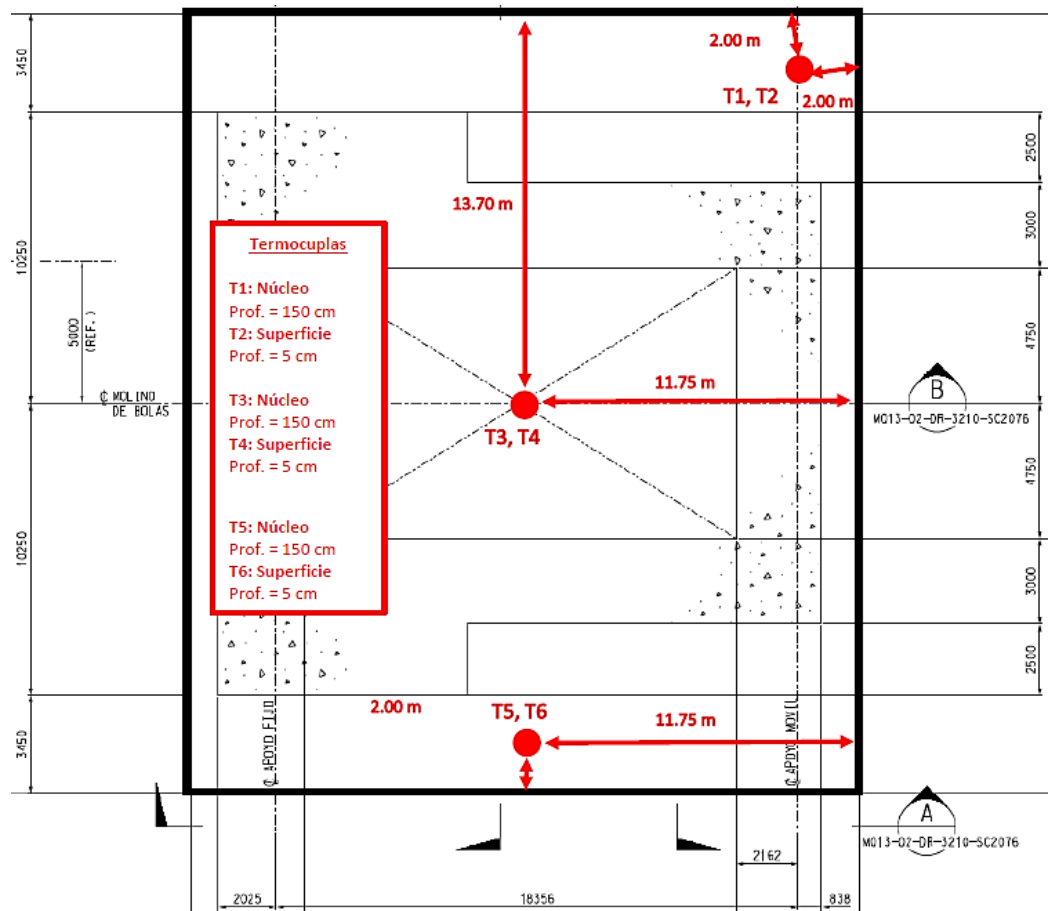


Figura 31. Plano en planta de ubicación de termocuplas en cimentación del Molino de Bolas 01.

Fuente: Información del proyecto

Lectura de termocuplas

Se obtuvo que, como parte de las lecturas de temperaturas obtenidas por las termocuplas, la muestra alcanza un gradiente máximo de 9.8 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 76.8 °C; a una edad de 2.8 días. En la Figura 32, se muestra el histograma de las temperaturas registradas por las termocuplas instaladas.

Cimentación de Molino de Bolas 01

Lectura de Termocuplas

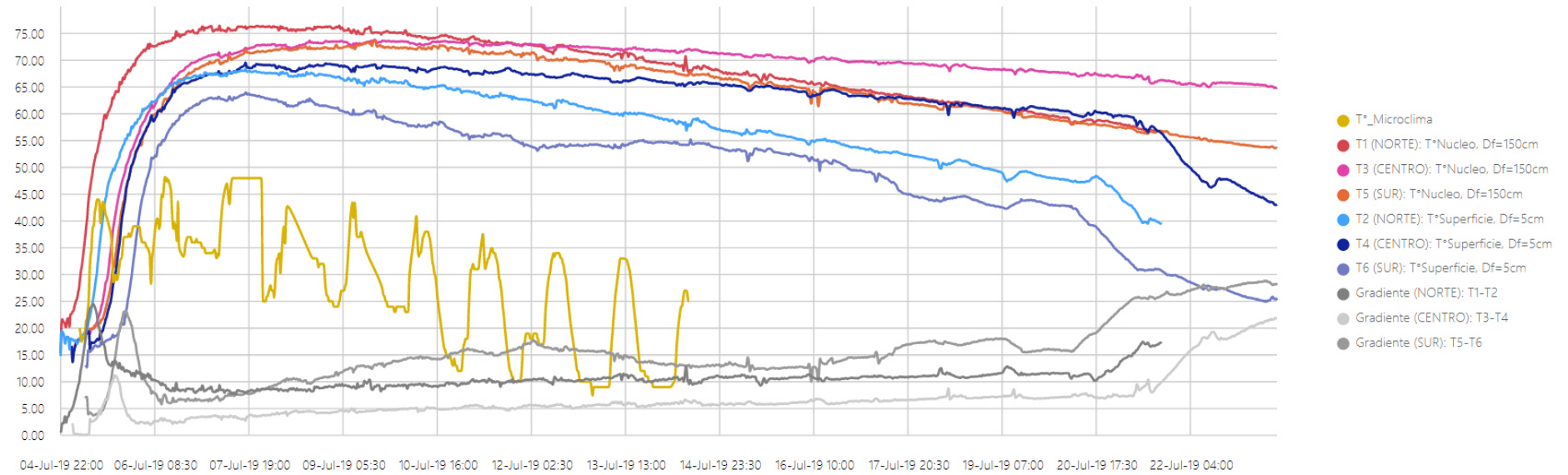


Figura 32. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en la Cimentación del Molino de Bolas 01.

Fuente: Elaboración propia, basada en la información del proyecto

Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.

Mano de obra (M.O.).

El vaciado se realizó del 04/07/2019 al 05/07/19, mientras que el control de temperatura se mantuvo hasta el 23/07/19. De los registros de HH para estas fechas se obtiene el total de HH correspondientes a la implementación y operación de los controles térmicos:

$$Total\ HH = 1802\ HH$$

Del sistema informático de gestión del proyecto se tiene que el costo de HH a la fecha por concepto de jornal y leyes sociales de HH promedio a la fecha es:

$$Costo\ HH\ a\ la\ fecha = 26,738,273.22\ USD... \text{ (jornal y leyes sociales)}$$

$$HH\ a\ la\ fecha = 2,791,653.25\ HH$$

$$Costo\ HH\ promedio\ a\ la\ fecha = 9.58\ USD/HH... \text{ (jornal y leyes sociales)}$$

Con este valor determinamos que el costo de mano de obra asociado a la implementación y operación de los controles térmicos para la cimentación del Molino de Bolas 01es:

$$Costo\ total\ M.O. = 1802\ HH * 9.58 \frac{USD}{HH}$$

$$Costo\ total\ M.O. = 17,263.16\ USD$$

Equipos (EQP.).

Del protocolo del proyecto de vaciado de concreto masivo para la cimentación del Molino de Bolas 01se tiene el siguiente listado de equipos y herramientas utilizados:

- De compactación

- 15 vibradores de concreto eléctricos: 09 operando y 06 en stand by. 3
vibradoras serán utilizadas por bomba.
- De vaciado
 - 20 camiones mixer (18 operando permanentemente y 02 en stand by)
 - 04 bombas de concreto tipo camión pluma (03 operando permanentemente y 01 en stand by)
- De Soporte
 - 01 camión cisterna de combustible
 - 01 camión cisterna de agua
 - 01 camioneta de Mantenimiento mecánico.
- Eléctricos
 - 02 grupo generador de 175 KW
 - 02 tablero eléctrico
 - 10 torres de iluminación
 - Se utilizarán 11 calefactores, 8 de ellos serán eléctricos y 3 a combustión (8 und. BS-30, 2 und. MA59 y 1 und. MA 32), con una potencia total mínima de 396 kW
 - Extensiones eléctricas con terminales industriales
- Control de Calidad
 - 02 equipos para determinación de asentamiento (Cono de Abrams)
 - 02 olla Washington
 - 03 termómetros de inserción. (Rango -20°C a 150°C)
 - 01 termohigrómetro (Rango 0.0 a 100% HR)
 - 01 balanza de 30 kg.
 - 200 moldes para especímenes de concreto 6" x 12"

- 06 datalogger c/ termocuplas embebidas en concreto. (Se anexa Hoja Técnica, ver Anexo 04)
- Varios
 - Andamios
 - Mochilas de curado
 - 02 extintores PQS de 9kg
 - 02 estación de emergencias (seguridad)

De este listado se han subrayado todos los elementos usados debido a los métodos de control térmico implementados.

Los costos de posesión y mantenimiento de los equipos, obtenidos del sistema informático de gestión del proyecto, se presentan en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6

Tarifas de posesión y mantenimiento de equipos para control térmico (en USD).

<i>Descripción</i>	<i>Cant</i>		<i>Tarifa posesión</i>	<i>Tarifa mantenimiento</i>	
Calefactor BS-30	8	112.82	\$/mes	285.44	soles/mes
Grupo electrógeno	2	2,205.00	\$/mes		
175KW					
Tablero eléctrico	2	4.69	\$/dia		
Calefactor MA32 / MA59	3	3,264.00	soles/mes	285.44	soles/mes

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Convertimos las tarifas anteriores a costo diario en dólares sin IGV, se considera la tasa de cambio del proyecto de 3.30 soles/USD:

Tabla 7

Tarifas de posesión, mantenimiento y combustible de equipos para control térmico (en S/)..

Descripción	Cant	Tarifa posesión (\$/día)	Tarifa mantto	Tarifa diaria (\$/día)	Consumo horario de combustible (galones/hora)	Tarifa combustible (galón)	Tarifa combustible diaria
Calefactor BS-30	8	3.76	2.88	6.64	Eléctrico		
Grupo electrógeno 175KW	2	73.50		73.50	12.15	3.67	445.91
Tablero eléctrico	2	4.69		4.69			
Calefactor MA32 / MA59	3	32.97	2.88	35.85	2.00	3.67	73.40

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Adicional a los costos de posesión y mantenimiento es necesario considerar los costos de movilización y desmovilización de los equipos, es decir los costos de transporte de los equipos desde los almacenes del arrendador hasta el lugar del proyecto y viceversa.

Del sistema de gestión del proyecto se tiene los costos de movilización y desmovilización según el equipo de transporte y la procedencia:

- **Equipo** = Semitrailer 25 Tn
- **Ruta** = Lima - Zona de proyecto (Moquegua)
- **Costo por viaje** = 7789 soles/viaje... (1)
- **Tasa de cambio** = 3.30 soles/USD... (2)
- **Número de vaciados masivos** = 8... (3)
- **Costo por movilización y desmovilización** = 590.08 USD... (1) / ((2) *(3))

Del registro de temperaturas se tiene que los calefactores estuvieron asignados a este elemento desde el 4 hasta el 12 de julio, sin embargo, solo estuvieron encendidos desde

el 4 al 9 de julio y alrededor de 1 día más entre el 9 y el 12 de Julio. Con esta información, el costo se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Costos de posesión, mantenimiento y combustible de equipos para control térmico.

Descripción	Cant	Días en posesión	Tarifa diaria (\$/día)	Subtotal Equipos	Días operativos	Tarifa (\$/día)	Subtotal Combustible
Calefactor BS-30	8	8	6.64	425.22	6	-	-
Grupo electrógeno 175KW	2	8	73.50	1,176.00	6	445.91	2,675.43
Tablero eléctrico	2	8	4.69	75.08	6	-	-
Calefactor MA32 / MA59	3	8	35.85	860.47	6	73.40	440.40
				2,536.77			
							3,115.83

Nota. Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior se tiene el subtotal por alquiler de equipos y consumo de combustibles, a estos montos se le adiciona el subtotal por movilización y desmovilización (1) y se obtiene:

$$\text{Costo total EQP.} = 6,242.67 \text{ USD}$$

1. **Materiales (MAT.):**

Del protocolo del proyecto de vaciado de concreto masivo para la cimentación del Molino de Bolas 01 se tiene el siguiente listado de materiales empleados:

Materiales.

- Aditivos Químicos para el concreto (curador). Sika antisol.
- Agua.
- Yute
- Conos de seguridad
- Sogas para la manguera de la bomba y microclima
- Mantas Flexilona
- Mantas Térmicas
- Tricapas
- Tablones para acceso o superficies de apoyo.

De este listado se han subrayado los elementos usados para los métodos de control térmico implementados, sin embargo, se tiene dos observaciones:

1. No se llegó a usar mantas térmicas pues el procedimiento indica la siguiente condición: *"Si se detectara que el gradiente térmico se acerca a los 19°C, se procederá a cubrir la superficie del elemento con mantas térmicas y/o a incrementar el número de calefactores."*. Ante esta condición se decidió emplear calefactores en lugar de mantas térmicas.
2. El listado anterior no menciona consumibles menores necesarios para la construcción, estos se estiman conservadoramente como el 3% del costo de mano de obra de la actividad.

Los costos de compra de estos materiales se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9
Costos de compra de materiales.

Descripción	Costo compra	Und.
Mantas Flexilona	0.82	USD/m2
Corte, cosido y ojales de mantas	2,427.75	Soles
Consumibles varios (3% M.O.)	517.89	USD

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Convertimos las tarifas anteriores a dólares, se considera la tasa de cambio del proyecto de 3.30 soles/USD; se muestran los resultados en la Tabla 10.

Tabla 10
Costos de compra de materiales en dólares.

Descripción	Costo compra	Und.
Mantas Flexilona	0.82	USD/m2
Corte, cosido y ojales de mantas	735.68	USD
Consumibles varios (3% M.O.)	517.89	USD

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de manta flexilona empleada para el microclima se obtiene de las dimensiones mostradas en la Figura 33.

ANALISIS DE LA POTENCIA REQUERIDA Y CANTIDAD DE MAQUINAS

6.1. ESTIMACION DE AREAS

TABLA N 1°. Dimensiones de la carpa.

ANCHO	25.02 m
SOBRE ANCHO DE CARPA	4.18 m
LARGO	33.77 m
ALTO HOMBRO	6.00 m
PENDIENTE DE TECHO	10.6 °
ANCHO CUBIERTA	17.18 m
ALTURO CORONAMIENTO	8.03 m
ANCHO DE CORONA	3.07 m

FIGURA N 5°. Esquema de la carpa - Vista Frontal

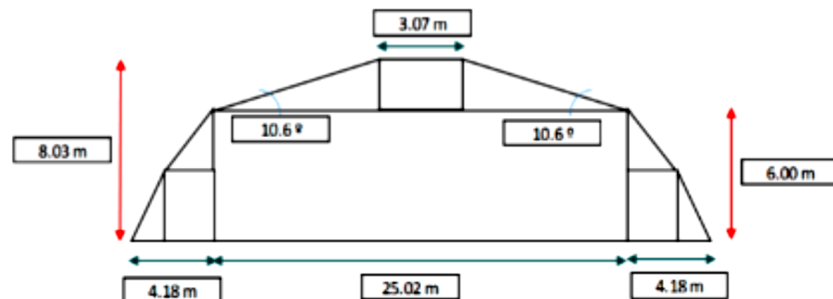


FIGURA N 6°. Esquema de la carpa - Vista Lateral.

Figura 33. Esquema en elevación de dimensiones de toldo para microclima empleado en Cimentación de Molino de Bolas 01.

Fuente: Información del proyecto

$$\text{Cubierta superior: } 1 \cdot 1353.04 = 1353.04 \text{ m}^2$$

$$\text{Cubierta inferior: } 2 \cdot 203.76 = 407.52 \text{ m}^2$$

$$\text{Total de manta flexilona usada: } 1,760.57 \text{ m}^2$$

El costo de transporte de los materiales desde los almacenes del arrendador hasta el lugar del proyecto sería el siguiente:

- **Equipo** = Semitrailer 25 Tn
- **Ruta** = Lima - Zona de proyecto (Moquegua)

- **Costo por viaje** = 7789 soles/viaje... (1)
- **Tasa de cambio** = 3.30 soles/USD... (2)
- **Número de vaciados masivos** = 8... (3)
- **Costo por movilización y desmovilización** = 295.04USD... (1) / ((2) *(3))

No se considera costo de desmovilización pues el material se desecha en el botadero del proyecto al final de su vida útil. Con toda la información anterior, el costo total por materiales se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11

Costo total de compra de materiales, en dólares.

Descripción	Und	Cant	Costo unitario	Subtotal
Mantas Flexilona	m2	1,760.57	0.82	1438.17
Corte, cosido y ojales de mantas	Gbl	1	735.68	735.68
Consumibles varios (3% M.O.)	Gbl	1	517.89	517.89
Movilización	Gbl	1	295.04	295.04
TOTAL				2,986.78

Nota. Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Costo total MAT.} = 2,986.78 \text{ USD}$$

En base a los cálculos anteriores, se tiene que el costo total asociado a la implementación y operación de los métodos de control del gradiente térmico empleados en el vaciado de la cimentación del molino de bolas 01 el cual se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12

Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Cimentación de Molino de Bolas 01.

Descripción	Costo (en USD)
Mano de Obra (M.O.)	17,263.16
Equipos y herramientas (EQP.)	6,242.67
Materiales (MAT.)	2,986.78
Costo Total	26,492.61

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del costo – efectividad.

El costo por metro cúbico se halló dividiendo el costo total de \$26,160.37 entre el volumen del elemento, 1931.7 m³. De ello se obtuvo que la inversión para el control del gradiente térmico en el elemento es de \$13.54 por metro cúbico.

Por otro lado, la efectividad se calculó mediante la diferencia del gradiente térmico teórico (56.89°C) y el gradiente térmico experimental (9.8°C). Resultando, para este elemento una efectividad de 47.09°C.

Finalmente, para hallar la relación costo – efectividad; se dividió la inversión, por cada metro cúbico del elemento (\$13.54), entre la efectividad calculada (47.09°C). Obteniéndose que con una inversión de \$0.29, por cada metro cúbico del elemento, se logra controlar 1°C del gradiente térmico del elemento analizado. Se mantuvo el mismo esquema de cálculo para los demás elementos.

Cimentación de Molino de Bolas 02

Modelo Teórico.

De acuerdo con el procedimiento de Estimación del comportamiento termodinámico de las unidades de estudio, descrito en el capítulo 02. Se obtuvo que la muestra alcanza un gradiente máximo de 59.66 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 84.25 °C; en un tiempo de 3.5 días. Para detalles del cálculo, ver Anexo 06.

Métodos de control de gradiente térmico implementados.

Microclima.

Se instaló una carpa de protección climática de iguales dimensiones que la empleada en la cimentación del molino de bolas 01, por ser elementos de la misma dimensión, es decir tuvo 33.38x33.77m de base y 8m de altura, con armazón de andamios metálicos y toldo de lona plástica. La temperatura del microclima para este vaciado no fue registrada.

La vista isométrica de la estructura del microclima empleado se muestra en la Figura

34, el plano completo se encuentra en el Anexo 03:

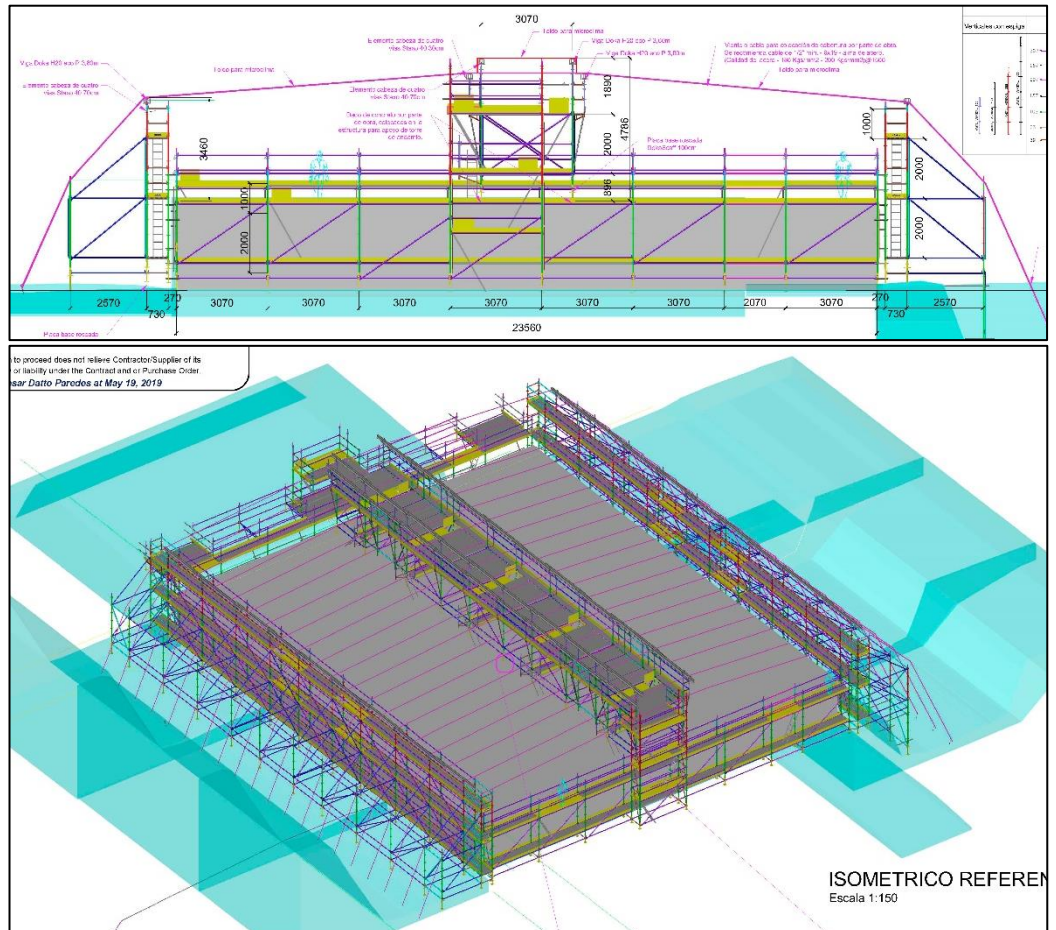


Figura 34. Plano isométrico y en elevación de estructura de microclima para el vaciado de la Cimentación de Molino de Bolas 02

Fuente: Información del proyecto

Turbocalefactores.

Se emplearon 11 turbocalefactores, 8 eléctricos y 3 a combustión debido a disponibilidad en obra, con una potencia total mínima de 396 kW. La distribución en planta de estos equipos para asegurar una temperatura uniforme en el microclima se muestra en la figura 35.

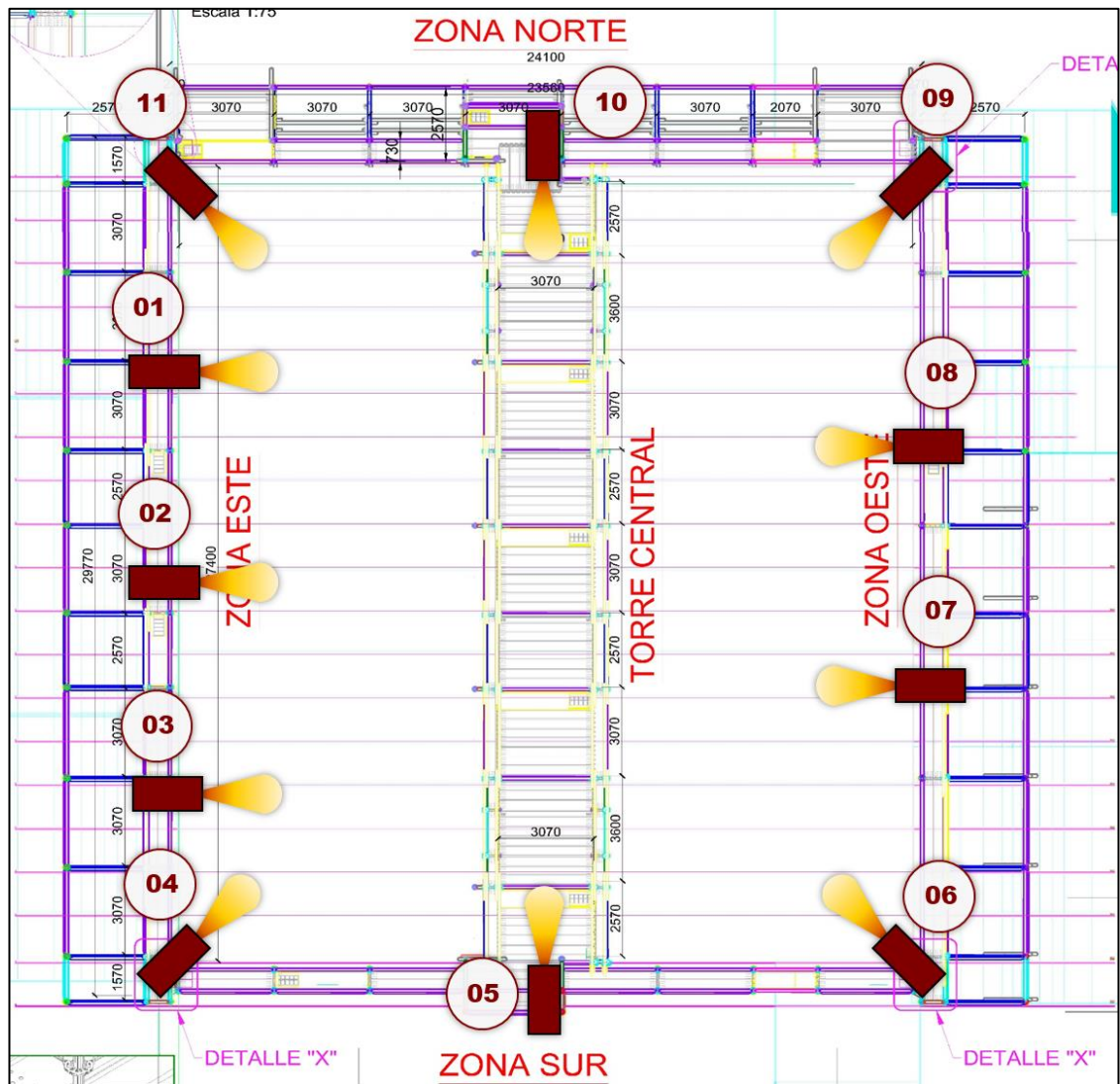


Figura 35. Plano en planta de distribución perimetral de los 11 turbocalentadores empleados para el vaciado de la Cimentación de Molino de Bolas 02

Fuente: Información del proyecto

Vaciado por celdas.

Se siguió una secuencia de vaciado por celdas con una velocidad máxima de ascenso del concreto sobre el encofrado no mayor de 1.77 m/h. El detalle de la secuencia se muestra en la Figura 36, donde el eje de las filas corresponde a la altura de la cimentación y el eje de las columnas al largo. A lo ancho, no hubo sectorización.

FILA 08	0,2	3,0	3 12,0 850,9 Celdas 36	3 12,0 1030,7 Celdas 44	3 12,0 1210,5 Celdas 52	3 12,0 1384,2 Celdas 60	3 12,0 1533,8 Celdas 67	3 12,0 1659,6 Celdas 73	3 12,0 1761,3 Celdas 78	3 12,0 1839,1 Celdas 82	3 12,0 1892,9 Celdas 85	3 12,0 1922,8 Celdas 87	4 8,9 1931,7 Celdas 88
FILA 07	0,4	2,8	1 24,0 671,2 Celdas 28	1 24,0 839,0 Celdas 35	1 24,0 1018,7 Celdas 43	1 24,0 1198,5 Celdas 51	1 24,0 1372,2 Celdas 59	1 24,0 1521,9 Celdas 66	1 24,0 1647,6 Celdas 72	1 24,0 1749,3 Celdas 77	1 24,0 1827,1 Celdas 81	1 24,0 1880,9 Celdas 84	2 17,9 1910,8 Celdas 86
FILA 06	0,4	2,4	1 24,0 503,4 Celdas 21	1 24,0 647,2 Celdas 27	1 24,0 815,0 Celdas 34	1 24,0 994,8 Celdas 42	1 24,0 1174,5 Celdas 50	1 24,0 1348,2 Celdas 58	1 24,0 1497,9 Celdas 65	1 24,0 1623,6 Celdas 71	1 24,0 1725,4 Celdas 76	1 24,0 1803,2 Celdas 80	2 17,9 1857,0 Celdas 83
FILA 05	0,4	2,0	1 24,0 359,6 Celdas 15	1 24,0 479,4 Celdas 20	1 24,0 623,2 Celdas 26	1 24,0 791,0 Celdas 33	1 24,0 970,8 Celdas 41	1 24,0 1150,6 Celdas 49	1 24,0 1324,2 Celdas 57	1 24,0 1473,9 Celdas 64	1 24,0 1599,6 Celdas 70	1 24,0 1701,4 Celdas 75	2 17,9 1779,2 Celdas 79
FILA 04	0,4	1,6	1 24,0 239,7 Celdas 10	1 24,0 335,6 Celdas 14	1 24,0 455,4 Celdas 19	1 24,0 599,3 Celdas 25	1 24,0 767,0 Celdas 32	1 24,0 946,8 Celdas 40	1 24,0 1126,6 Celdas 48	1 24,0 1300,3 Celdas 56	1 24,0 1450,0 Celdas 63	1 24,0 1575,7 Celdas 69	2 17,9 1677,4 Celdas 74
FILA 03	0,4	1,2	1 24,0 143,8 Celdas 6	1 24,0 215,7 Celdas 9	1 24,0 311,6 Celdas 13	1 24,0 431,5 Celdas 18	1 24,0 575,3 Celdas 24	1 24,0 743,1 Celdas 31	1 24,0 922,8 Celdas 39	1 24,0 1102,6 Celdas 47	1 24,0 1276,3 Celdas 55	1 24,0 1426,0 Celdas 62	2 17,9 1551,7 Celdas 68
FILA 02	0,4	0,8	1 24,0 71,9 Celdas 3	1 24,0 119,9 Celdas 5	1 24,0 191,8 Celdas 8	1 24,0 287,6 Celdas 12	1 24,0 407,5 Celdas 17	1 24,0 551,3 Celdas 23	1 24,0 719,1 Celdas 30	1 24,0 898,9 Celdas 38	1 24,0 1078,7 Celdas 46	1 24,0 1252,3 Celdas 54	2 17,9 1402,0 Celdas 61
FILA 01	0,4	0,4	1 24,0 24,0 Celdas 1	1 24,0 47,9 Celdas 2	1 24,0 95,9 Celdas 4	1 24,0 167,8 Celdas 7	1 24,0 263,7 Celdas 11	1 24,0 383,5 Celdas 16	1 24,0 527,3 Celdas 22	1 24,0 695,1 Celdas 29	1 24,0 874,9 Celdas 37	1 24,0 1054,7 Celdas 45	2 17,9 1228,3 Celdas 53
			2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	1,90
			2,55	5,10	7,65	10,20	12,75	15,30	17,85	20,40	22,95	25,50	27,40
			COL 1	COL 2	COL 3	COL 4	COL 5	COL 6	COL 7	COL 8	COL 9	COL 10	COL 11

DATOS DEL TIEMPO DE VACIADO

Hora de Inicio del Vaciado Masivo: 18:30 Hrs
 Hora de Fin del Vaciado Masivo: 08:29 Hrs

TOTAL DE HORAS DEL VACIADO

18:30 Hrs
 08:29 Hrs
 13:59 Hrs

NOMENCLATURA PARA CELDAS DE VACIADO

Tipo de Celda
 Volumen de Celda (m3)
 Volumen Acumulado (m3)

1	00:10	Duración (min)
23,97	18:30	Hora Inicio (Hrs)
23,97	18:40	Hora Fin (Hrs)
Celdas 1		Número de Celdas

Figura 36. Secuencia de vaciado por celdas de la cimentación del molino de bolas 2

Fuente: Información del proyecto

Lectura de termocuplas

Se obtuvo que, como parte de las lecturas de temperaturas obtenidas por las termocuplas, la muestra alcanza un gradiente máximo de 29.5 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 80 °C; a una edad de 3.8 días. En la Figura 38 se presenta el histograma de las temperaturas registradas por las termocuplas instaladas.

Cimentación de Molino de Bolas 02

Lectura de Termocuplas

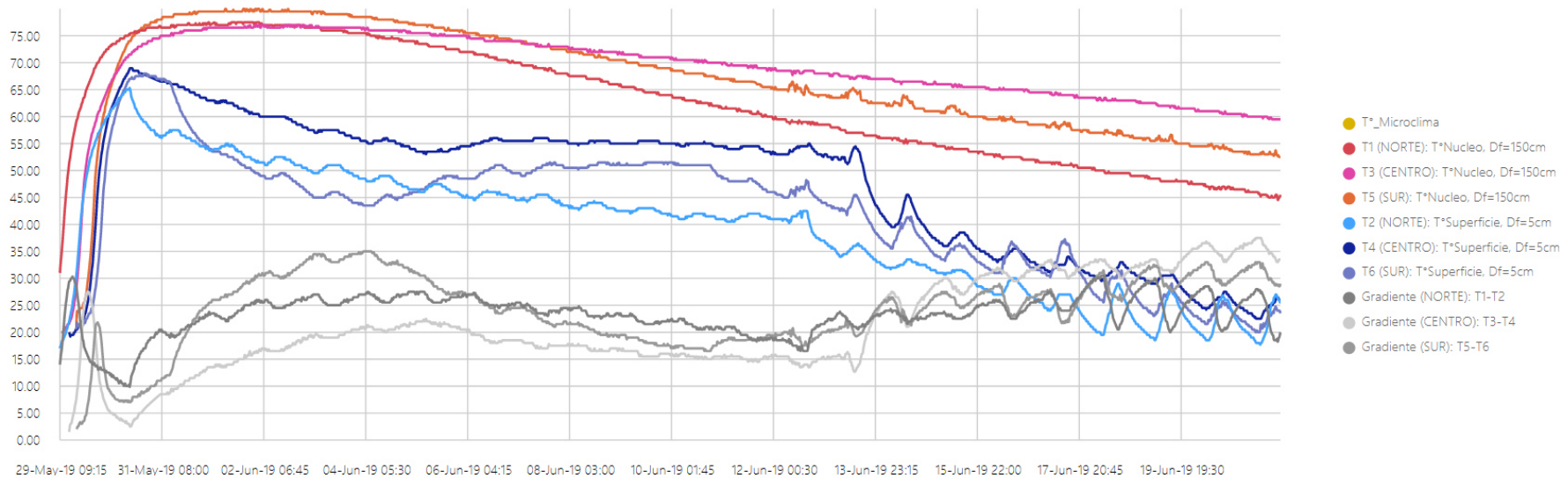


Figura 38. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en la Cimentación del Molino de Bolas 02.

Fuente: Elaboración propia, basada en la información del proyecto

Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.

El cálculo de los costos asociados a los métodos de control térmico implementados en esta muestra se detalla en el Anexo 11, a continuación, se presenta en la Tabla 13 el resumen de los costos obtenidos.

Tabla 13

Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Cimentación de Molino de Bolas 02.

Descripción	Costo (en USD)
Mano de Obra (M.O.)	21,243.65
Equipos y herramientas (EQP.)	10,222.47
Materiales (MAT.)	3,106.20
Costo Total	34,572.32

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del costo – efectividad.

Se siguió el mismo procedimiento de cálculo para la relación costo – efectividad, descrito para la Cimentación del Molino de Bolas 01. Obteniéndose que con una inversión de \$0.5718, por cada metro cúbico del elemento, se logra controlar 1°C del gradiente térmico del elemento analizado.

Cimentación de Molino SAG 02

Modelo Teórico.

De acuerdo con el procedimiento de Estimación del comportamiento termodinámico de las unidades de estudio, descrito en el capítulo 02. Se obtuvo que la muestra alcanza un gradiente máximo de 53.84 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 78.95 °C; en un tiempo de 3.8 días. Para detalles del cálculo, ver Anexo 07.

Métodos de control de gradiente térmico implementados.

Microclima.

Se instaló una carpa de protección climática de 30.02x33.77m de base y 8m de altura, con armazón de andamios metálicos y toldo de lona plástica. La temperatura del microclima fue monitoreada mediante el uso de un termómetro digital.

La vista isométrica de la estructura del microclima empleado se muestra en la Figura 39, el plano completo se encuentra en el Anexo 15. Por otro lado, se muestra un registro fotográfico en la Figura 40.

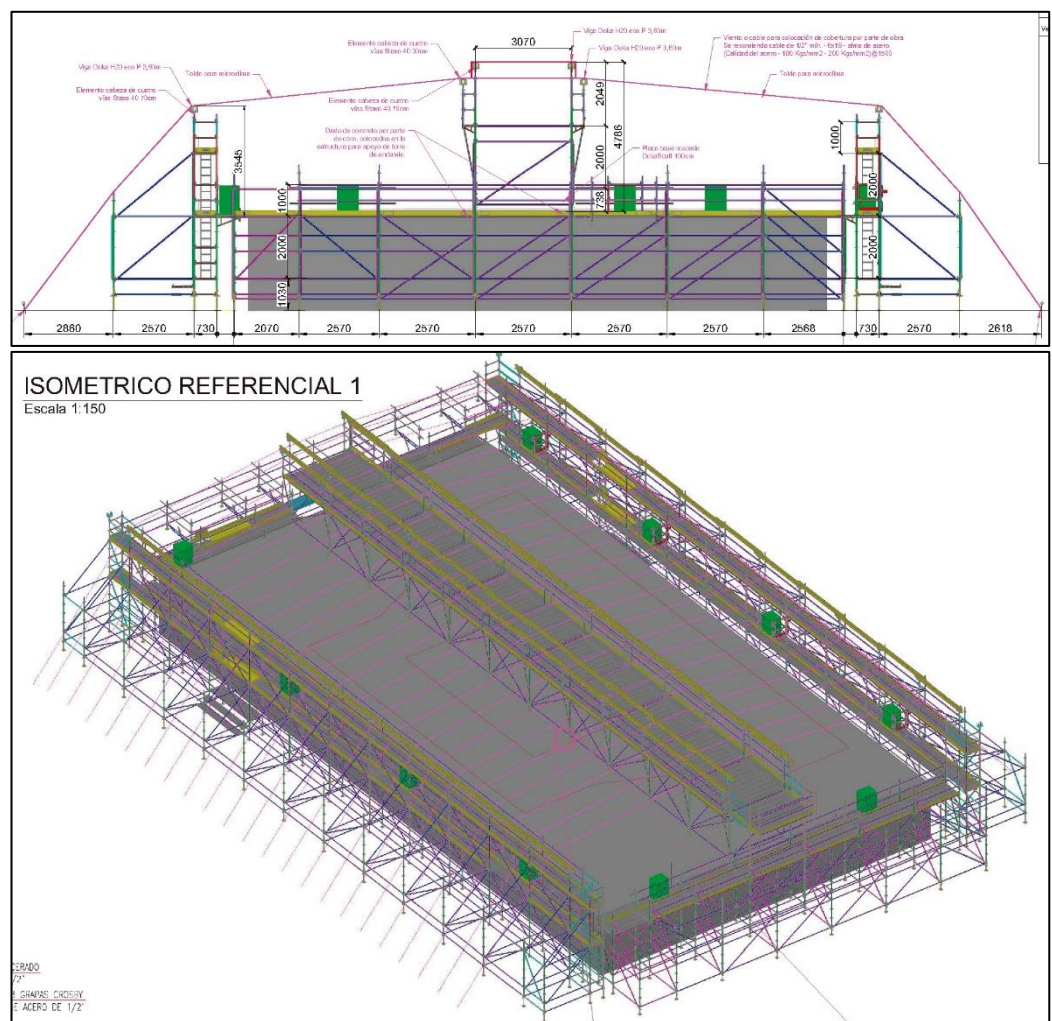


Figura 39. Plano isométrico y en elevación de estructura de microclima para el vaciado de la Cimentación del Molino SAG 02.

Fuente: Información del proyecto



Figura 40. Fotografía de microclima implementado en campo para Cimentación de Molino SAG 02.

Fuente: Información del proyecto

Turbocalefactores

Se emplearon 11 turbocalefactores, 8 eléctricos y 3 a combustión debido a disponibilidad en obra, con una potencia total mínima de 396 kW. La distribución en planta de estos equipos para asegurar una temperatura uniforme en el microclima se muestra en la Figura 41, así mismo, en la Figura 42 se muestra un registro fotográfico.

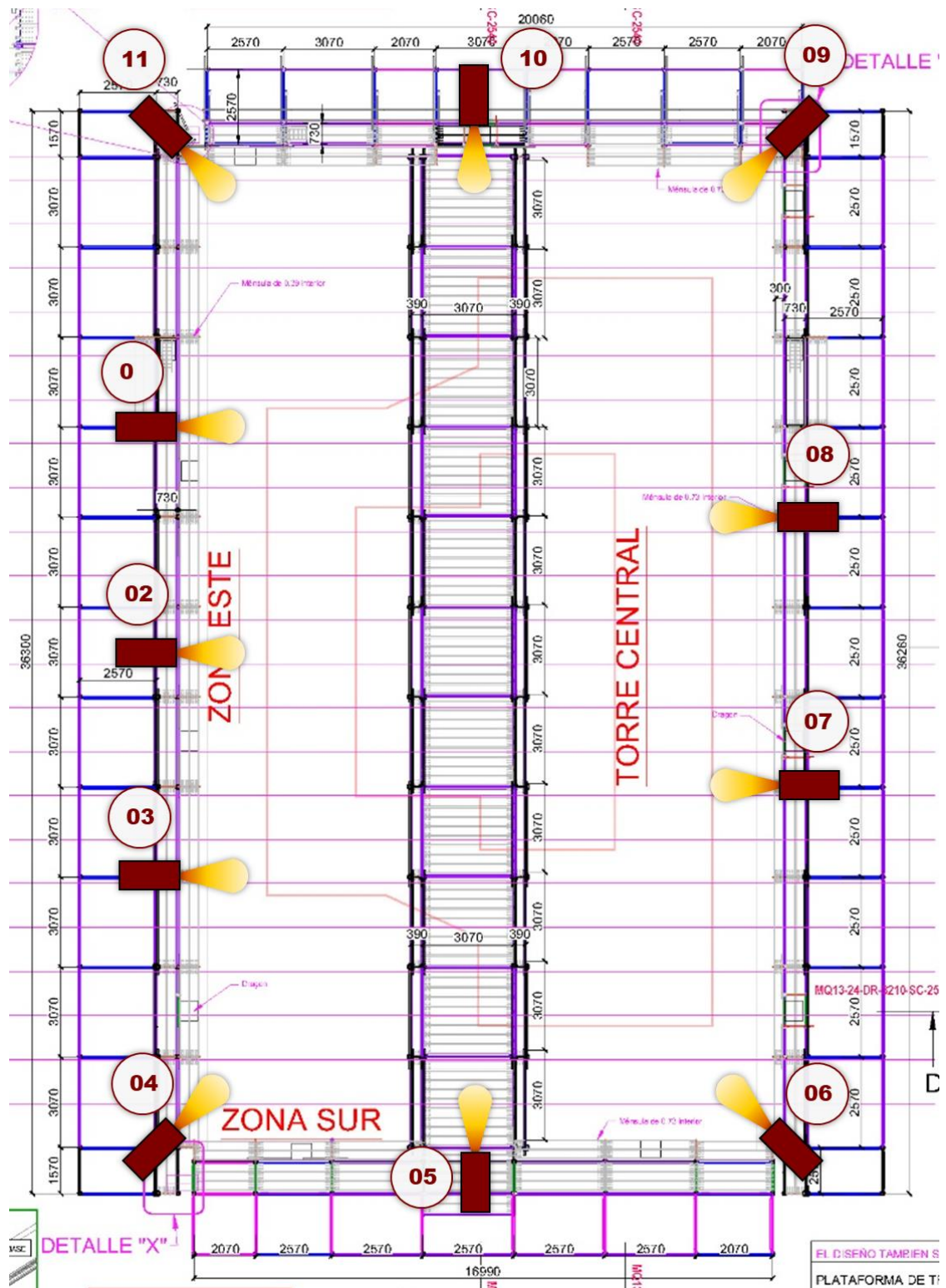


Figura 41. Distribución en planta de turbocalentadores en el perímetro de la Cimentación del

Molino SAG 02

Fuente: Información del proyecto.



Figura 42. Detalle de espacio para turbocalentadores en estructura de microclima.

Fuente: Información del proyecto.

Vaciado por celdas.

Se siguió una secuencia de vaciado por celdas con una velocidad máxima de ascenso del concreto sobre el encofrado no mayor de 1.77 m/h. El detalle de la secuencia se muestra en la Figura 43, donde el eje de las filas corresponde a la altura de la cimentación y el eje de las columnas al largo. A lo ancho, no hubo sectorización.

Fuente: Información del proyecto

Protección superficial.

Se utilizó protección térmica en la superficie de concreto del elemento, la cual consistió en 01 capa de polipropileno en contacto con el concreto, sobre este, 02 capas de poliestireno de 2" de espesor cada una, cubiertas con una capa de polietileno para protección contra el tránsito.

Datos de campo registrados.

Ubicación de termocuplas.

Se emplearon 6 termocuplas con dataloggers para el registro de las temperaturas con una frecuencia de 15 minutos, 3 de las termocuplas se ubicaron en el plano del núcleo y 3 a 5cm de la superficie del elemento. Se muestra una vista en planta en la Figura 44.

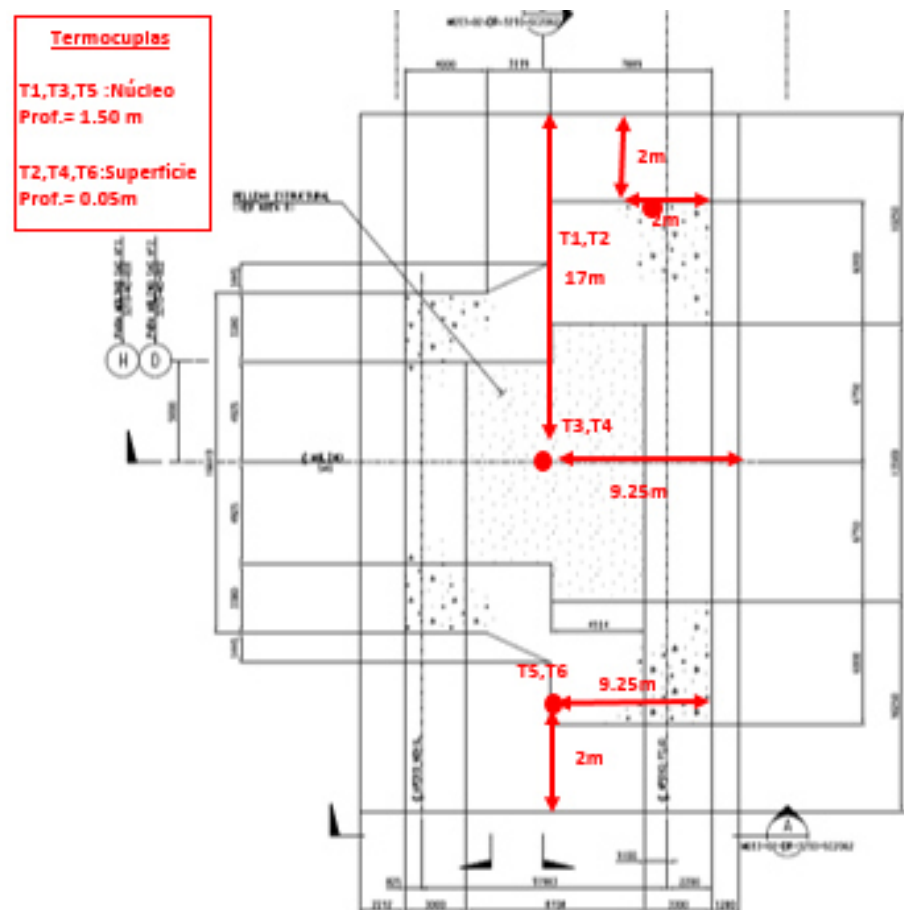


Figura 44. Plano en planta de ubicación de termocuplas en cimentación del molino de SAG 02.

Fuente: Información del proyecto

Lectura de termocuplas

Se obtuvo que, como parte de las lecturas de temperaturas obtenidas por las termocuplas, la muestra alcanza un gradiente máximo de 16.3 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 80.9 °C; a una edad de 4.4 días. En la Figura 45 se presenta histograma de las temperaturas registradas por las termocuplas instaladas.

Cimentación de Molino SAG 02

Lectura de Termocuplas

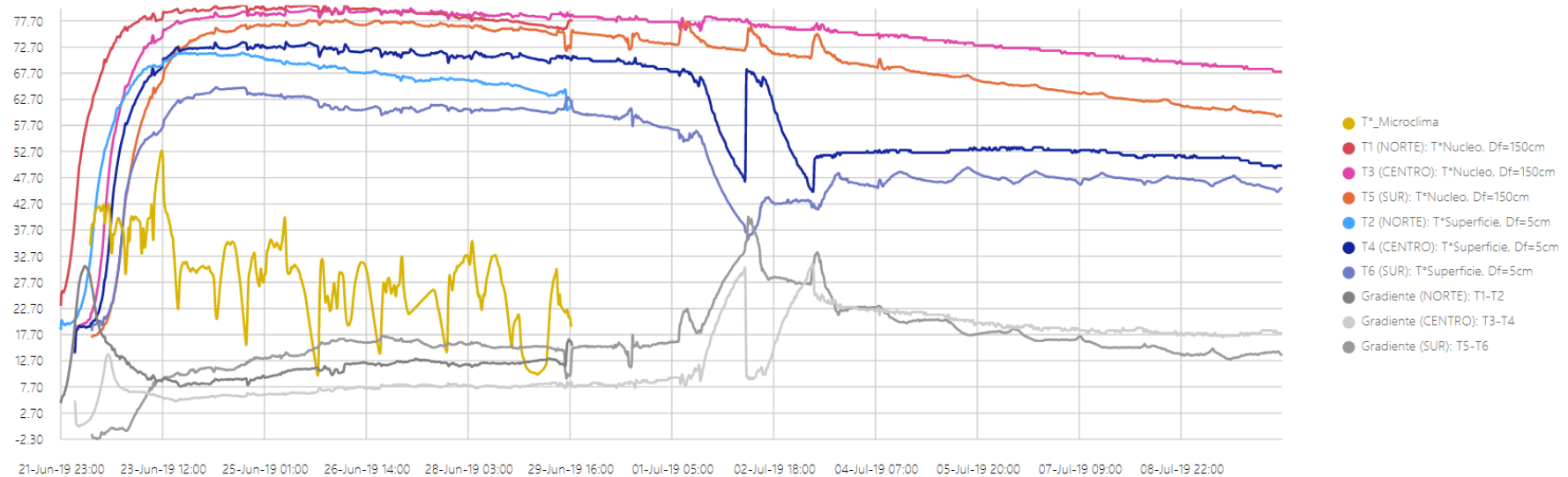


Figura 45. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en la Cimentación del Molino de SAG 02.

Fuente: Elaboración propia, basada en la información del proyecto

Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.

El cálculo de los costos asociados a los métodos de control térmico implementados en esta muestra se detalla en el Anexo 12, a continuación, se presenta un resumen en la Tabla 14.

Tabla 14

Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Cimentación de Molino SAG 02.

Descripción	Costo (en USD)
Mano de Obra (M.O.)	26,450.38
Equipos y herramientas (EQP.)	5,723.37
Materiales (MAT.)	2,608.47
Costo Total	34,782.22

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del costo – efectividad.

Se siguió el mismo procedimiento de cálculo para la relación costo – efectividad, descrito para la Cimentación del Molino de Bolas 01. Obteniéndose que con una inversión de \$0.4910, por cada metro cúbico del elemento, se alcanza a controlar 1°C del gradiente térmico del elemento analizado.

Cimentación Túnel de Recuperación (Etapa 01).

Modelo Teórico.

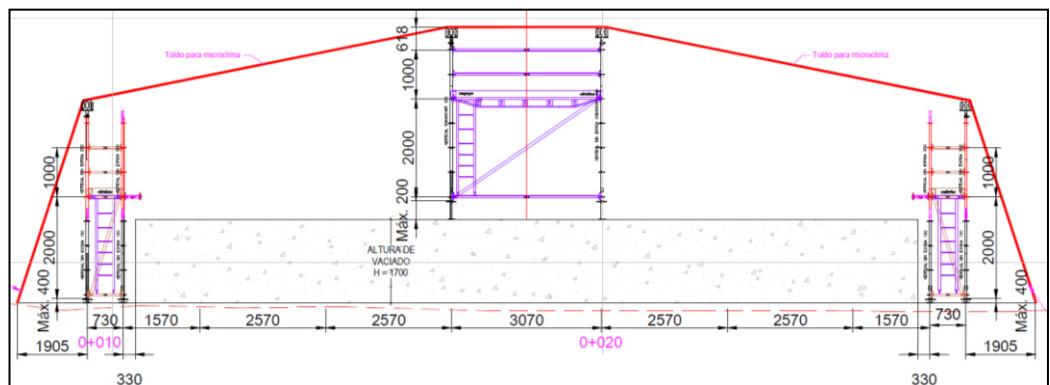
De acuerdo con el procedimiento de Estimación del comportamiento termodinámico de las unidades de estudio, descrito en el capítulo 02. Se obtuvo que la muestra alcanza un gradiente máximo de 44.95 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 68.95 °C; en un tiempo de 3 días. Para detalles del cálculo, ver Anexo 08.

Métodos de control de gradiente térmico implementados.

Microclima.

Se instaló una carpa de protección climática de 20.98x34.18m de base y 5.5m de altura, con armazón de andamios metálicos y toldo de lona plástica.

La vista isométrica de la estructura del microclima empleado se muestra en la Figura 46, el plano completo se encuentra en el Anexo16. Por otro lado, en la Figura 47 se presenta un registro fotográfico.



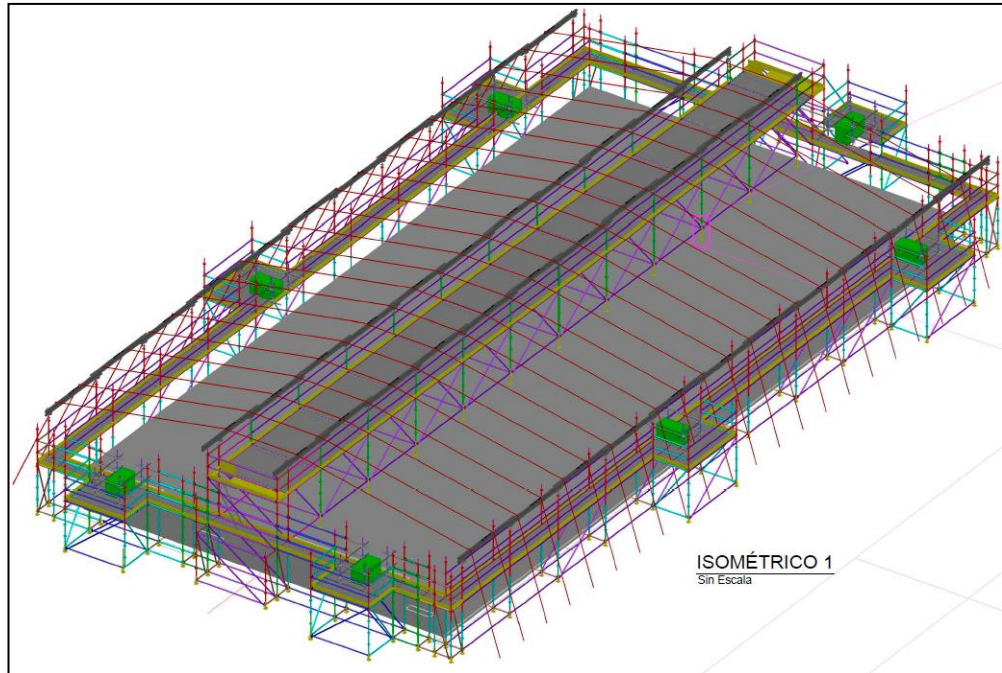


Figura 46. Plano isométrico y en elevación de estructura de microclima para el vaciado de la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Fuente: Información del proyecto



Figura 47. Fotografía de microclima ejecutado en campo para la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Fuente: Información del proyecto

Turbocalefactores

Se emplearon 07 turbocalefactores, 3 eléctricos y 4 a combustión debido a disponibilidad en obra, con una potencia total mínima de 220 kW. La distribución en planta de estos equipos para asegurar una temperatura uniforme en el microclima se muestra en la Figura 48.

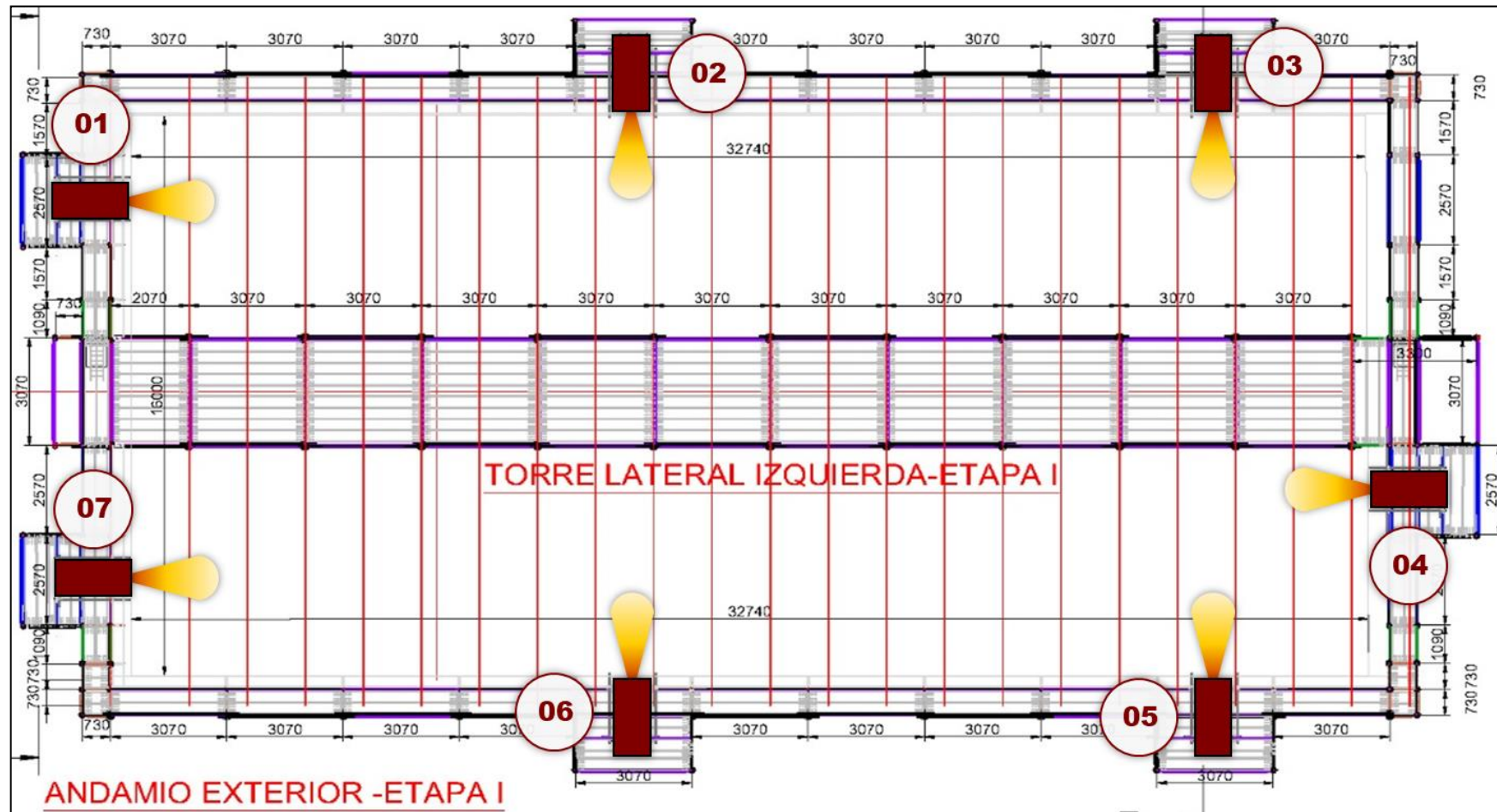


Figura 48. Distribución en planta de turbocalefactores en el perímetro de la etapa 1 de la cimentación del túnel de recuperación.

Fuente: Información del proyecto

Vaciado por celdas.

Se siguió una secuencia de vaciado por celdas con una velocidad máxima de ascenso del concreto sobre el encofrado no mayor de 1.77 m/h. El detalle de la secuencia se muestra en la Figura 49, donde el eje de las filas corresponde a la altura de la cimentación y el eje de las columnas al largo. A lo ancho, no hubo sectorización.

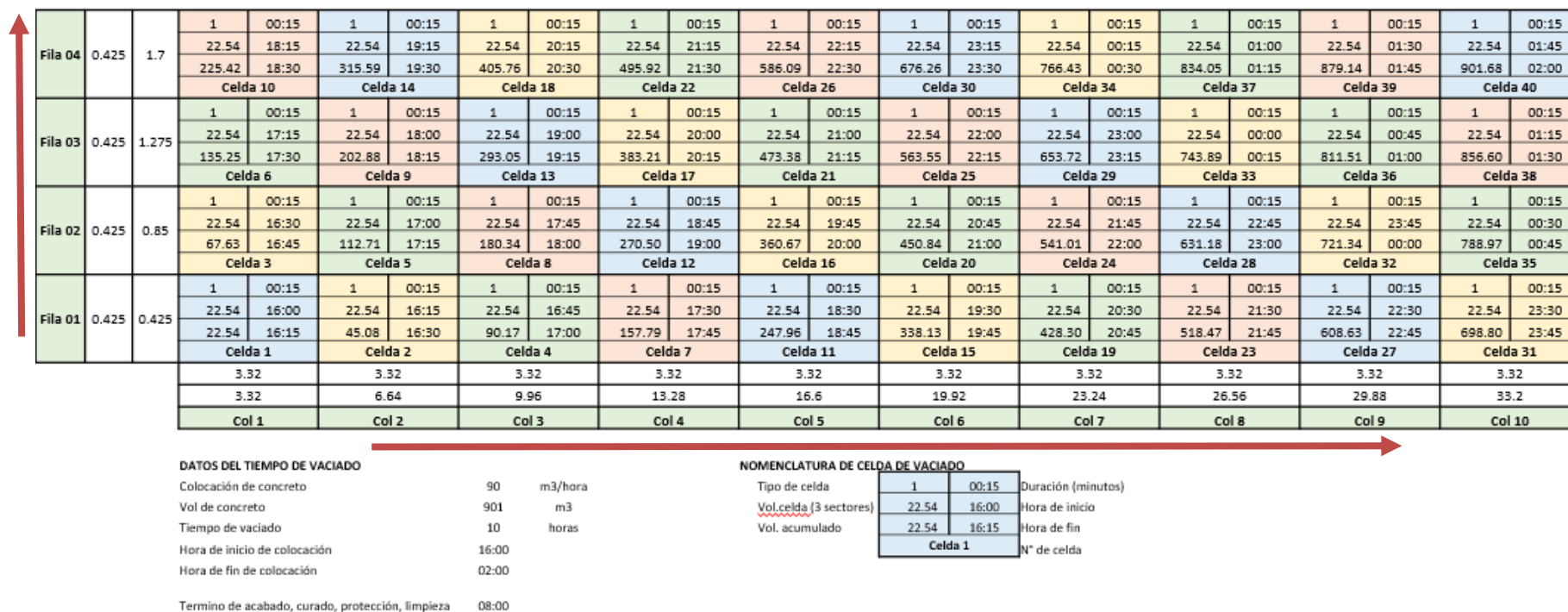


Figura 49. Secuencia de vaciado por celdas de la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Fuente: Información del proyecto.

Protección superficial.

Se utilizó protección térmica en la superficie de concreto del elemento, la cual consistió en 01 capa de polipropileno en contacto con el concreto, sobre este, 02 capas de poliestireno de 2" de espesor cada una, cubiertas con una capa de polietileno para protección contra el tránsito.

Datos de campo registrados.

Ubicación de termocuplas.

Se emplearon 6 termocuplas con dataloggers para el registro de las temperaturas con una frecuencia de 15 minutos, 3 de las termocuplas se ubicaron en el plano del núcleo y 3 a 5cm de la superficie del elemento. Se muestra una vista en planta en la Figura 50.

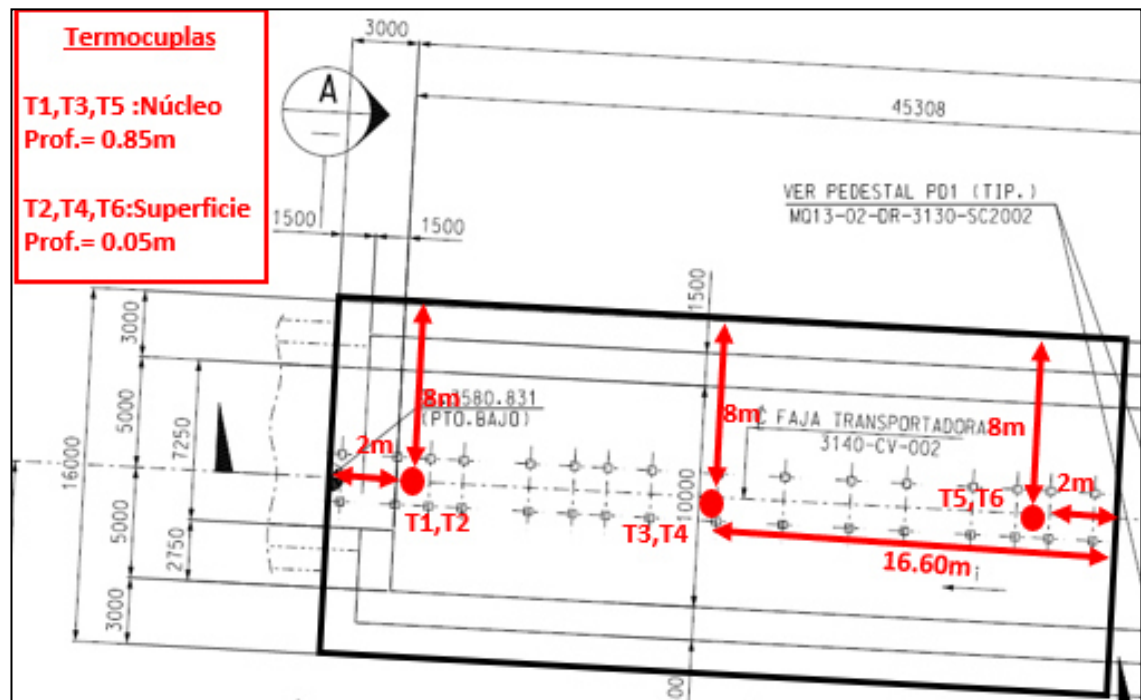


Figura 50. Plano en planta de ubicación de termocuplas en Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Fuente: Información del proyecto.

Lectura de termocuplas.

Se obtuvo que, como parte de las lecturas de temperaturas obtenidas por las termocuplas, la muestra alcanza un gradiente máximo de 8.6 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 73.7 °C; a una edad de 2.4 días. La figura 51 presenta el histograma de las temperaturas registradas.

Cimentación de Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Lectura de Termocuplas

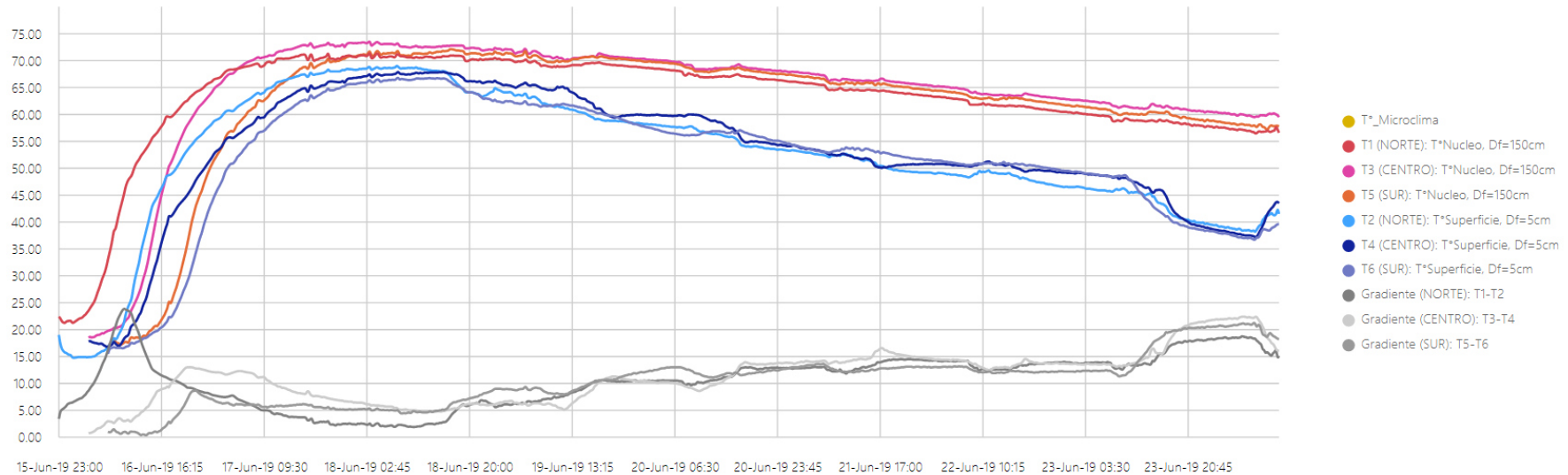


Figura 51. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01).

Fuente: Elaboración propia, basada en la información del proyecto

Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.

El cálculo de los costos asociados a los métodos de control térmico implementados en esta muestra se detalla en el Anexo 13, a continuación, se presenta el resumen en la Tabla 15.

Tabla 15

Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Cimentación de Túnel de Recuperación (Etapa 01).

Descripción	Costo (en USD)
Mano de Obra (M.O.)	15,256.15
Equipos y herramientas (EQP.)	5,127.78
Materiales (MAT.)	2,109.40
Costo Total	22,493.33

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del costo – efectividad.

Se siguió el mismo procedimiento de cálculo para la relación costo – efectividad, descrito para la Cimentación del Molino de Bolas 01. Obteniéndose que con una inversión de \$0.6871, por cada metro cúbico del elemento, se alcanza a controlar 1°C del gradiente térmico del elemento analizado.

Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01).

Modelo Teórico.

De acuerdo con el procedimiento de Estimación del comportamiento termodinámico de las unidades de estudio, descrito en el capítulo 02. Se obtuvo que la muestra alcanza un gradiente máximo de 39.20 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 62.74 °C; en un tiempo de 2.3 días. Para detalles del cálculo, ver Anexo 09.

Métodos de control de gradiente térmico implementados.

Microclima.

Se instaló una carpa de protección climática de 33.38x33.77m de base y 8m de altura, con armazón de andamios metálicos y toldo de lona plástica. La temperatura del microclima fue monitoreada mediante el uso de un termómetro digital.

La vista isométrica de la estructura del microclima empleado se muestra en la Figura 52 y un registro fotográfico en la Figura 53.

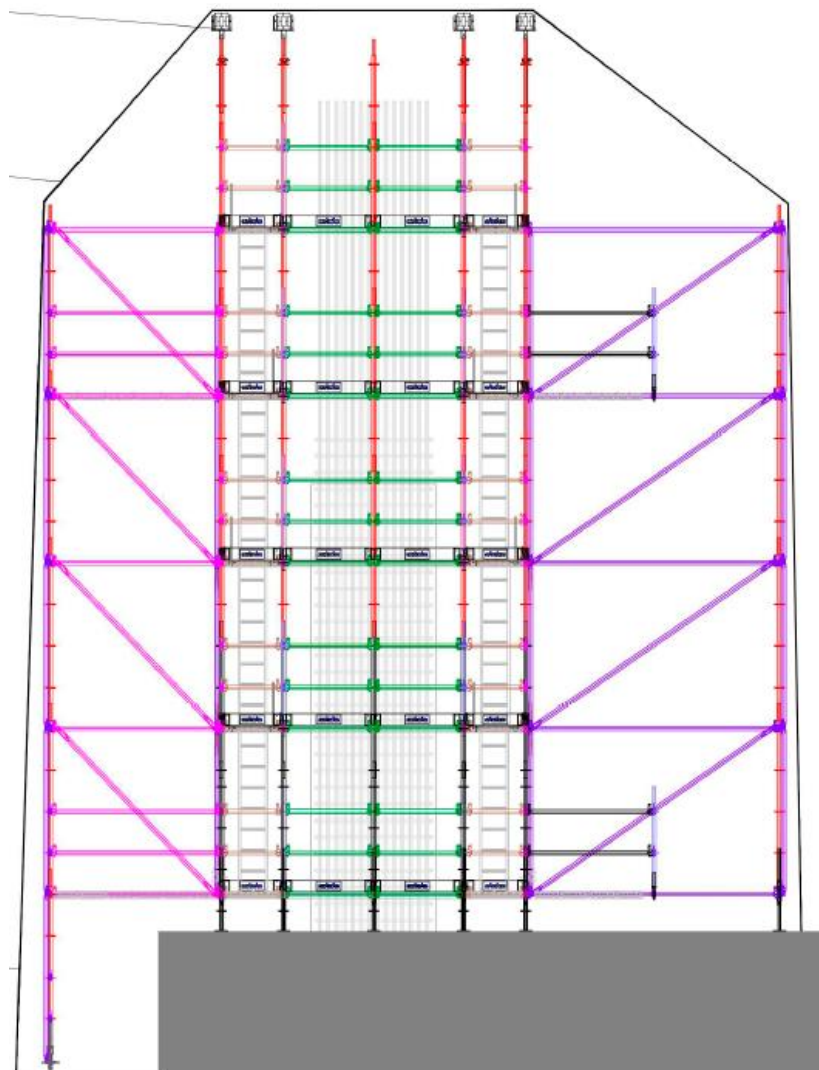


Figura 52. Plano en elevación de estructura de microclima para el vaciado del Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Fuente: Información del proyecto



Figura 53. Fotografía de microclima ejecutado en campo para el Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Fuente: Información del proyecto

Turbocalefactores.

Se emplearon 07 turbocalefactores, 4 eléctricos y 3 a combustión debido a disponibilidad en obra, con una potencia total mínima de 140 kW. La distribución en planta de estos equipos para asegurar una temperatura uniforme en el microclima se muestra en la Figura 54.

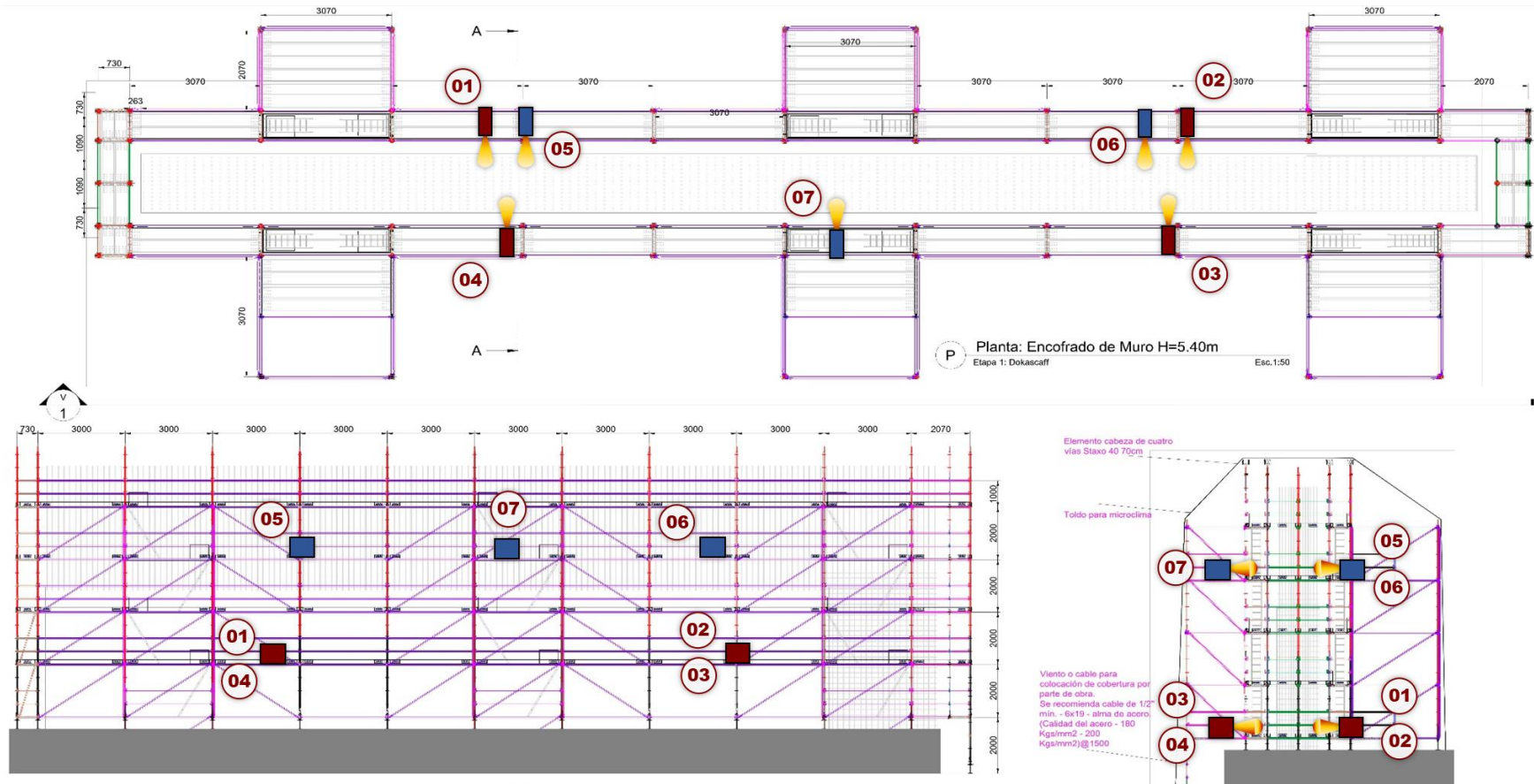


Figura 54. Distribución en planta y elevación de turbocalefactores en el perímetro de la etapa 1 del muro cimentación del túnel de recuperación.

Fuente: Información del proyecto

Vaciado por celdas.

Se siguió una secuencia de vaciado por celdas con una velocidad máxima de ascenso del concreto sobre el encofrado no mayor de 1.77 m/h. A lo ancho, no hubo sectorización.

Protección superficial.

No se empleó protección térmica superficial de poliestireno para este elemento.

Datos de campo registrados.***Ubicación de termocuplas.***

Se emplearon 2 termocuplas con dataloggers para el registro de las temperaturas con una frecuencia de 15 minutos, una termocupla en el núcleo y una en la superficie del elemento; como se muestra en la Figura 55.

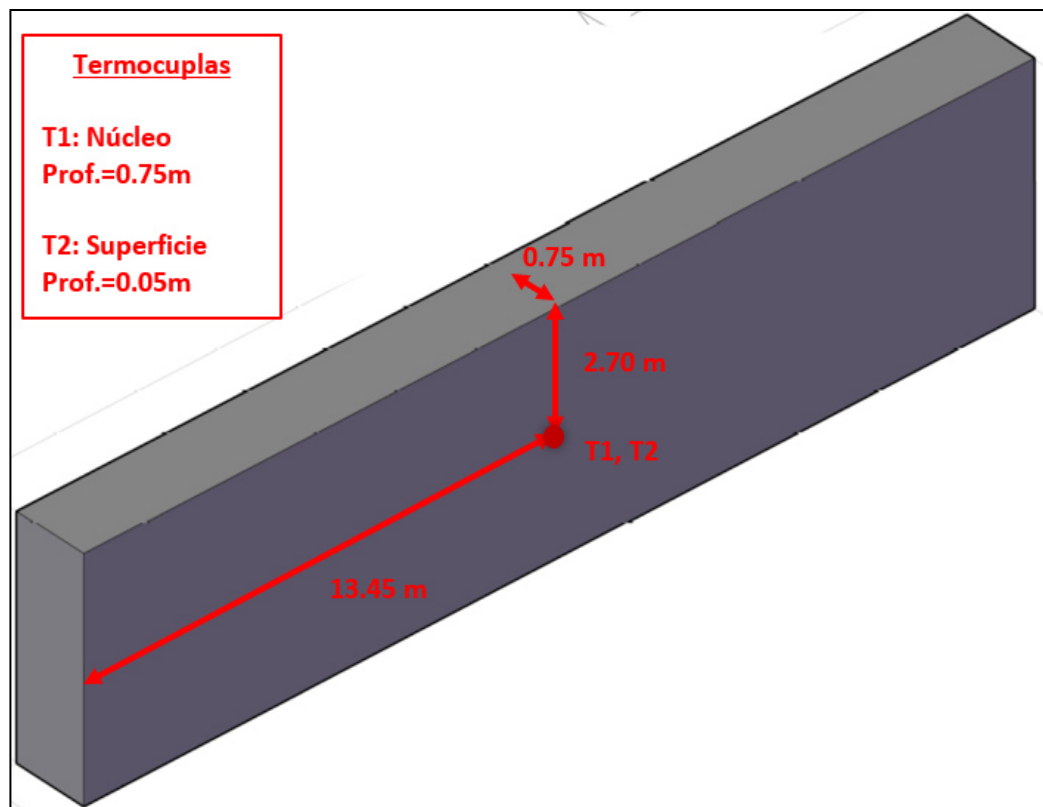


Figura 55. Plano isométrico de ubicación de termocuplas en etapa 01 del muro de túnel de recuperación.

Fuente: Información del proyecto

Lectura de termocuplas.

Se obtuvo que, como parte de las lecturas de temperaturas obtenidas por las termocuplas, la muestra alcanza un gradiente máximo de 22.1 °C, con una temperatura máxima del núcleo de 71.1 °C; a una edad de 1.8 días. En la Figura 56 se muestra el histograma de las temperaturas registradas por las termocuplas.

Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Lectura de Termocuplas

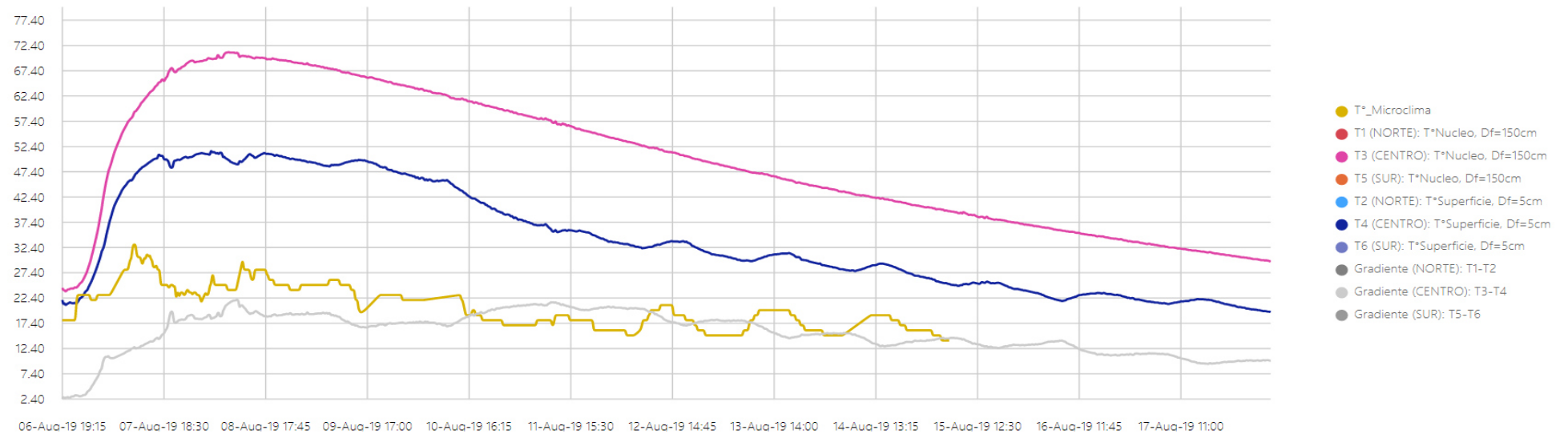


Figura 56. Histograma de temperaturas registradas por las termocuplas instaladas en el Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Fuente: Elaboración propia, basada en la información del proyecto

Estimación de costos de los métodos de reducción del gradiente de temperatura.

El cálculo de los costos asociados a los métodos de control térmico implementados en esta muestra se detalla en el Anexo 14, a continuación, se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16

Costo por implementación y operación de métodos de control térmico en Muro de Túnel de Recuperación

Descripción	Costo (en USD)
Mano de Obra (M.O.)	3,956.54
Equipos y herramientas (EQP.)	5,127.78
Materiales (MAT.)	1,260.86
Costo Total	10,345.18

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del costo – efectividad.

Se siguió el mismo procedimiento de cálculo para la relación costo – efectividad, descrito para la Cimentación del Molino de Bolas 01. Obteniéndose que con una inversión de \$2.6823, por cada metro cúbico del elemento, se alcanza a controlar 1°C del gradiente térmico del elemento analizado.

Capítulo 5

Resultados

Cimentación de Molino de Bolas 01

Comportamiento térmico del elemento.

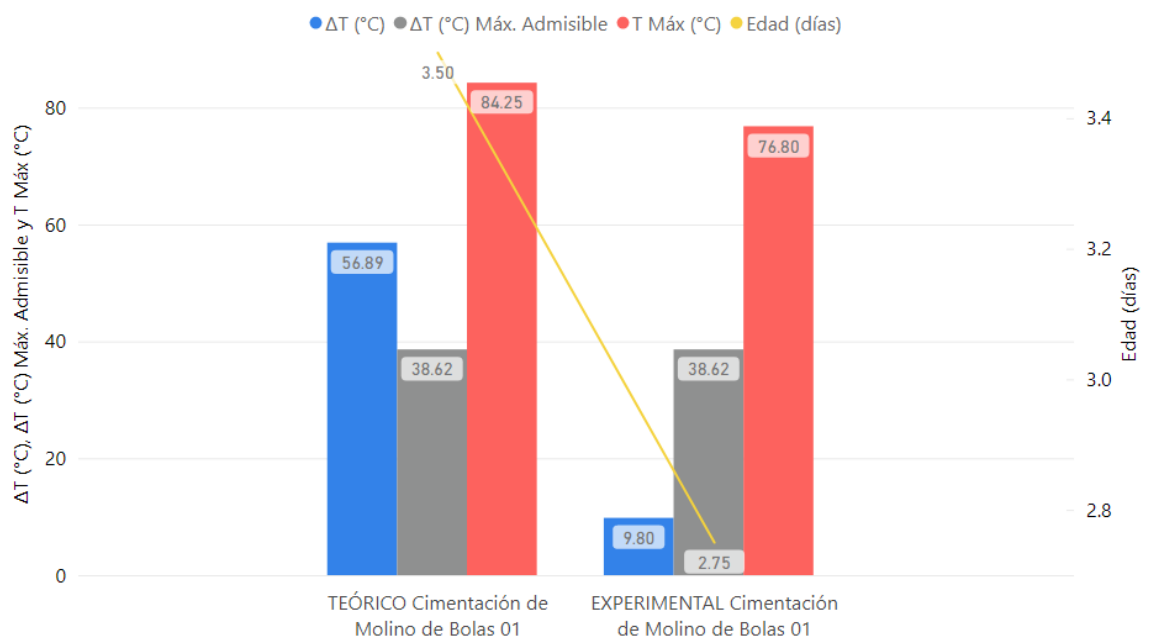


Figura 57. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en la Cimentación del Molino de Bolas 01.

Fuente: Elaboración propia.

Modelo teórico del comportamiento térmico.

En el gráfico 57, se observa que los valores obtenidos en el modelo teórico del comportamiento térmico son; 56.89°C de gradiente térmico, valor muy por encima del gradiente máximo admisible (38.62°C), lo cual ocasionaría esfuerzos térmicos que generarían fisuración en el elemento.

Por otro lado; se halló la temperatura máxima en el núcleo, obteniéndose un valor de 84.25°C, influenciado principalmente por las grandes dimensiones del elemento (volumen de 1931.7m³).

Este valor de temperatura máxima supera los 70°C, indicado en el ACI 201.2R-16 como máximo permisible para la temperatura del núcleo, ya que valores mayores aumentan el riesgo de generar el fenómeno de etringita diferida y finalmente afectar la durabilidad del elemento. Así mismo, se encontró que la edad teórica en que ha de alcanzar la temperatura máxima del núcleo es a los 3.5 días de iniciado el vaciado masivo.

Modelo experimental del comportamiento térmico.

En el gráfico 57; se observa que con la aplicación de la Combinación 01 de los métodos:

Vaciado por celdas, Microclima y Protección Superficial. Se obtuvieron los siguientes valores experimentales; 9.8°C de gradiente térmico, valor muy por debajo del gradiente máximo admisible (38.62°C).

Por otro lado; se encontró una temperatura máxima en el núcleo de 76.8°C, valor inferior a la temperatura máxima calculada (84.25°C). Si bien, dentro de lo máximo indicado en el Marco Teórico (80°C); aún superior a los 70°C recomendados por el ACI; por ello se encontró que, si bien el riesgo de formación de etringita diferida ha disminuido, este riesgo aún es existente.

Finalmente, en el modelo experimental se calculó que la edad en que se alcanza la temperatura máxima del núcleo es a los 2.75 días de iniciado el vaciado masivo y no a los 3.5 días, como se había previsto en el modelo teórico.

Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.

Se calculó la diferencia entre el gradiente térmico teórico y el gradiente térmico experimental, obteniéndose un valor de 47.09°C; este valor representa la efectividad del control del gradiente térmico de la Combinación 01 de métodos de control térmico en la Cimentación del Molino de Bolas 01. Es decir, la cantidad de grados reducidos del gradiente con la implementación de la Combinación 01.

Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.

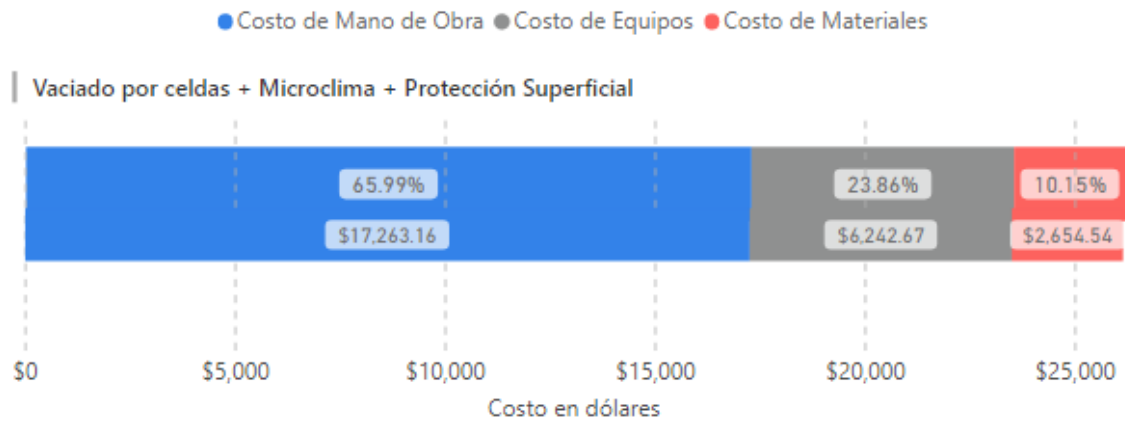


Figura 58. Costos de implementación y operación de la Combinación 01 aplicada en la Cimentación de Molino de Bolas 01.

Fuente: Elaboración propia.

El costo de implementación de la Combinación 01, aplicada a la Cimentación de Molino de Bolas 01 cuyo volumen fue de 1'931.7 m³, ascendió a un total de \$26'160.37 (sin IGV). De la figura 58, se observa que la partida de mayor incidencia es la Mano de Obra (\$17'263.16, representando el 65.99% del total), en segundo lugar, el Costo de Equipos (\$6'242.67, representando el 23.86% del total) y por último el Costo de Materiales (\$2'654.54, representando el 10.15% del total).

Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.

Se obtuvo que con una inversión total de \$26'160.37 (sin IGV), para la implementación de la Combinación 01, en un elemento de volumen 1'931.7 m³; el costo por metro cúbico es de \$13.54 y se alcanzó una efectividad de 47.04°C en el control del gradiente térmico. En otras palabras; con una inversión de \$0.29 por cada m³ de la Cimentación de Molino de Bolas 01, se controló 1°C del gradiente térmico.

Cimentación de Molino de Bolas 02

Comportamiento térmico del elemento.

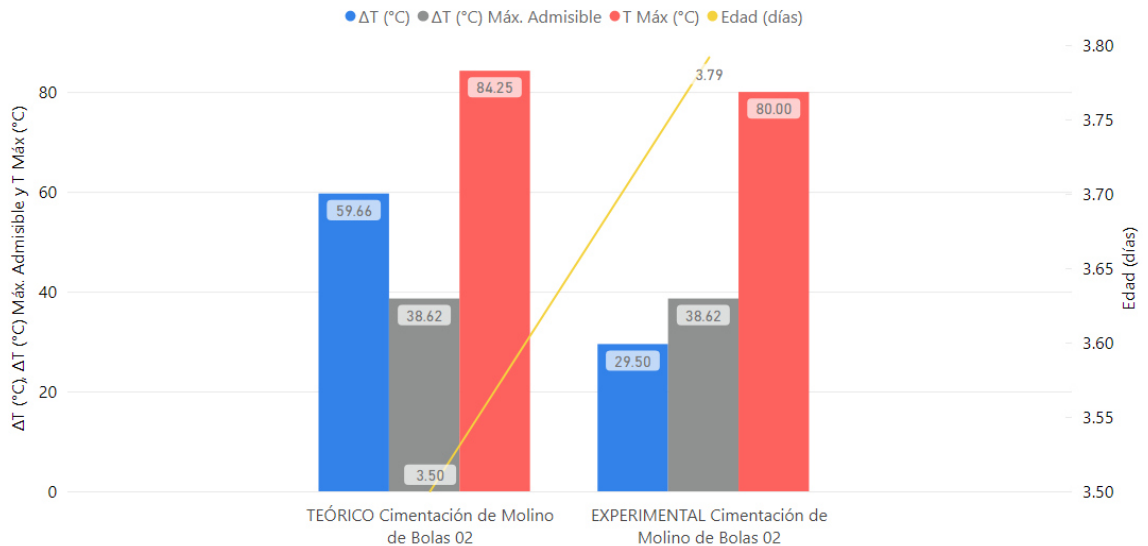


Figura 59. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en la Cimentación del Molino de Bolas 02.

Fuente: Elaboración propia.

Modelo teórico del comportamiento térmico.

En el gráfico 59, se observa que los valores obtenidos en el modelo teórico del comportamiento térmico son; 59.66°C de gradiente térmico, valor muy por encima del gradiente máximo admisible (38.62°C), lo cual ocasionaría esfuerzos térmicos que generarían fisuración en el elemento.

Por otro lado; se halló la temperatura máxima en el núcleo, pronosticándose un valor de 84.25°C , influenciado principalmente por las grandes dimensiones del elemento (volumen de 1931.7m^3). Este valor de temperatura máxima supera los 70°C , indicado en el ACI 201.2R-16 como máximo permisible para la temperatura del núcleo, ya que valores mayores aumentan el riesgo de generar el fenómeno de etringita diferida y finalmente afectar la durabilidad del elemento. Así mismo, se encontró que la edad teórica en que se alcanzaría la temperatura máxima del núcleo era a los 3.5 días de iniciado el vaciado masivo.

Modelo experimental del comportamiento térmico.

En el gráfico 59; se observa que con la aplicación de la Combinación 02 de los métodos:

Vaciado por celdas y Microclima. Se obtuvieron los siguientes valores experimentales; 29.5°C de gradiente térmico, valor debajo del gradiente máximo admisible (38.62°C).

Por otro lado; se encontró una temperatura máxima en el núcleo de 80.0°C , valor inferior a la temperatura máxima calculada (84.25°C). Si bien, se redujo en 4.25°C ; este valor se encuentra al límite del máximo indicado en el Marco Teórico (80°C). Aún superior a los 70°C recomendados por el ACI; por ello se encontró que, el riesgo de formación de etringita diferida es existente y por ende la afectación a la durabilidad del elemento.

Finalmente, en el modelo experimental se calculó que la edad en que se alcanza la temperatura máxima del núcleo es a los 3.75 días de iniciado el vaciado masivo; obteniéndose una pequeña diferencia respecto a los 3.5 días, pronosticados en el modelo teórico.

Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.

Se calculó la diferencia entre el gradiente térmico teórico y el gradiente térmico experimental, obteniéndose un valor de 30.16°C ; este valor representa la efectividad del control del gradiente térmico de la Combinación 02 de métodos de control térmico en la Cimentación del Molino de Bolas 01. Es decir, la cantidad de grados reducidos del gradiente con la implementación de la Combinación 02.

Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.

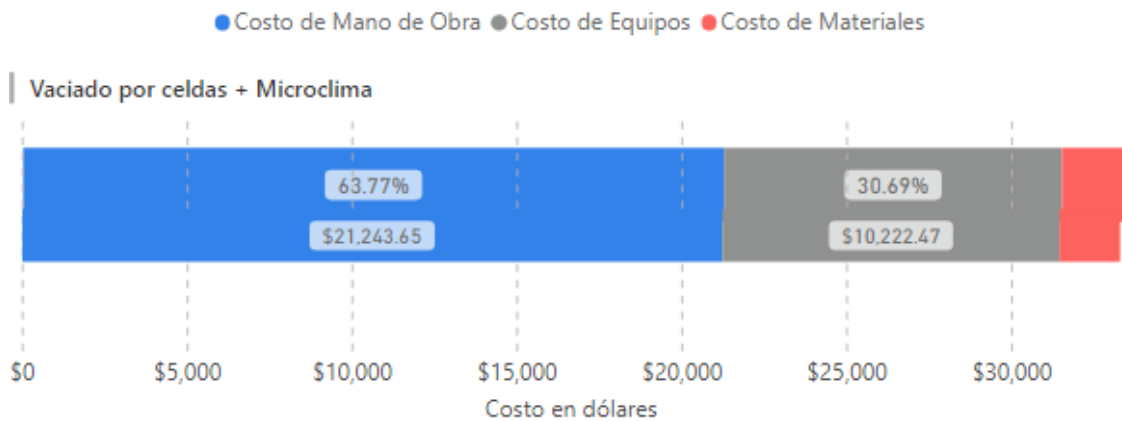


Figura 60. Costos de la implementación y operación de la combinación de métodos aplicados a la Cimentación del Molino de Bolas 02.

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 60, se observa que el costo de implementación de la Combinación 02, aplicada a la Cimentación de Molino de Bolas 02 cuyo volumen fue de 1'931.7 m³, ascendió a un total de \$33'313.78 (sin IGV). De la figura 60, se observa que la partida de mayor incidencia es la Mano de Obra (\$21'243.65, representando el 63.77% del total), en segundo lugar, el Costo de Equipos (\$10'222.47, representando el 30.69% del total) y por último el Costo de Materiales (\$1'847.66, representando el 5.54% del total).

Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.

Se obtuvo que con una inversión de \$33'313.78 (sin IGV), para la implementación de métodos de control en un volumen de 1'931.7 m³, el costo por metro cúbico es de \$17.25 y se alcanzó una efectividad de 30.16 °C en el control del gradiente térmico. En otras palabras; con una inversión de \$0.57 por cada m³ de la Cimentación de Molino de Bolas 02, se controló 1°C del gradiente térmico.

Cimentación de Molino SAG 02

Comportamiento térmico del elemento.

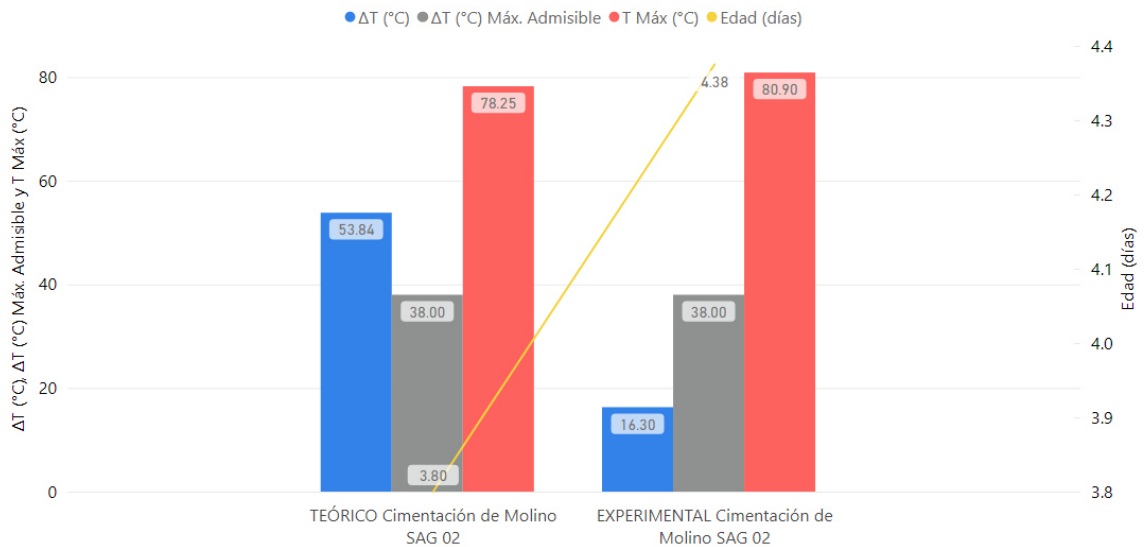


Figura 61. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en la Cimentación del Molino SAG 02.

Fuente: Elaboración propia.

Modelo teórico del comportamiento térmico.

En el gráfico 61, se observa que los valores obtenidos en el modelo teórico del comportamiento térmico son; 53.84°C de gradiente térmico, valor muy por encima del gradiente máximo admisible (38.00°C), lo cual ocasionaría esfuerzos térmicos que generarían fisuración en el elemento.

Por otro lado; se halló la temperatura máxima en el núcleo, obteniéndose un valor de 84.25°C , influenciado principalmente por las grandes dimensiones del elemento (volumen de 1887.0m^3). Este valor de temperatura máxima supera los 70°C , indicado en el ACI 201.2R-16 como máximo permisible para la temperatura del núcleo, ya que valores mayores aumentan el riesgo de generar el fenómeno de etringita diferida y finalmente afectar la durabilidad del elemento.

Así mismo, se encontró que la edad teórica en que ha de alcanzar la temperatura máxima del núcleo es a los 3.5 días de iniciado el vaciado masivo.

Modelo experimental del comportamiento térmico.

En el gráfico 61; se observa que con la aplicación de la Combinación 01 de los métodos: Vaciado por celdas, Microclima y Protección Superficial. Se obtuvieron los siguientes valores experimentales; 16.3°C de gradiente térmico, valor muy por debajo del gradiente máximo admisible (38°C).

Por otro lado; se encontró una temperatura máxima en el núcleo de 80.9°C, valor superior a la temperatura máxima calculada (78.25°C). Este valor se encuentra fuera del límite del máximo indicado en el Marco Teórico (80°C); por ello se encontró que, el riesgo de formación de etringita diferida es existente y por ende la probabilidad de afectación a la durabilidad del elemento.

Finalmente, en el modelo experimental se encontró que la edad en que se alcanza la temperatura máxima del núcleo es a los 4.37 días de iniciado el vaciado masivo; obteniéndose una pequeña diferencia respecto a los 3.8 días, pronosticados en el modelo teórico.

Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.

Se calculó la diferencia entre el gradiente térmico teórico y el gradiente térmico experimental, obteniéndose un valor de 37.54°C; este valor representa la efectividad del control del gradiente térmico de la Combinación 01 de métodos de control térmico en la Cimentación del Molino SAG 02. Es decir, la cantidad de grados reducidos del gradiente con la implementación de la Combinación 01.

Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.

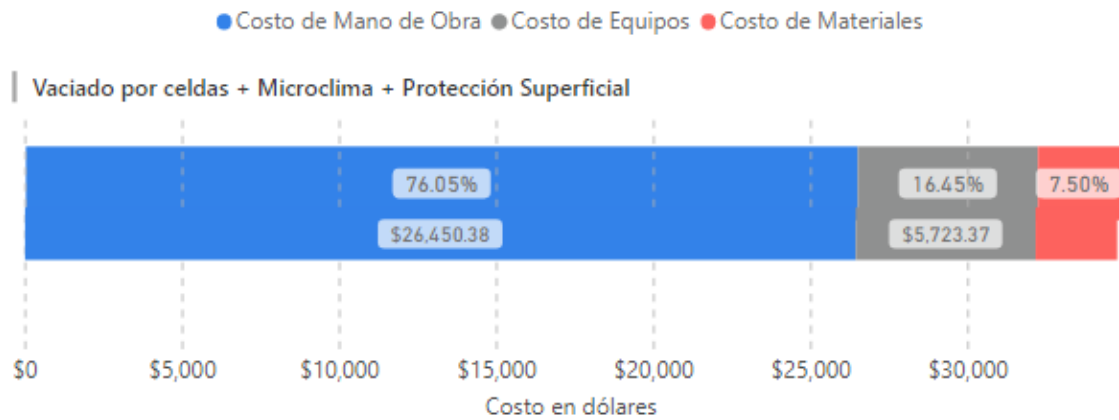


Figura 62. Costos de la implementación y operación de la combinación de métodos aplicados a la Cimentación del Molino SAG 02.

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 62, se observa que el costo de implementación de la combinación de métodos; Vaciado por celdas, Microclima y Protección Superficial, para un volumen de 1'887.0 m³, ascendió a un total de \$34'782.08 (sin IGV). Siendo de mayor incidencia el de Mano de Obra (\$26'450.38, representando el 76.06% del total), en segundo lugar, el Costo de Equipos (\$5'723.37, representando el 16.45% del total) y por último el Costo de Materiales (\$2'608.33, representando el 7.50% del total).

Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.

Se obtuvo que con una inversión de \$34'782.08 (sin IGV), para la implementación de métodos de control en un volumen de 1'887.0 m³, el costo por metro cúbico es de \$18.43 y se alcanzó una efectividad de 37.54°C en el control del gradiente térmico. En otras palabras; con una inversión de \$0.49 por cada m³ de la Cimentación de Molino SAG 02, se controló 1°C del gradiente térmico.

Cimentación de Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Comportamiento térmico del elemento.

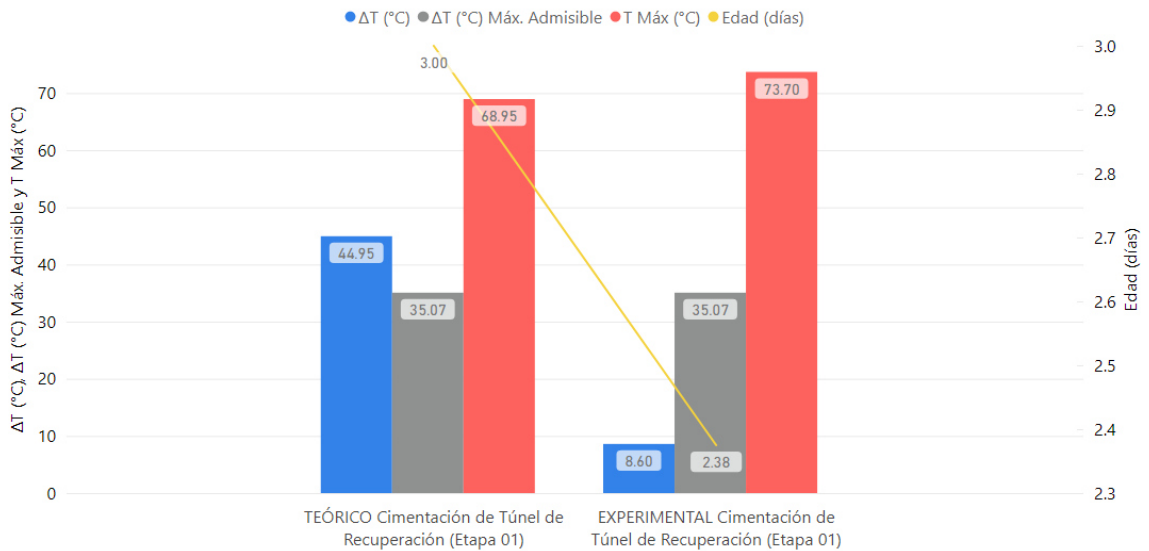


Figura 63. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01).

Modelo teórico del comportamiento térmico.

De la Figura 63, se observa que los valores obtenidos en el modelo teórico del comportamiento térmico son; 44.95°C de gradiente térmico, valor muy por encima del gradiente máximo admisible (35.07°C), lo cual ocasionaría esfuerzos térmicos que generarían fisuración en el elemento.

Por otro lado; se halló la temperatura máxima en el núcleo, obteniéndose un valor de 68.95°C, influenciado principalmente por las grandes dimensiones del elemento (volumen de 901.408m³). Este valor de temperatura máxima en el núcleo se encontró dentro de los 70°C; indicados en el ACI 201.2R-16 como máximo permisible para la temperatura del núcleo, por lo que teóricamente no existía el riesgo de generar el fenómeno de etringita diferida y finalmente afectar la durabilidad del elemento. Así mismo, se encontró que la edad teórica en que alcanzaría la temperatura máxima del núcleo era a los 3.0 días de iniciado el vaciado masivo.

Modelo experimental del comportamiento térmico.

En el gráfico 63; se observa que con la aplicación de la Combinación 01 de los métodos:

Vaciado por celdas, Microclima y Protección Superficial. Se obtuvieron los siguientes valores experimentales; 8.6°C de gradiente térmico, valor muy por debajo del gradiente máximo admisible (35.07°C).

Por otro lado; se encontró una temperatura máxima en el núcleo de 73.7°C, valor superior a la temperatura máxima calculada (68.95°C). Este valor se encuentra fuera del límite del máximo indicado en la norma ACI, pero dentro de límite establecido en el Marco Teórico (80°C); por ello se encontró que existe una baja probabilidad de formación de etringita diferida.

Finalmente, en el modelo experimental se encontró que la edad en que se alcanza la temperatura máxima del núcleo es a los 2.37 días de iniciado el vaciado masivo; obteniéndose una pequeña diferencia respecto a los 3 días, pronosticados en el modelo teórico.

Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.

Se calculó la diferencia entre el gradiente térmico teórico y el gradiente térmico experimental, obteniéndose un valor de 36.35°C; este valor representa la efectividad del control del gradiente térmico de la Combinación 01 de métodos de control térmico en la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa 01). Es decir, la cantidad de grados reducidos del gradiente con la implementación de la Combinación 01.

Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.

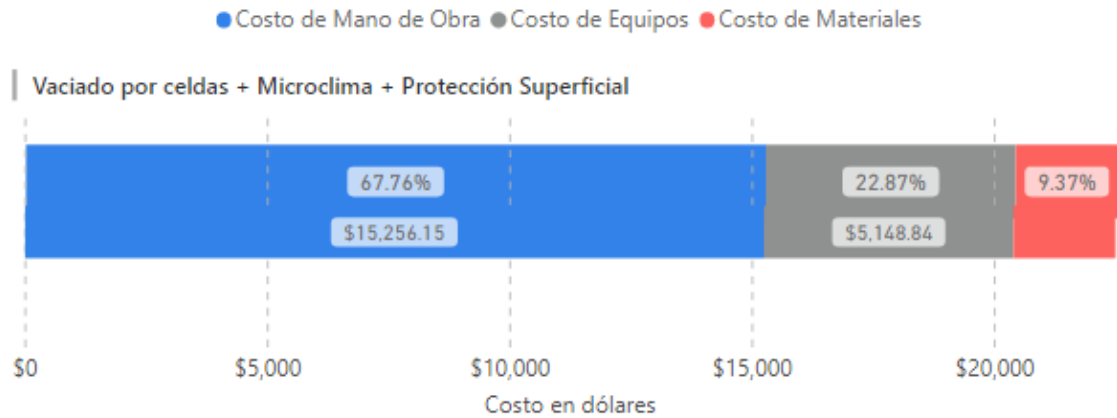


Figura 64. Costos de la implementación y operación de la combinación de métodos aplicados a la Cimentación del Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01).

Fuente: Elaboración propia.

El costo de implementación de la combinación de métodos; Vaciado por celdas, Microclima y Protección Superficial, para un volumen de 901.41 m³, ascendió a un total de \$22'514.39 (sin IGV). Siendo de mayor incidencia el de Mano de Obra (\$15'256.15, representando el 67.76% del total), en segundo lugar, el Costo de Equipos (\$5'148.84, representando el 22.87% del total) y por último el Costo de Materiales (\$2'109.40, representando el 9.37% del total).

Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.

Se obtuvo que con una inversión de \$22'514.39 (sin IGV), para la implementación de métodos de control en un volumen de 901.41m³, el costo por metro cúbico es de \$24.98 y se alcanzó una efectividad de 36.35°C en el control del gradiente térmico. En otras palabras; con una inversión de \$0.69 por cada m³ de la Cimentación del Túnel de Recuperación (Etapa01), se controló 1°C del gradiente térmico.

Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Comportamiento térmico del elemento.

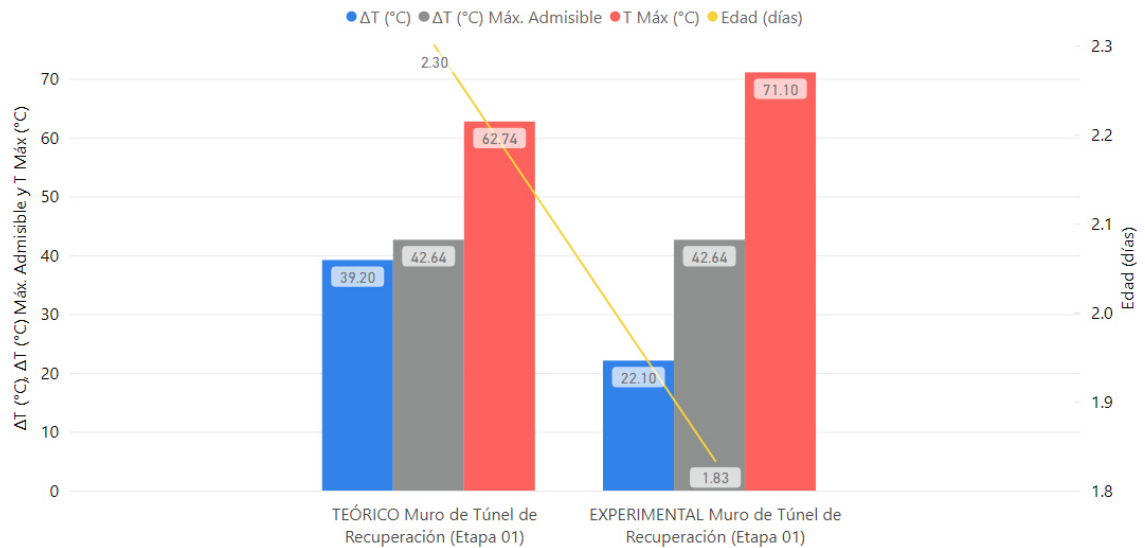


Figura 65. Resultado del comportamiento térmico, teórico y experimental, en el Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01).

Modelo teórico del comportamiento térmico.

De la Figura 65, se observa que los valores obtenidos en el modelo teórico del comportamiento térmico son; 39.2°C de gradiente térmico, valor menor al del gradiente máximo admisible (42.64°C), lo cual no configuraría el riesgo de la formación de esfuerzos térmicos que generarían fisuración en el elemento.

Por otro lado; se halló la temperatura máxima en el núcleo, obteniéndose un valor de 62.74°C, este valor bajo es influenciado principalmente por la esbeltez del elemento y el volumen de este (221.13m³). Este valor de temperatura máxima en el núcleo se encontró dentro de los 70°C; indicados en el ACI 201.2R-16 como máximo permisible para la temperatura del núcleo, por lo que teóricamente no existía el riesgo de generar el fenómeno de etringita diferida y finalmente afectar la durabilidad del elemento. Así mismo, se encontró que la edad teórica en que alcanzaría la temperatura máxima del núcleo era a los 2.3 días de iniciado el vaciado masivo.

Modelo experimental del comportamiento térmico.

En el gráfico 65; se observa que con la aplicación de la Combinación 02 de los métodos:

Vaciado por celdas y Microclima. Se obtuvieron los siguientes valores experimentales; 22.1°C de gradiente térmico, valor muy por debajo del gradiente máximo admisible (42.64°C).

Por otro lado; se encontró una temperatura máxima en el núcleo de 71.1°C , valor superior a la temperatura máxima calculada (62.74°C). Este valor se encuentra fuera del límite del máximo indicado en la norma ACI, pero dentro de límite establecido en el Marco Teórico (80°C); por ello se encontró que existe una baja probabilidad de formación de etringita diferida.

Finalmente, en el modelo experimental se encontró que la edad en que se alcanza la temperatura máxima del núcleo es a los 1.83 días de iniciado el vaciado masivo; obteniéndose una pequeña diferencia respecto a los 2.3 días, pronosticados en el modelo teórico.

Efectividad de la combinación de métodos para el control del gradiente térmico.

Se calculó la diferencia entre el gradiente térmico teórico y el gradiente térmico experimental, obteniéndose un valor de 17.1°C ; este valor representa la efectividad del control del gradiente térmico de la Combinación 02 de métodos de control térmico en el Muro del Túnel de Recuperación (Etapa 01). Es decir, la cantidad de grados reducidos del gradiente con la implementación de la Combinación 02.

Costos para la implementación y operación de la combinación de métodos para el control de gradiente térmico.

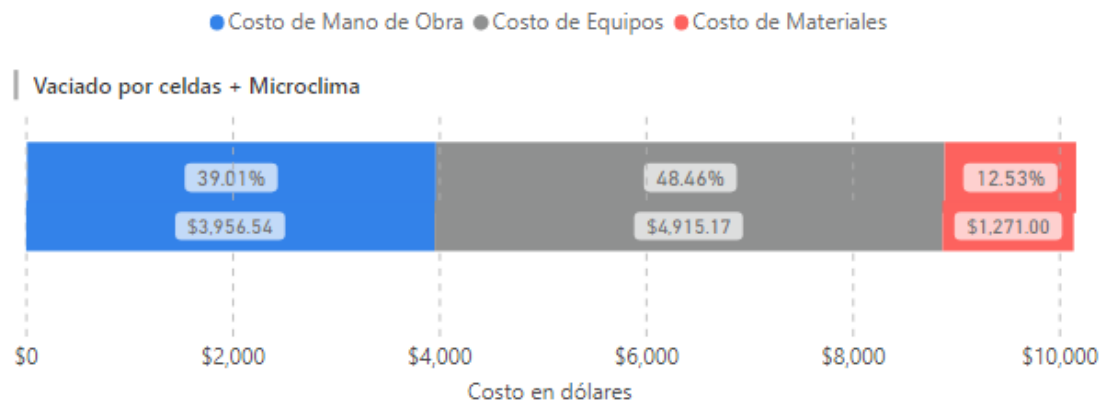


Figura 66. Costos de la implementación y operación de la combinación de métodos aplicados al Muro de Túnel de Recuperación (Etapa 01)

Fuente: Elaboración propia.

El costo de implementación de la combinación de métodos; Vaciado por celdas y Microclima, para un volumen de 221.13 m³, ascendió a un total de \$10'142.71 (sin IGV). Siendo de mayor incidencia el de Costo de Equipos (\$4'915.17, representando el 48.46% del total), en segundo lugar, el de Mano de Obra (\$3'956.54, representando el 39.01% del total) y por último el Costo de Materiales (\$1'271.00, representando el 12.53% del total).

Relación costo – efectividad de la combinación de método aplicada.

Se obtuvo que con una inversión de \$10'142.71 (sin IGV), para la implementación de métodos de control en un volumen de 221.13 m³, el costo por metro cúbico es de \$45.87 y se alcanzó una efectividad de 17.1 °C en el control del gradiente térmico. En otras palabras; con una inversión de \$2.68 por cada m³ del Muro de Túnel de Recuperación (Etapa01), se controló 1°C del gradiente térmico.

Resultados generales

Comportamiento térmico de los elementos.

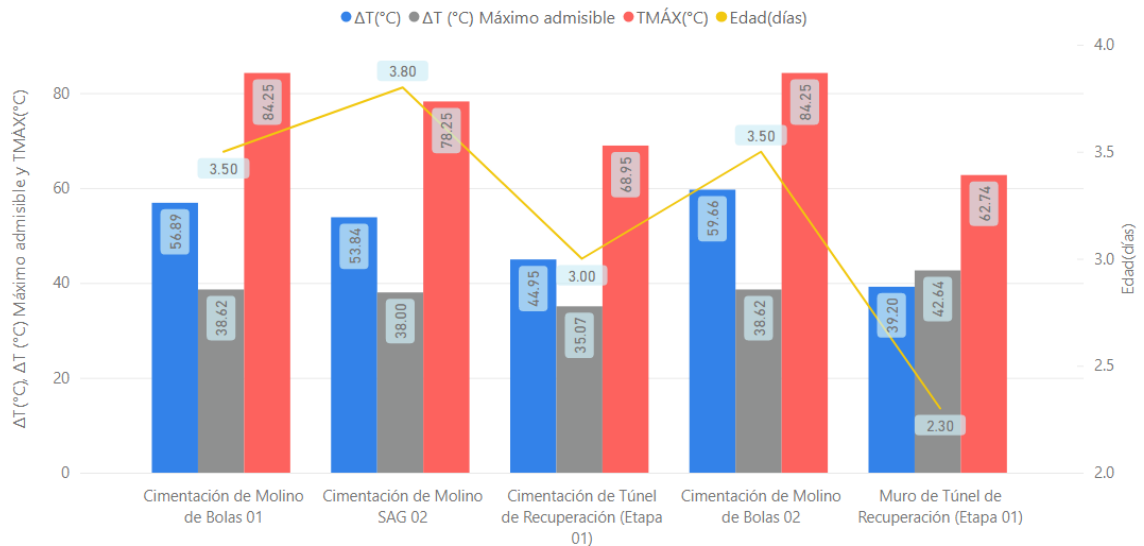


Figura 67. Valores del comportamiento térmico teórico de los elementos.

Fuente: Elaboración propia.

De la Fig. 67; se observa que, en el comportamiento térmico teórico de las cimentaciones, el gradiente teórico (ΔT , en azul), cuyo valor máximo encontrado fue de 59.66 °C, superó al gradiente máximo admisible (en plomo), con valor máximo encontrado de 59.66 °C.

Anticipando la formación de esfuerzos térmicos y fisuración debido al alto gradiente térmico; por otro lado, respecto a la edad en que se alcanza la temperatura máxima en el núcleo, se predijo con valores que oscilaban entre los 03 - 04 días.

El comportamiento teórico del muro; fue diferente a las cimentaciones, el gradiente térmico calculado (39.2 °C) no superó al gradiente admisible (42.64 °C) y se encontró que la edad en que alcanzaba la temperatura máxima del núcleo estaba debajo del rango en que lo hacían las cimentaciones (2.3 días).

En cuanto a la temperatura máxima en el núcleo, como se muestra en la Fig.67, no presentó un patrón comparativo entre los elementos.

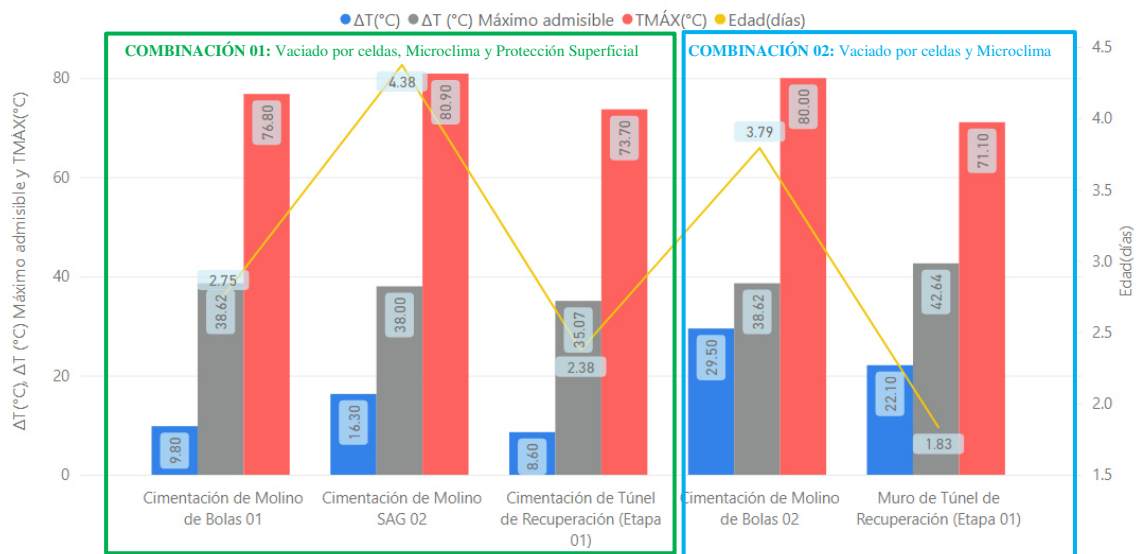


Figura 68. Valores del comportamiento térmico experimental, en función a los métodos de control aplicados por elemento.

Fuente: Elaboración propia.

De la Fig.68, se observa que con la aplicación de la Combinación 01 de control de métodos de gradientes térmicos, se obtuvo gradientes menores (el menor valor obtenido fue de 9.8 °C) a los alcanzados bajo la aplicación de la Combinación 02 (el menor valor obtenido fue de 22.1 °C). En todos los elementos, independientemente de la combinación aplicada, se lograron gradientes térmicos inferiores a los máximos admisibles; eliminando el riesgo de la fisuración en los elementos debido a esfuerzos térmicos.

No se encontró un patrón comparativo respecto a la temperatura máxima del núcleo o la edad en que alcanza esta, a nivel de la totalidad de muestras. Sin embargo, considerando las características similares de las Cimentaciones de Molino de Bolas 01 y 02; se observó que la aplicación de la Combinación 01 ofrece un gradiente (9.8 °C), mucho menor al alcanzado con la Combinación 02 (29.5 °C). Así mismo; con la Combinación 01 se alcanzaron valores menores de T° máxima en el núcleo (76.8 °C) y edad (2.75 días) en que alcanza esta, que con la aplicación de la Combinación 02 (80°C y 3.79 días) en los elementos de Molino de Bolas.

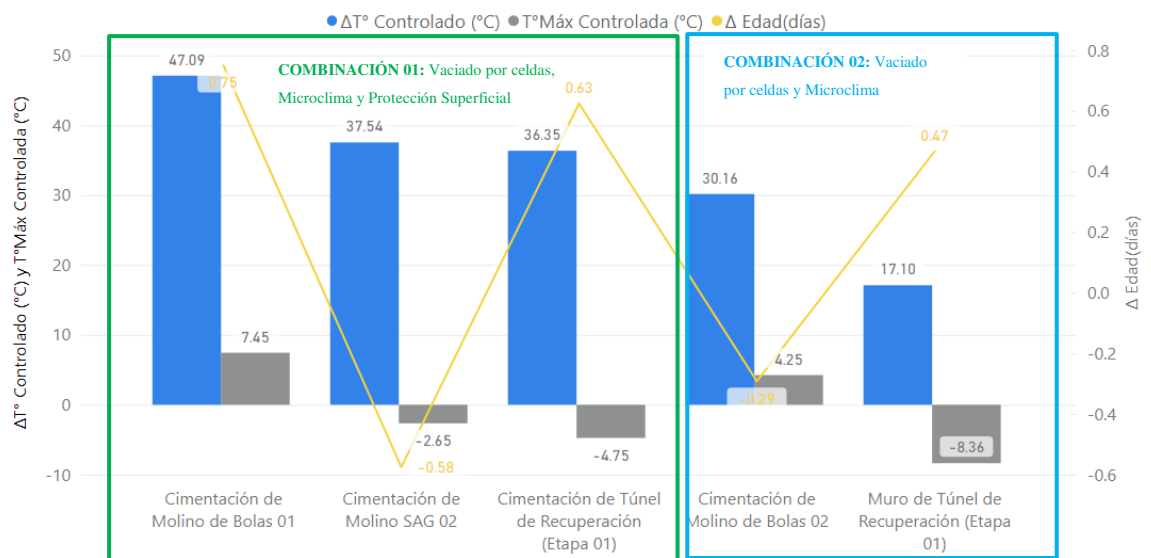


Figura 69. Diferencial de valores entre el modelo térmico teórico y el modelo experimental.

Fuente: Elaboración propia.

De la Fig. 69; se observa que con la aplicación de la Combinación 01, se obtuvo mayor disminución en el gradiente térmico en la fase experimental (se alcanzó a controlar hasta 47.09°C para el Molino de Bolas 01), respecto a lo pronosticado en el comportamiento teórico. Las edades pronosticadas en la fase teórica fueron muy cercanas a las obtenidas en la fase experimental; en función a lo representado por la línea amarilla en la Fig.69, en ningún caso el modelo teórico ofrece diferencia mayor a 01 día respecto a lo obtenido en el modelo experimental. La diferencia de edades obtenidas entre la fase teórica y la experimental se encuentra dentro del rango de 0.3 a 0.75, por lo que se asume confiabilidad en el modelo teórico.

No se establece un patrón comparativo respecto a la temperatura máxima del núcleo; sin embargo, considerando las similitudes de las Cimentaciones de Molino de Bolas 01 y 02 se observó que con la aplicación de la Combinación 01, se obtuvo una reducción de la temperatura de núcleo en 7.45 °C mientras que con la Combinación 02 solo se alcanzó una reducción de 4.25 °C.

Efectividad de las combinaciones de métodos de control del gradiente térmico.

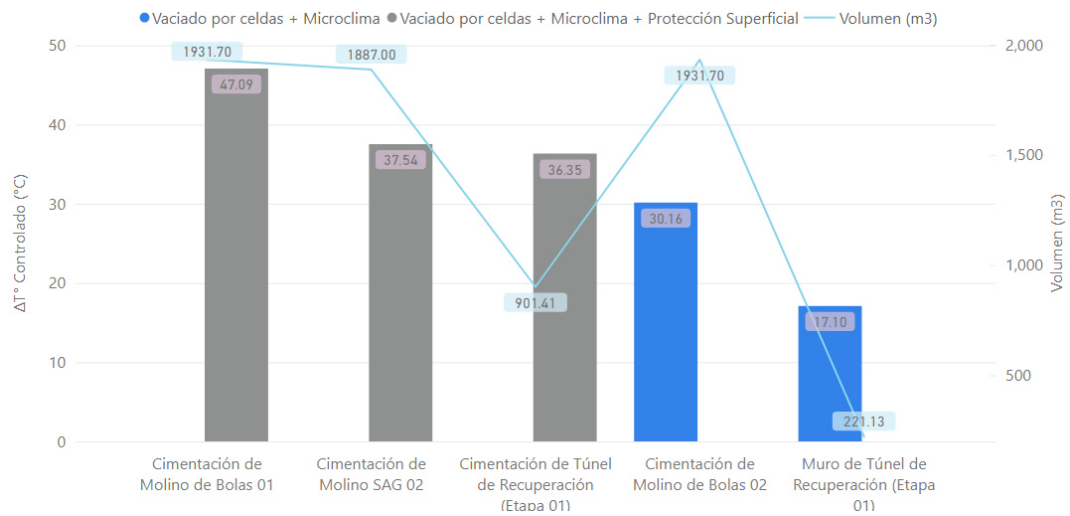


Figura 70. Efectividad de las combinaciones de métodos de control de gradiente térmico

Fuente: Elaboración propia.

De la figura 70, se observa que se obtuvo mayor efectividad en aquellas muestras en que se implementó la Combinación 01 de los métodos de control de gradiente térmico. Cuyos valores se encuentran dentro del rango de 36 °C a 47 °C, valores encima del promedio asumido en la hipótesis (30 °C); por ello, se rechaza la hipótesis para la Combinación 01.

Así mismo; en la figura 70, se observa que con la Combinación 02 (de menor efectividad), se obtuvo valores de 30.16 °C para la cimentación y 17.1 °C para el muro. El valor obtenido para la cimentación es cercano al asumido en la hipótesis (30°C), pero el valor obtenido en el muro difiere cerca de un 50%; por lo que se rechaza la hipótesis, puesto que la misma es generalizada y no hace diferencia en el tipo de elemento.

No se encontró relación directa entre los grados controlados y el volumen del elemento. Por otro lado, en función a lo contemplado en el mismo gráfico, se observa que en aquellas muestras de naturaleza y características idénticas como son las Cimentaciones del Molino de Bolas 01 y 02; la efectividad de la Combinación 01 (47.09 °C) es ampliamente superior a la de la Combinación 02 (30.16 °C), difiriendo estas combinaciones solo en la aplicación del método de Protección Superficial.

Costos de implementación y operación de las combinaciones de métodos

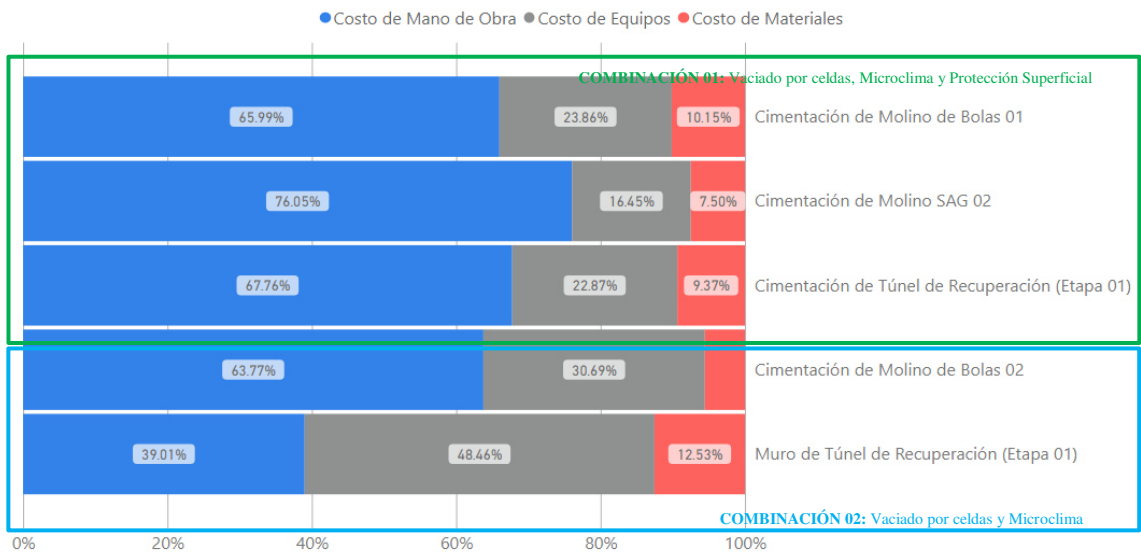


Figura 71. Incidencia en costos de los recursos invertidos para las combinaciones aplicadas.

Fuente: Elaboración propia.

En función a mostrado en la Fig. 71; se observa que, para las cimentaciones, el recurso más incidente en costo es el de mano de obra, con una incidencia de más del 60% seguido del costo de equipos y finalmente de materiales. Estos últimos no sobrepasan ampliamente la incidencia del 10%. En el caso del muro; el costo más incidente corresponde al de equipos, con una incidencia de 39%.

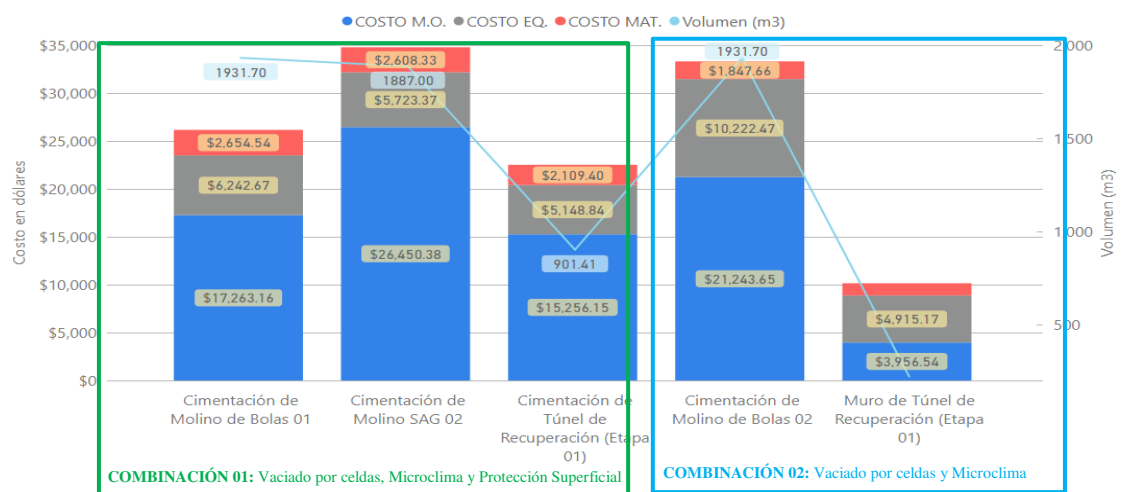


Figura 72. Costos de la implementación y operación de las combinaciones de métodos aplicados a cada elemento, expresado en dólares.

Fuente: Elaboración propia.

De la Fig.72; se observa que para los elementos en que se aplicó la Combinación 01, los costos por materiales fueron similares ($\$2'457.42 \pm \$150.91$) independientemente del volumen del elemento. Por otro lado, en estos mismos elementos, no se halló una relación común entre el volumen del elemento y el costo total de la combinación.

Se obtuvo un escenario diferente respecto a los elementos en los que se aplicó la Combinación 02, donde se observó que el costo total guardaba una relación proporcional con el volumen del elemento.

Finalmente; se halló que el costo, por m^3 , de aplicación de la Combinación 01 en cimentaciones fluctúan entre \$13 - \$25, los costos asociados en la Combinación 02 son de \$17.24 para la cimentación y \$45.86 para el muro. Los costos por m^3 para las cimentaciones, independientemente de la combinación, son similares al rango indicado en la hipótesis ($\$20 \pm 5$); por lo que se acepta la hipótesis para el caso de las cimentaciones, pero se difiere para el caso del muro.

Relación costo – efectividad del control del gradiente térmico.

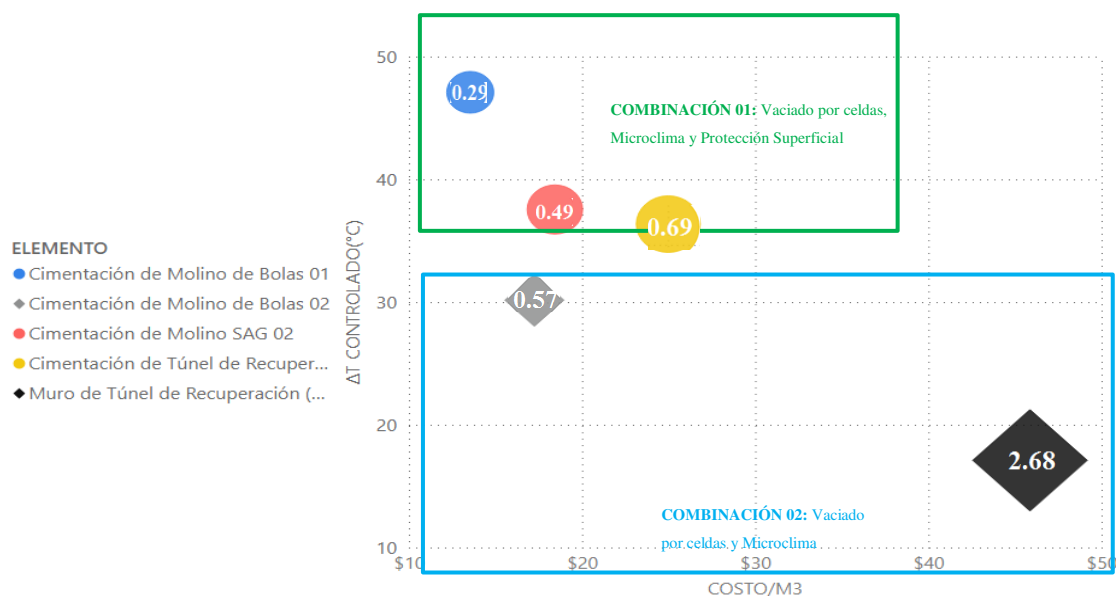


Figura 73. Costos de la implementación por m^3 versus el gradiente térmico controlado, expresado en dólares invertidos para controlar un grado del gradiente.

Fuente: Elaboración propia.

De la Fig.73; se observa en el eje de las abscisas, el costo por metro cúbico del elemento. Es decir, aquellos elementos ubicados más a la derecha poseen un costo mayor que aquellos en la izquierda.

Por otro lado; en el eje de las ordenadas, se observa la efectividad que se tuvo en determinado elemento, expresado por el gradiente controlado. Es decir, aquellos elementos más alejados del eje horizontal tuvieron mayor efectividad en el control del gradiente térmico.

Se encontró que, aquellos elementos en que se aplicó la Combinación 01 tienen un menor costo por metro cúbico ($< \$30.00$) y una mayor efectividad en el control térmico ($> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ controlados), en comparación a aquellos elementos en que se aplicó la Combinación 02. Se halló que la mejor relación costo – efectividad, expresado en dólares invertidos para controlar un grado del diferencial térmico, fue de 0.29 en la Cimentación del Molino de Bolas 01 con la aplicación de la Combinación 01. En las otras dos cimentaciones donde también se aplicó la Combinación 01, se obtuvo valores de 0.49 y 0.69.

Finalmente, se encontró que la relación costo – efectividad en los elementos donde se aplicó la Combinación 01 fluctúa entre 0.29 a 0.69; en el caso de los elementos con la Combinación 02, la relación es de 0.57 para la cimentación y 2.68 para el muro.

En la hipótesis se indicó un rango de 0.5 a 1; de los resultados hallados, solo en dos elementos de cinco, se encontró valores dentro de ese rango. Dado que la cantidad de elementos con este valor (2), es menor al 50% del total (5); se rechaza la hipótesis general.

Capítulo 6

Discusión de Resultados

Discusión

De las figuras 69, en el Capítulo 5; se observa que los datos del estudio del comportamiento térmico indican que, en todas las muestras, con la aplicación de la Combinación 01 o 02, se obtiene una disminución del gradiente térmico, llegando a controlar 47.09°C con la Combinación 01 y 30.16°C con la Combinación 02; pero no se obtuvo un patrón similar respecto a la disminución de la temperatura máxima para todos los casos. Por otro lado; M. Valarezo, en el 2014, al evaluar el comportamiento térmico de un elemento, obtiene valores de 60°C como temperatura máxima y 20° como gradiente máximo y con la aplicación de métodos de control térmico (Uso de cemento puzolánico en el concreto, circulación de agua fría a través de tuberías embebidas, encofrados de acero y el uso de una manta protectora para aislamiento superficial), obtiene una temperatura máxima del núcleo de 49°C y un gradiente térmico máximo de 15° . Es decir, M. Valarezo, obtuvo una reducción tanto en el gradiente (5°C) como en la temperatura máxima (11°C); estos resultados son muy inferiores a los obtenidos en el presente trabajo. En el caso de la reducción del gradiente térmico, la Combinación 01, supera a la combinación usada por Valarezo en 42.09°C ; mientras que la Combinación 02 supera a la combinación estudiada por Valarezo en 25.16°C . Respecto al control de la temperatura máxima en el núcleo, el método analizado por Zeña es más efectivo que las Combinaciones 01 y 02; debido a que ofrece 11°C mientras que con las Combinaciones 01 y 02, en algunos casos incluso se incrementa la temperatura máxima lejos de reducirla. Se encuentran estas diferencias debido a que los métodos estudiados por Valarezo incluyen algunos métodos exclusivos de control de temperatura máxima en el núcleo del elemento; por ejemplo, el uso de cemento puzolánico y tuberías embebidas para el enfriamiento, mientras que los métodos de las Combinaciones 01 y 02 incluyen principalmente métodos de control de temperatura superficial.

Respecto a los valores de los gradientes térmicos experimentales, de las muestras a las que se aplicó la Combinación 01, en función a lo mostrado en la Fig. 68 del capítulo anterior, se presentan valores de 9.8 °C; 8.6 °C y 16.3 °C. Los cuales se comparan con los valores obtenidos por H. Gutierrez en el 2017, quien al aplicar métodos de preenfriamiento (uso de hielo para disminuir la temperatura del agua de mezcla) y de post enfriamiento (colocación de concreto en diferentes capas, vaciado por celdas), alcanza un promedio de 20°C de gradiente térmico; mostrando así que los valores de gradiente térmico obtenido con la Combinación 01 son inferiores, en 8°C en promedio, a los obtenidos por la combinación aplicada por H. Gutierrez. La diferencia de resultados se da debido a que H. Gutierrez considera un método de control de preenfriamiento como parte de su combinación (uso de hielo en la mezcla), mientras que la Combinación 01 solo incluye métodos de post enfriamiento. Por otro lado, si comparamos los gradientes de la Combinación 02 (29.5 °C y 22.1 °C, Fig. 68 del Capítulo 5) y el resultado de H. Gutierrez (20°C); la combinación de métodos aplicada por H. Gutierrez, ofrece un gradiente menor en 6°C en promedio; esto debido a que la Combinación 02, no tiene como parte de su combinación de métodos la Protección Superficial, la misma que contribuye con el control térmico superficial y a su vez el gradiente térmico del elemento.

Respecto a los costos de la implementación y operación de las combinaciones de método de control térmico; no se encontró bibliografía específica debido a que la mayor parte de los estudios relacionados al concreto masivo, se centran en analizar y comparar los métodos de estudio teórico y práctico del comportamiento térmico. Por ello, a fin de establecer una referencia, a continuación, se comparan elementos con características similares a las que se aplicaron combinaciones diferentes; de la Fig. 72, en las Cimentaciones de Molinos de Bolas, se observa que el costo de la Combinación 01 (\$26'160.37) es menor a la Combinación 02 (\$33'412.78) en \$7'252.41. Es decir, la inversión por metro cúbico de la Combinación 01 (\$13.54/m³) es menor a la Combinación 02(\$17.29/m³), puesto que ambos elementos poseen el mismo volumen (1931.7m³).

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

De los resultados objetivos, se puede determinar que la relación costo - efectividad en los elementos donde se aplicó la Combinación 01 es menor a los elementos donde se aplicó la Combinación 02; en función a lo mostrado en la Fig. 73, para cimentaciones donde se aplicó la Combinación 01, con una inversión de $\$0.49 \pm 0.20$ se controla 1°C del gradiente térmico. Mientras que, para los elementos donde se aplicó la Combinación 02, tales como la Cimentación de Molino de Bolas 01, se obtiene un valor de $\$0.57$ para controlar 1°C del gradiente térmico y en el Muro del Túnel de Recuperación el valor es de $\$2.68$. Por ello, se deduce que la Combinación 01 ofrece mejor ratio costo – efectividad para cimentaciones; no se establece comparativo respecto a otros elementos, como el muro, debido a que solo se analizó un elemento de este tipo con la Combinación 02 y no con la Combinación 01.

Del análisis de costos, de los recursos empleados para la implementación y operación de las combinaciones de métodos; se concluye que el costo por metro cúbico de la Combinación 02 ($\$17.24/\text{m}^3$) es mayor al de la Combinación 01 ($\$13.54/\text{m}^3$), en el caso de la Cimentación de Molino de Bolas. Así mismo el valor más alto de inversión fue de $\$45.8/\text{m}^3$ con la aplicación de la Combinación 02 para el Muro del Túnel de recuperación; por ello se infiere que se incurre en mayores costos para elementos más esbeltos. Por otro lado, se resume que, para el caso de la Combinación 01 de métodos los costos por cada oscilan en $\$13$ a $\$25$, mientras que con la Combinación 02 son de $\$17.24$ y $\$45.86$; por ello se asumen que la Combinación 01 ofrece ratios menores de inversión para ejercer control térmico, en comparación a la Combinación 02.

Del estudio térmico teórico - experimental; se colige que la combinación de tres métodos (Combinación 01) proporciona mayor efectividad que solo aplicar la combinación de dos métodos (Combinación 02). En función a lo indicado en la Fig. 69, la efectividad alcanzada con

la Combinación 01 oscila entre los 36 a 47 °C controlados del gradiente térmico; mientras que con la Combinación 02 el rango es menor, oscilando entre 17 y 30°C.

Recomendaciones

De los elementos estudiados; se recomienda la aplicación de la Combinación 01 para cimentaciones, debido a que mantienen la menor relación de costo – efectividad a diferencia de la Combinación 02, para elementos de cimentaciones con grandes extensiones.

Sugerimos evaluar la relación costo – efectividad para elementos esbeltos, como los Muros, con la aplicación de la Combinación 01; así, se podría establecer un comparativo para este tipo de elementos con ambas combinaciones de métodos de control de gradiente térmico.

Respecto a la elección de combinaciones, el incorporar el método de Protección Superficial optimiza la inversión de costos versus los grados controlados; ya que, siendo el método diferenciado entre ambas combinaciones estudiadas, ha resultado fundamental en los resultados obtenidos. Haciendo que la Combinación 01 sea más efectiva que la Combinación 02.

Se aconseja; no solo realizar el estudio térmico de las Combinaciones 01 y 02 en más elementos; sino también, evaluar los costos asociados para tener mayores referencias de comparación.

Como línea futura de investigación, se invita a verificar la relación costo efectividad de la combinación de métodos de control térmico que incluyan tuberías embebidas

Referencias

- ACI 207.3R-94 Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions* (1994).
- ACI Committee 207, & American Concrete Institute. (2005). *Cooling and insulating systems for mass concrete*. Detroit, Mich.: American Concrete Institute.
- ACI Committee 207, M. C. (2007). *Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 309. (2005). *Guide for consolidation of concrete*. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute (Ed.). (2018). *Report on practices for evaluation of concrete in existing massive structures for service conditions*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute, Comité ACI 318, & Comité ACI 318. (2015). Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-14) y comentario (ACI 318SR-14): (Versión en español y en sistema métrico SI).
- Ayala Millan, Gustavo Amado. (1997). *Agrietamiento en estructuras masivas de concreto por efectos termicos : presa de Zimapan* (Universidad Nacional Autónoma de México). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000248267
- Babul Guixe, P. I. (2013). *Análisis de aplicabilidad en Chile de la guía “pautas para el control de fisuración en hormigón masivo 2008 - Instituto del Concreto de Japón”*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería., Chile.
- Bourchy, A., Barnes, L., Bessette, L., Chalencon, F., Joron, A., & Torrenti, J. M. (2019). Optimization of concrete mix design to account for strength and hydration heat in massive concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 103, 233–241. DOI: <https://DOI.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.005>

- Carrillo Negrete, E. M. (2011). *Evaluación del efecto de la temperatura y del tiempo de fraguado en la resistencia estimada del hormigón mediante madurez* (Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería.). Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería., Chile.
- Chen, Y.-Y. (2019). *Impact of climate on mock-up for mass concrete incorporating pozzolans. Construction and Building Materials*, 199, 771–782. DOI: <https://DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.008>
- Committee 301, A. C. I. (2018). *ACI 301S-16 Especificaciones para Concreto Estructural*. American Concrete Institute.
- Croppi, J. I., & Lazzaroni, M. C. (2014). Modelo de elementos finitos para el análisis térmico de estructuras hormigonadas por etapas. *Obras y proyectos*, 16, 51–58. DOI: <https://DOI.org/10.4067/S0718-28132014000200004>
- De Matos, P. R., Junckes, R., Graeff, E., & Prudêncio Jr, L. R. (2020). *Effectiveness of fly ash in reducing the hydration heat release of mass concrete. Journal of Building Engineering*, 28, 101063. DOI: <https://DOI.org/10.1016/j.jobbe.2019.101063>
- Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)–Sixth Edition (SPANISH)*. (2017). Project Management Institute.
- Guixé, P. I. B., Fuenzalida, A. H., Ariztía, F. D., & Uribe, F. Y. (2013). Análisis de aplicabilidad en Chile de la guía “Pautas para el control de fisuración en hormigón masivo 2008 – Instituto del Concreto de Japón (Tesis de pregrado).
- Gutierrez H. (2017). Variación de la temperatura y su influencia en la fisuración en concretos masivos (Tesis de pregrado).
- Ha, J., Jung, Y., & Cho, Y. (2013). *Development of Automated Curing System for Mass Concrete. 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining; Held in conjunction with the 23rd World Mining Congress, Montreal, Canada*. DOI: <https://DOI.org/10.22260/ISARC2013/0055>

- Han, S. (2020). *Assessment of curing schemes for effectively controlling thermal behaviour of mass concrete foundation at early ages*. *Construction and Building Materials*, 230, 117004. DOI: <https://DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117004>
Iowa State University, Iowa.
- Juntas en las construcciones de concreto ACI-224.2R-95*. (2002). México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Kim, S. G. (2010a). *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement* (p. 2807872) [Master of Science, Iowa State University, Digital Repository].
<https://DOI.org/10.31274/etd-180810-763>
- Klemczak, B. A. (2014). Modelling thermal-shrinkage stresses in early age massive concrete structures – Comparative study of basic models. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(4), 721–733. DOI: <https://DOI.org/10.1016/j.acme.2014.01.002>
- Lawrence, A. (s. f.-a). *A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete* (Thesis doctoral).
- MICHAEL S. MAMLOUK. (2013). *MATERIALES PARA INGENIERIA CIVIL*. Place of publication not identified: NIELSEN BOOKDATA.
- Nili, M., & Salehi, A. M. (2010). *Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete*. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2108–2116. DOI: <https://DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.049>
- Ouyang, J., Chen, X., Huangfu, Z., Lu, C., Huang, D., & Li, Y. (2019). *Application of distributed temperature sensing for cracking control of mass concrete*. *Construction and Building Materials*, 197, 778–791. DOI: <https://DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.221>
- Pasquel E. (1998). *Tópicos de Tecnología del Concreto en el Perú*. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

- Sosa Avendaño, A. (1997). Agrietamiento en estructuras masivas de concreto por efectos térmicos: Presa de Zimapán (Tesis de Maestría). Recuperado de:
https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000248267
- Tasri, A., & Susilawati, A. (2019). *Effect of cooling water temperature and space between cooling pipes of post-cooling system on temperature and thermal stress in mass concrete. Journal of Building Engineering*, 24, 100731. DOI:
<https://DOI.org/10.1016/j.jobbe.2019.100731>
- Townsend, C. L. (1981). *Control of Cracking in Mass Concrete Structures*. Denver: Engineering and Research Centre.
- Valarezo M. (2014). Instrumentación de bloques de concreto masivo para verificar el sistema de enfriamiento, caso práctico. Boletín informativo, ACI Ciudad de México.
- Yan, P., Zheng, F., Peng, J., & Qin, X. (2004). *Relationship between delayed ettringite formation and delayed expansion in massive shrinkage-compensating concrete. Cement and Concrete Composites*, 26(6), 687–693. DOI: [https://DOI.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00060-X](https://DOI.org/10.1016/S0958-9465(03)00060-X)
- Yunchuan, Z., Liang, B., Shengyuan, Y., & Guting, C. (2012). *Simulation Analysis of Mass Concrete Temperature Field. Procedia Earth and Planetary Science*, 5, 5–12. DOI:
<https://DOI.org/10.1016/j.proeps.2012.01.002>
- Zeña M. (2015). Estudio termodinámico teórico - práctico sobre el comportamiento de vaciados de concreto masivo a más de 4 700 m.s.n.m. en la sierra del Perú (Tesis de pregrado).
- Zhu Bofang (2014). *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. Estados Unidos: Elsevier. DOI: <https://DOI.org/10.1016/C2012-0-06038-3>

Anexos

- Anexo 01: Diseño de mezclas 350 kg/cm², a/c=0.367.



A

01_K-CS-221-QA-DM

- Anexo 02: Diseño de mezclas 350 kg/cm², a/c=0.39.



A

02_K-CS-221-QA-DM

- Anexo 03: Planos de Microclima, MB 01 y 02.



A

03_Cim_Mol_Bol_01

- Anexo 04: Hoja Técnica Datalogger



A 04_Hoja Técnica
DataLogger.pdf

- Anexo 05: Análisis del comportamiento térmico BM 01.



A

05_Comportamiento

- Anexo 06: Análisis del comportamiento térmico BB 02.



A

06_Comportamiento

- Anexo 07: Análisis del comportamiento térmico SAG.



A

07_Comportamiento

- Anexo 08: Análisis del comportamiento térmico Cimentación T.R.



A

08_Comportamiento

- Anexo 09: Análisis del comportamiento térmico Muro T.R.



A

09_Comportamiento

- Anexo 10: Análisis de Costos MB 01.

A 10_Análisis de
costos MB01.pdf

- Anexo 11: Análisis de Costos MB 02.

A 11_Análisis de
Costos MB02.pdf

- Anexo 12: Análisis de Costos SAG.

A 12_Análisis de
Costos SAG.pdf

- Anexo 13: Análisis de Costos Cim. T.R.



A 13_Análisis de
Costos Cim. TR.pdf

- Anexo 14: Análisis de Costos Muro T.R.



A 14_Análisis de
Costos Muro TR.pdf

- Anexo 15: Planos de Microclima, SAG.



A
15_Cim_Mol_SAG_02

- Anexo 16: Planos de Muro T.R.



A
16_Cim_Tun_Recp_E