

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Civil



TESIS

Modelamiento numérico de los esfuerzos térmicos en el concreto masivo

Para obtener el título profesional de ingeniero civil.

Elaborado por

Harold Alberto Suárez Torres

 [0009-0009-1859-0487](https://orcid.org/0009-0009-1859-0487)

Asesor

Dr. Hugo Scaletti Farina

 [0000-0001-6479-1508](https://orcid.org/0000-0001-6479-1508)

LIMA - PERÚ

2025

Citar/How to cite	Suarez Torres [1]
Referencia/Reference	[1] H. Suarez Torres “Modelamiento numérico de los esfuerzos térmicos en el concreto masivo” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Suarez, 2025)
Referencia/Reference	Suarez, H. (2025). Modelamiento numérico de los esfuerzos térmicos en el concreto masivo. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Harold Alberto Suárez Torres

hsuarezt@uni.pe

+51 1 402 0131

Dedicatoria

*Para mi madre por estar siempre conmigo,
para mi padre por darme las oportunidades que él no tuvo
y para Zarela por confiar en mí.*

Agradecimientos

Al Dr. Hugo Scaletti Farina por todo el tiempo compartido desde mis épocas de estudiante universitario.

Resumen

Después de vaciar el concreto, es usual colocar mantas humedecidas para controlar la temperatura y prevenir la fisuración en elementos esbeltos. Sin embargo, para elementos masivos es conveniente evaluar la necesidad de metodologías más avanzadas.

Localmente, existen pocas referencias recientes de análisis térmicos para concreto. Sólo se identificó una tesis, Gutiérrez (2017), la que presenta resultados obtenidos con ábacos del ACI207-2R y registros de campo para losas de gran espesor.

En países industrializados, estos análisis usualmente se realizan con el método de elementos finitos (MEF) y están regulados por normativas específicas. En Perú las estructuras que se construyen son cada vez más complejas por lo que se requiere generar la capacidad de conducir análisis detallados, como los propios del concreto masivo.

Este trabajo busca modelar numéricamente la generación de calor en estructuras de concreto masivo que podrían ser construidas en Perú. Para ello, fue necesario reunir los parámetros de análisis, construir modelos numéricos, y evaluar metodologías de control.

El objetivo se logró con cuatro etapas secuenciales: Revisión del marco teórico, análisis de casos con el MEF, comparación con las referencias, y evaluación de metodologías de enfriamiento.

Los resultados obtenidos fueron compatibles con los de campo y validaron los resultados obtenidos con ábacos para una estructura regular. También se evaluaron condiciones complejas como geometría, procedimiento constructivo y metodologías de control. Las tuberías de enfriamiento y el cemento de bajo calor de hidratación destacaron por su eficacia para el control térmico.

Palabras clave — Concreto armado, calor de hidratación, análisis térmico y Elementos Finitos.

Abstract

After pouring the concrete, it is common to place moistened blankets to control temperature and prevent cracking in slender elements. However, for massive elements, it is advisable to evaluate the need for more advanced methodologies.

Locally, there are few recent references to thermal analysis for concrete. Only one thesis was identified, Gutiérrez (2017), which presents results obtained with ACI 207-2R charts and field records for thick slabs.

In industrialized countries, these analyses are usually performed using the finite element method (FEM) and are regulated by specific standards. In Peru, the structures being built are increasingly complex, necessitating the development of the capacity to conduct detailed analyses, such as those for massive concrete.

This work seeks to numerically model heat generation in mass concrete structures that could be built in Peru. To do so, it was necessary to gather analysis parameters, construct numerical models, and evaluate control methodologies.

This objective was achieved through four sequential stages: review of the theoretical framework, case analysis using the FEM, comparison with references, and evaluation of cooling methodologies.

The results obtained were compatible with field results and validated the results obtained with abacuses for a regular structure. Complex conditions such as geometry, construction procedures, and control methodologies were also evaluated. Cooling pipes and low-heat cement stood out for their effectiveness in thermal control.

Keywords — Reinforced concrete, heat of hydration, thermal analysis, and Finite Elements.

Índice

Resumen	iv
Abstract	v
Prólogo	xviii
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	3
1.3 Objetivos del estudio	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 Antecedentes investigativos	7
1.5 Formulación de la hipótesis	7
1.6 Contenido de la tesis	7
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	9
2.1 Generalidades	9
2.1.1 Concreto masivo	9
2.1.2 Recuento de presas en el Perú	9
2.1.3 Desarrollo tecnológico del concreto masivo	9
2.1.4 Generación del calor de hidratación	12
2.1.5 Cambios en el volumen, contracción por secado y generación de tracción	16
2.1.6 Métodos para el control de la temperatura	17
2.1.7 Límites para el ancho de fisuras	18
2.1.8 Modelamiento numérico del flujo de calor en sólidos y esfuerzos generados	18
2.1.9 Método de los elementos finitos	20
Capítulo III. Revisión de la información disponible	24
3.1 Propiedades mecánicas del concreto	24

3.1.1 Módulo de elasticidad	24
3.1.2 Módulo de corte	24
3.1.3 Coeficiente de Poisson	24
3.2 Propiedades térmicas del concreto	24
3.2.1 Coeficiente de dilatación	25
3.2.2 Calor específico	25
3.2.3. Conductividad térmica.....	26
3.2.4 Difusividad térmica	27
Capítulo IV. Aplicaciones prácticas.....	29
4.1 Parámetros de análisis.....	29
4.1.1 Propiedades térmicas	29
4.1.2 Propiedades mecánicas.....	31
4.1.3 Temperatura ambiental	32
4.1.4 Metodologías de enfriamiento seleccionadas	33
4.2 Casos de análisis	34
4.3 Caso 1: Análisis plano de concreto vaciado en roca	35
4.3.1 Descripción del caso	35
4.3.2 Descripción del modelo	36
4.3.3 Sub-casos y resultados del análisis	37
4.3.4 Análisis de resultados	69
4.4 Caso 2: Análisis plano de un túnel.....	72
4.4.1 Descripción del caso	72
4.4.2 Descripción del modelo	72
4.4.3 Sub-casos y resultados del análisis	73
4.4.4 Análisis de resultados	85
4.5 Caso 3: Análisis tridimensional de una losa de cimentación	86

4.5.1 Descripción del caso	86
4.5.2 Descripción del modelo	86
4.5.3 Sub-casos y resultados del análisis	87
4.5.4 Análisis de resultados	111
4.6 Caso 4: Análisis de una presa de tipo arco en concreto armado.....	112
4.6.1 Descripción del caso	112
4.6.2 Descripción del modelo	116
4.6.3 Sub-casos y resultados del análisis	116
4.6.4 Análisis de resultados	148
Conclusiones.....	149
Recomendaciones	152
Referencias bibliográficas	153
Anexos	157

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Porosidad para cementos Portland y puzolánico vs temperatura de curado	2
Tabla 2: Cuadro resumen de antecedentes para el concreto masivo.....	5
Tabla 3: Número de presas en el Perú de acuerdo a su tipología.....	10
Tabla 4: Fineza y calor de hidratación a los 28 días para diferentes tipos de cemento	14
Tabla 5: Cambios de volumen y permeabilidad en el concreto masivo	17
Tabla 6: Anchos de fisura razonables de acuerdo a las cargas de servicio	18
Tabla 7: Valores de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.....	25
Tabla 8: Propiedades térmicas del concreto para varias presas	26
Tabla 9: Coeficiente de dilatación del concreto para varios tipos de agregados	27
Tabla 10: Conductividad térmica del concreto para varios tipos de agregados.....	27
Tabla 11: Difusividad térmica del concreto para varios tipos de agregados.....	28
Tabla 12: Propiedades térmicas del concreto y la roca	30
Tabla 13: Propiedades mecánicas del concreto y la roca.....	31
Tabla 14: Casos y sub-casos analizados.....	34

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Resistencia a la compresión para cementos Portland y puzolánico vs temperatura de curado	2
Figura 2: Incremento adiabático de la temperatura para concretos con 220Kg/m3 de cemento	14
Figura 3: Velocidad de generación de calor para varios módulos de fineza del cemento	15
Figura 4: Velocidad de generación de calor para varios módulos de fineza del cemento	15
Figura 5: Edad de temperatura pico versus ratio de volumen superficie	16
Figura 6: Cuerpo sujeto a la transferencia de calor	18
Figura 7: Generación del calor en el concreto vs el tiempo para cemento convencional	30
Figura 8: Generación del calor en el concreto vs el tiempo para cemento tipo I de EE.UU. ...	30
Figura 9: Generación del calor en el concreto vs el tiempo para cemento tipo I de Corea	31
Figura 10: Generación del calor en el concreto vs el tiempo para cemento tipo IV de Corea	31
Figura 11: Promedio de temperatura para Tumbes	32
Figura 12: Promedio de temperatura para Cusco	32
Figura 13: Promedio de temperatura para Yanagawa (Japón)	33
Figura 14: Promedio de temperaturas para Chachapoyas	33
Figura 15: Descripción de la estructura propuesta y la secuencia constructiva	35
Figura 16: a) Volúmenes declarados en ADINA-Thermal, b) Malla de Elementos Finitos	37
Figura 17: Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h	38
Figura 18: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329	38
Figura 19: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h	39
Figura 20: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h	40
Figura 21: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h	40
Figura 22: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h	41
Figura 23: Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h	42
Figura 24: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329	42
Figura 25: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c) 288h	43

Figura 26: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	44
Figura 27: Reerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	44
Figura 28: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h	45
Figura 29: Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h	46
Figura 30: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329	47
Figura 31: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	47
Figura 32: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	48
Figura 33: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	48
Figura 34: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h	49
Figura 35 Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h	50
Figura 36: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329	51
Figura 37: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	51
Figura 38: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	52
Figura 39: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	52
Figura 40: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h	53
Figura 41 Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h	54
Figura 42: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329	54
Figura 43: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	55
Figura 44: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	56
Figura 45: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	56
Figura 46: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h	57
Figura 47 Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h	58
Figura 48: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329	58

Figura 49: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	59
Figura 50: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	60
Figura 51: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	60
Figura 52: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h	61
Figura 53 Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h	62
Figura 54: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329	62
Figura 55: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	63
Figura 56: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	64
Figura 57: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	64
Figura 58: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h	65
Figura 59 Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h	66
Figura 60: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329	66
Figura 61: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	67
Figura 62: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	68
Figura 63: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h.....	68
Figura 64: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h	69
Figura 65: a) Imagen referencial y b) Esquema de los componentes estructurales	72
Figura 66: a) Malla de elementos finitos, b) Refinamiento de la malla en el recubrimiento	73
Figura 67: Reporte de temperaturas (Celsius) para 18h.....	74
Figura 68: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 142, y 196	74
Figura 69: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	75
Figura 70: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para 18h.....	76
Figura 71: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para 18h	76
Figura 72: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para 18h	77
Figura 73: Reporte de temperaturas (Celsius) para 18h.....	78

Figura 74: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 142, y 196	78
Figura 75: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	79
Figura 76: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para 18h.....	80
Figura 77: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para 18h	80
Figura 78: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para 18h	81
Figura 79: Reporte de temperaturas (Celsius) para 18h.....	82
Figura 80: Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 142, y 196	82
Figura 81: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	83
Figura 82: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para 18h.....	84
Figura 83: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para 18h	84
Figura 84: Reporte de desplazamientos máximos (metros) para 18h	85
Figura 85: Secuencia de vaciados	86
Figura 86: a) Malla de elementos finitos, b) Refinamiento de la malla en los extremos	87
Figura 87: Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior.....	88
Figura 88: Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781	88
Figura 89: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	89
Figura 90: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	89
Figura 91: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	90
Figura 92: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior.....	90
Figura 93: Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior.....	91
Figura 94: Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781	92
Figura 95: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	92
Figura 96: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	93
Figura 97: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	93
Figura 98: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior.....	94
Figura 99: Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior.....	94
Figura 100: Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781	95

Figura 101: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	95
Figura 102: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	96
Figura 103: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior	96
Figura 104: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior.....	97
Figura 105: Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior	98
Figura 106: Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781	98
Figura 107: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	99
Figura 108: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	99
Figura 109: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior	100
Figura 110: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior.....	100
Figura 111: Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior	101
Figura 112: Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781	102
Figura 113: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	102
Figura 114: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	103
Figura 115: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior	103
Figura 116: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior	104
Figura 117: Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior	105
Figura 118: Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781	105
Figura 119: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	106
Figura 120: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	106
Figura 121: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior	107
Figura 122: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior	107

Figura 123: Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior	108
Figura 124: Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781	109
Figura 125: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h.....	109
Figura 126: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior.....	110
Figura 127: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior	110
Figura 128: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior	111
Figura 129: Eje de la presa Chadín	113
Figura 130: Dimensiones del volado central	114
Figura 131: Vista en planta de la presa Chadín	114
Figura 132: Elevación frontal de la presa Chadín	115
Figura 133: Vista 3D de la presa Chadín	115
Figura 134: Malla de elementos finitos a) vista frontal, b) vista lateral, c) vista superior y d) vista inferior.....	117
Figura 135: Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba	119
Figura 136: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	120
Figura 137: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	121
Figura 138: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	122
Figura 139: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba	123
Figura 140: Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba	125
Figura 141: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	126
Figura 142: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	127
Figura 143: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	128
Figura 144: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba	129
Figura 145: Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba	131
Figura 146: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	132

Figura 147: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	133
Figura 148: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	134
Figura 149: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba	135
Figura 150: Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba	137
Figura 151: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	138
Figura 152: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	139
Figura 153: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	140
Figura 154: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba	141
Figura 155: Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba	143
Figura 156: Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	144
Figura 157: Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	145
Figura 158: Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba	146
Figura 159: Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba	147

Lista de símbolos y siglas

°C:	Grados Centígrados
°K:	Grados Kelvin
ACI:	American Concrete Institute
ADINA:	Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis
ASD:	Allowable Strength Design
ASTM:	American Society for Testing and Materials
JSCE:	Japan Society of Civil Engineers
LRFD:	Load and Resistance Factor Design
MEF:	Método de los Elementos Finitos
NATM:	New Austrian Tunneling Method
Pa:	Pascales
RCCM:	Research Center of Computational Mechanics
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
USACE:	States Army Corps of Engineers

Prólogo

Este trabajo trata sobre el análisis térmico de estructuras de concreto masivo, es decir aquellas estructuras de concreto de dimensiones significativamente grandes, que pueden ser afectadas por la generación del calor de hidratación.

La generación de calor depende del diseño de mezcla y particularmente de las características del cemento empleado. Las temperaturas y los esfuerzos que se desarrollan dependen también de la geometría de la estructura, del proceso constructivo, de las condiciones ambientales y de las medidas que se adopten para mitigar los efectos del calor generado.

En la tesis se estudian las diferencias al usar distintos tipos de cemento o al enfriar los agregados o al usar tuberías de enfriamiento para diversas estructuras. En general estas técnicas pueden ser altamente efectivas, en la medida en que se haga previamente un análisis térmico detallado.

Se ha observado que resultados obtenidos con los ábacos del ACI 207.2R-07 pueden ser adecuados para casos geométricamente simples. Sin embargo, con las técnicas de elementos finitos empleadas en esta tesis pueden considerarse fácilmente geometrías más complejas, simular mejor el proceso constructivo y eventualmente estudiar más realísticamente posibles medidas para controlar las temperaturas y los consecuentes esfuerzos.

Se espera que esta tesis contribuya a generar interés sobre el tema y a que se desarrollen investigaciones para mejorar el conocimiento de las propiedades térmicas de los materiales y de las técnicas constructivas en estructuras de concreto masivo.

Capítulo I. Introducción

1.1 Generalidades

La expansión económica de las últimas décadas en el Perú ha venido acompañada por un crecimiento de la inversión en infraestructura. Las estadísticas del consumo de cemento per cápita muestran que este se triplicó entre 2001 y 2014 (Consumo per cápita, 2021). Asimismo, el plan nacional de infraestructura (2022 - 2025) considera un presupuesto 21% mayor al del periodo anterior (2019-2022). Por lo tanto, se puede identificar una tendencia hacia el incremento sostenido de la producción de concreto en el Perú. El plan actual lista 72 grandes proyectos de infraestructura, de los cuales la mayor parte están enfocados en salud, transporte, agua y saneamiento (Ministerio de Economía y Finanzas, 2022). Es importante notar que en este tipo de proyectos se incluye con frecuencia elementos de concreto masivo.

La generación de calor de hidratación en elementos esbeltos de concreto resulta ser un fenómeno manejable en obra con el empleo de técnicas convencionales de curado. Sin embargo, en el caso del concreto masivo, como suele ocurrir en una presa o un bloque de cimentación de gran volumen, es usual que el calor generado tenga un impacto notable en la aparición de fisuras. Controlar la formación de fisuras es necesario para asegurar la durabilidad de los elementos estructurales y la capacidad, en el caso de estructuras de contención. Un ejemplo frecuentemente mencionado cuando se hace referencia al desarrollo del concreto masivo, es el caso de la presa Hoover, construida en la década de 1930 entre los estados de Nevada y Arizona, en los Estados Unidos. Su ejecución impulsó grandemente la innovación en las técnicas constructivas, el control de calidad del concreto y el control de la temperatura. Por ejemplo, por primera vez en un proyecto de esta índole, se limitó el vaciado de concreto a bloques de 1.50m de altura, se construyeron columnas intercaladas para conformar la estructura y se implementaron casi 1000 km de tuberías para circular agua a bajas temperaturas a fin de enfriar el concreto colocado. Sin este tipo de procedimientos la presa hubiera demorado 125 años en alcanzar la temperatura del ambiente (US Bureau of Reclamation, 2015).

La disminución en la resistencia acompañada de un incremento en la porosidad como resultado de haber afrontado temperaturas elevadas durante el curado pueden comprometer seriamente la salud del elemento estructural. Experimentalmente, se ha demostrado que temperaturas superiores a los 70°C son frecuentes en bloques masivos y permanecen por algunas semanas. Por otra parte, se ha identificado en especímenes de pasta cementicia que las muestras curadas a 85°C o más desarrollan un 20% más de porosidad que las muestras

curadas a temperaturas de 22°C (Elkhadiri et al., 2009), ver Tabla 1. El mismo estudio señala que las pastas curadas a temperaturas superiores a 80°C presentan una resistencia notoriamente más baja (Elkhadiri et al., 2009), ver Figura 1.

Tabla 1

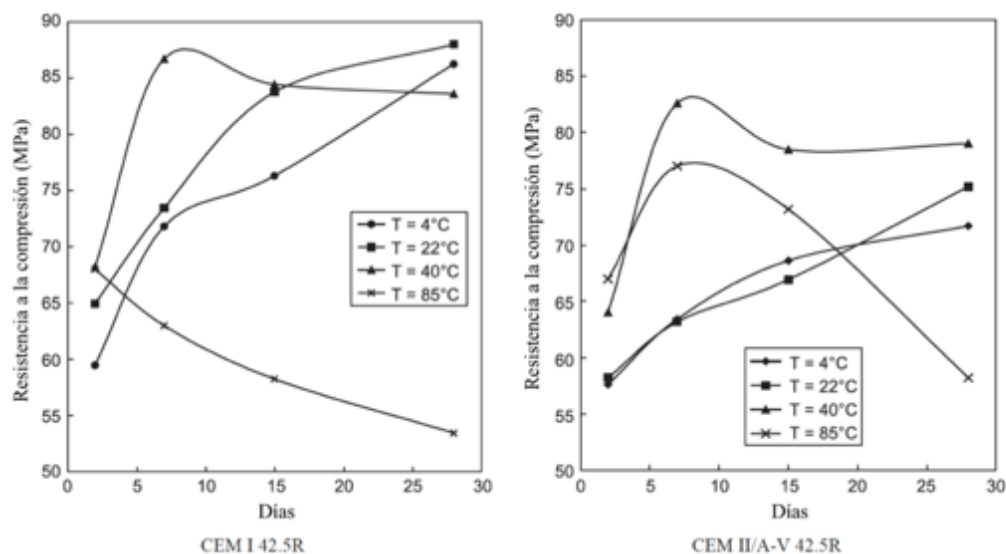
Porosidad para cementos Portland y puzolánico vs temperatura de curado

T (°C)	2 días	28 días
Cemento CEM I 42.5R		
4	17.71	11.98
22	14.47	8.83
40	13.63	7.44
85	14.30	18.95
Cemento CEM II/A – V42.5R		
4	16.47	12.45
22	16.64	10.70
40	13.14	9.30
85	12.53	15.45

Nota: Adaptado de (Elkhadiri et al., 2009)

Figura 1

Resistencia a la compresión para cementos Portland y puzolánico vs temperatura de curado



Nota: Adaptado de (Elkhadiri et al., 2009)

En países industrializados, el control del calor de hidratación es parte de los requerimientos cotidianos para elementos de concreto masivo. En tal sentido se dispone de regulaciones y organizaciones enfocadas en su estudio, las mismas que fueron establecidas varias décadas atrás. Un ejemplo es el comité 207 del ACI, un comité del ACI especializado en concreto masivo, que publica regularmente procedimientos y recomendaciones para estimar y controlar el calor de hidratación. De manera similar, la sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE) ha incluido una sección en su norma de concreto con provisiones enfocadas en la fabricación de elementos masivos. Por otra parte, la academia y la industria privada también han contribuido en el control del calor de hidratación, poniendo a disposición un gran número de plataformas basadas en el método de los Elementos Finitos (MEF). Con estas plataformas es posible modelar con detalle la generación el calor de hidratación, reconocer los patrones de flujo y por ende identificar las zonas que necesitan atención en grandes bloques de concreto. Los modelos numéricos presentados en esta tesis se construyeron en ADINA, una de estas plataformas.

Modelar la generación de calor de hidratación, y eventualmente los mecanismos para controlarlo, requiere conocer algunos parámetros: 1) Las propiedades del material, 2) La temperatura al momento del vaciado, 3) Las condiciones de borde, y 4) La temperatura del ambiente circundante. El ACI, y algunas instituciones similares, ofrecen pautas para la determinación de los tres primeros parámetros. El último parámetro es específico de la localidad y puede contribuir significativamente a elevar o mantener la temperatura al interior del bloque. Considerando la variedad de climas en el Perú, especialmente los que predominan en las zonas más cálidas, se hizo una revisión del mapa climático actual, y las fuentes que disponen registros meteorológicos de las diferentes localidades. Un resumen de la información recolectada está disponible en el Anexo I. Los casos generales, sin ubicación determinada, presentados en esta tesis se evaluaron con las temperaturas correspondientes a Tumbes y a Cusco, como representantes de climas severos. Los otros casos, con ubicación determinada, fueron evaluados con temperaturas obtenidas de los reportes meteorológicos locales.

1.2 Descripción del problema de investigación

La colocación de concreto masivo viene asociada a la necesidad de prevenir esfuerzos elevados que podrían producir fisuración en etapas tempranas del concreto. A pesar de que estas fisuras representan un impacto moderado en el comportamiento del concreto armado, ya que el concreto usualmente se fisura frente a esfuerzos de flexión, la fisuración representa un problema grave para la durabilidad de la estructura. Además, de que es recurrente solicitar

la reparación de dichas fisuras con procedimientos que garanticen devolver las propiedades originales del concreto, y que suelen ser de un costo elevado.

En la actualidad es frecuente aplicar agua corriente o mantas humedecidas en los elementos de concreto recién fabricados. Este procedimiento habitualmente controla las temperaturas en elementos esbeltos, pero no es la solución más razonable para elementos masivos. En bloques de gran espesor, se genera un gradiente de temperatura significativo. Dicho gradiente debe controlarse apropiadamente para evitar la formación de fisuras. Hoy se dispone de una gran cantidad de metodologías para este fin que pueden aplicarse antes o después de la colocación del concreto. Sin embargo, lo más conveniente es elegir la metodología en base a un modelamiento numérico del calor a generarse.

A pesar de que se disponen de métodos aproximados para estimar la temperatura de bloques masivos, como aquellos incluidos en el ACI207-2R (2021), estos frecuentemente resultan limitados. Además, estos métodos no logran representar con el nivel de detalle necesario las características geométricas de la mayoría de estructuras reales, y mucho menos las técnicas de enfriamiento. Por ello, lo ideal es hacer uso de las técnicas basadas en el Método de los Elementos Finitos cuando se requiera la distribución y evolución del calor al interior de un elemento masivo.

En países desarrollados, la construcción habitual de elementos de concreto masivo ha llevado a la formalización de los procesos de análisis del calor de hidratación. Muchos países disponen de estándares enfocados en la fabricación y manejo de este tipo de elementos. Además, el software comercial basado en MEF permite el modelamiento de las propiedades mecánicas y térmicas del concreto, procesos constructivos y las metodologías de control de la temperatura. Desde este punto de vista, en los países que hace décadas cuentan con una producción sostenida de concreto masivo, a diferencia del Perú, modelar el calor de hidratación es una práctica bien establecida.

La tabla 2 muestra un resumen de antecedentes revisados para el concreto masivo. Además de un uso cotidiano de análisis térmicos basados en MEF, lo cual no tiene limitación geográfica, se evidencia la disponibilidad de normativas y difusión de propiedades de los materiales a nivel local. Por lo mencionado líneas arriba, en el Perú existe la urgencia de generar la capacidad de analizar numéricamente y controlar el calor de hidratación en elementos de concreto masivo. Por lo tanto, es necesario investigar y difundir las propiedades térmicas (generación de calor, conductividad y coeficiente de expansión térmica) de los cementos locales y agregados, generar una normativa local, compartir casos de análisis validados en campo y entrenar a los profesionales en el análisis térmico asistido con FEM.

Tabla 2

Cuadro resumen de antecedentes para el concreto masivo

Autor y año	Título	Factores estudiados / Información disponible
ACI Committe 207 (2020)	Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete	• Metodologías de control térmico: pre y post-enfriamiento • Ejemplos de cálculo para el diseño
ACI Committe 207 (2007)	Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete	• Propiedades mecánicas y térmicas del concreto, específicas para la producción de Estados Unidos • Estimación de temperaturas y esfuerzos • Ejemplos de cálculo con ábacos
ACI Committe 207 (2020)	Guide to Hot Weather Concreting	• Efectos de la temperatura en el concreto • Especificaciones para climas cálidos
ACI Committe 207 (2021)	Mass Concrete Guide	• Propiedades mecánicas y térmicas del concreto, específicas para la producción de Estados Unidos • Metodologías de control térmico e instrumentación, a nivel introductorio
ADINA Inc. (2021)	ADINA User Interface Command Reference Manual Volume II: Thermal.	• Declaración de propiedades mecánicas y térmicas de los materiales en ADINA • Declaración de condiciones de borde, elementos de convección y cargas térmicas • Post-procesamiento de resultados
ADINA Inc. (2021)	ADINA Primer	• Casos de análisis para diferentes condiciones (geometría, materiales, condiciones de borde, cargas térmicas, proceso constructivo) • Ejemplos de cálculo con el MEF
Angelucci (2018)	Concrete hydration temperatures for the design of crack-width reinforcement in water- retaining structures	• Mediciones de temperaturas durante la fabricación de muros de contención • Contraste con valores teóricos obtenidos para materiales y normas de Sudáfrica • Evaluación de la necesidad de actualizar los códigos sudafricanos en base a las mejoras tecnológicas de los cementos
Bathe (2014)	Finite Element Procedures (2ª edición)	• Fundamentos teóricos del MEF • Modelamiento del flujo del calor en sólidos
Chao. & Yang. (2017)	Optimization of Cooling Pipes Inside Mass Concrete Bridge Pile	• Eficiencia de las tuberías de enfriamiento para el pilar de un puente en China • Influencia del flujo y configuración de la malla

RCCM Inc (2014)	ASTEA MACS for Windows (8ª edición)	• Pre y post-procesamiento en el entorno de ASTEA MACS, un programa basado en MEF • Catálogos con propiedades mecánicas, térmicas y datos meteorológicos, específicos para el Japón
Elkhadiri et al. (2009)	Effect of curing temperature on cement hydration	• Influencia de la temperatura en la resistencia a la compresión y a la porosidad en morteros • Resultados experimentales para cementos de tipo I y II producidos por Holcim en España
Gutiérrez (2017)	Variación de la temperatura y su influencia en la fisuración en concretos masivos.	• Estimación de temperaturas y esfuerzos en base a los ábacos del ACI 207 • Instrumentación y medición de temperaturas durante la fabricación de una estructura real • Contraste de resultados teóricos vs reales
Japan Society of Civil Engineers (2007)	Standard Specifications for concrete structures	• Especificaciones para el diseño de mezcla, fabricación, curado y control de calidad del concreto masivo • Formulaciones simplificadas para estimar la temperatura y los esfuerzos en campo
Soo (2010)	Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement	• Influencia del calor de hidratación en las temperaturas pico y los esfuerzos • Contraste de resultados teóricos del MEF con mediciones reales en una estructura regular • Propiedades térmicas en base a ensayos de laboratorio para cementos de tipo I y IV producidos en Corea y en Estados Unidos
Yang et al. (2020)	Discussion on Temperature Control Method of Cooling Water Pipe for Mass Concrete Construction	• Influencia de las tuberías de enfriamiento en la temperatura, esfuerzos y desplazamientos • Resultados teóricos basados en el MEF para una presa de concreto, especificaciones de materiales producidos en China

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Analizar numéricamente la generación de calor de hidratación en diversos tipos de estructuras de concreto masivo que podrían ser construidas en el Perú.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir las propiedades necesarias para modelar el problema, tanto del concreto como del medio en el que se emplazará.
- Analizar con el MEF la generación y el flujo del calor de hidratación en algunas estructuras típicas de concreto masivo, y evaluar su integridad en términos de temperaturas máximas y de esfuerzos.
- Evaluar el impacto que tienen algunas de las metodologías de pre y post-enfriamiento en la temperatura de los elementos de concreto masivo.
- Contrastar los resultados de los análisis numéricos, realizados en base a la información disponible, con los resultados experimentales, tomados en vaciados monitoreados.

1.4 Antecedentes investigativos

En el Perú, la experiencia en el análisis térmico de estructuras de concreto masivo es limitada. En una revisión de las tesis presentadas en la facultad de ingeniería civil de la Universidad Nacional de Ingeniería sólo se identificó un trabajo que aborda el tema como foco central. La tesis de Gutiérrez (2017), titulada: “Variación de la temperatura y su influencia en la fisuración en concretos masivos”, presenta los resultados obtenidos con las fórmulas sugeridas por el ACI207-2R (2021) para la determinación de las temperaturas en el interior de losas de gran espesor. Al observarse diferencias importantes con los valores medidos en obra, se evidencia la necesidad de realizar análisis más detallados, como el uso de modelos de elementos finitos.

1.5 Formulación de la hipótesis

El MEF permite modelar la generación y el flujo de calor en estructuras de concreto masivo, siendo también posible considerar los procedimientos habitualmente usados para controlar la temperatura.

1.6 Contenido de la tesis

En este trabajo se hace énfasis en aquellos elementos que califican como concreto masivo. Especialmente en la generación del calor de hidratación y los procedimientos numéricos para determinar los esfuerzos que podrían generar fisuración. También se presentan resultados del análisis para situaciones hipotéticas simplificadas, así como

situaciones reales de proyectos en ingeniería civil. Para este fin se ha organizado este trabajo de la siguiente manera:

En el capítulo I, Introducción, se tratan brevemente la justificación de este trabajo y la organización del mismo.

En el capítulo II, Marco Teórico y Conceptual, se presenta un recuento histórico de los métodos utilizados para controlar el calor de hidratación en concreto masivo. Asimismo, se profundiza en los principales aspectos teóricos que respaldan los métodos para análisis térmicos. Específicamente, se revisa la generación de calor de hidratación, la transferencia de calor en el concreto y los métodos numéricos disponibles para el análisis de flujo de calor y la generación esfuerzos.

En el capítulo III, se recopila información disponible de los parámetros relevantes para los análisis térmicos (por ejemplo, conductividad térmica del concreto).

En el capítulo IV, se presentan algunos casos resueltos con las metodologías descritas en el capítulo II, utilizando parámetros de entrada recogidos en el capítulo III. Los análisis se realizaron con ADINA, un programa basado en el MEF, haciendo uso de sus módulos especializados en análisis térmicos y estimación de esfuerzos. Los casos presentados corresponden a situaciones representativas del concreto masivo. Adicionalmente se presentan algunas aplicaciones de las metodologías de pre y post-enfriamiento. En el caso 3, losa de cimentación, se comparan los resultados obtenidos por el MEF con los obtenidos de las ecuaciones simplificadas del ACI-207 y los registros de Gutiérrez (2017).

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Generalidades

2.1.1 Concreto Masivo

El ACI 116 R (2000) presenta la siguiente definición para el concreto masivo: “Cualquier volumen de concreto con dimensiones lo suficientemente grandes como para requerir medidas que hagan frente a la generación del calor de hidratación del cemento y al cambio volumétrico que lo acompaña, a fin de prevenir la fisuración.”

Especialmente en bloques grandes, se puede apreciar que la generación del calor de hidratación produce una variación térmica importante. Este calor inicialmente expande el bloque, pero cuando el calor cesa, inicia la contracción del bloque. Este fenómeno, acompañado de restricciones para un libre desplazamiento, frecuentemente originará fisuras. Además, temperaturas por encima de los 70°C tienen un impacto negativo en la resistencia del concreto y tienden a incrementar la porosidad (Imad et al 2009). Es por ello que el calor de hidratación que no se atiende adecuadamente compromete el monolitismo del bloque y la durabilidad del mismo.

Existe un grupo importante de obras de infraestructura que requieren de elementos masivos de concreto. Entre ellos se tienen muros, túneles, pilares, estribos de puentes, etc. Sin embargo, las presas de concreto son probablemente los cuerpos más significativos dentro de este grupo y su desarrollo ha demandado abundante innovación tanto para el análisis térmico como para el control de la temperatura.

2.1.2 Recuento de presas en el Perú

Según el inventario nacional de presas, en el Perú se cuenta con 743 presas (ANA 2015). De acuerdo a la Tabla 2, alrededor del 40% se construyeron con concreto o mampostería, siendo la gran mayoría presas de gravedad. A pesar de ello, se cuentan algunos casos resaltables de presas de concreto armado, siendo probablemente la presa El Frayle la más emblemática, debido a sus 74 m de altura y su doble curvatura. Otro caso importante es el de la presa Tablachaca, con 80m de altura, completada en 1982.

2.1.3 Desarrollo tecnológico del concreto masivo

A inicios del siglo pasado la producción de concreto se hacía de manera empírica, con poca o nula estandarización de los materiales y un mezclado manual (ACI-207, 1R-05). Con el paso de las décadas se ha logrado automatizar el proceso de fabricación e introducir

alternativas para el cemento Portland al igual que una gran cantidad de aditivos capaces de modificar sustancialmente las características del concreto.

Tabla 3

Número de presas en el Perú de acuerdo a su tipología

N°	Tipología	N° de presas
1	Presas de gravedad de concreto o mampostería. Se incluyen las presas arco - gravedad y las de concreto armado.	294
2	Presas de materiales sueltos (homogéneas, zonificadas, con núcleo de material impermeable).	249
3	Presas de enrocado y/o materiales sueltos con pantalla de concreto o de acero.	29
4	Presas de contrafuertes.	5
5	Presas mixtas (de gravedad y dique de material suelto).	3
6	Presas de arco - gravedad.	4
7	Presas de bóveda.	1
8	Otros.	45
9	Presas de relaves.	113

Fuente: Tomado de Autoridad Nacional del Agua (2015)

Debido a que los casos de presas en el Perú son limitados, se hizo una revisión de los casos realizados en los Estados Unidos, a fin de poder documentar mejor el desarrollo del concreto masivo. Al día de hoy, en Estados Unidos se cuentan 91,827 presas de acuerdo a su propio inventario, de las cuales más de 3000 fueron construidas en concreto (USACE 2024). Una selección de los hitos más significativos en el desarrollo tecnológico, tomados de la Guía de Concreto masivo del ACI (ACI 207.1R-05), se presenta a continuación:

Antes de 1900. En general, los cementos frecuentemente tenían impurezas, al igual que los agregados, y los diseños de mezcla conocidos variaban grandemente. Además de ello se desconocía la importancia de la relación agua cemento, por lo que no se controlaba la cantidad de agua utilizada en la fabricación y la consistencia se evaluaba visualmente. No se regulaba el volumen colocado con juntas de contracción y usualmente se adicionaba rocas dentro de la mezcla y en general los volúmenes alcanzaban unos pocos cientos de metros cúbicos al día.

Sin embargo, existen algunas referencias de presas que empezaron a estandarizar el proceso de fabricación y el control de calidad. Un ejemplo de estos, corresponde a la presa de Lower Crystal Springs (California, EE.UU.). La construcción de esta presa de 47m de altura, completada en 1890, registra el establecimiento de límites para la cantidad de agua suministrada en la fabricación, especificación de forma y tamaño de los bloques a fabricarse, compactación con pisones y la proporción de cobertura del concreto fresco contra el sol (ACI-207, 1R-05).

1900 – 1930. Se observó poco desarrollo del requerimiento para el cemento Portland, con la excepción de un requerimiento más estricto del módulo de fineza y límites para el contenido de magnesio y pérdida por ignición. Sin embargo, se puso foco en la determinación de las propiedades de los agregados y el diseño de mezcla. Duff Abrams y su equipo establecieron la relación entre la resistencia y la proporción de agua-cemento. A pesar de que esta relación se publicó en 1918, la regulación del agua en la fabricación tardó alrededor de una década en establecerse. A la par tomaron relevancia la ejecución de la prueba de revenimiento, más conocida como la prueba del cono de Abrams, y la toma de muestras cilíndricas para determinar la resistencia a la compresión.

Durante este periodo, dejó de utilizarse el concreto ciclópeo. A la vez, que no hubo un avance significativo en el desarrollo de aditivos del concreto o la inclusión de alternativas al cemento Portland. Un par de excepciones corresponden a la presa Elephant Butte (New Mexico, EE.UU.), en donde se utilizó cemento combinado con granito pulverizado finamente, y la presa Big Dalton (California, EE. UU.) en donde se reemplazó 20% del contenido de cemento por pumicita, un tipo de puzolana (ACI-207, 2005).

1930 – 1970. En este periodo se acelera la inserción del concreto masivo con la ejecución de varias presas de tamaño significativo. Para este fin se introdujeron el uso de grúas, cables transportadores y trenes con la capacidad de cargar grandes contenedores con concreto fresco. La fabricación de concreto masificó el pesado de los materiales y la medición del volumen de agua. Se mejoró la trabajabilidad del concreto con el uso de puzolanas, inserción de aire y aditivos químicos. También se introdujeron sistemas para el vibrado.

Se registró que concretos de composición similar expuestos al mismo ambiente podían presentar diferencias importantes en términos de durabilidad. Una revisión de la información disponible encontró que los cambios obedecían a cambios térmicos durante la fabricación. En 1930, se organizó el comité 207 del ACI, con la tarea de investigar las propiedades del concreto

masivo y los factores que podían afectarlas. Alrededor de 1950, Bogue y sus investigadores lograron identificar los componentes del cemento y sus contribuciones al calor de hidratación y resistencia.

La presa Hoover impulsó la investigación de los factores que influyen en la generación del calor de hidratación, como son las características del cemento, el tamaño del agregado y la temperatura de curado. Además de ello se introdujo el uso de cementos de bajo calor de hidratación y la utilización de tuberías embebidas para enfriar la masa de concreto a través de la circulación de agua a bajas temperaturas. Como podría esperarse, la presa Hoover también demandó una mejora en los sistemas de transporte del concreto. En los años posteriores a la construcción de la presa Hoover, se introdujeron diversos tipos de cementos puzolánicos y aditivos reductores de agua.

1970 – actualidad. Se continúa utilizando la mayoría de métodos desarrollados en el periodo anterior. Por otra parte, se ha introducido el concreto rolado, que se ha consolidado como el método constructivo predominante para presas. Además de observarse el desarrollo de muchos tipos de aditivos que permiten una trabajabilidad y versatilidad sin precedentes, y la introducción elementos prefabricados para construir bajo el agua.

El Anexo II incluye información tomada del comité ACI-207 relativa a los diseños de mezcla utilizados, proporciones típicas de agua-cemento y características de los agregados en presas importantes construidas durante el siglo pasado.

2.1.4 Generación del calor de hidratación

Entre los principales factores que contribuyen a la generación de calor y que determinan la difusión de mismo se pueden distinguir dos tipos. 1) factores intrínsecos: geometría del elemento, aglutinante, y el diseño de mezcla; 2) factores extrínsecos: encofrado y aislamiento, condiciones ambientales y temperatura del concreto, provisión de juntas de construcción, secuencia constructiva, y juntas de expansión (Angelucci, 2018).

En el caso del cemento Portland, el proceso de endurecimiento es gobernado por reacciones exotérmicas capaces de expandir el concreto. Varios de los componentes del cemento convencional aportan al calor de hidratación, siendo los mayores contribuyentes: el aluminato tricálcico (Al_2O_3) con 207 cal/g, limo libre (óxidos de calcio remanentes) con 279

cal/g y silicato di cálcico (C_2S) con 60 cal/g (Pacheco-Torgal, 2013). Aproximadamente, un 50% de este calor es generado en los primeros tres días y hasta un 80% en los primeros ocho días (Pacheco-Torgal, 2013).

El uso de puzolanas o cenizas volantes logra reducir o modificar las velocidades con la que el calor de hidratación se genera. El impacto final dependerá de la cantidad de puzolanas utilizadas y las características que posea. La contribución de las cenizas volantes al calor de hidratación en etapas tempranas es equivalente al 15 - 35% que generaría la misma cantidad de cemento (ACI 207.2R-95).

El comité 207 del ACI, ha compilado información experimental de cómo la naturaleza del aglutinante, la temperatura del ambiente y las proporciones del elemento afectan la generación de calor. Además del tipo de cemento, la fineza del cemento también puede incrementar la velocidad con la que se gana calor en los primeros días, aunque el calor total generado no variará. En la tabla 3, se puede apreciar las variaciones de fineza para cada tipo de cemento y el calor de hidratación generado durante los 28 primeros días luego de la colocación. La figura 2 muestra la evolución del incremento térmico con los días para 4 tipos de cemento para condiciones adiabáticas, i.e. sin intercambio de calor con el exterior. La figura 3 muestra los resultados obtenidos para la generación del calor en pasta de cemento para varios módulos de fineza. Un efecto similar, se puede observar cuando las temperaturas de colocación se incrementan: Se nota un incremento acelerado de la temperatura en los primeros días. La figura 4 muestra los efectos de variar la temperatura de colocación para cemento de Tipo I en la velocidad con la que se gana el calor de hidratación. Finalmente, la proporción volumen superficie también afecta la velocidad con la que el calor se gana, como se puede apreciar en la figura 5.

El calor de hidratación deberá diseminarse a través del cuerpo de elemento fabricado. En una etapa temprana se espera una expansión térmica que será seguida de una contracción, causante de esfuerzos de tensión. Cuando la construcción se produce en condiciones restringidas, por parte de las armaduras o por restricciones externas, se podrá esperar la aparición de fisuras originadas por tensión (Ottazzi, 2011).

Tabla 4

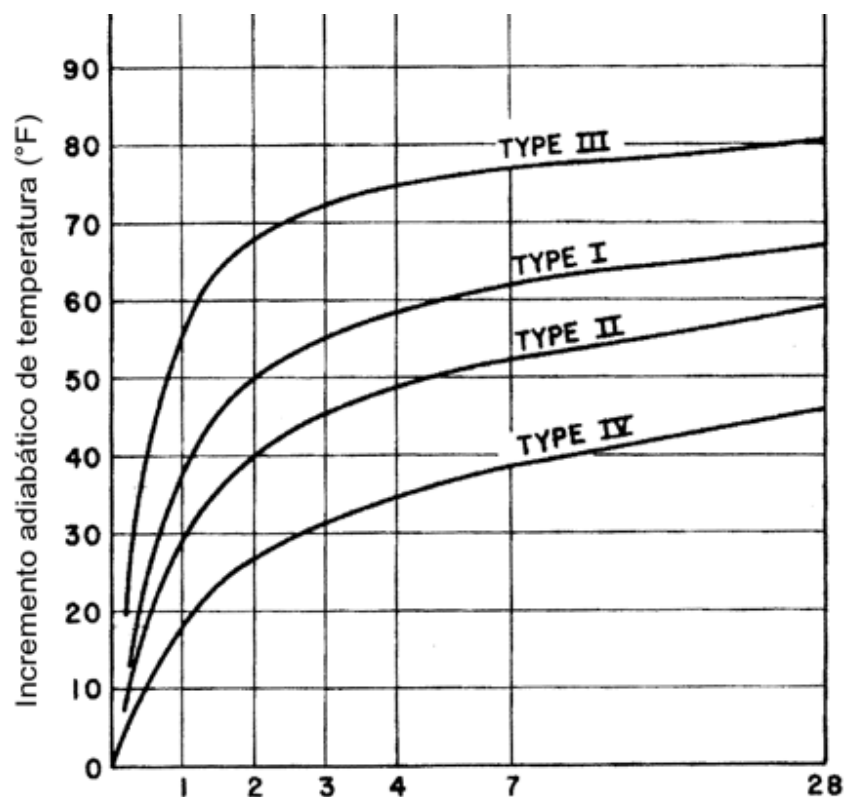
Fineza y calor de hidratación a los 28 días para diferentes tipos de cemento

Tipo de Cemento	Fineza – ASTM C115 (cm ² /g)	Calor de hidratación a los 28 días (Cal/g)
I	1790	87
II	1890	76
II	2030	105
IV	1910	60

Fuente: Adaptado de ACI 207.2R-95

Figura 2

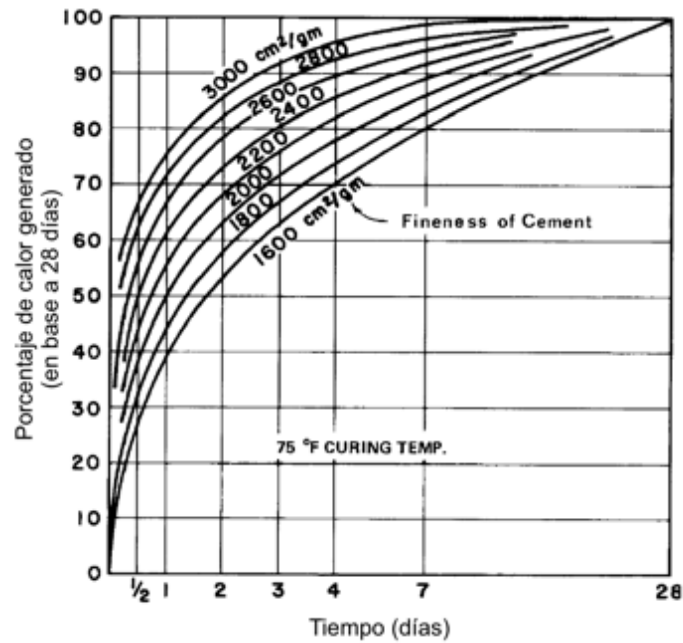
Incremento adiabático de la temperatura para concretos con 220Kg/m³ de cemento



Fuente: Tomado de ACI 207.2R-95

Figura 3

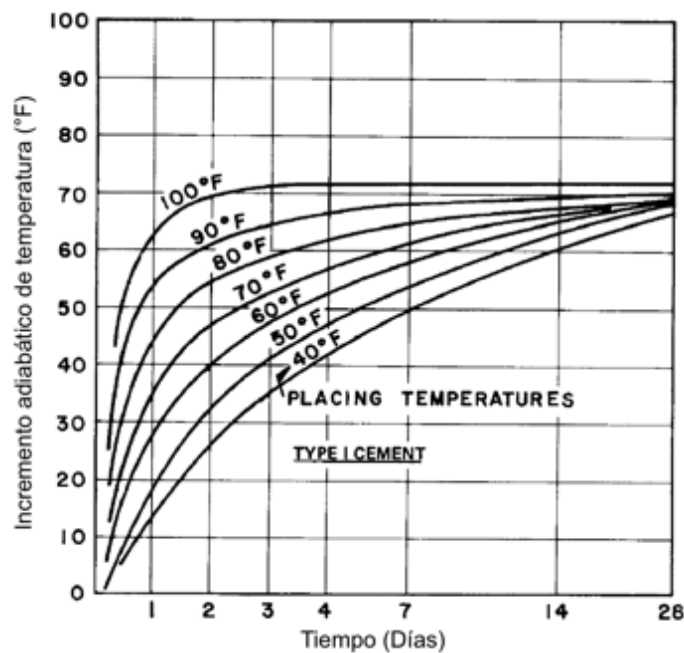
Velocidad de generación de calor para varios módulos de fineza del cemento



Fuente: Tomado de ACI 207.2R-95

Figura 4

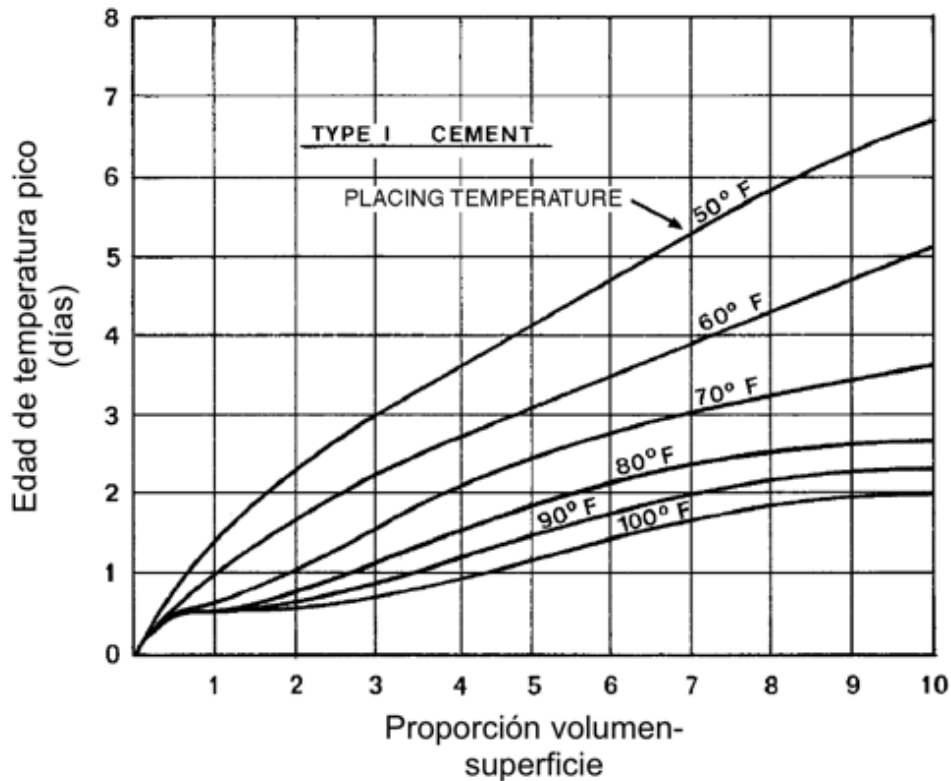
Velocidad de generación de calor para varios módulos de fineza del cemento



Fuente: Tomado de ACI 207.2R-95

Figura 5

Edad de temperatura pico versus ratio de volumen superficie



Fuente: Tomado de ACI 207.2R-95

2.1.5 Cambios en el volumen, contracción por secado y generación de tracción

De acuerdo al ACI 207.1R-05, los cambios en el volumen del concreto obedecen a cuatro causas principales: 1) Cambios en el contenido de humedad, 2) Cambios en la temperatura, 3) Reacciones químicas, 4) Esfuerzos por cargas aplicadas.

La contracción por secado ocurre principalmente por la pérdida de humedad durante el proceso de secado. Dicho proceso puede tardar unas cuantas semanas, retrayendo el concreto en alrededor de 1% en volumen (ACI 207.1R-05). Valores representativos de la contracción por secado están disponibles en la tabla 4.

Por otra parte, los esfuerzos de tensión obedecen a 5 factores: 1) Gradiente de temperatura, 2) Coeficiente de expansión térmica, 3) Módulo de elasticidad, 4) Creep, o fluencia, 5) restricciones a la retracción (ACI 207.1R-05).

Tabla 5

Cambios de volumen y permeabilidad en el concreto masivo

Estructura	Cambio autógeno de volumen		Contracción de secado	Permeabilidad m/s/m
	90 días, millonésimas	1 año, millonésimas	1 año, millonésimas	
Hoover	--	--	-270	1.83×10^{-13}
Grand Coulee	--	--	-420	--
Hungry Horse	-44	-52	-520	5.45×10^{-13}
Canyon Ferry	+6	-37	-397	5.69×10^{-13}
Monticello	-15	-38	-998	2.42×10^{-12}
Glen Canyon	-32	-61	-459	5.33×10^{-13}
Flaming Gorge	--	--	-496	3.27×10^{-13}
Yellowtail	-12	-38	-345	5.81×10^{-12}
Dworshak	+10	-8	-510	5.59×10^{-12}
Libby	+3	+12	-480	1.38×10^{-12}
Lower Granite	+4	+4	--	--

Fuente: Tomado de ACI 207.1R-05

2.1.6 Métodos para el control de la temperatura

Los métodos de enfriamiento suelen agruparse en pre-enfriamiento, es decir fruto de un manejo del concreto y sus constituyentes previos a la colocación, que ya es una práctica estándar en climas cálidos, y post-enfriamiento, aquellos métodos a aplicarse posteriormente a la colocación del concreto fresco. Es frecuente que en la fabricación de bloques grandes se utilicen ambos tipos de métodos. El primer registro de pre-enfriamiento de los materiales se atribuye a la presa Norfolk (Arkansas, EE.UU.), en la que se introdujo el enfriamiento del agua para la fabricación con la inclusión de hielo, logrando reducirse 5.6°C de la temperatura inicial (ACI-207 2005). Además de ello se ha logrado reducir la temperatura de los agregados con aire frío y agua fría, y más recientemente por saturación en vacío y nitrógeno líquido (ACI-207 2005). Uno de los primeros ejemplos en los que se registró la eficiencia del post-enfriamiento corresponde a la presa Glen Canyon, completada en 1963. En este caso, la temperatura llegaba a superar los 38°C , pero se logró mantener el concreto por debajo de los 24°C con el uso de tuberías embebidas (ACI-207 2005).

Algunos ejemplos numéricos de la implementación de los métodos de pre-enfriamiento y post-enfriamiento en campo se presentan en el capítulo IV.

2.1.7 Límites para el ancho de las fisuras

Históricamente se ha tratado de limitar el tamaño de las fisuras en el concreto para incrementar su durabilidad. La tabla 5 muestra los valores recomendados por el ACI 224R de acuerdo a las cargas de servicio.

Tabla 6

Anchos de fisura razonables de acuerdo a las cargas de servicio

Condición de Exposición	Ancho de fisura	
	In	Mm
Aire seco o membrana protectora	0.016	0.41
Humedad, aire húmedo, suelo	0.012	0.30
Productos químicos descongelantes	0.007	0.18
Agua de mar y rocío de agua de mar, humedecimiento y secado	0.006	0.15
Estructuras para retención de agua	0.004	0.10

Fuente: Tomado de ACI 224.R-01

2.1.8 Modelamiento numérico del flujo de calor en sólidos

Las ecuaciones que se muestran a continuación para definir el flujo de calor en sólidos se tomaron de Bathe (2006). Estas ecuaciones son las mismas que están implementadas en el módulo de análisis térmico de ADINA.

De acuerdo a esta solución, se supone que el cuerpo satisface la ley de Fourier para la transferencia de calor. Refiriéndose a un material isotrópico:

$$q_x = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (1)$$

Donde:

- q_x , q_y y q_z son las componentes de flujo de calor por unidad de área en cada dirección
- k es la conductividad térmica
- θ es la temperatura del cuerpo

Considerando el equilibrio del flujo de calor en el interior del cuerpo se obtiene:

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + Q \quad (2)$$

Donde:

- c es el calor específico del material (la cantidad de calor necesaria para incrementar en un grado la temperatura de una unidad de masa)
- ρ es la densidad (masa/volumen)
- Q representa el calor generado por unidad de volumen

Además de definirse las condiciones iniciales, en la superficie del cuerpo deben cumplirse condiciones de borde. En el conjunto de puntos S_θ se conoce la temperatura:

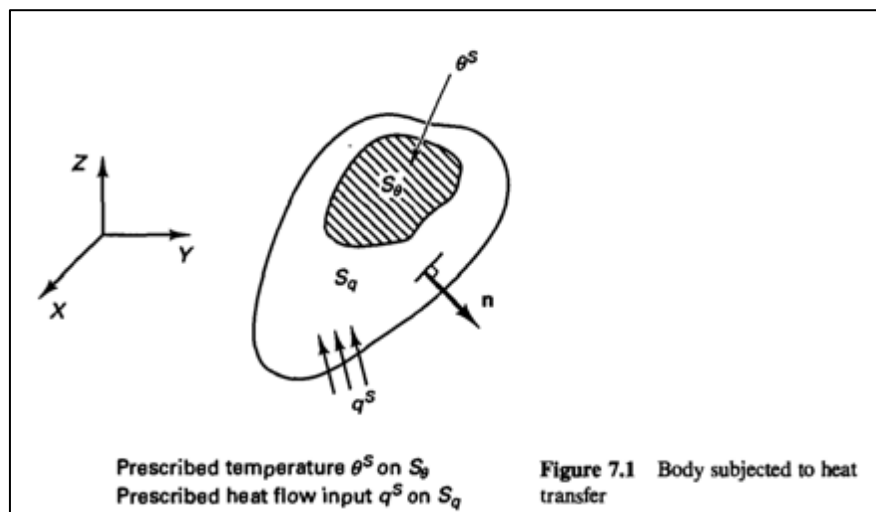
$$\theta = \bar{\theta}^s \quad (3)$$

Estas condiciones se denominan *esenciales*, puesto que es indispensable tener una condición de borde de este tipo en por lo menos un punto. En el resto de la superficie, S_q , se tienen condiciones de borde *naturales*, de la forma:

$$k \frac{\partial \theta}{\partial n} = \bar{q}^s \quad (4)$$

Figura 6

Cuerpo sujeto a la transferencia de calor



Fuente: Tomado de Bathe (2006)

En estas expresiones:

- $\bar{\theta}^s$ son las temperaturas conocidas en los puntos (no necesariamente continuos) de la superficie S_θ , como se indica esquemáticamente en la figura 6
- k es la conductividad térmica del material
- n representa el vector normal a la superficie, apuntando hacia afuera
- $\bar{q}^s$ es el flujo de calor en la superficie S_q

Como casos particulares de la forma indicada en la ecuación (4) cabe mencionar:

Condiciones de borde de convección:

$$\bar{q}^s = h(\bar{\theta}_e - \theta) \quad (5)$$

Donde:

- h es el coeficiente de convección, que depende de las características de la superficie (y podría ser variable con la temperatura).
- $\bar{\theta}_e$ es la temperatura del ambiente, y
- θ temperatura en el punto de la superficie S_q considerado

Condiciones de borde de radiación

Se considera

$$\bar{q}^s = \kappa(\bar{\theta}_r - \theta) \quad (6)$$

Donde:

- $\bar{\theta}_r$ es la temperatura de la fuente irradiante
- κ es un coeficiente que depende de las temperaturas absolutas, las características de los materiales y las condiciones geométricas
- θ temperatura en el punto de la superficie S_q considerado

2.1.9 Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos es una herramienta avanzada que permite obtener soluciones aproximadas para las ecuaciones en derivadas parciales que representan un proceso físico (Barkanov, 2001). En contraste con los procesos de diferencias finitas, en los que se aproximan los operadores de derivación, los métodos de elementos finitos se basan en

aproximaciones para las funciones incógnita. Una ventaja de los elementos finitos es la facilidad relativa con la que se tratan las condiciones de borde.

El medio estudiado se considera dividido en subregiones o elementos de tamaño finito, en cada uno de los cuales se hacen aproximaciones locales para las funciones incógnita. Habitualmente se trata de interpolaciones polinómicas de los valores nodales, con lo que la solución queda expresada en términos de un número finito de parámetros. Sobre la base de una reformulación débil de las ecuaciones diferenciales, como el principio de temperaturas virtuales o en el caso del análisis estructural el principio de trabajos virtuales, o bien utilizando un principio variacional equivalente, como el principio de mínima energía potencial, se puede entonces plantear un sistema de ecuaciones que permite determinar los referidos parámetros. Tratándose de un problema estacionario se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas; en cambio si las ecuaciones diferenciales incluyen derivadas respecto a tiempo lo habitual es obtener un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, típicamente resueltas por diferencias finitas.

La solución por el método de los elementos finitos requiere decisiones relativas al tipo de elementos, la generación de una malla, así como la representación de las condiciones de borde y de carga (Bathe, 2006), de las que depende la precisión en los resultados.

En los análisis térmicos que se presentan más adelante, la función incógnita es la temperatura, es decir un escalar. En cada elemento se aproxima la temperatura, θ , expresándola en función de los valores en los nudos directamente ligados al elemento, agrupados en una matriz columna $\mathbf{a}(t)$:

$$\theta = \mathbf{N} \mathbf{a} \quad (7)$$

Con la restricción $\theta = \bar{\theta}^S$ en S_θ . En esta tesis se emplearon elementos bidimensionales con 9 nudos (elementos de Lagrange) o tridimensionales con 27 nudos, en ambos casos con interpolaciones cuadráticas.

Derivando la expresión (7) se obtienen las componentes de gradiente:

$$\nabla \theta = \mathbf{B} \mathbf{a} \quad (8)$$

Y a partir de estas las componentes de flujo de calor:

$$\mathbf{q} = -k \nabla \theta = -k \mathbf{B} \mathbf{a} \quad (9)$$

Con las aproximaciones de la forma indicada en la ecuación (7) y sus consecuencias (8) y (9), se convierte la ecuación en derivadas parciales (2) en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\mathbf{C} \dot{\mathbf{a}} + \mathbf{H} \mathbf{a} = \mathbf{f}(t) \quad (10a)$$

Donde las matrices $\mathbf{C}$, $\mathbf{H}$ y $\mathbf{f}$ se obtienen ensamblando los aportes de los elementos:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T c \rho \mathbf{N} d\Omega \\ \mathbf{H} &= \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T k \mathbf{B} d\Omega - \int_{S_q} \mathbf{N}^T h \mathbf{N} dS \\ \mathbf{f} &= \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T Q(t) d\Omega + \int_{S_q} \mathbf{N}^T h \bar{\theta}_e dS \end{aligned} \quad (10b)$$

Si las propiedades de los materiales son constantes, las ecuaciones diferenciales (10) son lineales, que es el caso tratado en esta tesis, y la solución más eficiente se basa en una descomposición modal. Para el caso no lineal convendría realizar la integración directa con el método implícito (e incondicionalmente estable) de Crank-Nicholson (ADINA 2021, Bathe 2006).

Una vez determinada la distribución de temperaturas como función del tiempo, se determinaron los esfuerzos correspondientes a la condición de temperatura más crítica. Dado que los cambios de temperatura ocurren con relativa lentitud, los análisis se realizaron considerando el equilibrio como estático. En cada elemento se supusieron expresiones de interpolación de las componentes de traslación, $\mathbf{u}$:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \mathbf{a} \quad (11)$$

Para cada componente de traslación se emplearon interpolaciones polinómicas de segundo grado iguales a las planteadas en los análisis de temperaturas. En este caso $\mathbf{a}$ es una matriz columna que agrupa las componentes de traslación en cada uno de los nudos del elemento. Ignorando no linealidades geométricas, se obtienen entonces las componentes de deformación, derivando apropiadamente las ecuaciones (11):

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{a} \quad (12)$$

Luego, suponiendo comportamiento lineal del material:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{a} \quad (13)$$

Considerando las ecuaciones diferenciales de equilibrio (u otra formulación equivalente) se obtiene el sistema de ecuaciones algebraicas:

$$\mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{f} \quad (14a)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \\ \mathbf{f} &= \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 d\Omega \end{aligned} \quad (14b)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}_0$ son las deformaciones unitarias que se producirían por el cambio de temperatura si no se tuvieran restricciones a la deformación. Tratándose de un material isotrópico, las deformaciones normales serían $\alpha \Delta\theta$, siendo α el coeficiente de dilatación térmica y $\Delta\theta$ el cambio de temperatura, y no se tendrían deformaciones cortantes.

Más detalles de estos procesos pueden verse en textos como Zienkiewicz y Taylor (2004) o Bathe (2006).

Capítulo III. Revisión de la información disponible

3.1 Propiedades mecánicas del concreto

Para el análisis de las estructuras seleccionadas será necesario conocer las propiedades mecánicas y térmicas del concreto. Estos valores se determinan en laboratorios o se estiman en base a expresiones sencillas basadas en correlaciones con parámetros más fáciles de obtener.

3.1.1 Módulo de elasticidad

De acuerdo a la E060 (2020), para un concreto de peso normal, el módulo de elasticidad y el módulo de corte se pueden estimar con las siguientes fórmulas:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ en MPa}$$

3.1.2 Módulo de corte

De la misma fuente, el módulo de corte se puede estimar con la siguiente fórmula:

$$G = \frac{E_c}{2.3}$$

3.1.3 Coeficiente de Poisson

Considerando el concreto como un material isotrópico, el módulo de Poisson se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\mu = \left(\frac{E}{2G} \right) - 1$$

Basado en esto, las fórmulas propuestas por la E060, corresponden a un coeficiente de Poisson de 0,15. Pruebas experimentales muestran que el módulo de Poisson suele variar entre 0.1 y 0.3 durante la primera semana posterior a la fabricación (Lamis 2018).

El comité 207 del ACI ha registrado la variación temprana del módulo de elasticidad, módulo de corte y coeficiente de Poisson para varias presas con valor histórico. La tabla 6 muestra valores de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para diversas edades del concreto.

3.2 Propiedades térmicas del concreto

En el caso del concreto se espera que la mayor parte del calor sea transmitida por conducción, es decir a través del contacto directo. En tal sentido, el flujo de calor en el concreto está determinado por la proporción de sus constituyentes y por su configuración espacial (Iman, 2018). Para caracterizar el material se suelen investigar: coeficiente de dilatación, calor

específico, conductividad térmica, y difusividad térmica. La Tabla 7 incluye valores representativos de estas propiedades y otras registradas en algunas presas representativas.

Tabla 7

Valores de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

No	Presa	Resistencia a la compresión				Propiedades elásticas							
		MPa				Módulo de elasticidad (104 MPa)				Coeficiente de Poisson			
		Edad (días)				Edad (días)				Edad (días)			
		28	90	180	365	28	90	180	365	28	90	180	365
1	Hoover	20.9	22.8	--	29.6	3.8	4.3	--	4.7	0.18	0.2	--	0.21
2	Grand Coulee	33	35.6	--	41.3	3.2	4.2	--	4.1	0.17	0.2	--	0.23
3	Glen Canyon	17.6	26.3	27.2	--	3.7	--	4	--	0.11	--	0.14	--
4	Glen Canyon (*)	24.1	33.8	45.2	47	3.7	4.3	4.6	--	0.15	0.15	0.19	--
5	Flaming Gorge	20.3	24.1	26.7	32.3	2.4	3	3.2	--	0.13	0.25	0.2	--
6	Yellowtail	--	31.6	37.4	38.9	--	4.2	3.7	4.3	--	0.24	0.26	0.27
7	Morrow Point (*)	32.9	41.1	44.3	46.1	3	3.4	3.7	3.2	0.22	0.22	0.23	0.2
8	Lower Granite (*)	8.8	14.3	16.7	18.8	1.9	2.7	2.6	2.7	0.19	0.2	--	--
9	Libby	10	17	--	22	2.2	2.8	--	3.8	0.14	0.18	--	--
10	Dworshak	8.3	14	--	21.4	--	2.6	--	2.6	--	--	--	--
11	Ilha Solteira	16	19	21	22	3.5	4.1	--	--	0.15	0.16	--	--
12	Itaipu	13	28	18	19	3.8	4.3	4.5	4.5	0.18	0.21	0.22	0.2
13	Peace Site (*)	21.1	27.2	31.1	32.2	--	--	--	--	--	--	--	--
14	Modificación de Theodore Roosevelt	16.5	31	37.4	40	3.1	3.7	4.3	4.3	0.2	0.21	--	0.21

(*) Con agente reductor de agua

Fuente: Tomado de ACI 207.1R-05

3.2.1 Coeficiente de dilatación

El coeficiente de dilatación del concreto típicamente está determinado por los agregados, ya que estos representan la mayor parte del peso. La Tabla 8 incluye valores del coeficiente de dilatación para varios tipos de agregados en un concreto estándar.

3.2.2 Calor específico

El calor específico es la cantidad de calor necesaria para incrementar en un grado la temperatura de una unidad de masa de concreto. Este valor suele variar entre 0.20-0.25 Cal/g.°C para la mayoría de concretos, independientemente de su diseño de mezcla (ACI 207.2R, 07).

Tabla 8

Propiedades térmicas del concreto para varias presas

Estructura	Agregado grueso	Temperatura °C	Coeficiente de expansión Millonésimas/°C		Conductividad térmica kJ/m.h.°C	Calor específico kJ/kg.°C	Densidad Kg/m3	Difusividad [m²/h]x10 ⁻³
			37.5 mm máx	114 mm máx				
Hoover	Caliza y granito	10	9.5	8.6	10.6	0.887	2500	4.7
		38			10.4	0.941		4.4
		66			10.3	1.050		3.9
Grand Coulee	Basalto	10	7.9	8.3	6.74	0.916	2534	2.9
		38			6.74	0.967		2.7
		66			6.78	1.075		2.5
Friant	Cuarcita, granito y rolita	10	--	--	7.66	0.904	2465	3.4
		38			7.66	0.962		3.2
		66			7.70	1.017		3.1
Shasta	Andesita y pizarra	10	--	8.6	8.20	0.916	2510	3.6
		38			8.16	0.975		3.3
		66			8.16	1.033		3.2
Angostura	Caliza	10	7.2	--	9.29	0.925	2423	4.2
		38			9.20	0.992		3.8
		66			9.08	1.054		3.5
Kortes	Granito, gabro, y cuarzo	10	9.4	8.1	10.0	0.870	2433	4.6
		38			9.96	0.925		4.4
		66			9.87	0.979		4.1
Hungry Horse	Arenisca	10	9.7	9.4	10.1	0.895	2425	4.6
		38			10.0	0.937		4.4
		66			9.87	0.983		4.2
Monticello	Arenisca, metalimonita, cuarcita y riolita	10	9.4	--	9.79	0.941	2454	4.3
		38			9.67	0.992		4.0
		66			9.54	1.046		3.7
Anchor	Andesita, latita, y caliza	10	10.1	8.1	7.11	0.950	2388	3.2
		38			7.11	1.013		3.0
		66			7.15	1.079		2.8
Glen Canyon	Caliza, esquistos y arenisca	10	--	--	13.3	0.908	2407	6.0
		38			12.8	0.971		5.5
		66			12.3	1.033		4.9
Flaming Gorge	Caliza y arenisca	10	--	--	11.1	0.925	2411	5.0
		38			10.9	0.979		4.6
		66			10.8	1.038		4.3
Yellowtail	Caliza y andesita	10	--	7.7	9.67	0.946	2444	4.2
		38			9.46	1.000		3.9
		66			9.20	1.054		3.6
Dworshak	Granito y gneis	38	--	9.9	8.41	0.920	2467	3.9
Ilha Solteira	Cuarcita y basalto	38	--	12.5	10.8	0.920	2552	4.6
Itaipu	Basalto	38	--	7.8	6.61	0.975	2537	2.7
Modificación de Theodore Roosevelt	Granito	10	7.7	--	10.7	0.979	2380	4.6
		38			10.9	1.037		4.4
		66			10.6	1.088		4.1
Olverhain	Granodiorita	38	9.7	--	5.86	0.880	2360	2.8

Fuente: Tomado de ACI 207.2R-07

3.2.3 Conductividad térmica

La conductividad térmica se define como la velocidad con la que el calor pasa a través de un cuerpo de superficie y espesor unitarios influenciado por un gradiente térmico de una unidad (ACI 122, 2002). La tabla 9 contiene valores experimentales de conductividad térmica del concreto para varios tipos de agregados.

Tabla 9

Coeficiente de dilatación del concreto para varios tipos de agregados

Agregado grueso	Coeficiente de expansión térmica
	Millonésimas/°C
Granito	7 a 9
Basalto	6 a 8
Caliza	6
Dolomita	7 a 10
Arenisca	11 a 12
Cuarcita	11 a 13
Mármol	4 a 7
Concrete	7.4 a 13

Fuente: Tomado de ACI 207.2R-07

Tabla 10

Conductividad térmica del concreto para varios tipos de agregados

Agregado grueso	Conductividad térmica
	KJ/kg.°C
Cuarcita	4.5
Caliza	4.2
Dolomita	2.6 to 3.3
Granito	1.6 to 2.7
Riolita	2.2
Basalto	1.9 to 2.2

Fuente: Tomado de ACI 207.2R-07

3.2.4 Difusividad térmica

La difusividad térmica expresa que tan rápido se transfiere el calor a través de un cuerpo y que cantidad de calor será absorbido y permanecerá en el mismo (ACI 122, R2002). Como resultado, un material de alta difusividad, como el acero, permite el paso rápido del calor

y retiene muy poco del calor aplicado. La difusividad térmica se puede calcular dividiendo la conductividad térmica, k , entre el producto de la densidad y el calor específico. La tabla 10 contiene valores experimentales de difusividad térmica del concreto para varios tipos de agregados.

Tabla 11

Difusividad térmica del concreto para varios tipos de agregados

Agregado grueso	Difusividad del concreto $\text{m}^2/\text{día}$	Difusividad del concreto $\text{m}^2/\text{hx}10^{-3}$
Cuarcita	0.129	5.4
Caliza	0.113	4.7
Dolomita	0.111	4.6
Granito	0.096	4.0
Riolita	0.078	4.2
Basalto	0.072	4.0

Fuente: Tomado de ACI 207.2R-07

Capítulo IV. Aplicaciones prácticas

En este trabajo se revisaron cuatro casos de análisis: dos bidimensionales y dos con modelos tridimensionales. Para evaluar la influencia de los parámetros de entrada, cada caso se evaluó con variaciones de las características principales, generándose sub-casos de análisis.

El primer caso analiza el vaciado secuencial de concreto en roca y toma como base un problema tratado en el Primer de ADINA (2021). El segundo caso analiza la sección transversal de un túnel, para el cual se consideró la geometría y el registro climático de una estructura existente en Japón. El tercer caso analiza una losa de cimentación de gran espesor, tomando los parámetros descritos en la tesis de Gutiérrez (2017). Finalmente, se analizó una presa de tipo arco, utilizando las características descritas en la tesis de Vela (2018).

4.1 Parámetros para el análisis

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo II, para modelar la generación calor al interior de una estructura, además de la geometría, se requieren las características térmicas de los materiales que la constituyen. El intercambio de calor con el medio externo puede incluirse considerando las propiedades convectivas, teniendo en cuenta la temperatura exterior y el empleo de metodologías de enfriamiento. Finalmente, se utilizarán las propiedades mecánicas de los materiales y las condiciones de borde para estimar los esfuerzos.

A continuación, se listan los parámetros considerados en la formulación de los casos y los sub-casos analizados.

4.1.1 Propiedades térmicas

Debido a que no se dispone de información experimental de las características térmicas del concreto ni la roca para los casos analizados, se optó por utilizar los parámetros indicados en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Dichos parámetros se muestran en la tabla 11. Los valores están dentro de los rangos de las propiedades expuestas en el capítulo III. Asimismo, se tomó como referencia la curva de generación de calor usada en el problema citado, la cual se muestra en la figura 7. Para representar la generación de calor con otros tipos de cemento se tomaron las curvas de generación de calor presentadas por Soo (2010) para cementos del tipo I y IV de origen estadounidense y coreano, las cuales se muestran en las figuras 8, 9 y 10.

Tabla 12

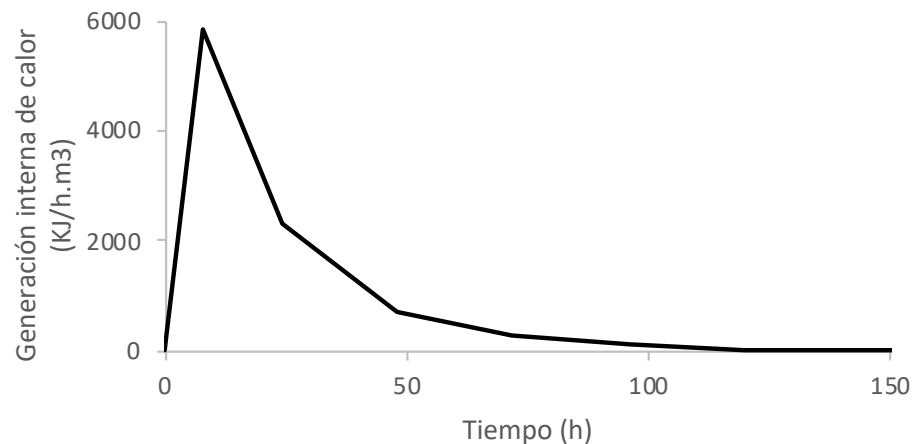
Propiedades térmicas del concreto y la roca

Característica	Concreto	Roca
Conductividad térmica (kJ/h.m.°K)	8.4	50
Capacidad calorífica (kJ/m ³ .°K)	1950	1850
Coeficiente de expansión térmica	1.0x10e-5	0.7x10e-5

Fuente: Tomado de Soo (2010)

Figura 7

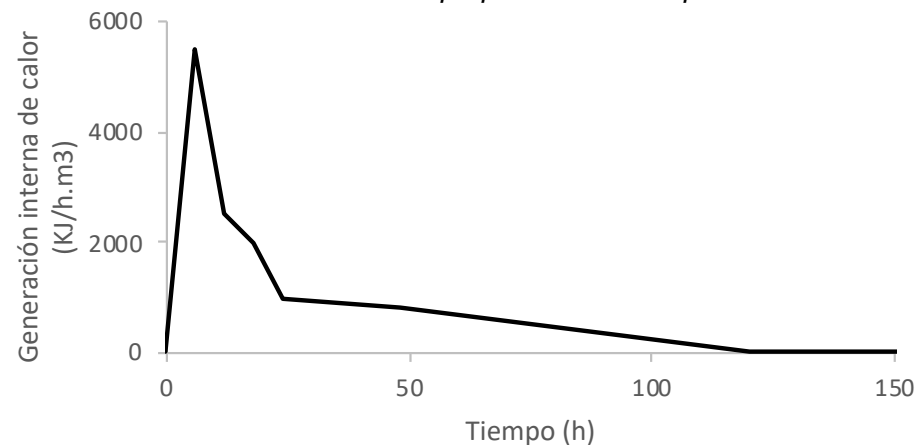
Generación del calor en el concreto vs el tiempo para cemento convencional



Fuente: Tomado de ADINA Inc. (2021)

Figura 8

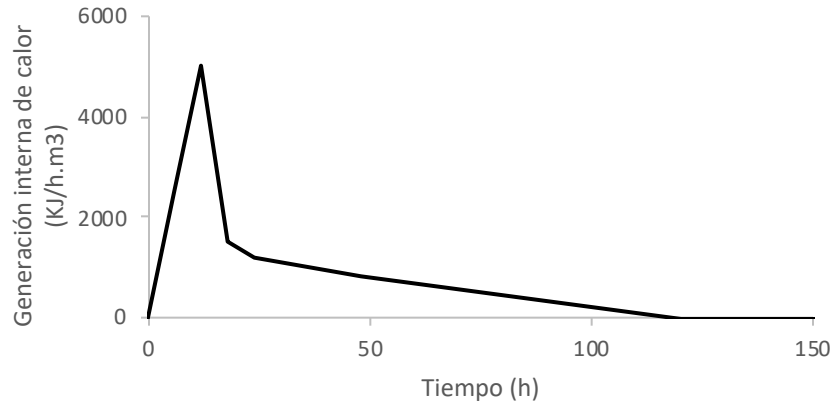
Generación del calor en el concreto vs el tiempo para cemento tipo I de EE.UU.



Fuente: Tomado de Soo (2010)

Figura 9

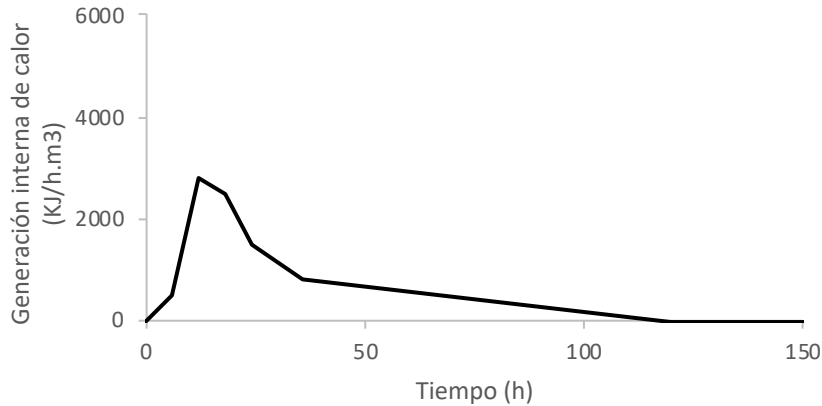
Generación del calor en el concreto vs el tiempo para cemento tipo I de Corea



Fuente: Tomado de Soo (2010)

Figura 10

Generación del calor en el concreto vs el tiempo para cemento tipo IV de Corea



Fuente: Tomado de Soo (2010)

4.1.2 Propiedades mecánicas

Para el análisis de esfuerzos, se tomaron valores dentro de los rangos expuesto en el capítulo III. Los valores seleccionados se muestran en la tabla 12

Tabla 13

Propiedades mecánicas del concreto y la roca

Propiedad	Concreto	Roca
Módulo de rigidez (GPa)	30	70
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3

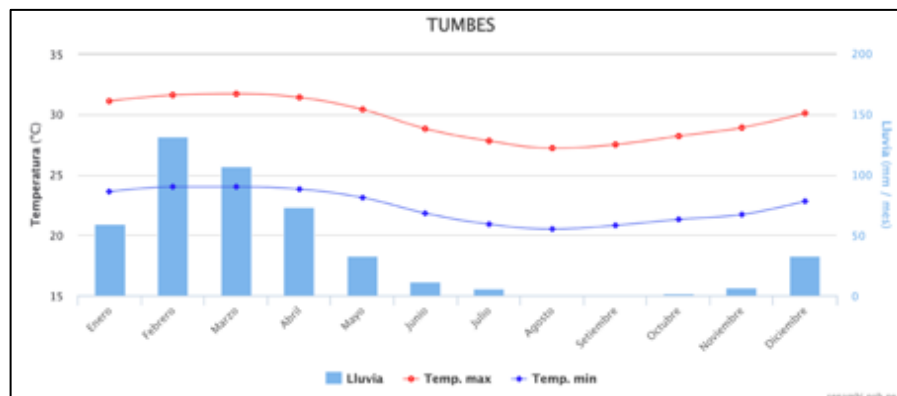
4.1.3 Temperatura ambiental

Para considerar el impacto de temperaturas elevadas en el comportamiento del concreto dentro del territorio nacional, se utilizaron en la mayoría de los casos los registros históricos de la temperatura para Tumbes. Además de ello, en el caso I, concreto vaciado en roca, también se evaluó el impacto de un clima frío, para lo cual se utilizaron los registros históricos de la ciudad de Cusco. En el caso II, sección transversal de un túnel, se utilizaron los registros meteorológicos de la localidad de Yanagawa en Japón. En el caso III, losa de cimentación, se utilizaron los registros térmicos de los vaciados tomados por Gutiérrez (2017). Finalmente, en el caso IV, presa tipo arco, se utilizó la temperatura histórica disponible para Chachapoyas debido a su cercanía.

Las figuras 11, 12, 13 y 14 muestran los registros históricos utilizados en los análisis.

Figura 11

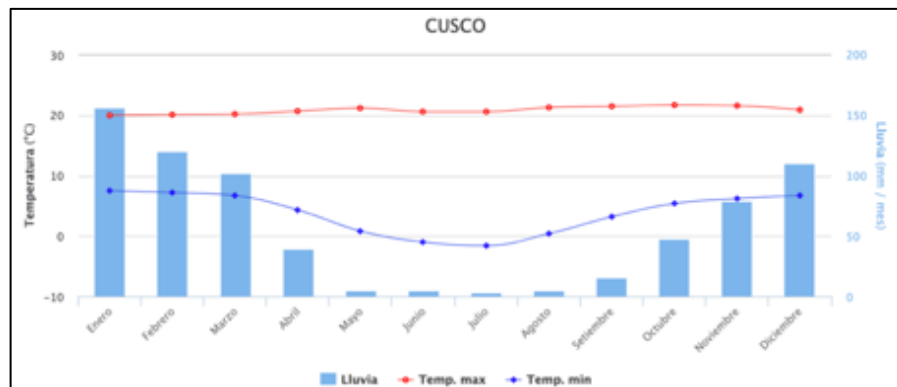
Promedio de temperatura para Tumbes



Fuente: Tomado de SENAMHI (2024)

Figura 12

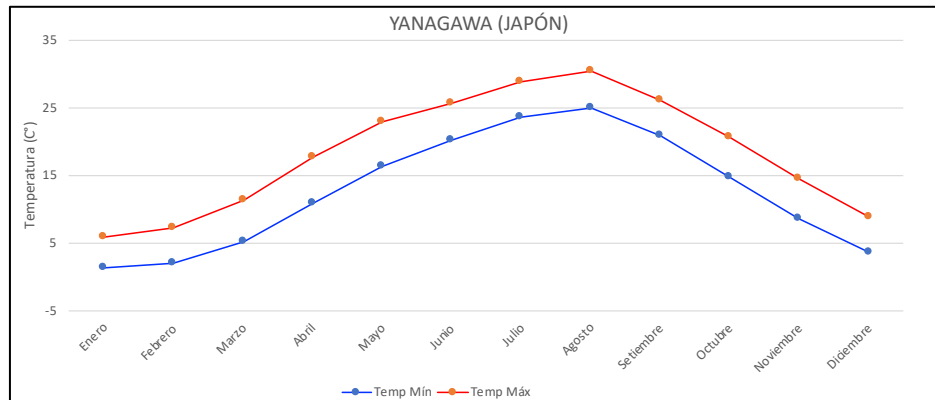
Promedio de temperatura para Cusco



Fuente: Tomado de SENAMHI (2024)

Figura 13

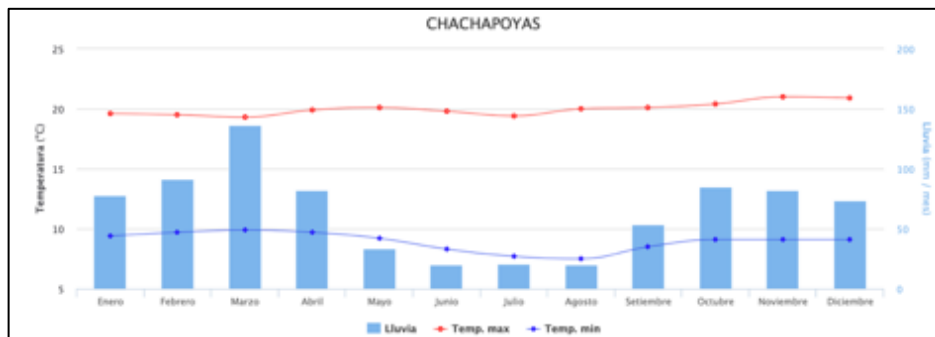
Promedio de temperatura para Yanagawa (Japón)



Fuente: Agencia Meteorológica Japonesa (2024)

Figura 14

Promedio de temperaturas para Chachapoyas



Fuente: Tomado de Senamhi (2024)

4.1.4 Metodologías de enfriamiento seleccionadas

En los sub-casos seleccionados se evaluó el impacto de utilizar las metodologías de enfriamiento indicadas en el capítulo III.

En el caso 1, concreto vaciado en roca, se evaluó el impacto de utilizar concreto enfriado, tuberías de enfriamiento, cementos alternativos, y la influencia de un clima frío. En el caso 2, sección transversal de un túnel, se consideraron diferentes espaciamientos de las tuberías de enfriamiento. En el caso 3, losa de cimentación, se consideró el uso de cementos alternativos y la variación de la velocidad de vaciado, como parte del proceso constructivo. Finalmente, en el caso 4, presa tipo arco, se consideró el enfriamiento del concreto y el uso de cementos alternativos.

4.2 Casos de análisis

En este trabajo se priorizaron veintitrés análisis para evaluar numéricamente el impacto de las diferentes metodologías de enfriamiento en la temperatura y esfuerzos para cuatro diferentes estructuras. La tabla 13 resume los analizados conducidos. Una descripción detallada de cada caso y sub-caso se presenta en las siguientes secciones de este capítulo.

Tabla 14

Casos y sub-casos analizados

Caso	Descripción	Tipo de análisis	Sub-caso	Variable
1	Vaciado en roca	2D	1A	Caso de referencia original
			1B	Concreto colocado a 5°C
			1C	Tuberías de enfriamiento a 2.5m
			1D	Tuberías de enfriamiento a 5m
			1E	Cemento Tipo I (EE.UU.)
			1F	Cemento Tipo I (Corea)
			1G	Cemento Tipo IV (Corea)
			1H	Vaciado en clima frío
2	Túnel	2D	2A	Caso de referencia original
			2B	Dos tuberías de enfriamiento
			2C	Cuatro tuberías de enfriamiento
3	Losa de 1500m ³	3D	3A	Caso de referencia original
			3B	Cemento Tipo I (EE. UU.)
			3C	Cemento Tipo I (Corea)
			3D	Cemento Tipo IV (Corea)
			3E	Vaciado lento

			3F	Vaciado acelerado
			3G	Vaciado completo
4	Presa	3D	4A	Caso de referencia original
			4B	Concreto colocado a 5°C
			4C	Cemento Tipo I (EE. UU.)
			4D	Cemento tipo I (Corea)
			4E	Cemento tipo IV (Corea)

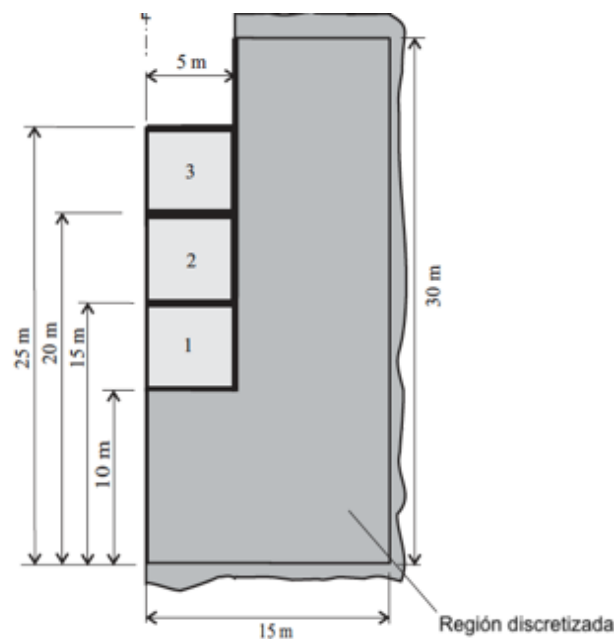
4.3 Caso 1: Análisis plano de concreto vaciado en roca

4.3.1 Descripción del caso

Esta estructura toma como referencia el problema N°25 presentado en ADINA Primer (ADINA Inc. 2021). La estructura seleccionada corresponde a una perforación en roca que se llena parcialmente con tres volúmenes de concreto colocados cada cuatro días (96 horas). Cada volumen eleva en 5m la superficie del concreto dentro de una perforación de 20m. La figura 15 presenta la secuencia constructiva descrita líneas arriba.

Figura 15

Descripción de la estructura propuesta y la secuencia constructiva.



Fuente: Tomado de ADINA Inc. (2021)

4.3.2 Descripción del modelo

Por tratarse de un problema simétrico se analiza sólo la mitad derecha, condicionando un intercambio de calor nulo con el lado izquierdo.

La conducción de los análisis en ADINA requiere la creación de dos modelos: 1) un modelo para conducir el análisis térmico y 2) un modelo para el análisis de esfuerzos. Esto se debe a que ADINA no dispone de las mismas herramientas en sus módulos térmico y de estructuras (esfuerzos). Sin embargo, el segundo modelo puede generarse rápidamente a partir de reutilizar recursos del primero. Por ejemplo, es posible exportar la malla de Elementos Finitos entre los módulos, pero algunos tipos de materiales y elementos finitos disponibles en el módulo térmico no están disponibles en el módulo de estructuras.

Para construir el modelo para el análisis térmico se declararon nueve volúmenes rectangulares, de los cuales tres corresponden a los volúmenes de concreto y seis a los volúmenes de roca. Posteriormente, los volúmenes se subdividieron para generar los elementos finitos. En este modelo se utilizaron elementos finitos del tipo 2D-Solid, conformados por cuadriláteros de 9 nodos. También, se declararon elementos de convección para representar zonas de transferencia de calor entre el concreto y el aire libre. La figura 16 muestra los volúmenes declarados al inicio y la malla de elementos finitos utilizada. Nótese que las líneas gruesas en la figura b representan los elementos de convección.

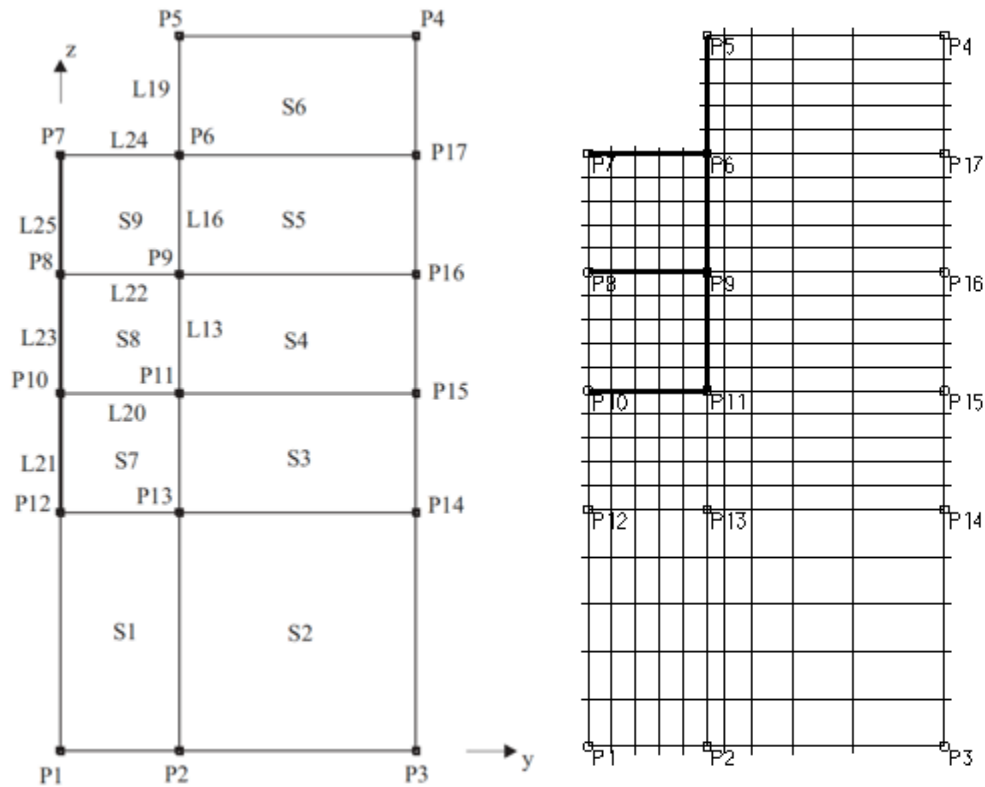
Además de ello fue necesario declarar funciones de tiempo para representar la generación del calor interior y el periodo de actividad tanto de volúmenes como de superficies. En ADINA, la generación de calor al interior de los volúmenes de concreto se introduce como una carga térmica.

Por otra parte, el modelo de esfuerzos requiere la declaración de condiciones de borde. En este caso se restringió la traslación horizontal y vertical para el extremo inferior de los volúmenes de roca. A parte de ello, tanto en el extremo izquierdo, eje de simetría, y el extremo derecho, límite de la roca, se restringió la traslación horizontal y se permitió la traslación vertical. Las cargas son producidas por la dilatación de los elementos como producto del cambio de temperaturas que estos experimentan. En tal sentido, fue necesario utilizar los valores obtenidos para las temperaturas en el módulo térmico para estimar los esfuerzos en el módulo de estructuras.

El modelo térmico se corrió para 640 pasos de 1 hora cada uno, y el modelo de esfuerzos se corrió solamente para los instantes críticos seleccionados en base a picos de temperaturas.

Figura 16

a) Volúmenes declarados en ADINA-Thermal, b) Malla de Elementos Finitos



Fuente: Tomado de ADINA Inc. (2021)

4.3.3 Sub-casos y resultados del análisis

Para el caso 1 se consideraron ocho sub-casos. Es importante notar que en cada sub-caso se cambió una sola condición respecto al sub-caso 1A.

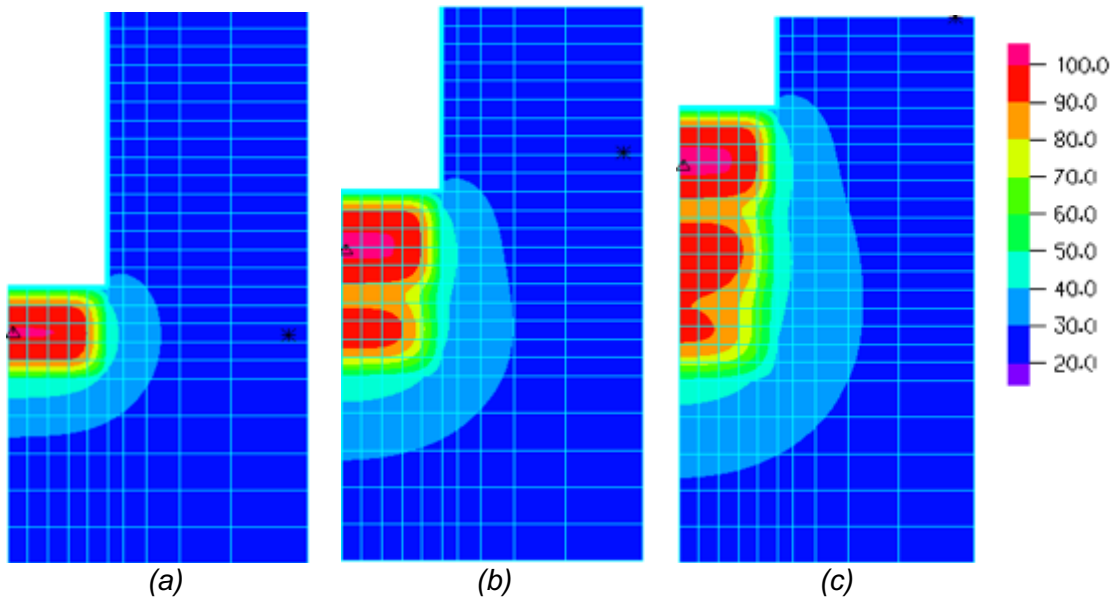
Sub-caso 1A: Caso original

En este sub-caso se aplican las condiciones básicas expuestas en la sección 4.1 sin ninguna metodología de control térmico. Este sub-caso considera la temperatura de Tumbes, mostrada líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021).

Las figuras 17a, 17b y 17c muestran la distribución de temperatura para la colocación de cada volumen de concreto, medidas 4 días después del vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir al centro de los bloques y alcanzan valores cercanos a los 100°C.

Figura 17

Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h

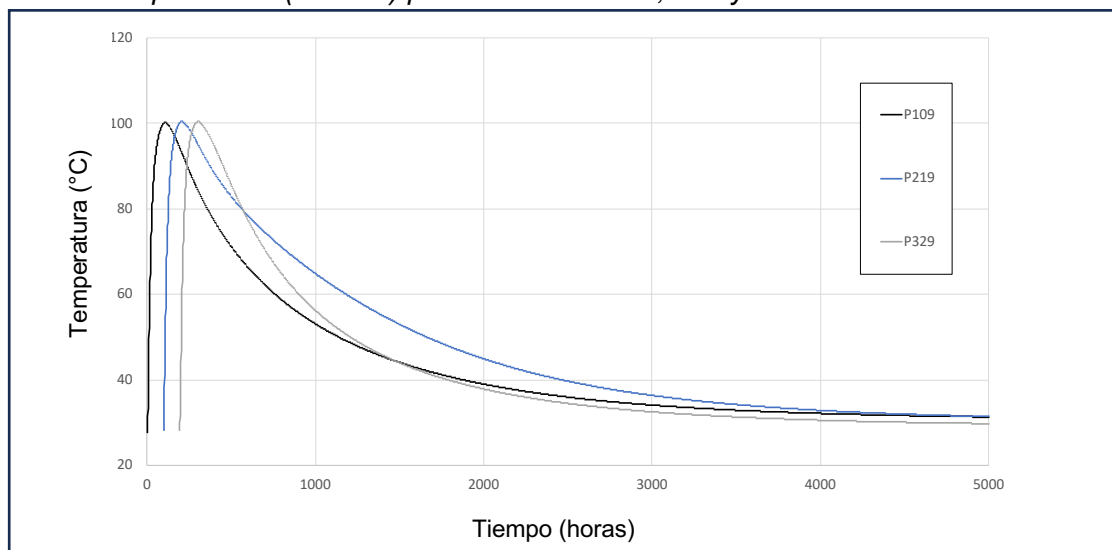


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 18 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados al centro de cada volumen. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 109 (bloque inferior), 219 (bloque intermedio) y 329 (bloque superior). En los tres casos se alcanza un pico cercano a los 100°C que lentamente descende hasta la temperatura ambiental. El último bloque se enfría más rápidamente ya que está expuesto al aire.

Figura 18

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329

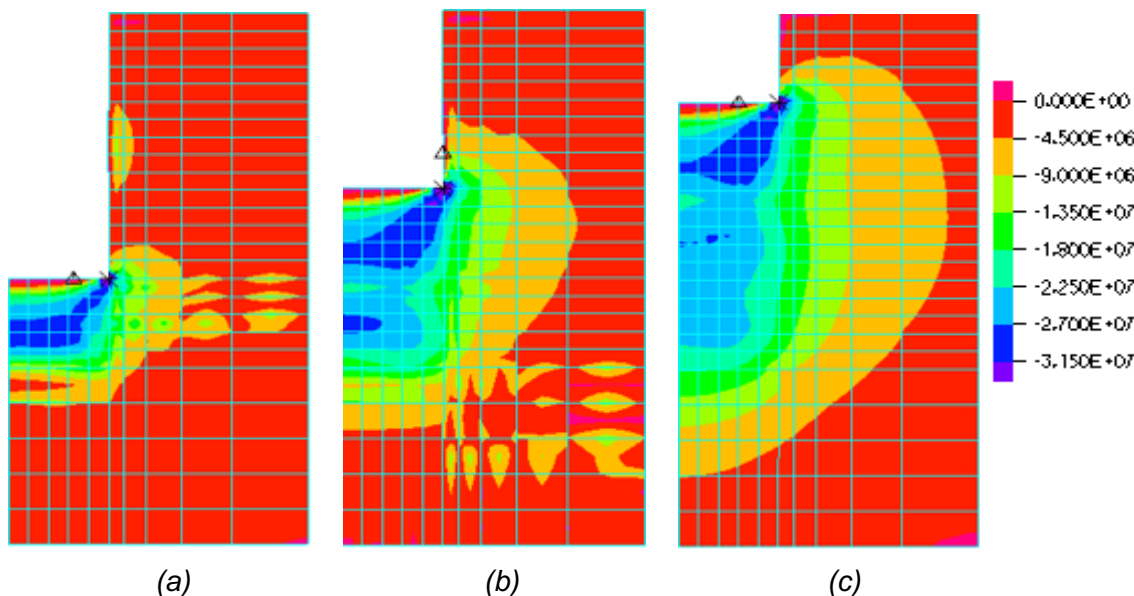


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 19a, 19b y 19c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 17a, 17b y 17c, respectivamente. Los valores mínimos se producen al interior de los bloques y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Los valores mencionados son cercanos a los 30MPa.

Figura 19

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

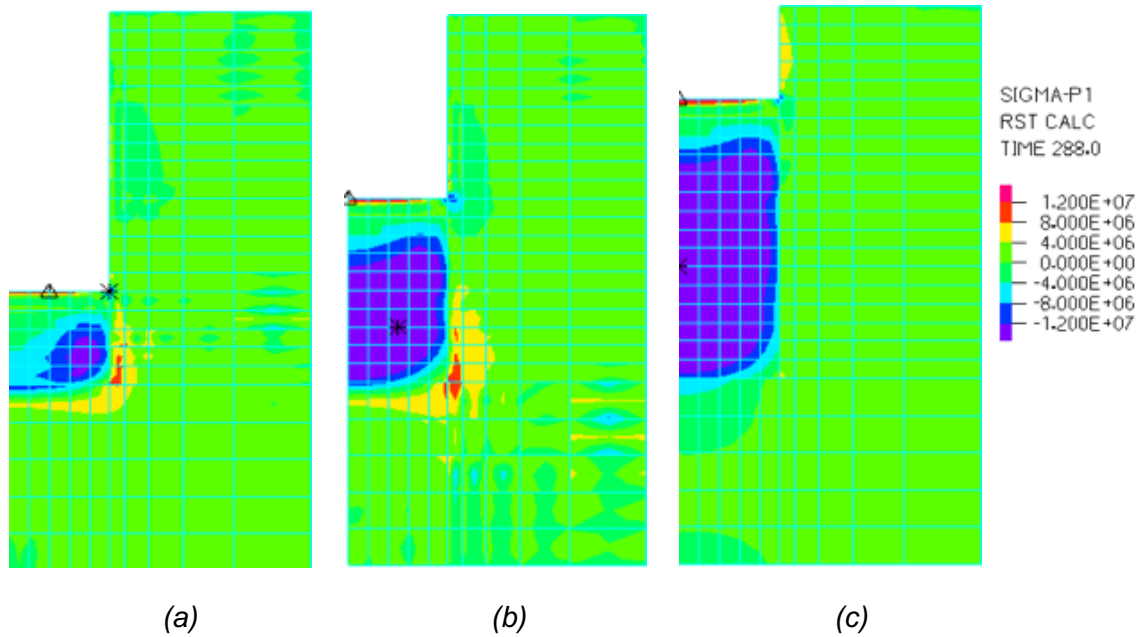
Las figuras 20a, 20b y 20c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 17a, 17b y 17c, respectivamente. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado, y los picos se producen en el centro. Los valores mencionados son cercanos a los 12MPa.

Las figuras 21a, 21b y 21c muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 17a, 17b y 17c, respectivamente. Los valores máximos se producen alrededor de los límites de materiales y toman un valor pico cercano a los 9MPa en los extremos de la superficie del volumen vaciado.

Las figuras 22a, 22b y 22c muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 17a, 17b y 17c, respectivamente. Los valores máximos se producen al centro de la superficie del volumen vaciado y alcanzan valores cercanos a los 4mm.

Figura 20

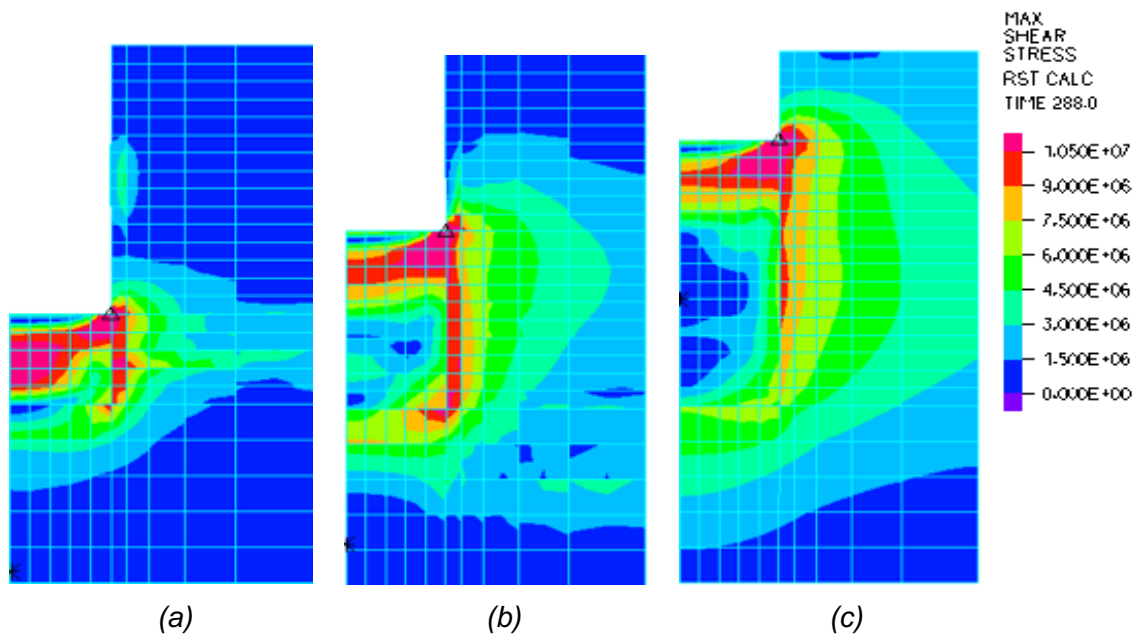
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 21

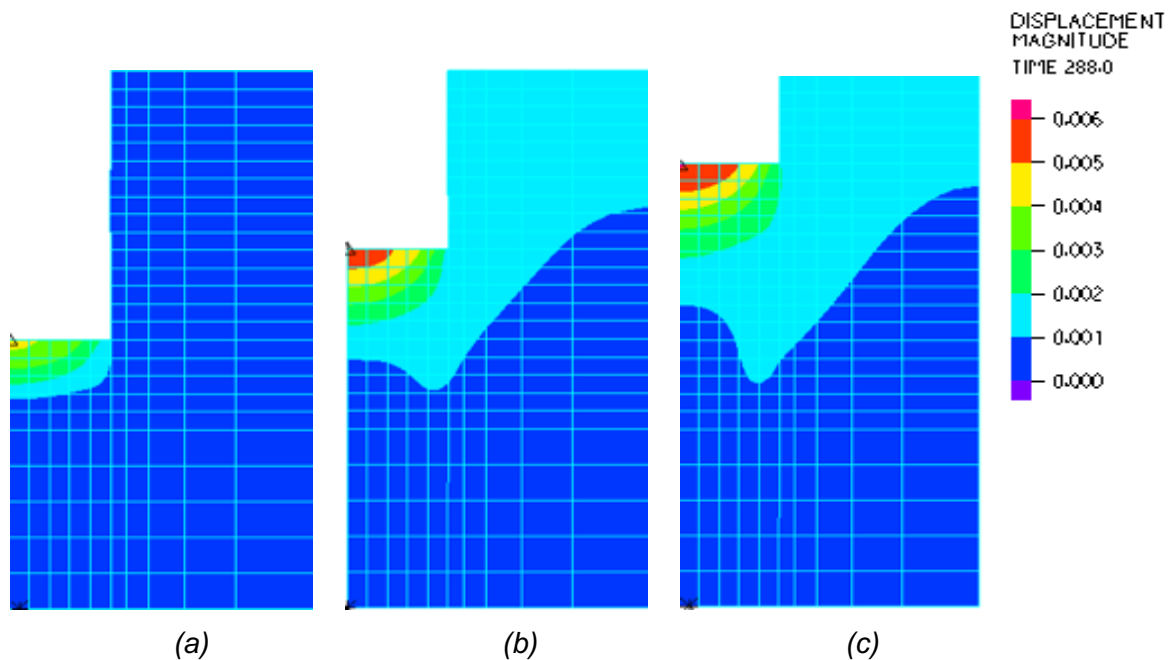
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 22

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 1B: Concreto colocado a 5°C

En este sub-caso se mantienen todas las condiciones consideradas en el Sub-caso 1A, con excepción de la temperatura del concreto al momento del vaciado. Es decir, se mantiene una temperatura correspondiente a Tumbes y las propiedades térmicas / mecánicas de acuerdo a lo utilizado en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). En este análisis se consideró que los volúmenes se fabricaron de concreto enfriado a 5°C al momento de la colocación.

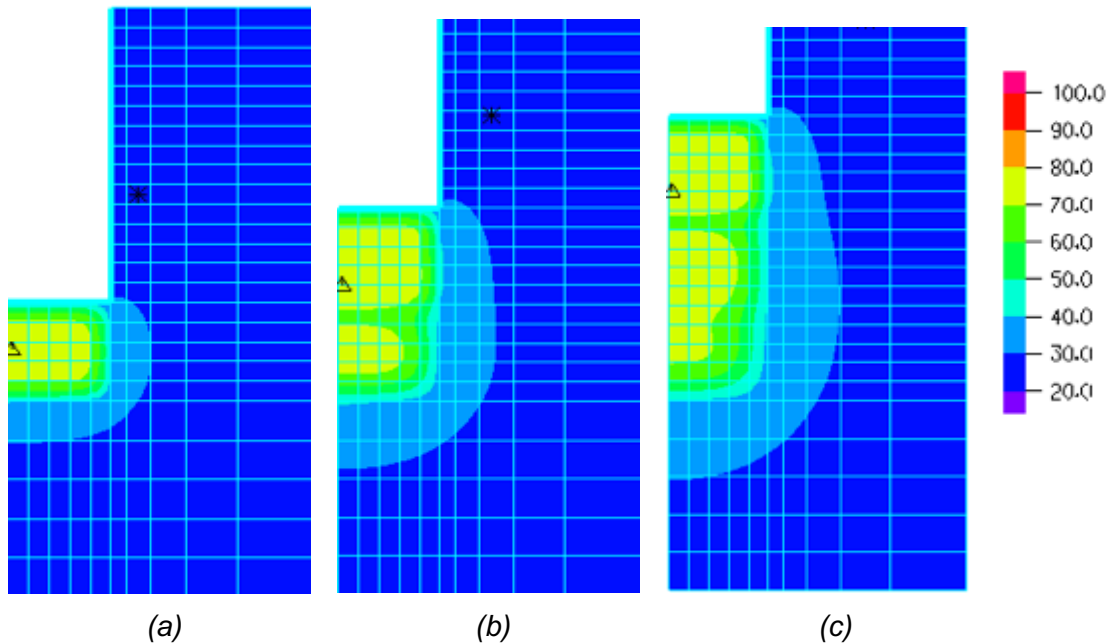
Las figuras 23a, 23b y 23c muestran la distribución de temperatura para la colocación de cada volumen de concreto, medidas 4 días después del vaciado. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos de las temperaturas ocurren en el centro de los bloques, sin embargo, los valores pico alcanzan valores cercanos a los 80°C, i.e. 20 °C por debajo de los picos indicados en el sub-caso 1A.

La figura 24 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados al centro de cada volumen. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 109 (bloque inferior), 219 (bloque intermedio) y 329 (bloque superior). En los tres casos se alcanza un pico cercano a los 80°C que lentamente descende hasta la temperatura

ambiental. Nótese que se reportan temperaturas superiores a los 70°C tres semanas después del primer vaciado.

Figura 23

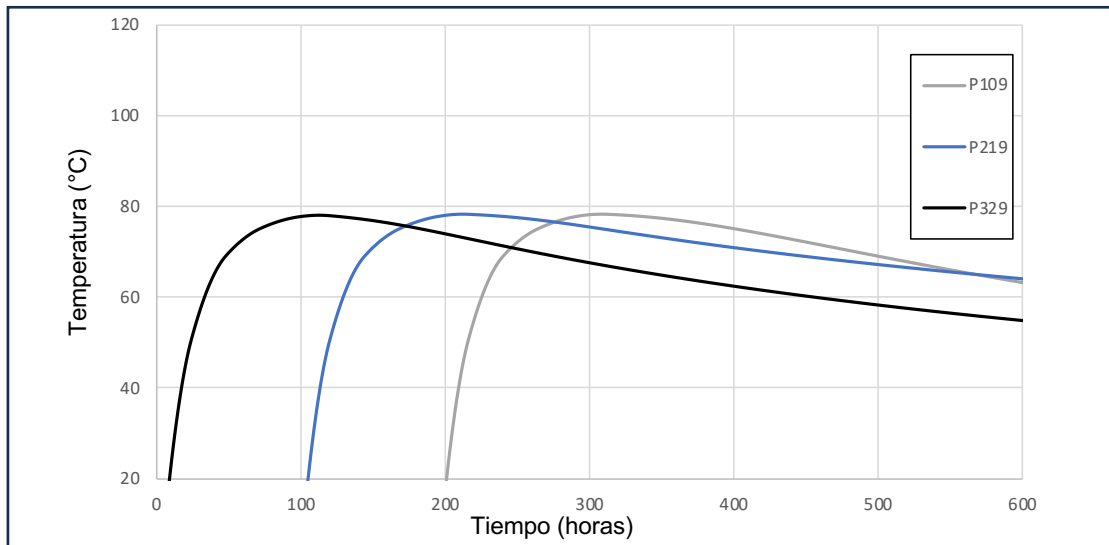
Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 24

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329

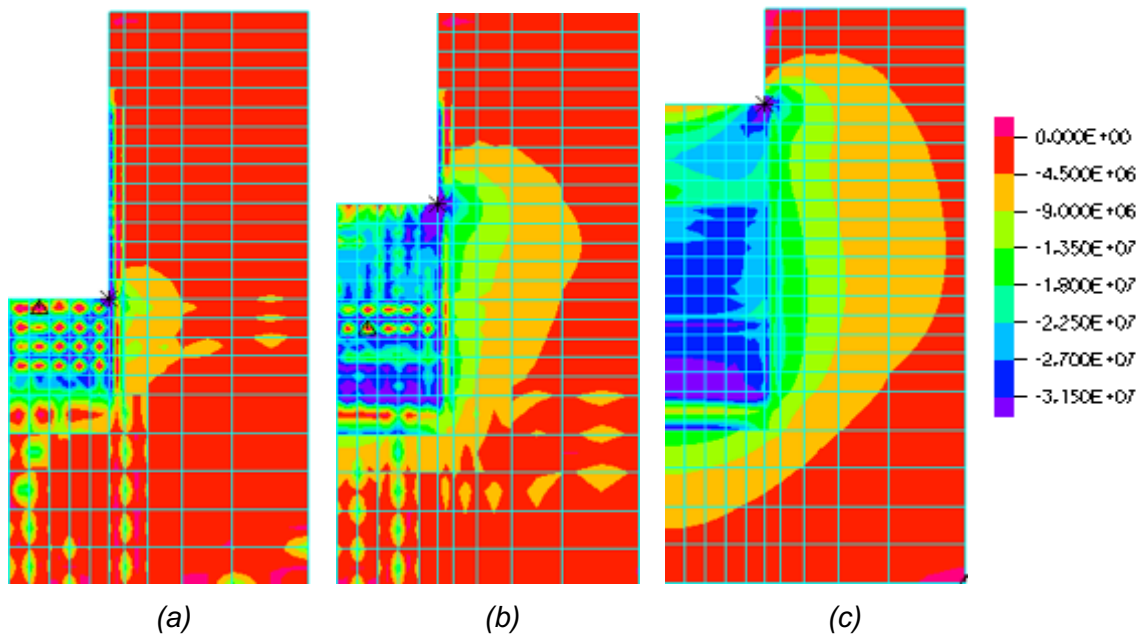


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 25a, 25b y 25c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 23a, 23b y 23c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos se producen al interior de los bloques y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Debe notarse que, en el segundo y tercer vaciado los esfuerzos alcanzan valores muy cercanos al pico al interior del bloque más antiguo. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos rondan los 27MPa.

Figura 25

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

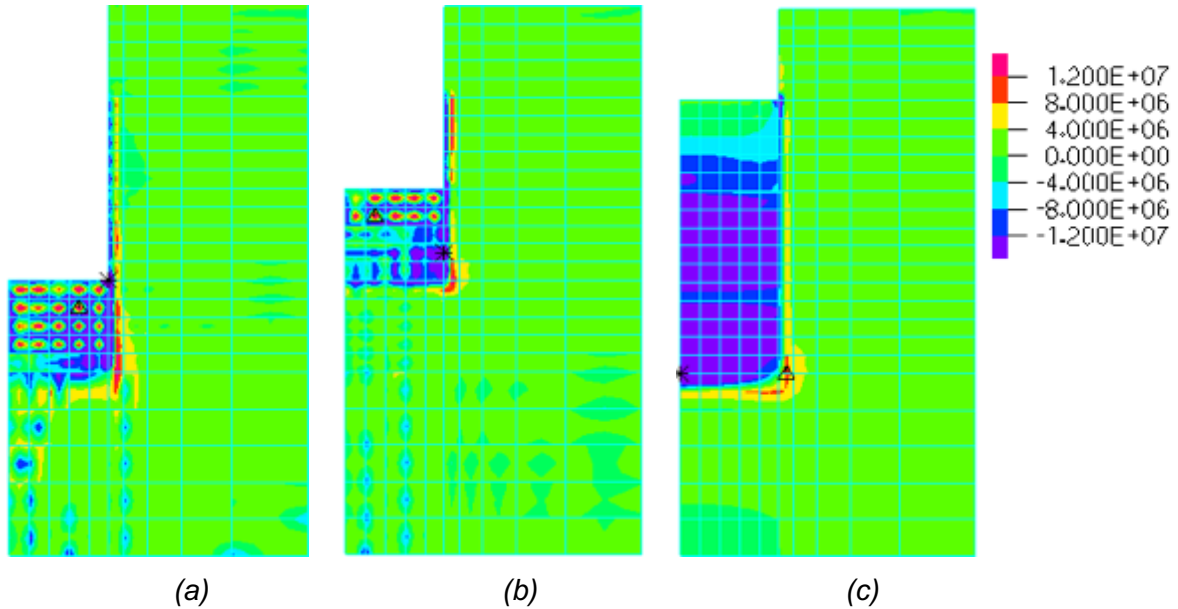
Las figuras 26a, 26b y 26c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 23a, 23b y 23c, respectivamente. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado, y los picos se producen en el centro. Los valores mencionados son cercanos a los 8MPa.

Las figuras 27a, 27b y 27c muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 23a, 23b y 23c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen alrededor de los límites de

materiales y toman un valor pico, cercano a los 9 MPa, en los extremos de la superficie del volumen vaciado.

Figura 26

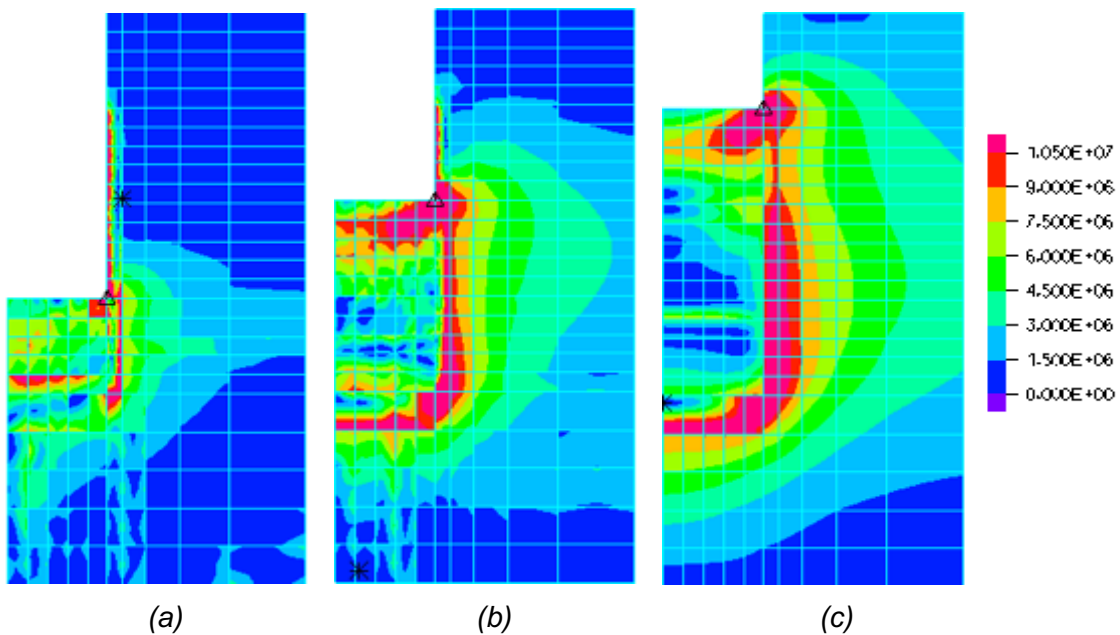
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 27

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h

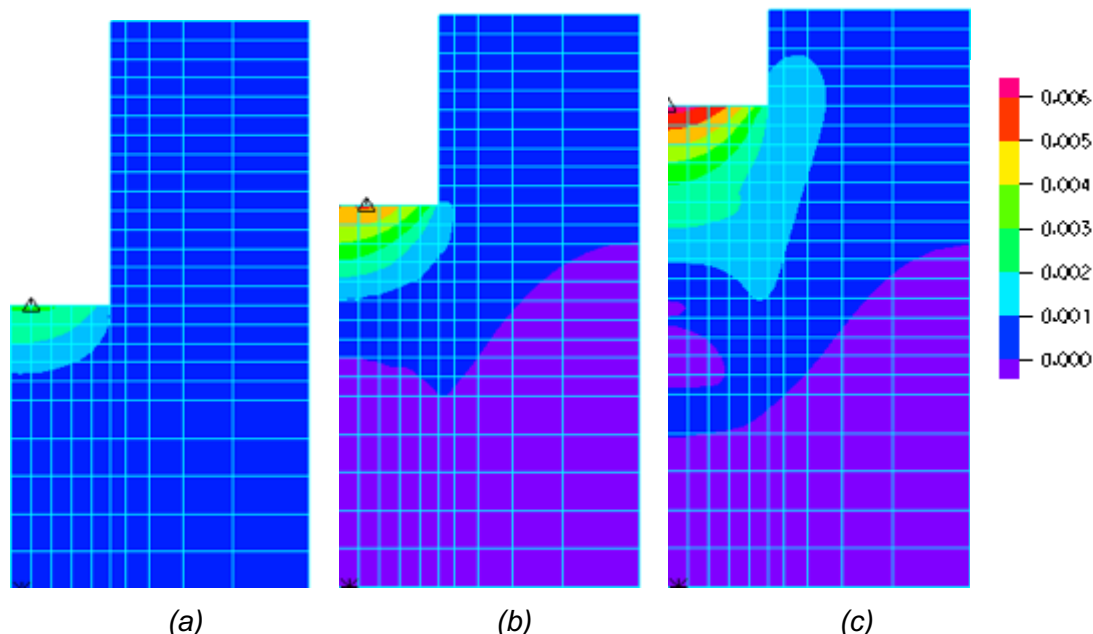


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 28a, 28b y 28c muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 23a, 23b y 23c, respectivamente. Nótese que, al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen en la superficie del volumen vaciado y alcanzan valores cercanos a los 4mm.

Figura 28

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 1C: Tuberías de enfriamiento a 2.5m

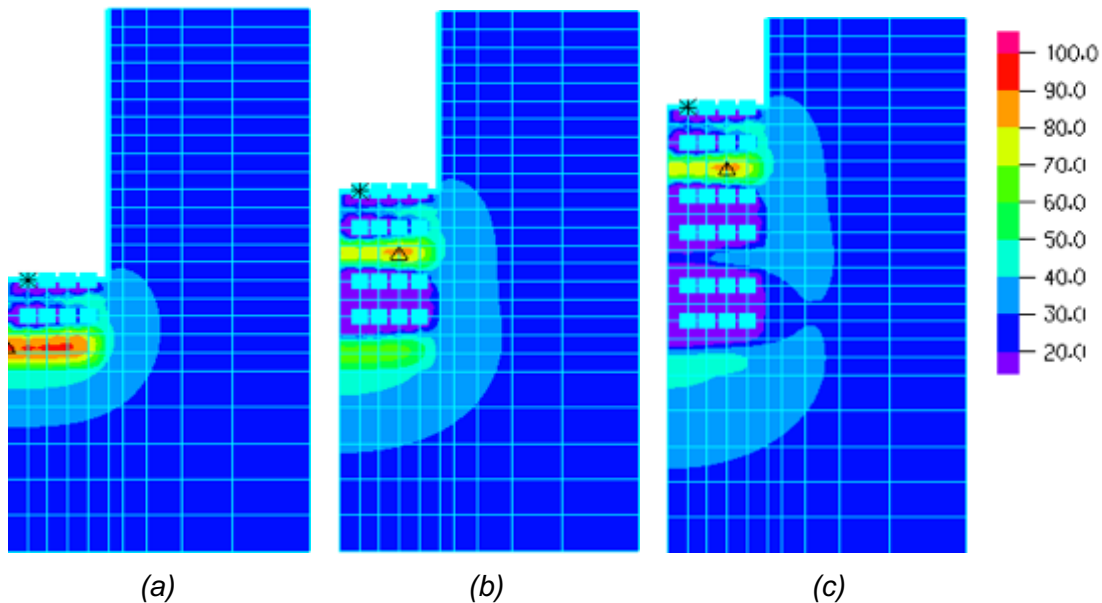
En este sub-caso se mantienen todas las condiciones consideradas en el Sub-caso 1A, con excepción de que se consideraron tuberías de enfriamiento al interior del concreto. Es decir, se mantiene una temperatura correspondiente a Tumbes y las propiedades térmicas / mecánicas de acuerdo a lo utilizado en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Pero, además de ello, se introdujeron tuberías de una pulgada espaciadas horizontalmente 1m y verticalmente 2.5m. En el análisis se consideró que por las tuberías circula agua con una temperatura cercana a 0°C, que se instalan durante la colocación del concreto y que permanecen activas hasta el final del análisis.

Las figuras 29a, 29b y 29c muestran la distribución de temperatura para la colocación de cada volumen de concreto, medidas 4 días después del vaciado. A diferencia de los sub-casos anteriores, los valores máximos de las temperaturas ocurren lejos del centro de los

bloques, donde se colocaron las tuberías. Las temperaturas rara vez alcanzan valores superiores a los 50°C, a excepción de los sectores más lejanos de las tuberías. En estos sectores se producen valores similares a los mostrados en casos anteriores, pero es importante notar que son áreas muy pequeñas y que este problema podría resolverse reconfigurando la ubicación de las tuberías.

Figura 29

Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 30 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados al centro de cada volumen. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 109 (bloque inferior), 219 (bloque intermedio) y 329 (bloque superior). En los tres casos se alcanza un pico cercano a los 60°C que se logra disipar en pocos días.

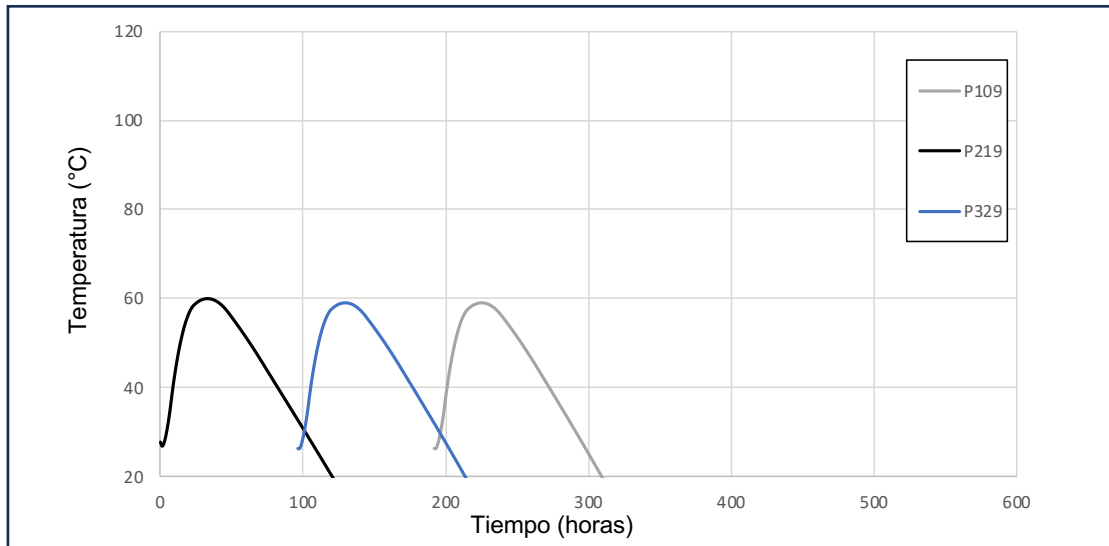
Las figuras 31a, 31b y 31c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 29a, 29b y 29c, respectivamente. A diferencia de los sub-casos anteriores, los valores mínimos ocurren lejos del centro de los volúmenes. Debe notarse que en general, el nivel de esfuerzos experimentado no supera los 9MPa.

Las figuras 32a, 32b y 32c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 29a, 29b y 29c,

respectivamente. Los valores máximos se ubican dispersamente en toda la estructura, pero en general, los valores se mantienen por debajo de los 8MPa.

Figura 30

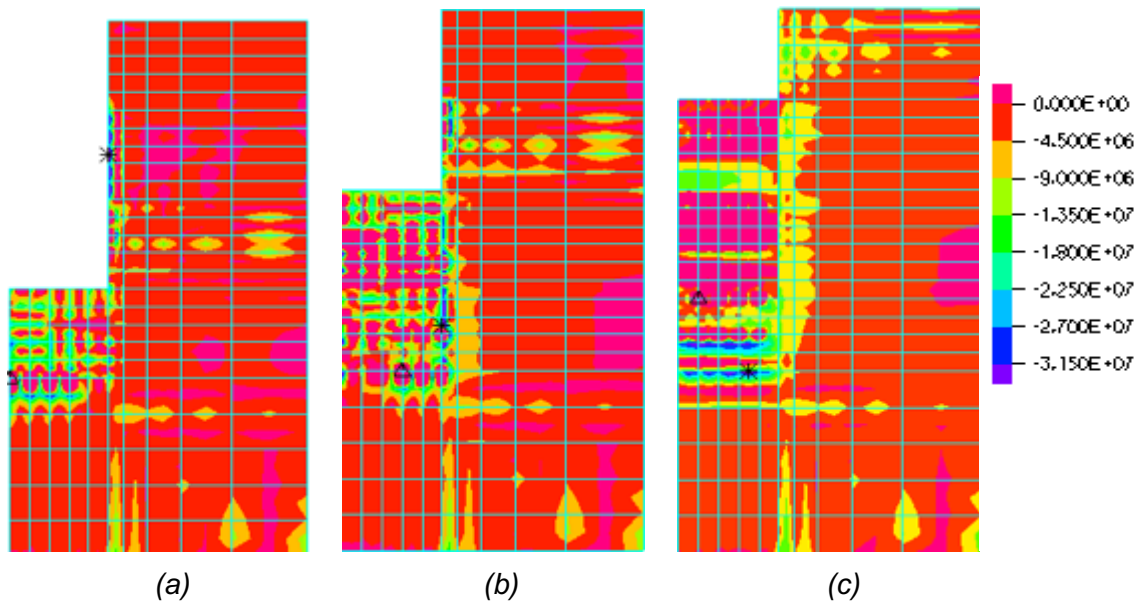
Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 31

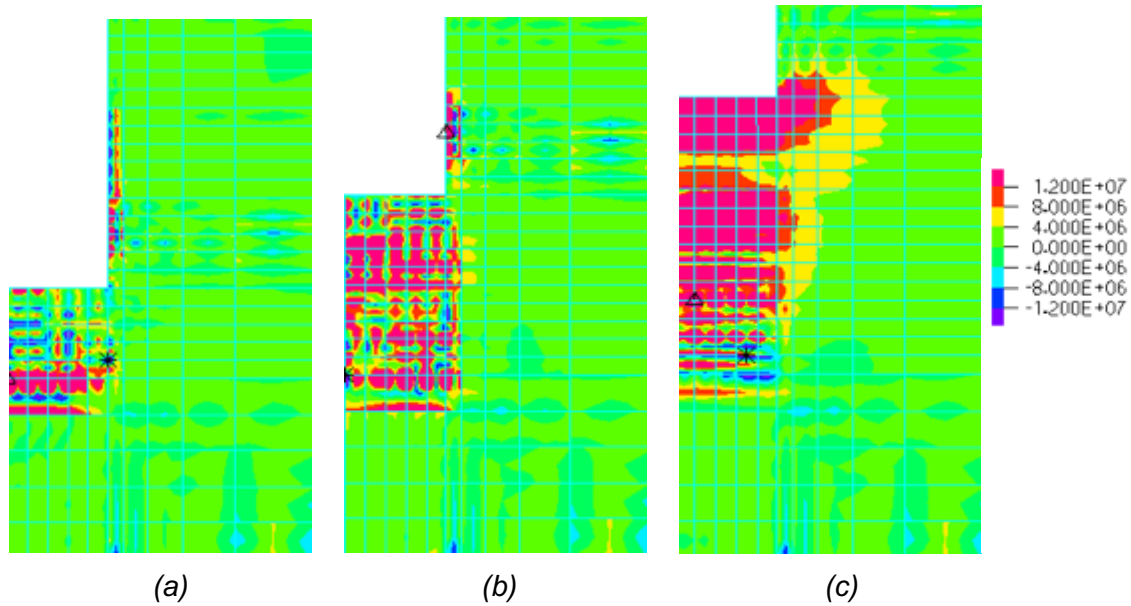
Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascuales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 32

Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h

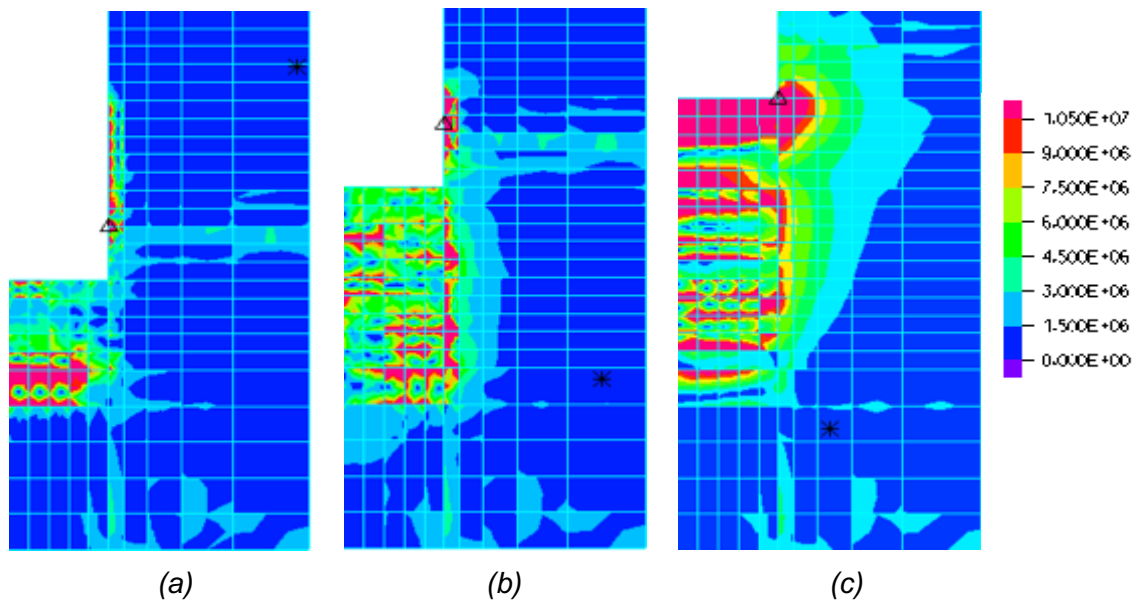


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 33a, 33b y 33c muestran los esfuerzos de corte máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 29a, 29b y 29c, respectivamente. Los esfuerzos máximos están dispersos en la estructura y son cercanos a 6MPa.

Figura 33

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h

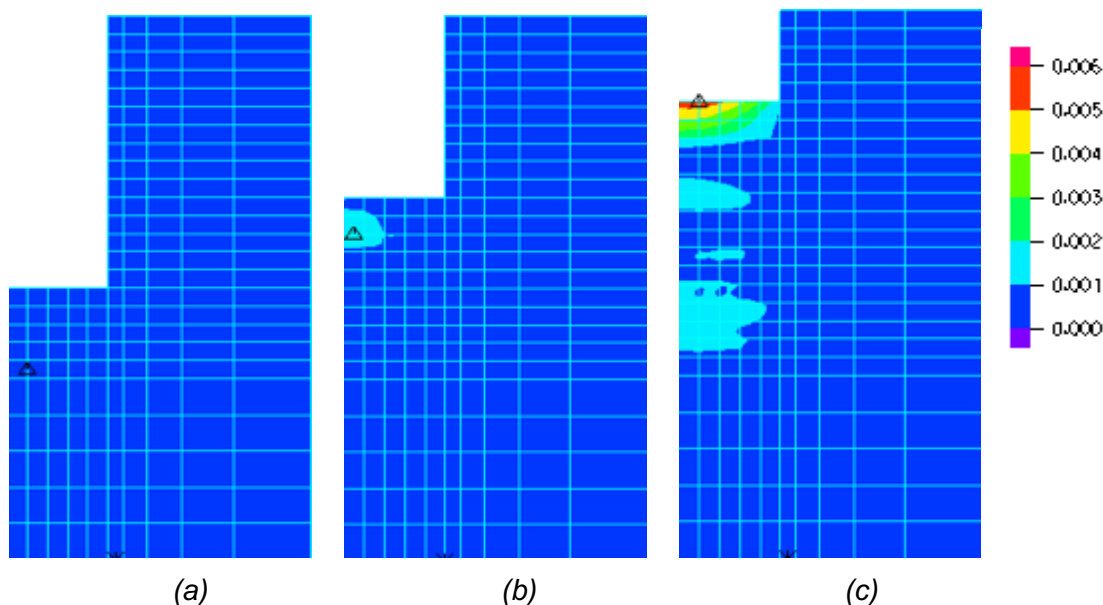


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 34a, 34b y 34c muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 29a, 29b y 29c, respectivamente. Nótese que, para los dos primeros vaciados no hay desplazamientos significativos. Pero para el tercero se identifican algunos desplazamientos cercanos a los 3mm en la superficie.

Figura 34

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 1D: Tuberías de enfriamiento a 5m

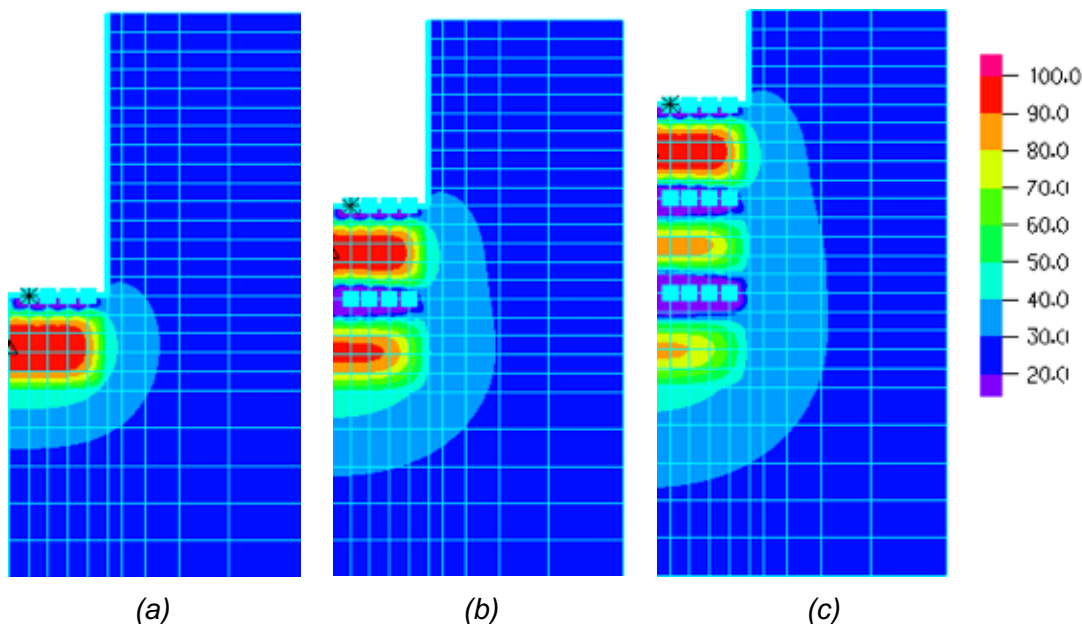
En este sub-caso se mantienen todas las condiciones consideradas en el Sub-caso 1A, con excepción de que se consideraron tuberías de enfriamiento al interior del concreto. Es decir, se mantiene una temperatura correspondiente a Tumbes y las propiedades térmicas / mecánicas de acuerdo a lo utilizado en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Pero, además de ello, se introdujeron tuberías de una pulgada espaciadas horizontalmente 1m y verticalmente 5m. En el análisis se consideró que por las tuberías circula agua con una temperatura cercana a 0°C, que se instalan durante la colocación del concreto, y que permanecen activas hasta el final del análisis.

Las figuras 35a, 35b y 35c muestran la distribución de temperatura para la colocación de cada volumen de concreto, medidas 4 días después del vaciado. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos de las temperaturas ocurren al interior de los bloques, sólo que ligeramente desplazados por la acción de las tuberías. Las temperaturas alcanzan valores

cercanos a los 90°C. Debe notarse respecto al sub-caso 1C, que incrementar el espaciamiento entre tuberías redujo grandemente la efectividad de la metodología.

Figura 35

Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

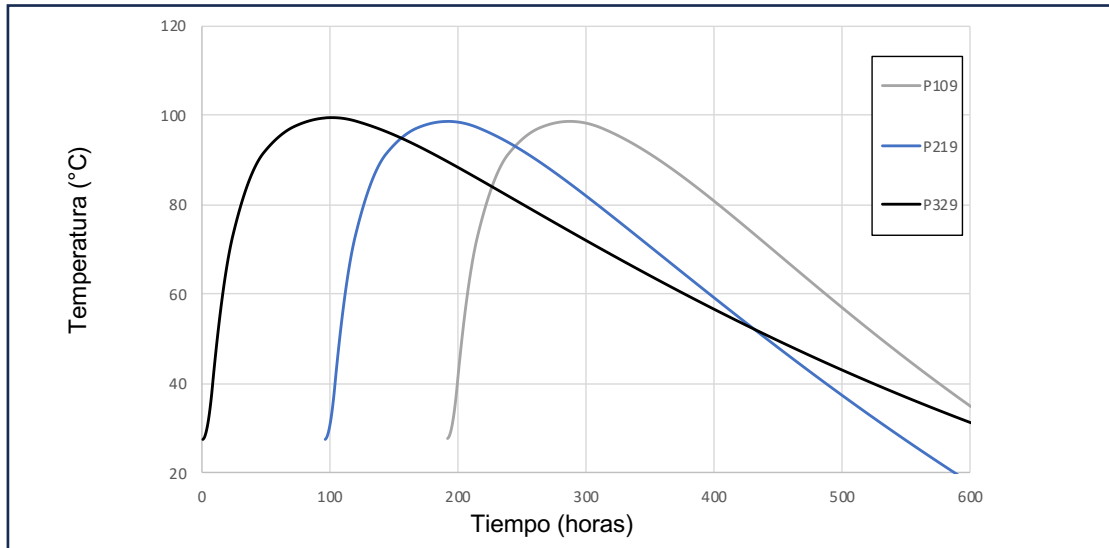
La figura 36 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados al centro de cada volumen. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 109 (bloque inferior), 219 (bloque intermedio) y 329 (bloque superior). En los tres casos se alcanza un pico cercano a los 100°C que se disipa lentamente.

Las figuras 37a, 37b y 37c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (comprensiones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 35a, 35b y 35c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos ocurren al interior de los volúmenes. En general, el nivel de esfuerzos experimentado no supera los 27MPa.

Las figuras 38a, 38b y 38c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 29a, 29b y 29c, respectivamente. Los valores máximos ocurren en la superficie del vaciado y entre los volúmenes, manteniéndose por debajo de los 8MPa.

Figura 36

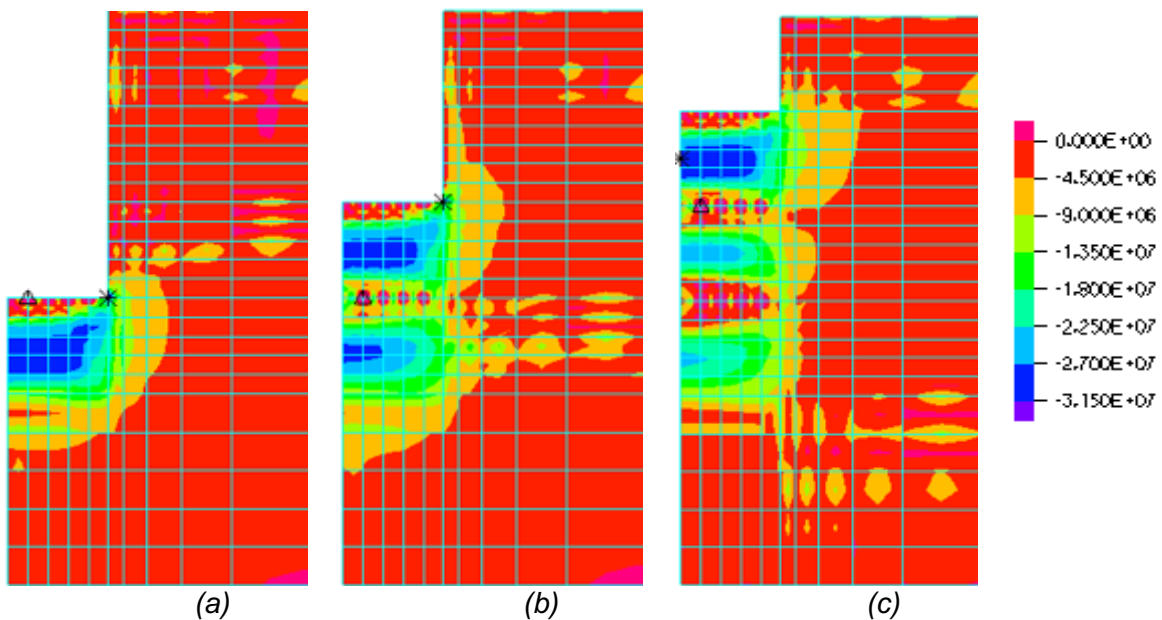
Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 37

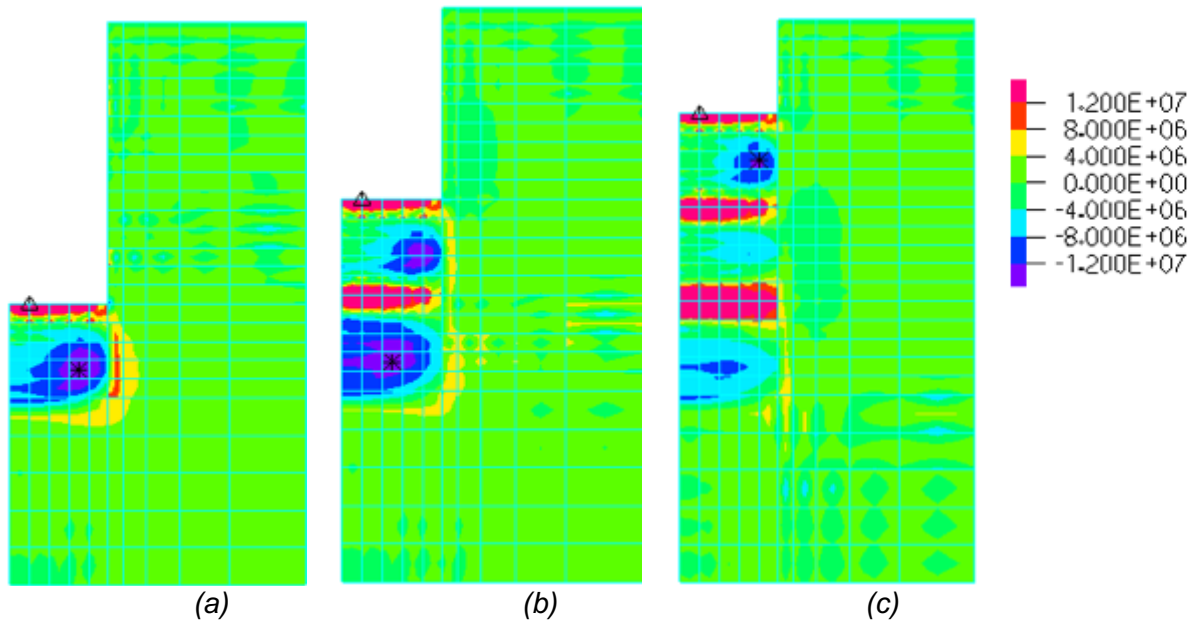
Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 38

Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h

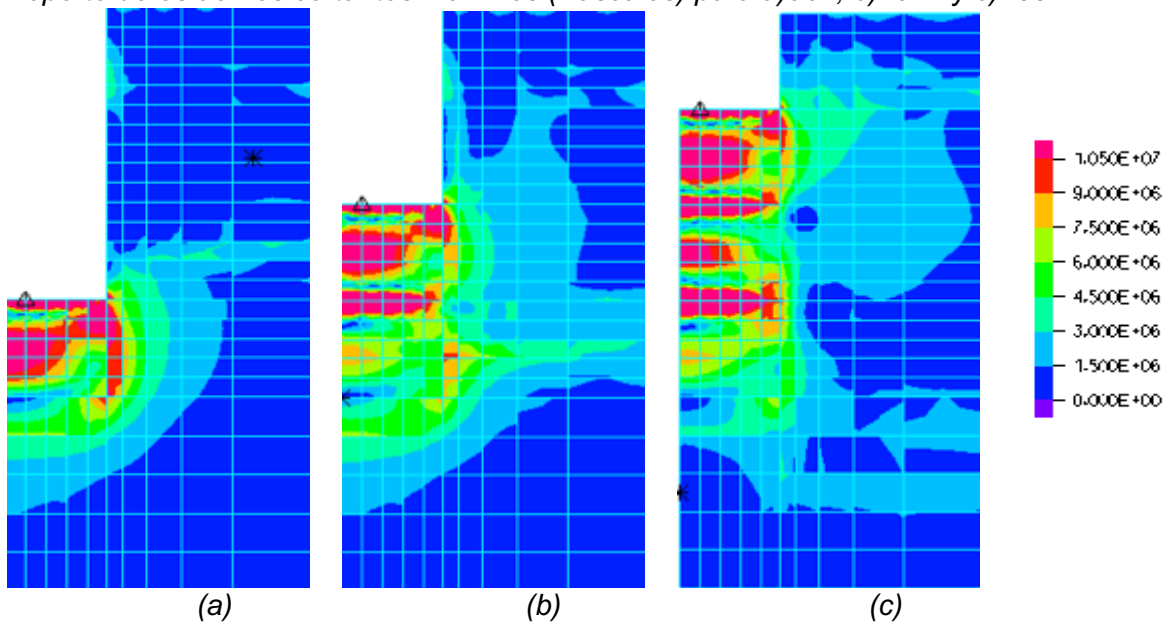


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 39a, 39b y 39c muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 25a, 25b y 25c, respectivamente. Los esfuerzos máximos se concentran al interior de los bloques y no superan los 9MPa.

Figura 39

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h

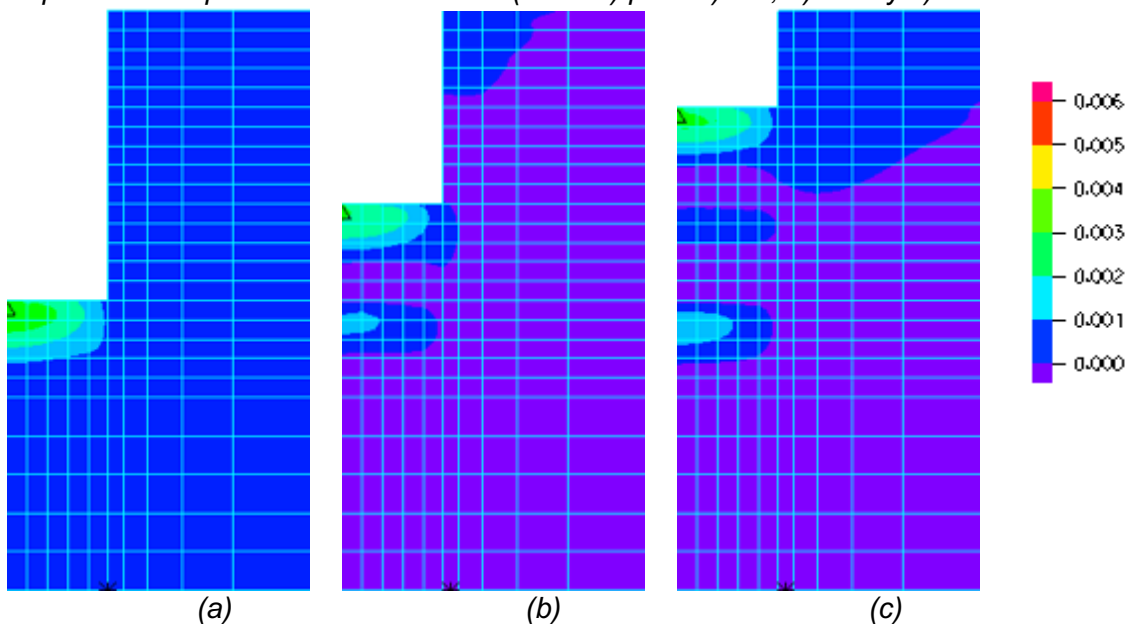


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 40a, 40b y 40c muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 35a, 35b y 35c, respectivamente. Nótese que, los valores máximos ocurren al centro de la superficie del volumen vaciado y no superan los 3mm.

Figura 40

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

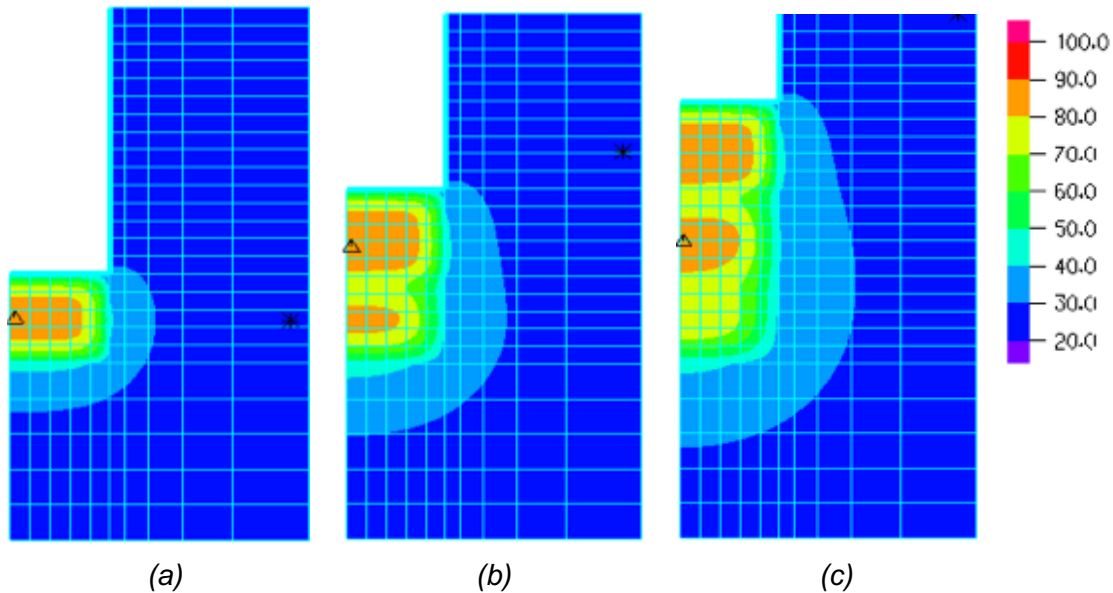
Sub-caso 1E: Cemento Tipo I (EEUU)

En este sub-caso se mantienen todas las condiciones consideradas en el Sub-caso 1A, con excepción de que se utiliza una curva de generación de calor para concreto fabricado con cemento estadounidense Portland del tipo I. Es decir, se mantiene una temperatura correspondiente a Tumbes y las propiedades térmicas / mecánicas de acuerdo a lo utilizado en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). La curva de calor para este cemento se obtuvo de los valores publicados por Soo (2010).

Las figuras 41a, 41b y 41c muestran la distribución de temperatura para la colocación de cada volumen de concreto, medidas 4 días después del vaciado. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos de las temperaturas ocurren en el centro de los bloques, sin embargo, los valores pico alcanzan valores cercanos a los 80°C, i.e. 20 °C por debajo de los picos indicados en el sub-caso 1A.

Figura 41

Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h

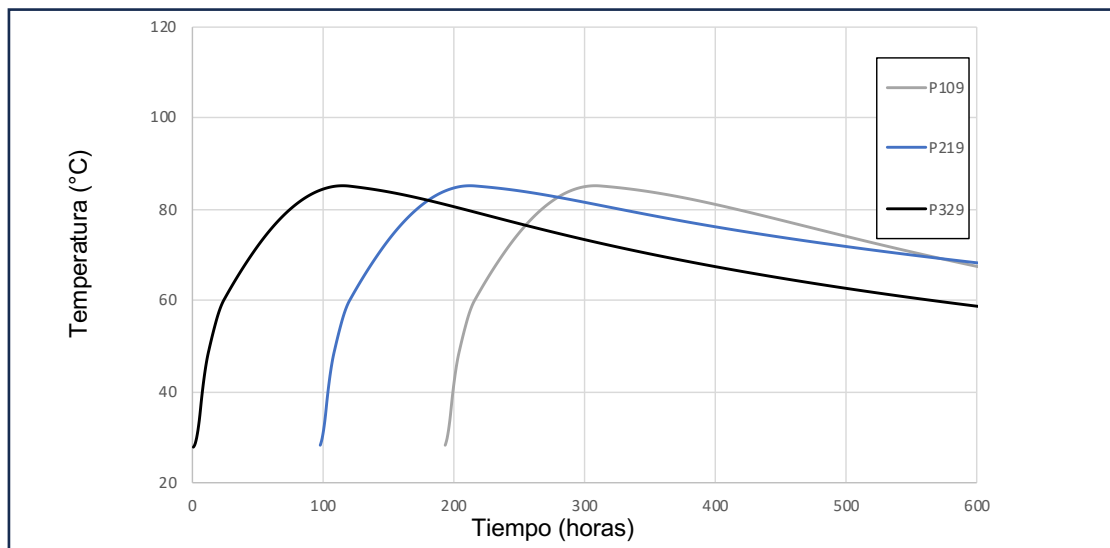


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 42 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados al centro de cada volumen. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 109 (bloque inferior), 219 (bloque intermedio) y 329 (bloque superior). En los tres casos se alcanza un pico cercano a los 90°C que lentamente descende hasta la temperatura ambiental. Nótese que se reportan temperaturas superiores a los 70°C tres semanas después del primer vaciado.

Figura 42

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329

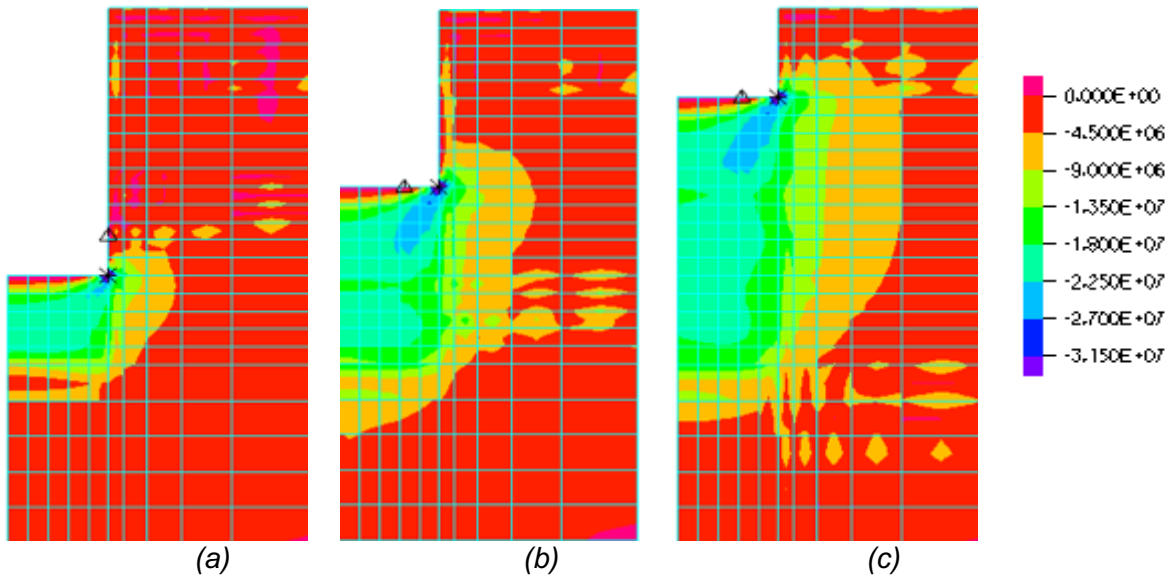


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 43a, 43b y 43c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 41a, 41b y 41c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos se producen al interior de los bloques y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos rondan los 18MPa.

Figura 43

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



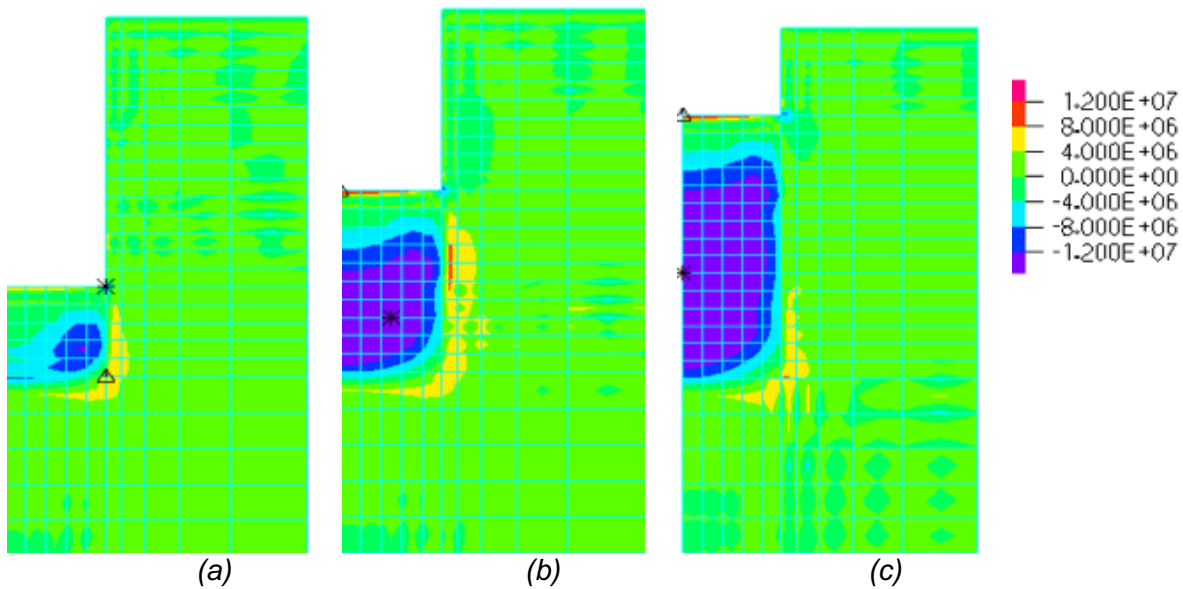
Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 44a, 44b y 44c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 41a, 41b y 41c, respectivamente. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado, y los picos se producen en el centro. Los valores mencionados son cercanos a los 8MPa.

Las figuras 45a, 45b y 45c muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 41a, 41b y 41c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen alrededor de los límites de materiales y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Los valores mencionados son cercanos a los 8MPa.

Figura 44

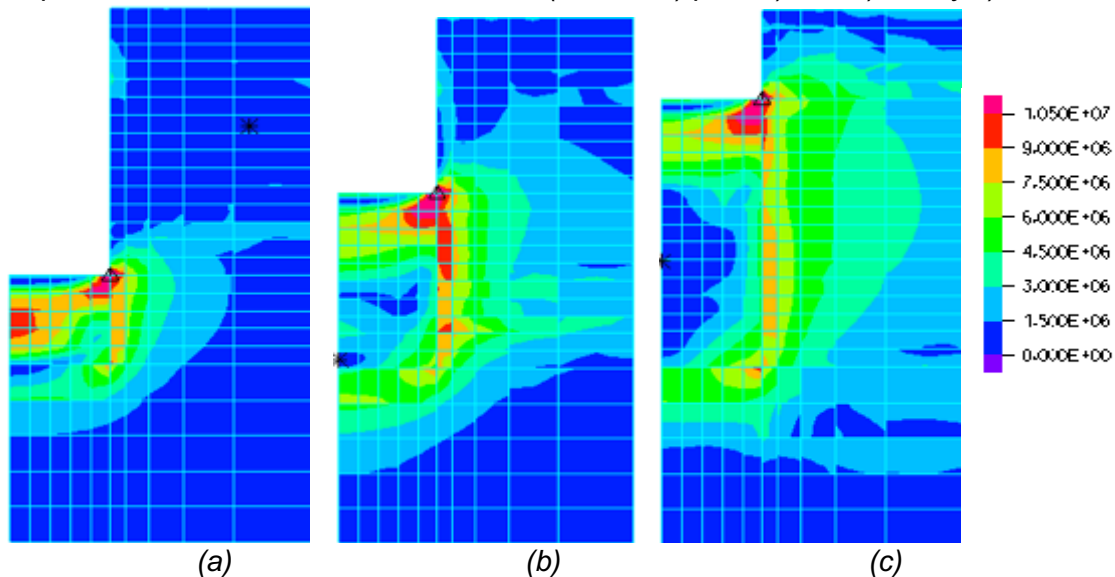
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 45

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



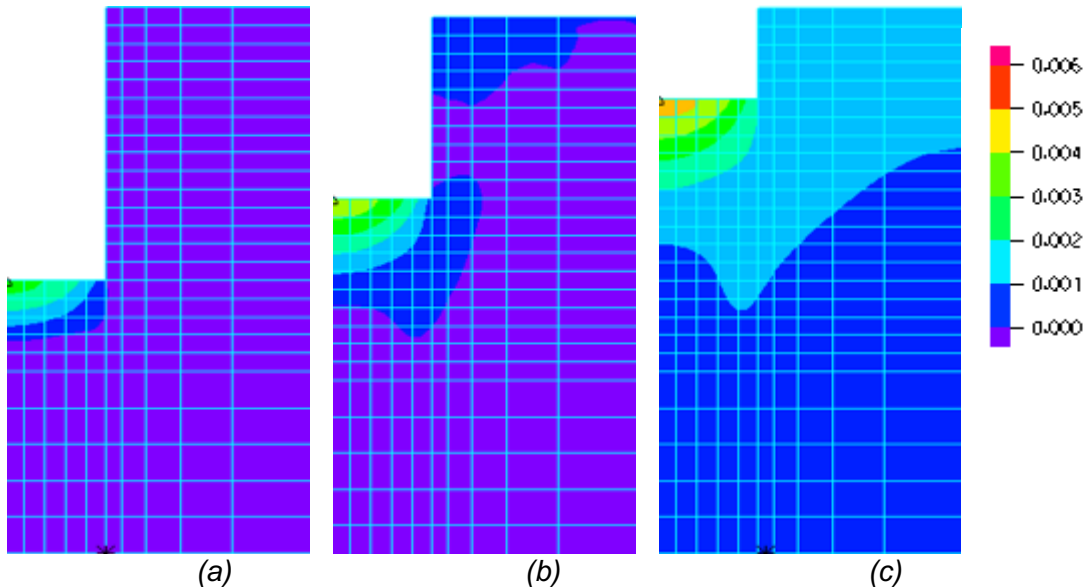
Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 46a, 46b y 46c muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 41a, 41b y 41c, respectivamente. Nótese

que, al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen en la superficie del volumen vaciado y alcanzan valores un poco más bajos, alrededor de los 3mm.

Figura 46

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 1F: Cemento Tipo I (Corea)

En este sub-caso se mantienen todas las condiciones consideradas en el Sub-caso 1A, con excepción de que se utiliza una curva de generación de calor para concreto fabricado con cemento coreano Portland tipo I. Es decir, se mantiene una temperatura correspondiente a Tumbes y las propiedades térmicas / mecánicas de acuerdo a lo utilizado en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). La curva de calor para este cemento se obtuvo de los valores publicados por Soo (2010).

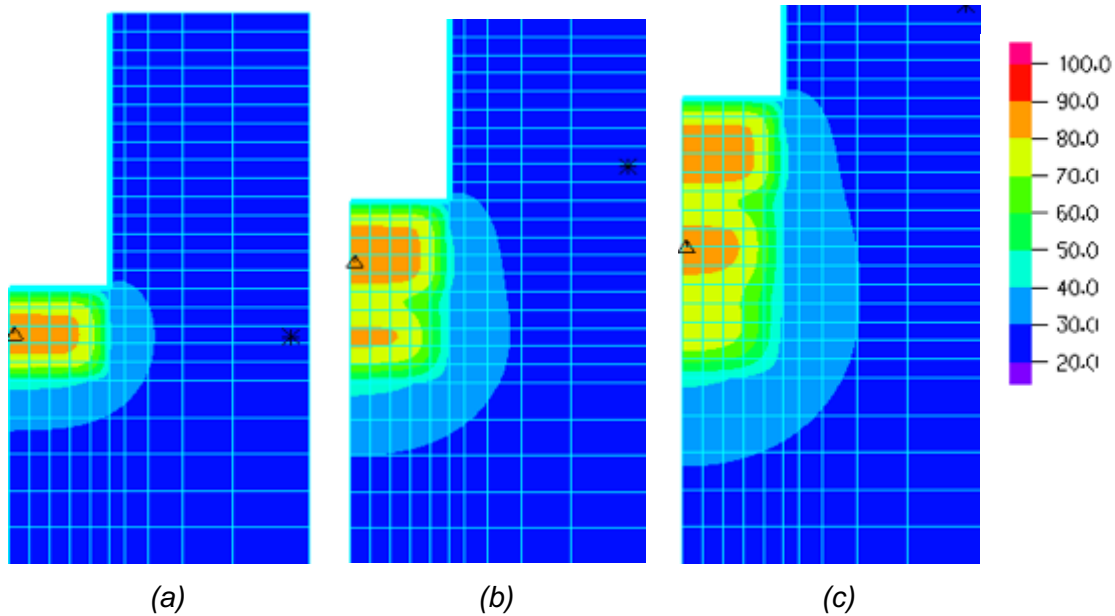
Las figuras 47a, 47b y 47c muestran la distribución de temperatura para la colocación de cada volumen de concreto, medidas 4 días después del vaciado. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos de las temperaturas ocurren en el centro de los bloques, sin embargo, los valores pico alcanzan valores cercanos a los 80°C, i.e. 20 °C por debajo de los picos indicados en el sub-caso 1A. Debe notarse que los resultados son bastante cercanos al del sub-caso anterior, 1E: Cemento Tipo I (EE. UU.), pero ligeramente más bajos.

La figura 48 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados al centro de cada volumen. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 109 (bloque inferior), 219 (bloque intermedio) y 329 (bloque superior). En los tres

casos se alcanza un pico cercano a los 85°C que lentamente descende hasta la temperatura ambiental. Se reportan temperaturas superiores a los 70°C tres semanas después del primer vaciado.

Figura 47

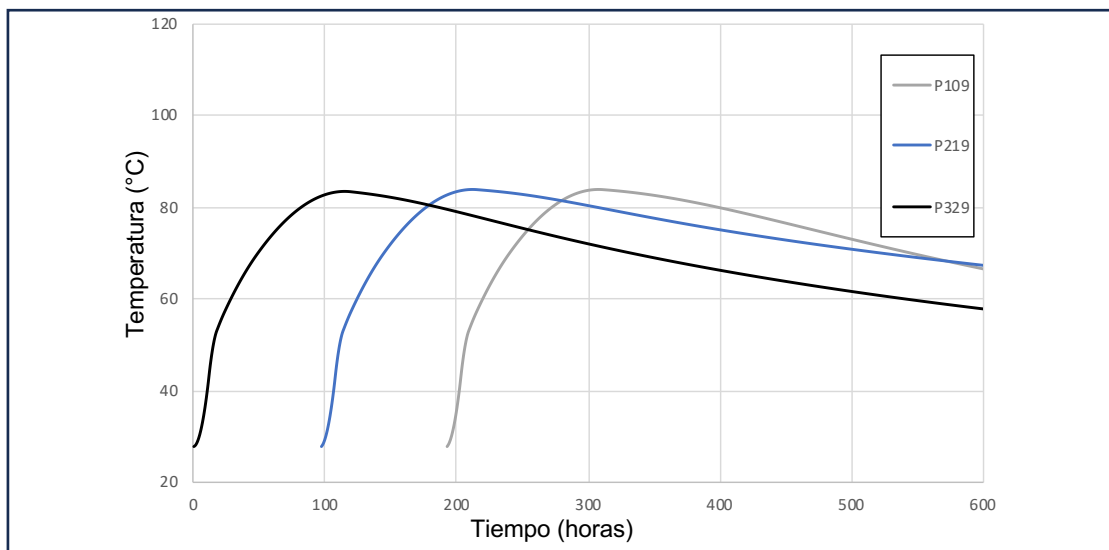
Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 48

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329

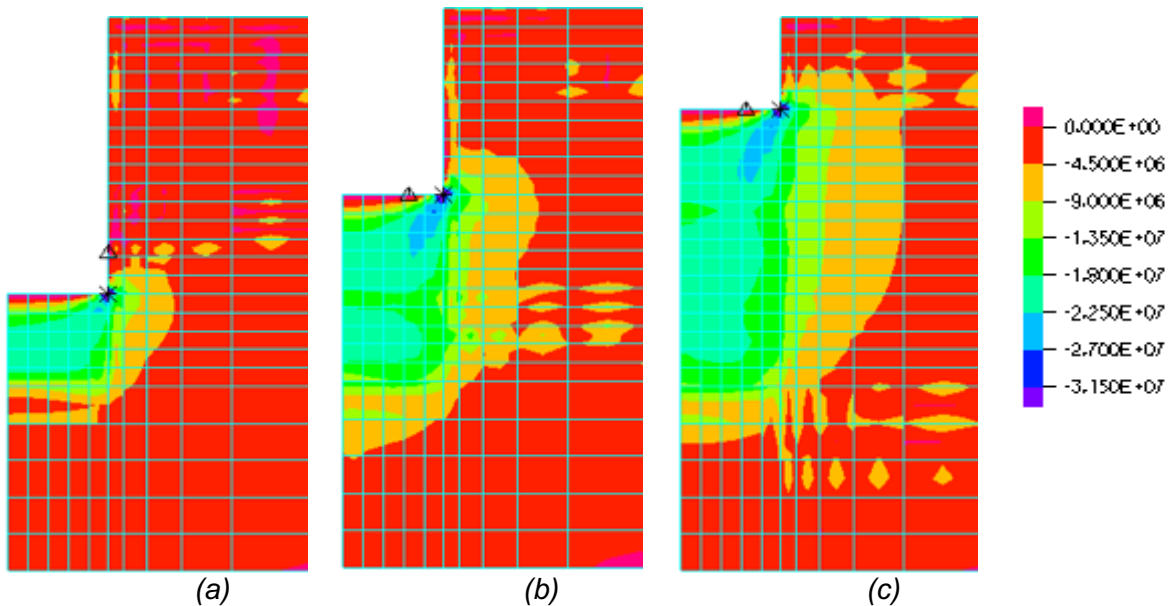


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 49a, 49b y 49c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 47a, 47b y 47c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos se producen al interior de los bloques y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos rondan los 22MPa.

Figura 49

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 50a, 50b y 50c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 47a, 47b y 47c, respectivamente. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado, y los picos se producen en el centro. Los valores mencionados son cercanos a los 8MPa.

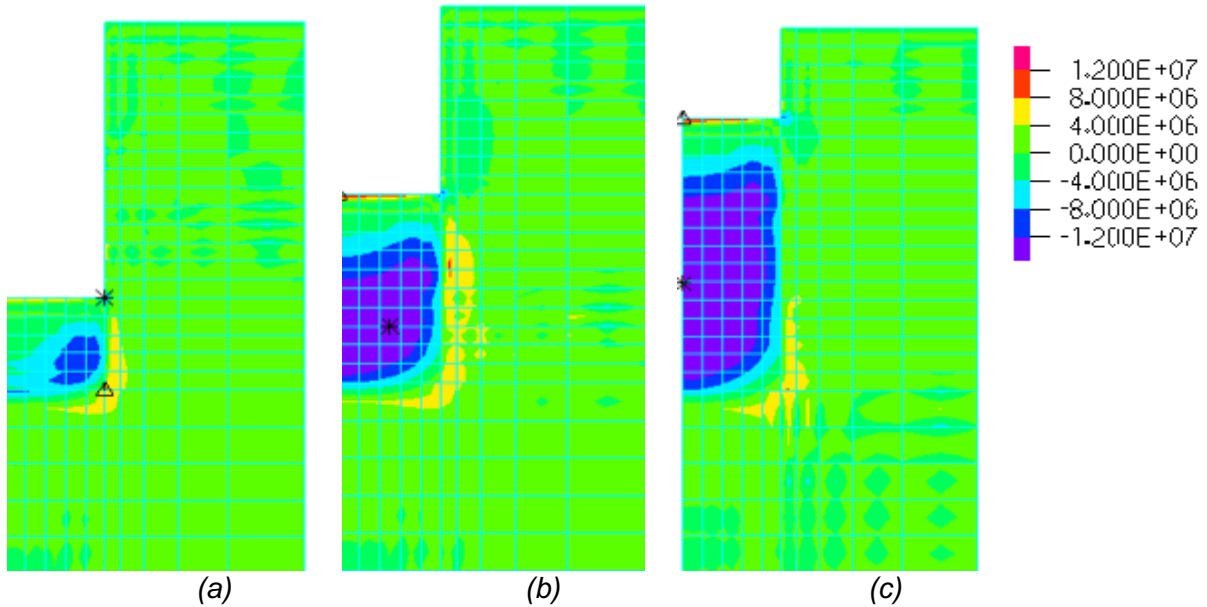
Las figuras 51a, 51b y 51c muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 47a, 47b y 47c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen alrededor de los límites de materiales y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Los valores mencionados son cercanos a los 8MPa.

Las figuras 52a, 52b y 52c muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 47a, 47b y 47c, respectivamente. Nótese

que, al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen en la superficie del volumen vaciado y alcanzan valores un poco más bajos, alrededor de los 3mm.

Figura 50

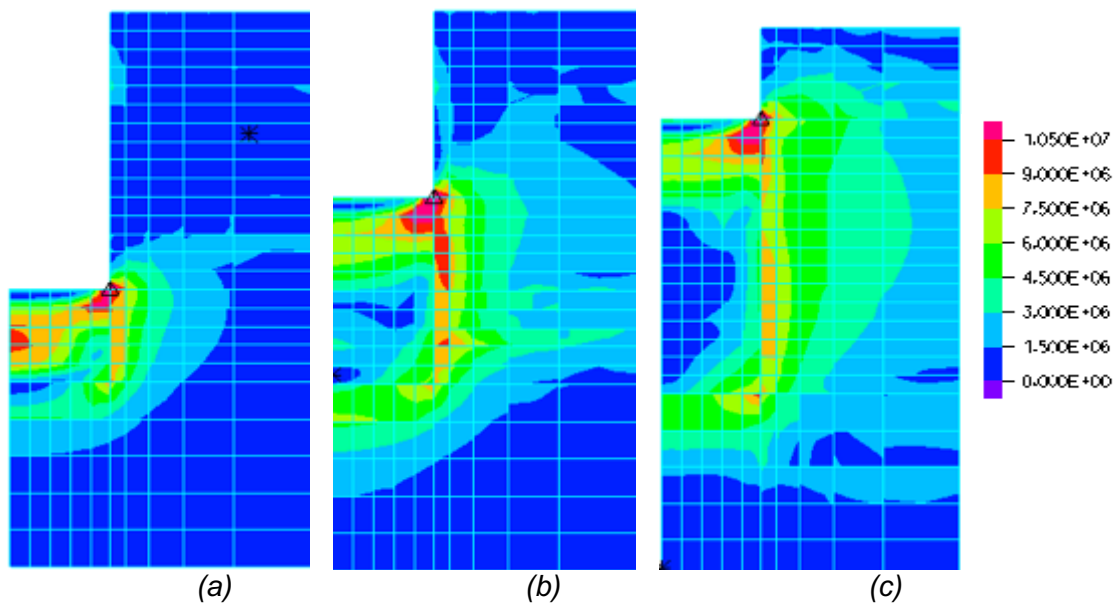
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 51

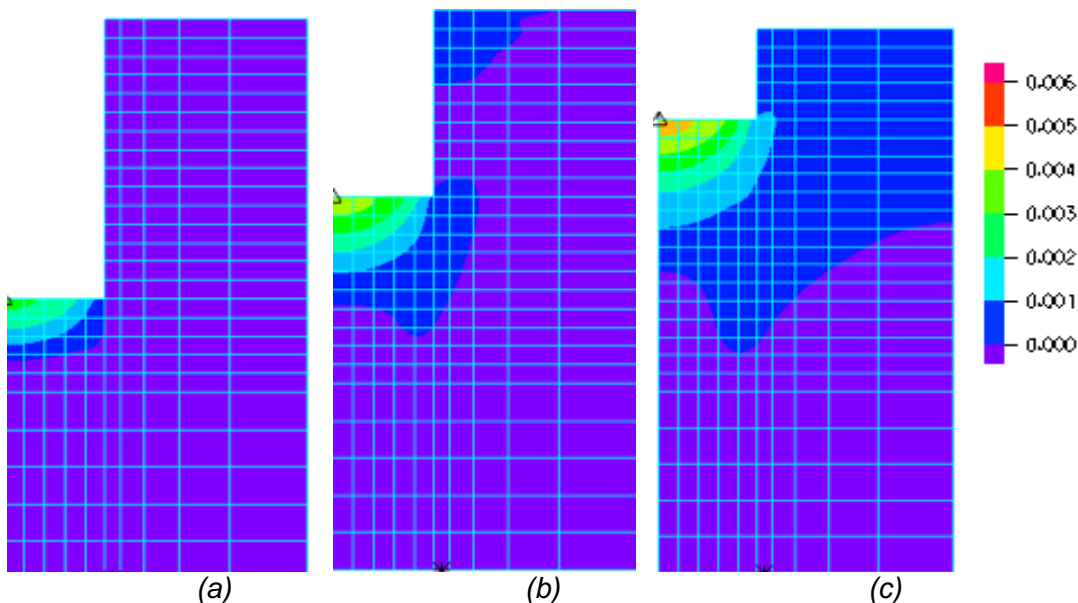
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 52

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 1G: Cemento Tipo IV (Corea)

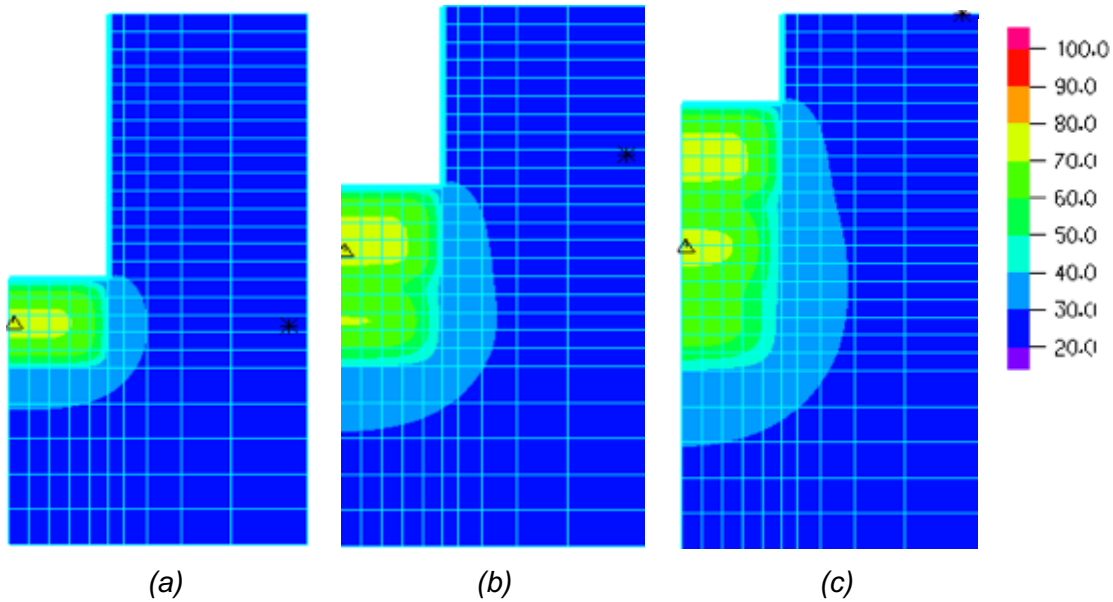
En este sub-caso se mantienen todas las condiciones consideradas en el Sub-caso 1A, con excepción de que se utiliza una curva de generación de calor para concreto fabricado con cemento coreano del tipo IV. Es decir, se mantiene una temperatura correspondiente a Tumbes y las propiedades térmicas / mecánicas de acuerdo a lo utilizado en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). La curva de calor para este cemento se obtuvo de los valores publicados por Soo (2010).

Las figuras 53a, 53b y 53c muestran la distribución de temperatura para la colocación de cada volumen de concreto, medidas 4 días después del vaciado. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos de las temperaturas ocurren en el centro de los bloques, sin embargo, los valores pico alcanzan valores cercanos a los 70°C, i.e. 30 °C por debajo de los picos indicados en el sub-caso 1A.

La figura 54 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados al centro de cada volumen. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 109 (bloque inferior), 219 (bloque intermedio) y 329 (bloque superior). En los tres casos se alcanza un pico cercano a los 70°C que lentamente desciende hasta la temperatura ambiental.

Figura 53

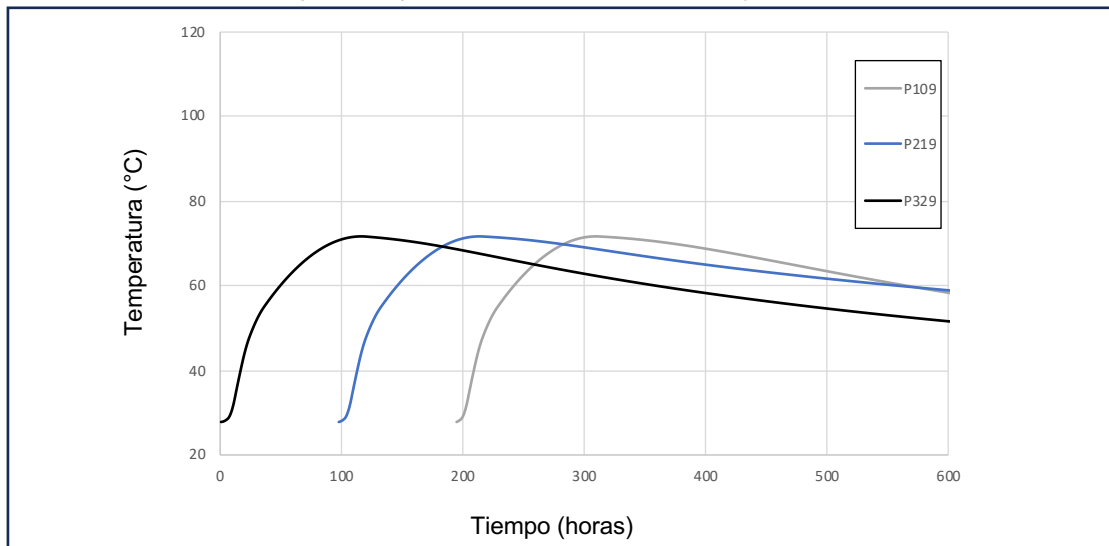
Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 54

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329



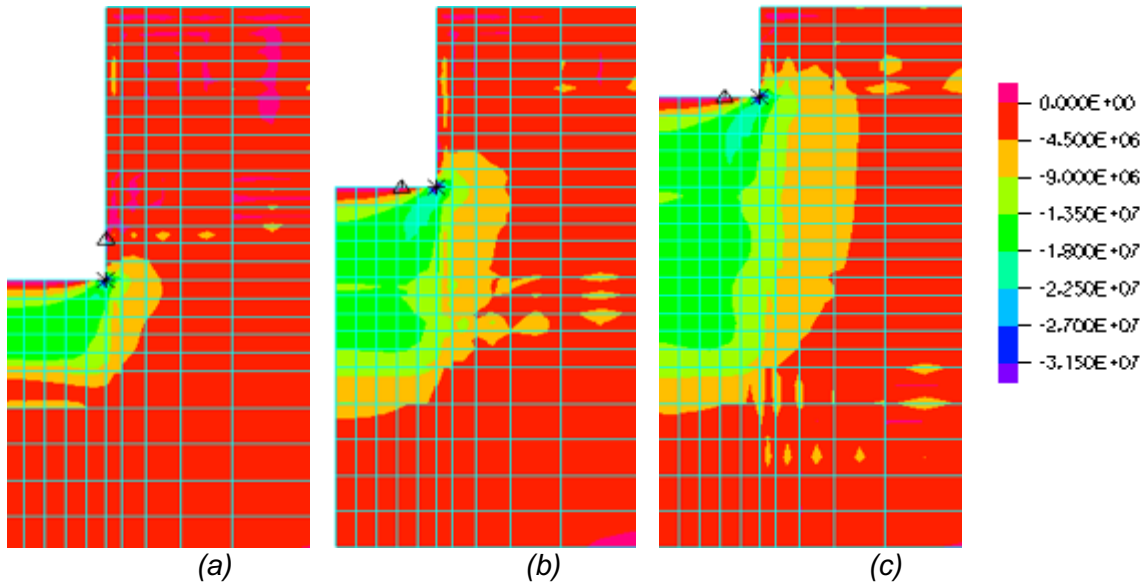
Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 55a, 55b y 55c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (comprensiones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 53a, 53b y 53c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos se producen al interior

de los bloques y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Los valores mínimos están cerca de los 18MPa.

Figura 55

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

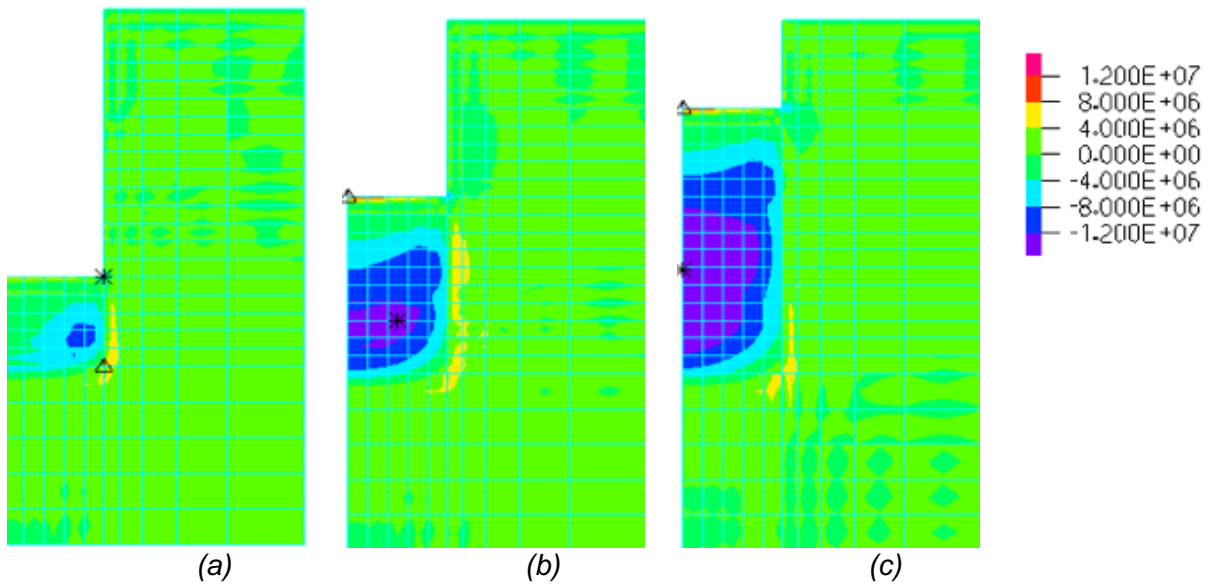
Las figuras 56a, 56b y 56c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 53a, 53b y 53c, respectivamente. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado, y los picos se producen en el centro. Los valores mencionados son cercanos a los 8MPa.

Las figuras 57a, 57b y 57c muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 53a, 53b y 53c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen alrededor de los límites de materiales y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Los esfuerzos se mantienen por debajo de los 3MPa.

Las figuras 58a, 58b y 58c muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 53a, 53b y 53c, respectivamente. Nótese que, al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen en la superficie del volumen vaciado, pero alcanzan valores mucho más bajos, alrededor de los 2mm.

Figura 56

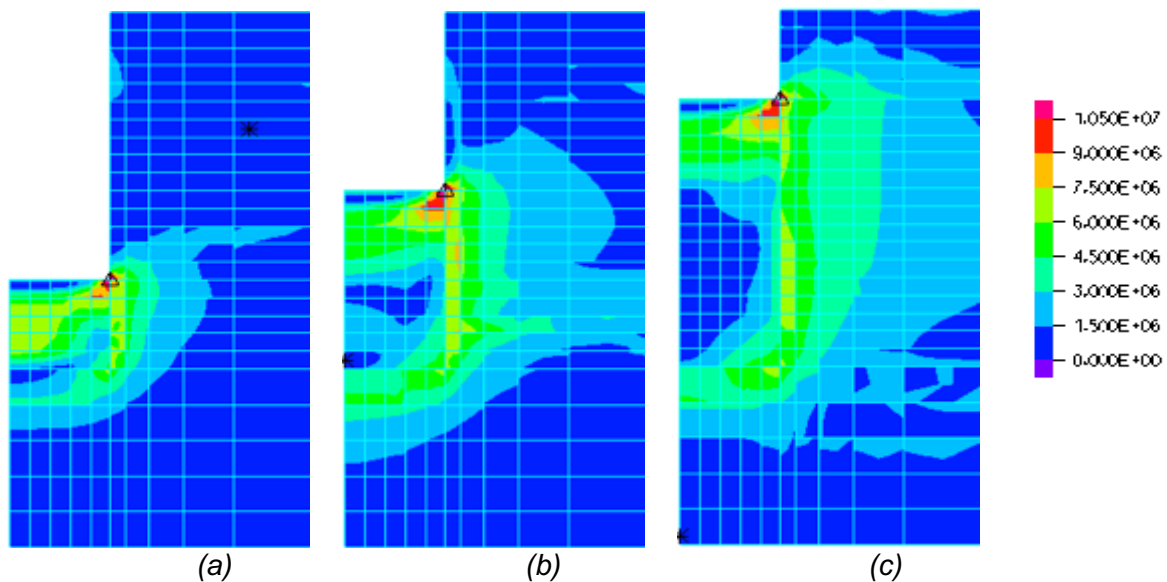
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 57

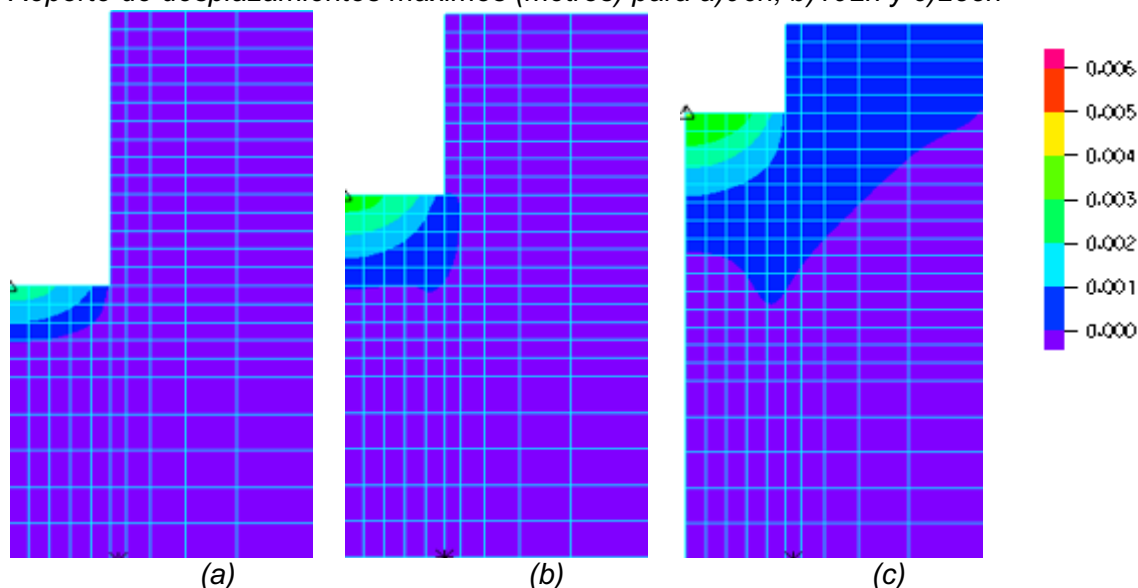
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 58

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 1H: Vaciado en clima frío

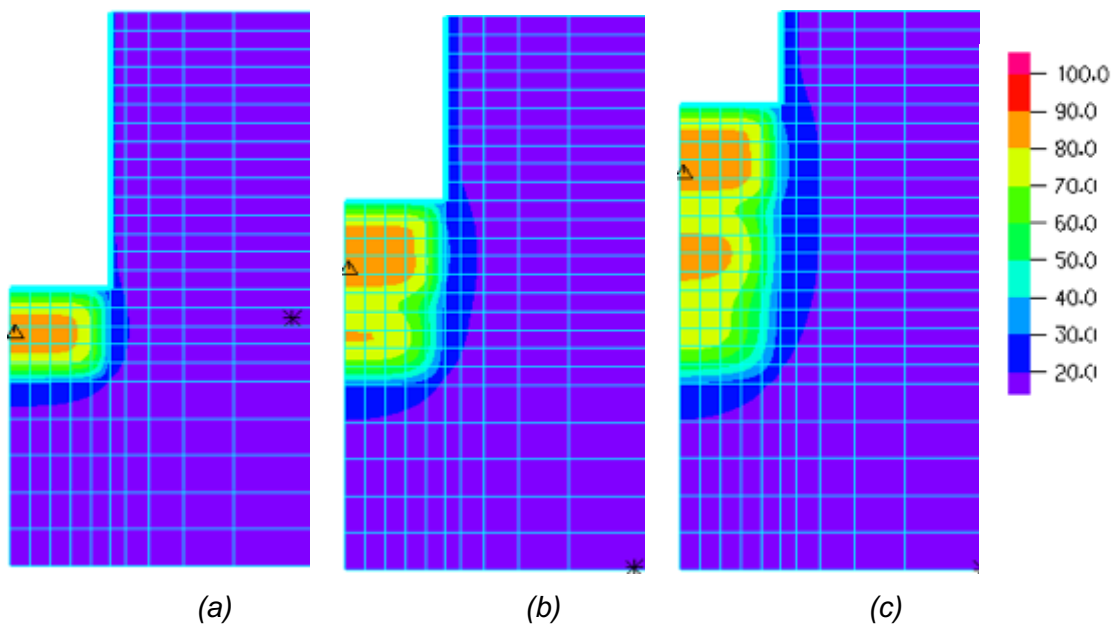
En este sub-caso se mantienen todas las condiciones consideradas en el Sub-caso 1A, con excepción de que se utiliza la temperatura ambiental correspondiente a Cusco, para simular los efectos de un entorno de vaciado frío. Es decir, se mantiene una temperatura correspondiente a Tumbes y las propiedades térmicas / mecánicas de acuerdo a lo utilizado en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). La temperatura ambiental utilizada corresponde al valor promedio de las temperaturas publicadas por SENAMHI para Cusco, las que se pueden apreciar en la Figura 12.

Las figuras 59a, 59b y 59c muestran la distribución de temperatura para la colocación de cada volumen de concreto, medidas 4 días después del vaciado. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos de las temperaturas ocurren en el centro de los bloques, sin embargo, los valores pico alcanzan valores cercanos a los 80°C, i.e. 20 °C por debajo de los picos indicados en el sub-caso 1A.

La figura 60 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados al centro de cada volumen. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 109 (bloque inferior), 219 (bloque intermedio) y 329 (bloque superior). En los tres casos se alcanza un pico cercano a los 85°C que lentamente descende hasta la temperatura ambiental.

Figura 59

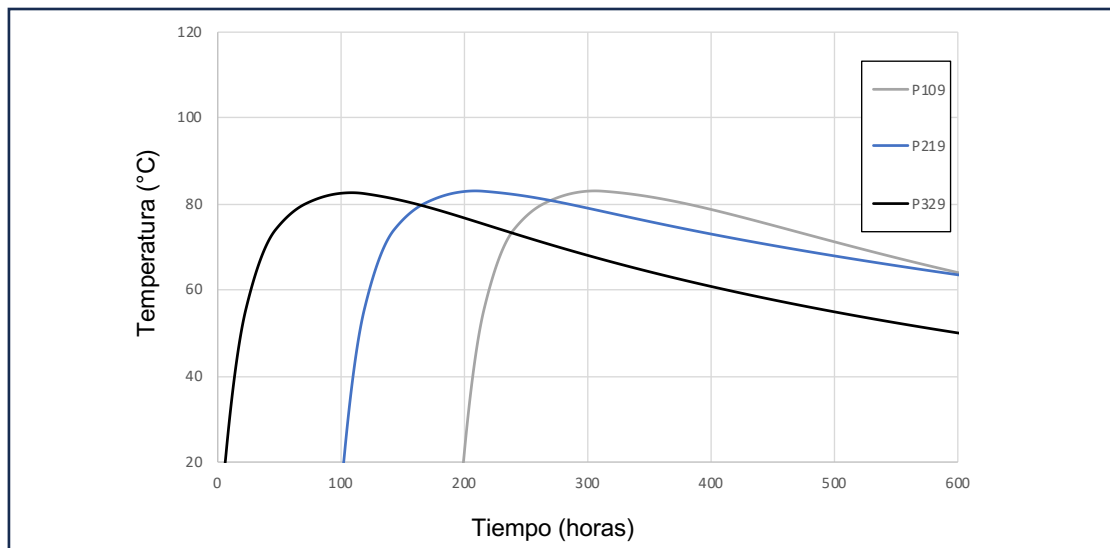
Reporte de temperaturas (Celsius) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 60

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 109, 219 y 329



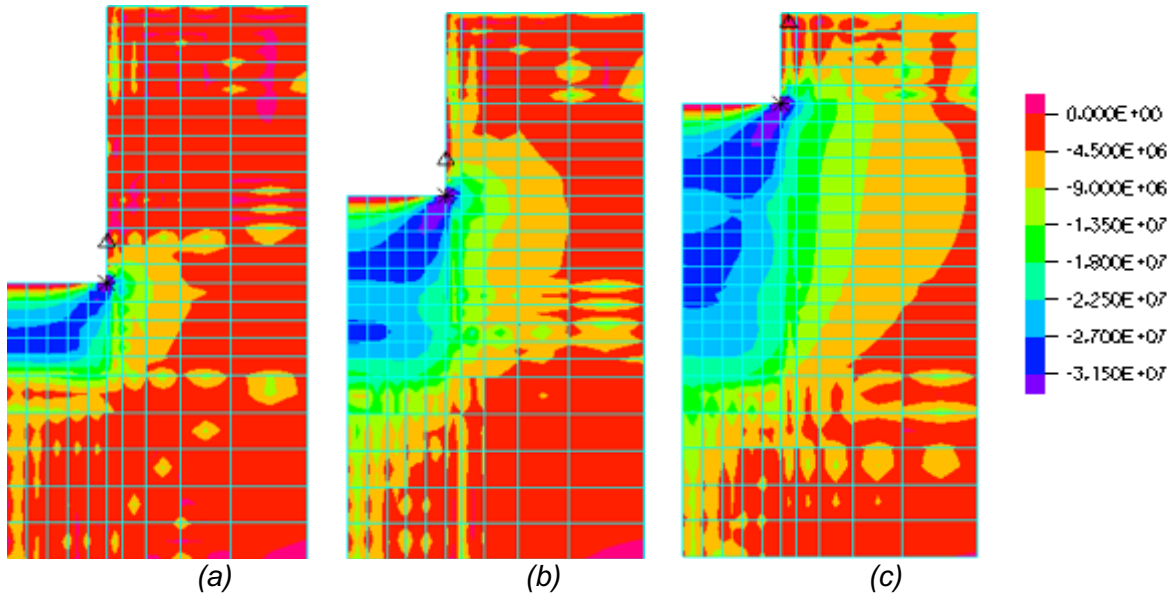
Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 61a, 61b y 61c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 59a, 59b y 59c,

respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores mínimos se producen al interior de los bloques y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Los valores mínimos rondan los 22MPa.

Figura 61

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



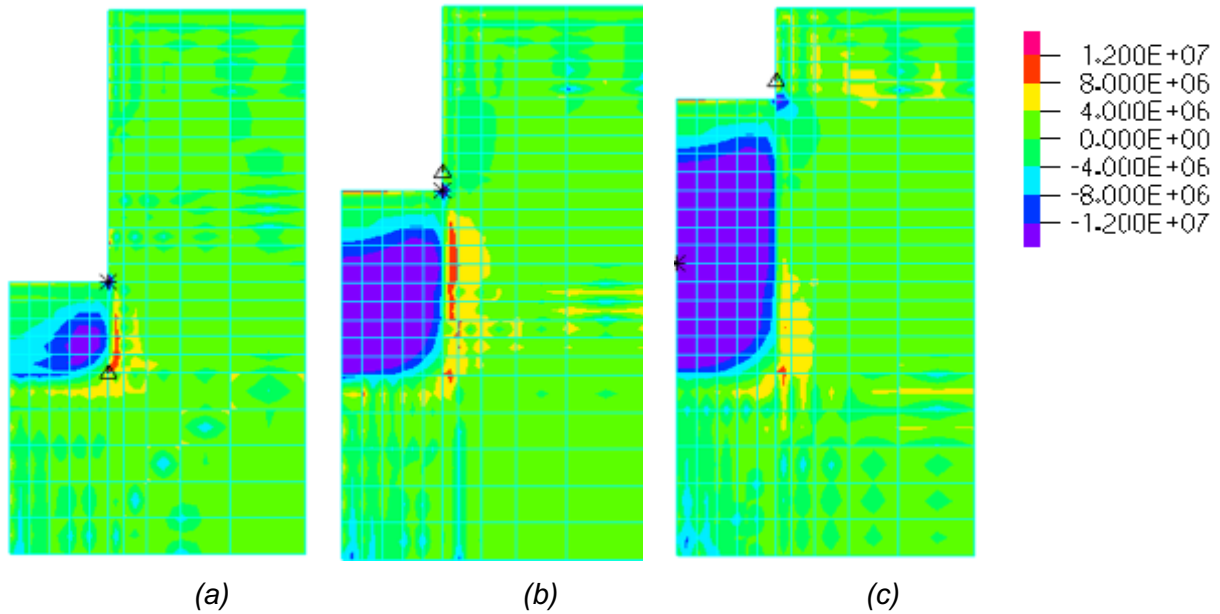
Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 62a, 62b y 62c muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para los patrones térmicos mostrados en las figuras 59a, 59b y 59c, respectivamente. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado, y los picos se producen en el centro. Los valores mencionados son cercanos a los 8MPa.

Las figuras 63a, 63b y 63c muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 59a, 59b y 59c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen alrededor de los límites de materiales y toman un valor pico en los extremos de la superficie del volumen vaciado. Los esfuerzos máximos superan los 5MPa.

Figura 62

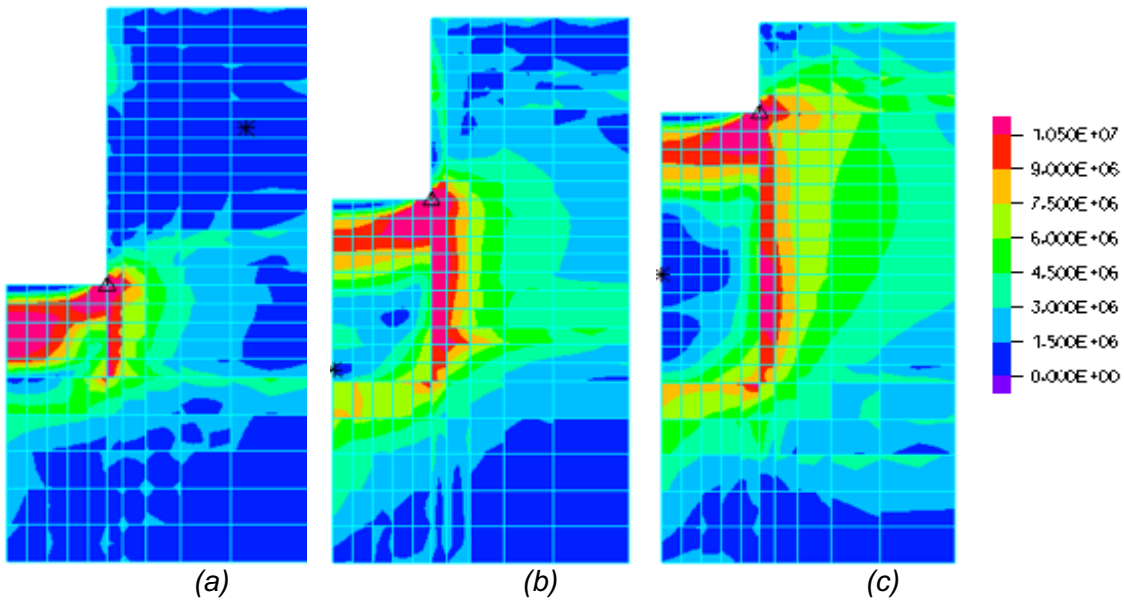
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 63

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para a)96h, b)192h y c)288h

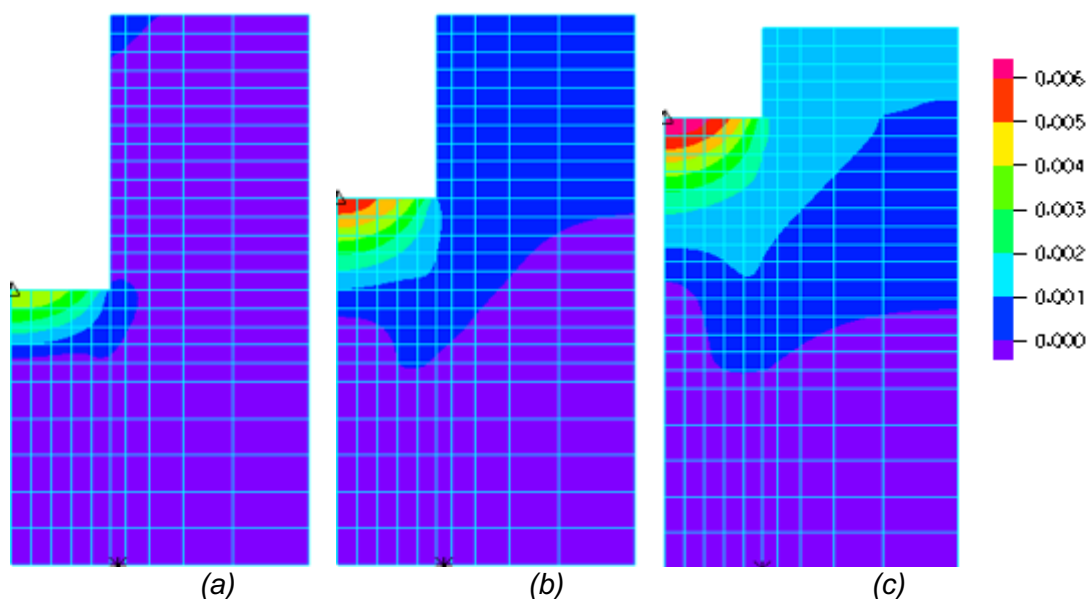


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 64a, 64b y 64c muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para los patrones térmicos mostrados en las figuras 59a, 59b y 59c, respectivamente. Al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen en la superficie del volumen vaciado, y alcanzan valores máximos alrededor de los 4mm.

Figura 64

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para a)96h, b)192h y c)288h



Fuente: Reportes creados en ADINA

4.3.4 Análisis de resultados

Temperatura

En el sub-caso 1A, caso original: sin metodologías de enfriamiento, se puede observar que las temperaturas alcanzan los 100°C en una parte importante de cada bloque colocado. Además, dichas temperaturas permanecen por encima de los 70°C durante varias semanas. Por lo expuesto en el capítulo II, hay evidencia de que ese rango térmico puede impactar negativamente al concreto en términos de resistencia y porosidad. Por lo tanto, ese rango de temperaturas debe evitarse y para ello es necesario controlar la generación de calor al interior del concreto fresco.

El enfriamiento del concreto, como se demuestra en el sub-caso 1B (concreto colocado a 5°C) logra reducir las temperaturas significativamente y disminuye los picos en al menos 20°C. Sin embargo, las temperaturas de algunos sectores permanecen encima de los 70°C

por algunas semanas. Lo cual resalta la necesidad de implementar alguna otra metodología en paralelo para lograr el control térmico.

El uso de tuberías de enfriamiento, como se muestra en los sub-casos 1C y 1D, demuestra el potencial de lograr el control térmico completo, pero los resultados demuestran que se depende altamente de un espaciamiento adecuado. La colocación de las tuberías a 2.5m, como se probó el sub-caso 1C, logra llevar a casi todo el conjunto por debajo de los 70°C, aunque con ajustes menores sería posible lograr la totalidad. Sin embargo, la colocación de tuberías a 5m, como se muestra en el sub-caso 1D, reduce las temperaturas con un alcance limitado. Es así que, en aquellas regiones alejadas de las tuberías se desarrollaron temperaturas cercanas a los 100°C, como en el sub-caso 1A. Entonces se puede concluir que el espaciamiento es clave para la efectividad de esta metodología.

El uso de cementos alternativos; como se probó en los sub-casos 1E, 1F y 1G; puede reducir las temperaturas significativamente. Debe tomarse en cuenta que la selección del tipo adecuado de cemento es importante. Los cementos del tipo I de origen estadounidense o coreano desarrollaron picos entre 10 y 15°C por debajo de los picos logrados con el cemento considerado en el Primer de ADINA (2021), lo que los mantiene en el rango perjudicial. Pero, el cemento del Portland tipo IV es efectivo para el control térmico, ya que mantiene las temperaturas por debajo de los 70°C.

La colocación de concreto en un clima frío, como se demuestra en el sub-caso 1H, tiene efectividad limitada. La colocación en Cusco reduciría la temperatura pico en 20°C, un efecto comparable al del caso 1B: concreto colocado a 5°C. Por lo cual también sería necesario utilizar alguna metodología complementaria.

Esfuerzos y desplazamientos

Como se puede apreciar en los sub-casos presentados, reducir la variación térmica logra disminuir los esfuerzos, aunque no de una manera lineal. A fin de evaluar el impacto de los esfuerzos generados, se hace necesario establecer algunos límites basados en las metodologías de diseño vigentes.

Actualmente se suelen utilizar los métodos LRFD (Diseño por cargas y resistencia factoradas) y en algunos casos ASD (Diseño por esfuerzos admisibles) para la mayoría de diseños estructurales. En un análisis convencional con el método LRFD se incrementan las cargas utilizando factores de amplificación y se compara con la resistencia de los materiales ligeramente reducida. Por otra parte, el método ASD, en el análisis típico, suma las cargas sin usar factores, pero reduce más drásticamente la resistencia de los materiales. Como resultado

de utilizar estos métodos se suele limitar el nivel de esfuerzos reales a un rango equivalente a un 40-60% de la resistencia de los materiales. Solo como referencia se consideran más adelante los órdenes de magnitud de esfuerzos que serían admisibles en una situación de esfuerzo uniaxial: para un concreto estándar con resistencia nominal de 20MPa podrían limitarse las compresiones a 50% de la resistencia, es decir 10MPa, y las tracciones a un 10% de ese valor, es decir 1MPa. Sin embargo, debe tenerse presente que en la mayor parte de los casos analizados se tienen condiciones de esfuerzo multiaxial, en las que podrían resistirse esfuerzos de compresión o esfuerzos cortantes muy superiores a los que serían admisibles en el concreto no confinado y sometido a un esfuerzo uniaxial (Chen y Han, 1988).

En todos los sub-casos evaluados el concreto experimenta esfuerzos de compresión superiores a los 30Mpa, con excepción de los casos 1C (tuberías de enfriamiento a 2.5m) y 1G (cemento tipo IV de Corea). En ambos sub-casos los esfuerzos se mantienen por debajo de los 20MPa.

En cuanto a los esfuerzos de tracción, se experimentan en casi todos los sub-casos valores superiores a los 10MPa. La excepción son los sub-casos 1G (cemento tipo IV de Corea) y el 1H (vaciado en clima frío) en los que los esfuerzos se mantienen por debajo de los 5 MPa.

Los esfuerzos de corte se comportan de manera similar a los esfuerzos de compresión. Se alcanzan los 10MPa en todos los casos excepto cuando se utilizan tuberías de enfriamiento (sub-caso 1C) o cemento Portland tipo IV (sub-caso 1G). En estos casos el nivel de esfuerzos se encuentra por debajo de los 5 MPa.

De acuerdo a lo evaluado en los casos previamente presentados resulta difícil mantener los esfuerzos experimentados por debajo de los límites mencionados líneas arriba, aún con el uso de las metodologías de enfriamiento. Sin embargo, se ha demostrado experimental y analíticamente que el confinamiento incrementa la capacidad del concreto a resistir esfuerzos. Por lo mencionado, las porciones más afectadas serían aquellas donde se experimenten esfuerzos elevados cerca de la superficie de vaciado. En esas zonas el confinamiento no es suficientemente significativo como para incrementar la capacidad de resistir esfuerzos, por lo que podrían originarse fisuras.

Por último, el nivel de deformaciones máximo suele ocurrir en la superficie de los volúmenes colocados, y alcanza como máximo los 5 milímetros. Los sub-casos con menor desplazamiento corresponden a los que se evaluaron con tuberías de enfriamiento (1C) y con cemento coreano del tipo IV (1G) en los que el desplazamiento no supera los 2 milímetros.

4.4 Caso 2: Análisis plano de un túnel

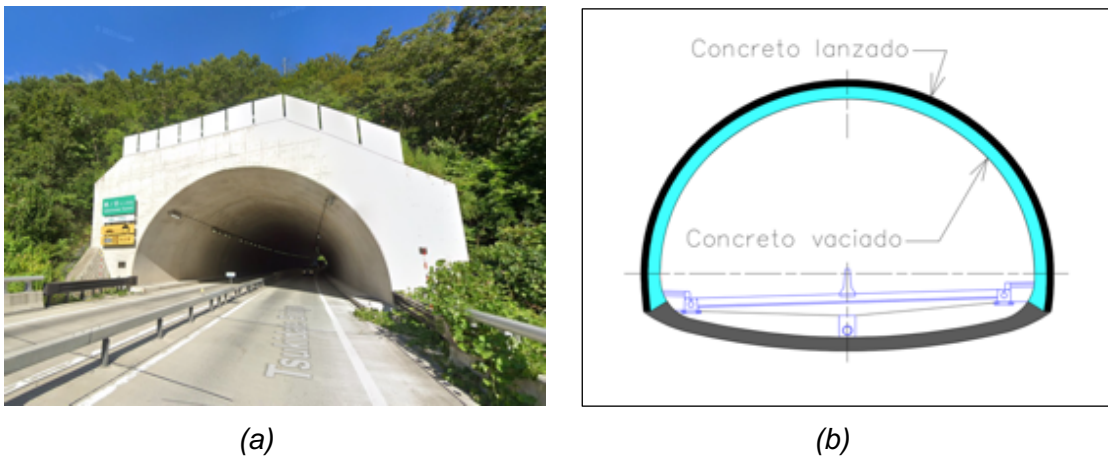
4.4.1 Descripción del caso

Este caso corresponde a un túnel de concreto construido en roca. Las figuras 65a y 65b muestran una imagen referencial y un esquema de los componentes estructurales necesarios de acuerdo al nuevo método austriaco de construcción de túneles (NATM), respectivamente. Siguiendo el NATM, primero se coloca una capa de concreto lanzado que asegura la roca suelta. Luego, se construyen los elementos definitivos de concreto armado, que suelen tener de 40 a 50 cm de espesor. Seguidamente, se coloca la base del túnel y finalmente las paredes laterales, estabilizando la estructura definitivamente.

Para el análisis se consideraron datos climáticos de la prefectura de Yanagawa, ubicada en el suroeste de Japón. Los registros utilizados están disponibles en la sección 4.1 de este trabajo.

Figura 65

a) Imagen referencial y b) Esquema de los componentes estructurales.



Fuente: Tomado de Google Maps (2024)

4.4.2 Descripción del modelo

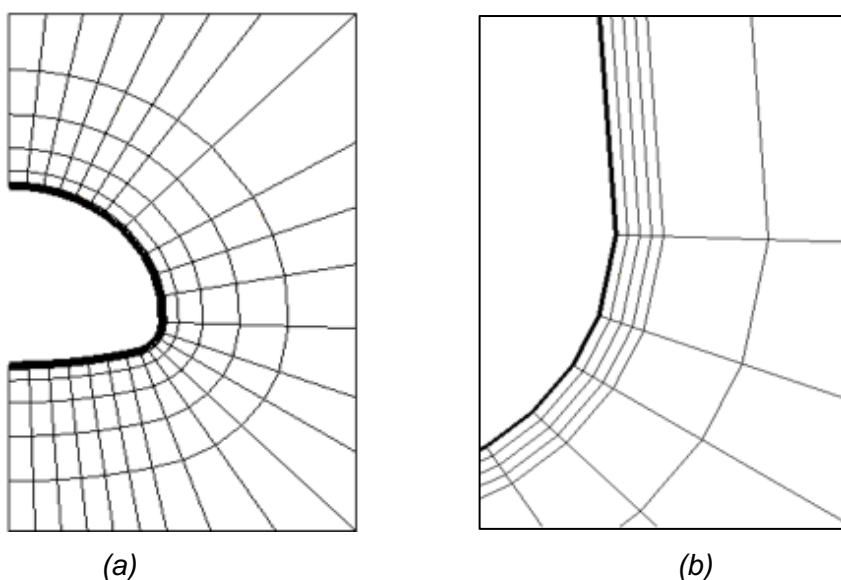
Por tratarse de un problema simétrico se modelará solamente un lado, considerando un análisis plano. El modelo térmico se construyó asumiendo una estructura de concreto dentro de la roca, la misma que se representó con una malla rectangular hacia afuera del túnel. Como se puede ver en la figura 66, la malla de elementos finitos se refinó en la zona del túnel. Los elementos finitos utilizados son del tipo 2D-Solid, es decir cuadriláteros de 9 nodos en ADINA. Al igual que en el caso anterior, también se generaron elementos de convección en las zonas de intercambio térmico.

En ADINA, los esfuerzos de dilatación se estiman en base a los cambios de temperaturas determinados con el módulo térmico. El análisis de esfuerzos requiere además condiciones de borde. Por lo que se restringió la traslación horizontal y vertical en los cuatro extremos del modelo, simulando las restricciones generadas por la roca. Además de ello en el eje de simetría se restringió la traslación horizontal, pero se permitió la traslación vertical.

El modelo térmico se corrió para 240 pasos de 1 hora cada uno, y el modelo de esfuerzos se corrió solamente para los instantes críticos seleccionados en base a los picos.

Figura 66

a) Malla de elementos finitos, b) Refinamiento de la malla en el recubrimiento



Fuente: Reportes creados con ADINA

4.4.3 Sub-casos y resultados del análisis

Para el caso 2 se consideraron tres sub-casos. Es importante notar que en cada sub-caso se cambió una sola condición respecto al sub-caso 2A.

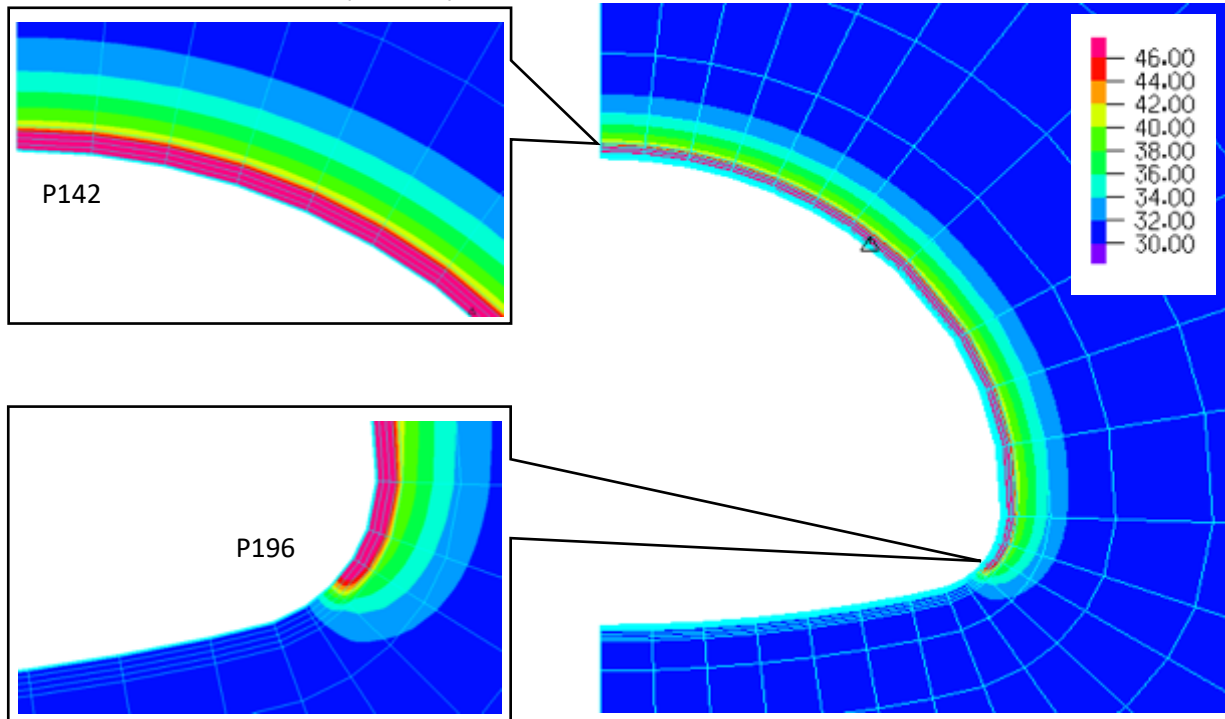
Sub-caso 2A: Caso original

En este sub-caso se aplican las condiciones básicas expuestas en la sección 4.1 sin ninguna metodología de control térmico. Este sub-caso considera la temperatura de Yanagawa, comentada líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021).

La figura 67 muestra la distribución de temperaturas medidas 15 horas después del vaciado. De esta figura se puede notar que las temperaturas alcanzan valores cercanos a los 45°C a lo largo de todo el concreto.

Figura 67

Reporte de temperaturas (Celsius) para 18h

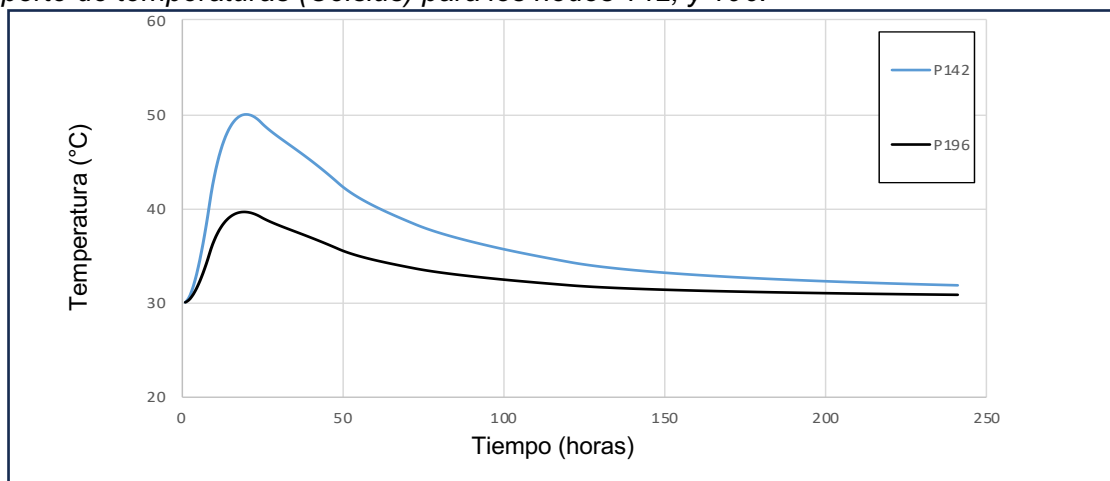


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 68 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en puntos importantes del recubrimiento de concreto. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 142 (centro del recubrimiento), y 196 (extremo). 15h después del vaciado, se alcanza 50°C en el centro y 40°C en los extremos, valores que lentamente descenden hasta alcanzar la temperatura ambiental.

Figura 68

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 142, y 196.

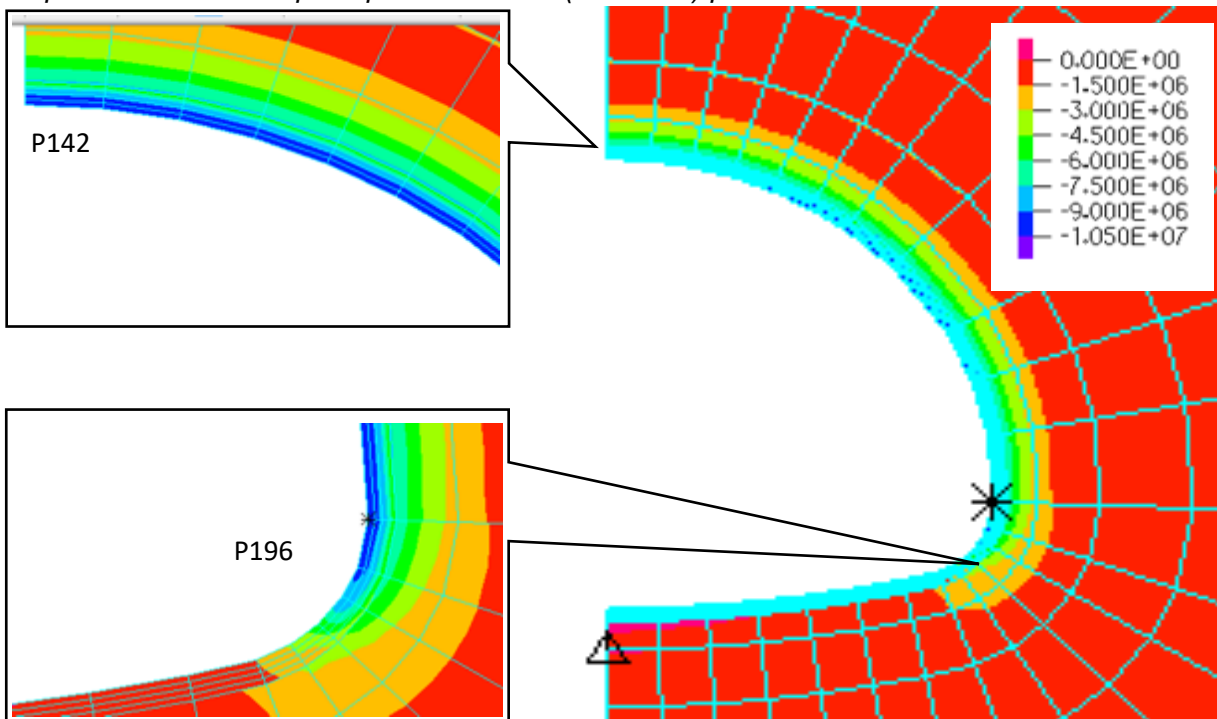


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 69 muestra la distribución de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para el patrón térmico mostrado en la figura 67. Los valores mínimos se producen en la superficie interior de los bloques y toman un valor pico en los extremos del recubrimiento, 9MPa.

Figura 69

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

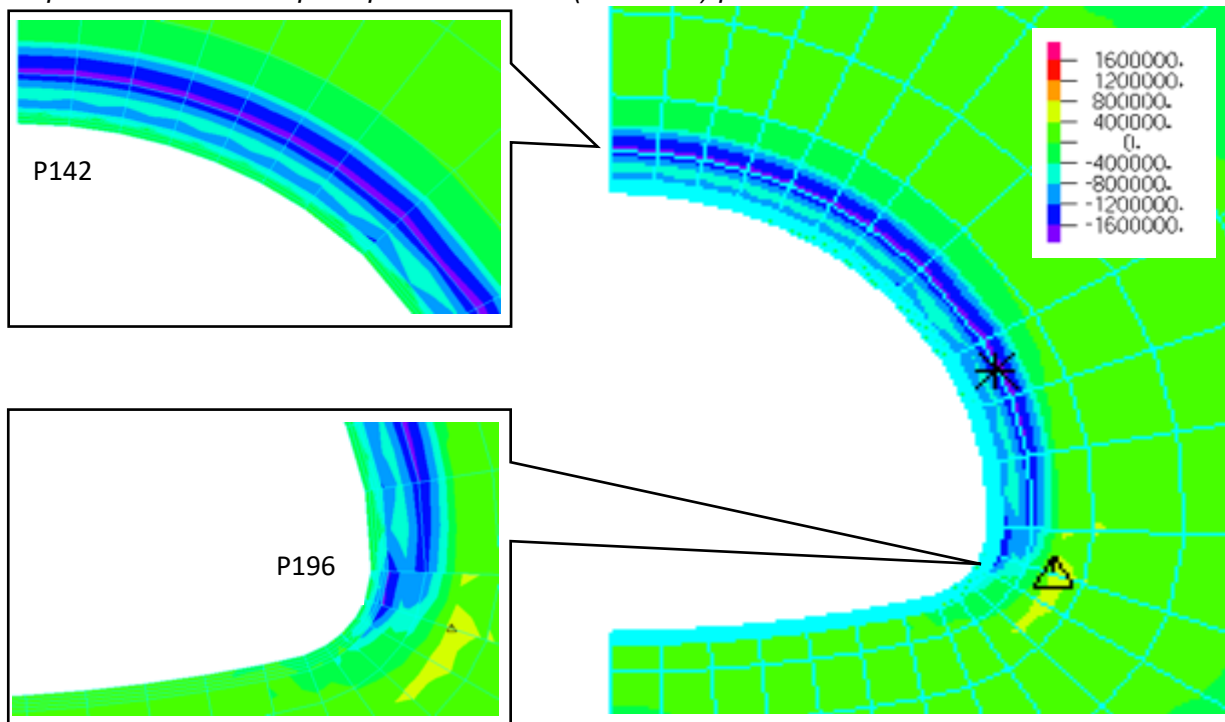
La figura 70 muestra las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para el patrón térmico mostrado en la figura 67. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado. Los valores máximos son cercanos a 1MPa.

La figura 71 muestra la distribución de los esfuerzos de corte máximos para el patrón térmico mostrado en la figura 67. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado y se mantienen por debajo de los 4MPa.

La figura 72 muestra la distribución de los desplazamientos máximos para el patrón térmico mostrado en la figura 67. Nótese que, al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen en la superficie del volumen vaciado, y no superan un décimo de milímetro.

Figura 70

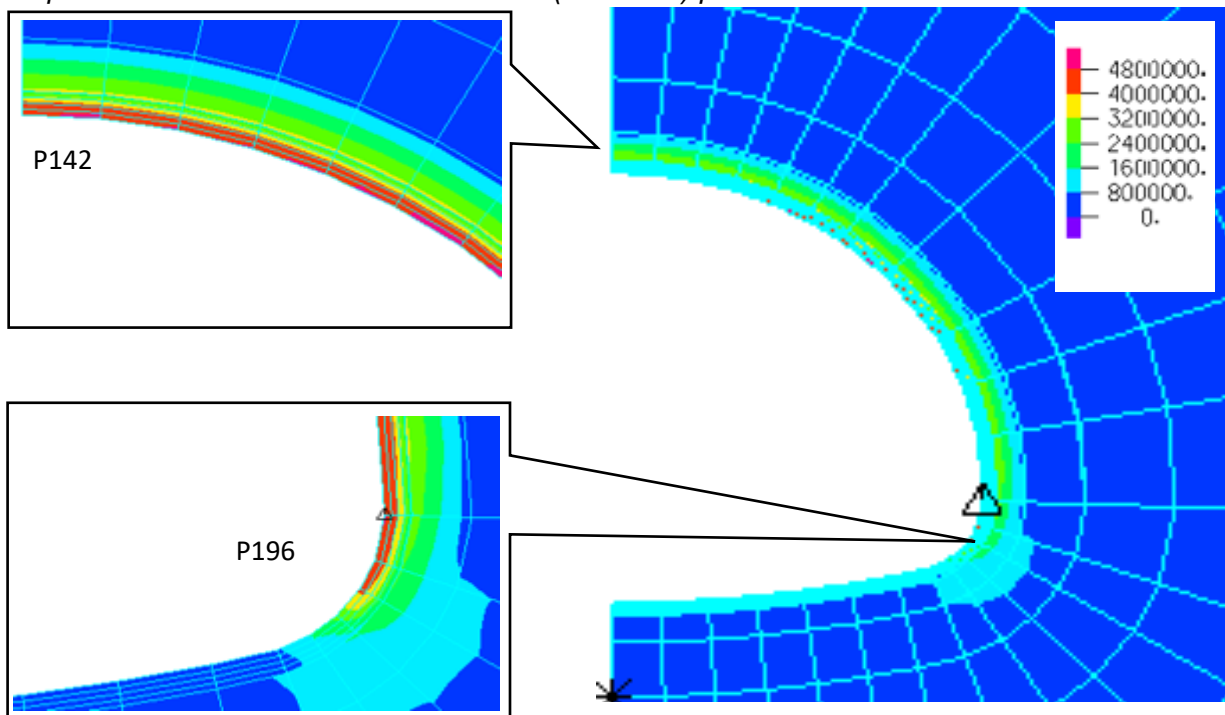
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 71

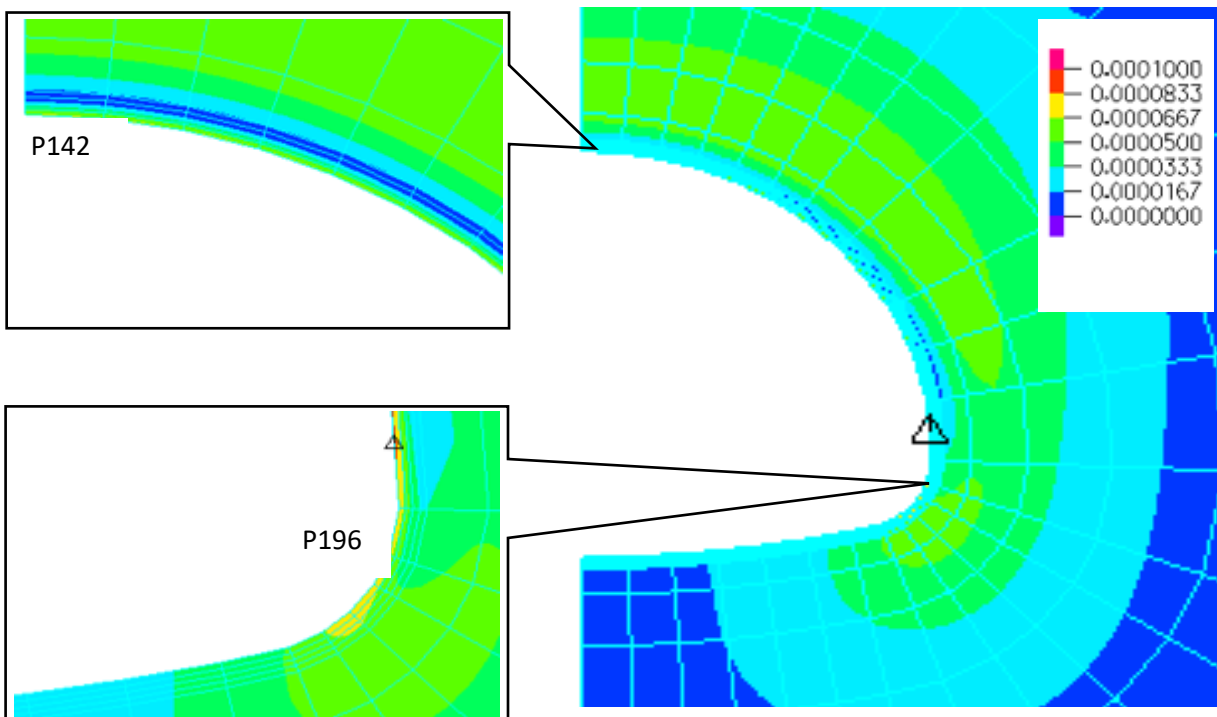
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 72

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 2B: Dos tuberías de enfriamiento

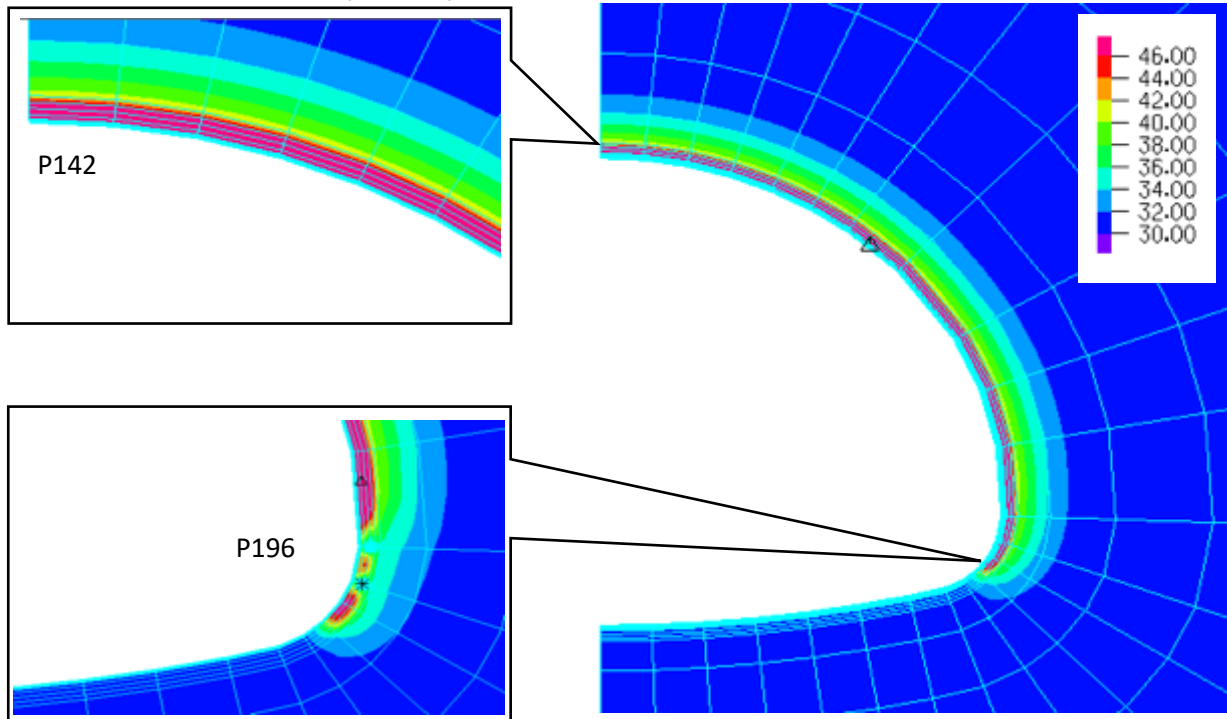
En este sub-caso se aplican las mismas condiciones que en el caso 2A, excepto que se consideran 2 tuberías de enfriamiento, espaciadas 50cm entre ellas, en cada extremo del recubrimiento. Este sub-caso considera la temperatura de Yanagawa, comentada líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el Primer de ADINA (2021).

La figura 73 muestra la distribución de temperaturas medidas 15 horas después del vaciado. De esta figura se puede notar que las temperaturas alcanzan valores cercanos a los 45°C en la mayor parte del volumen de concreto, excepto en la zona cercana a las tuberías.

La figura 74 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en puntos importantes del recubrimiento de concreto. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 142 (centro del recubrimiento), y 196 (extremo). 15h después del vaciado, se alcanza 50°C en el centro del recubrimiento y 40°C en los extremos, valores que lentamente descenden hasta alcanzar la temperatura ambiental, lo que coincide con el caso 2A.

Figura 73

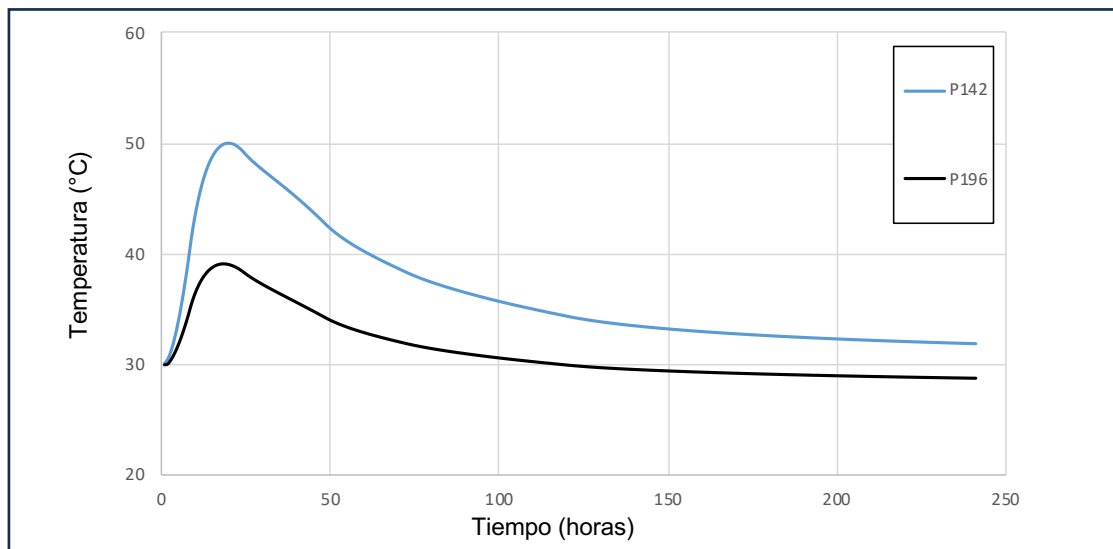
Reporte de temperaturas (Celsius) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 74

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 142, y 196.

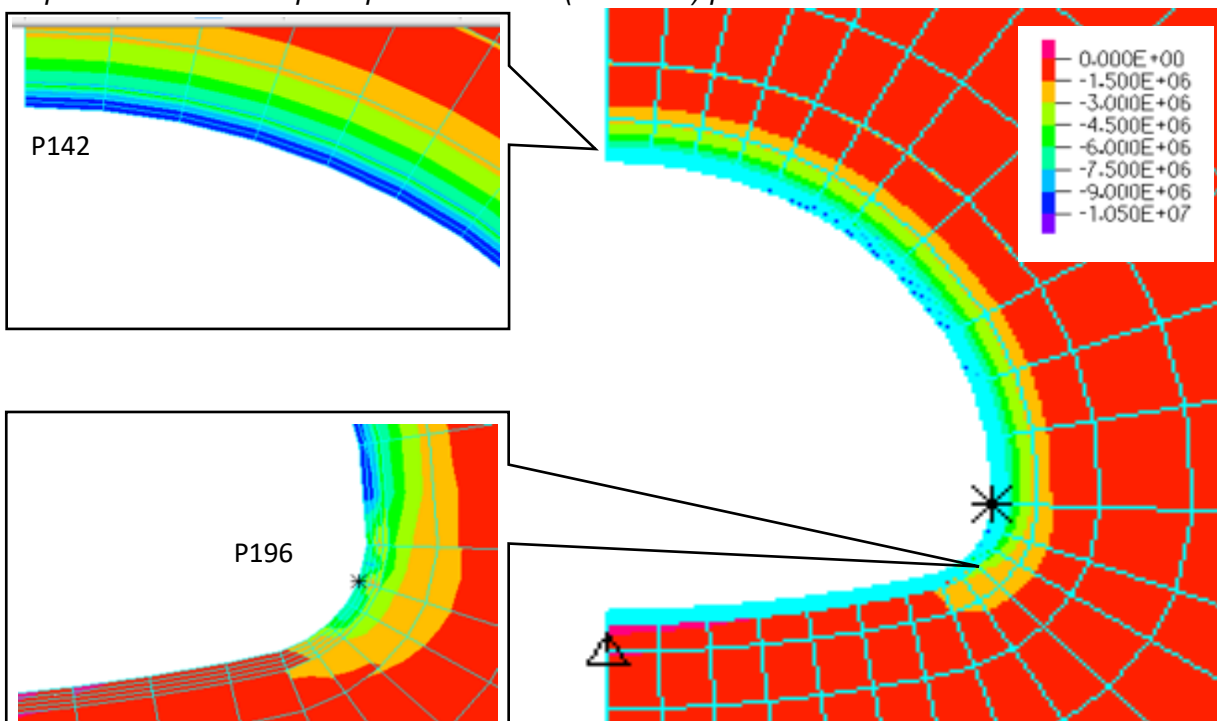


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 75 muestra la distribución de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para el patrón térmico mostrado en la figura 73. Los valores mínimos se producen en la superficie interior de los bloques y toman un valor pico en los extremos del recubrimiento, 9MPa.

Figura 75

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

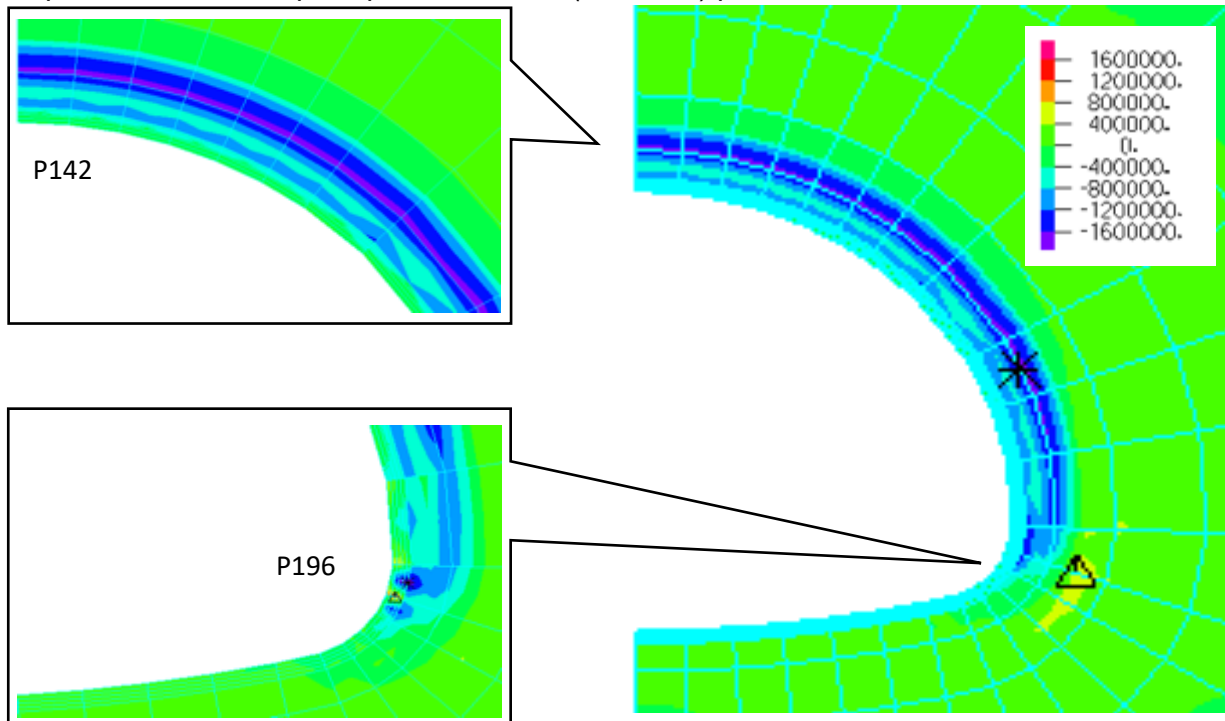
La figura 76 muestra las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para el patrón térmico mostrado en la figura 73. Los valores máximos se producen en la zona central del volumen vaciado y alcanzan 1MPa. Para la zona cercana a las tuberías este valor está por debajo de los 0.5MPa.

La figura 77 muestra la distribución de los esfuerzos de corte máximos para el patrón térmico mostrado en la figura 73. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado y se mantienen por debajo de los 2MPa. Para la zona cercana a las tuberías este valor está por debajo de los 1MPa.

La figura 78 muestra las magnitudes de los desplazamientos para el patrón térmico mostrado en la figura 73. Nótese que, al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen en la superficie del volumen vaciado, y no superan un décimo de milímetro. Para la zona de las tuberías este valor es bastante pequeño, muy por debajo de una fracción de milímetro.

Figura 76

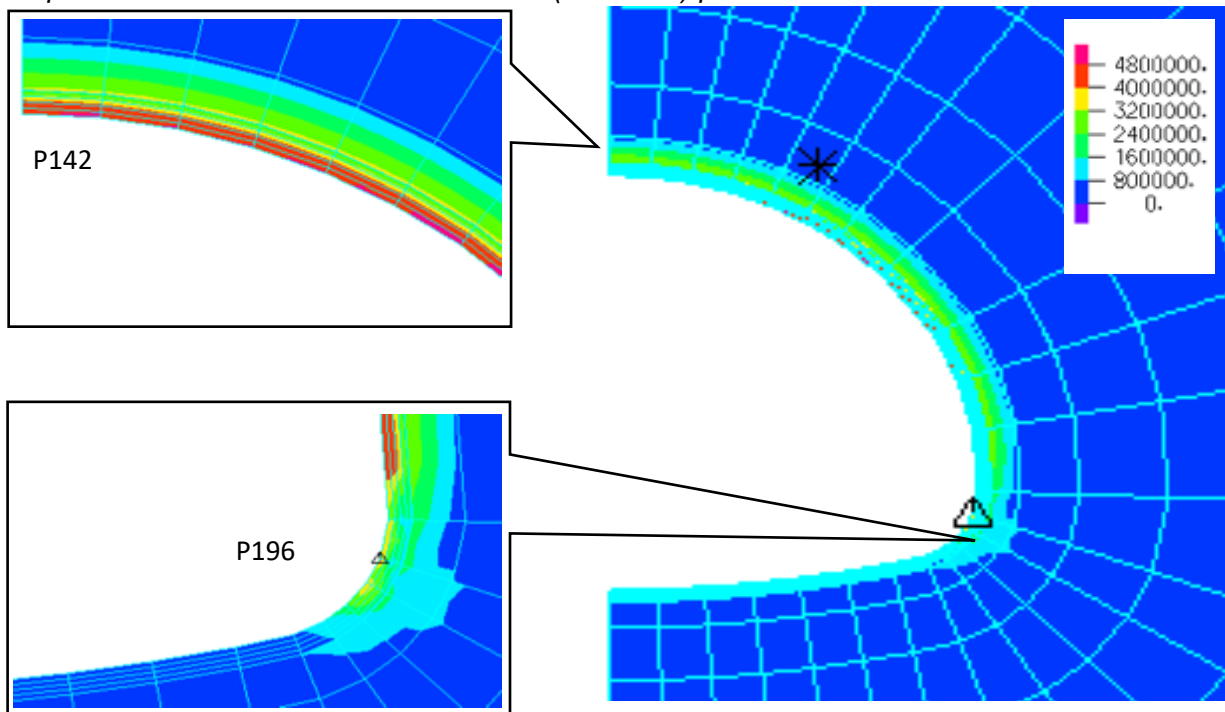
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para 18h.



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 77

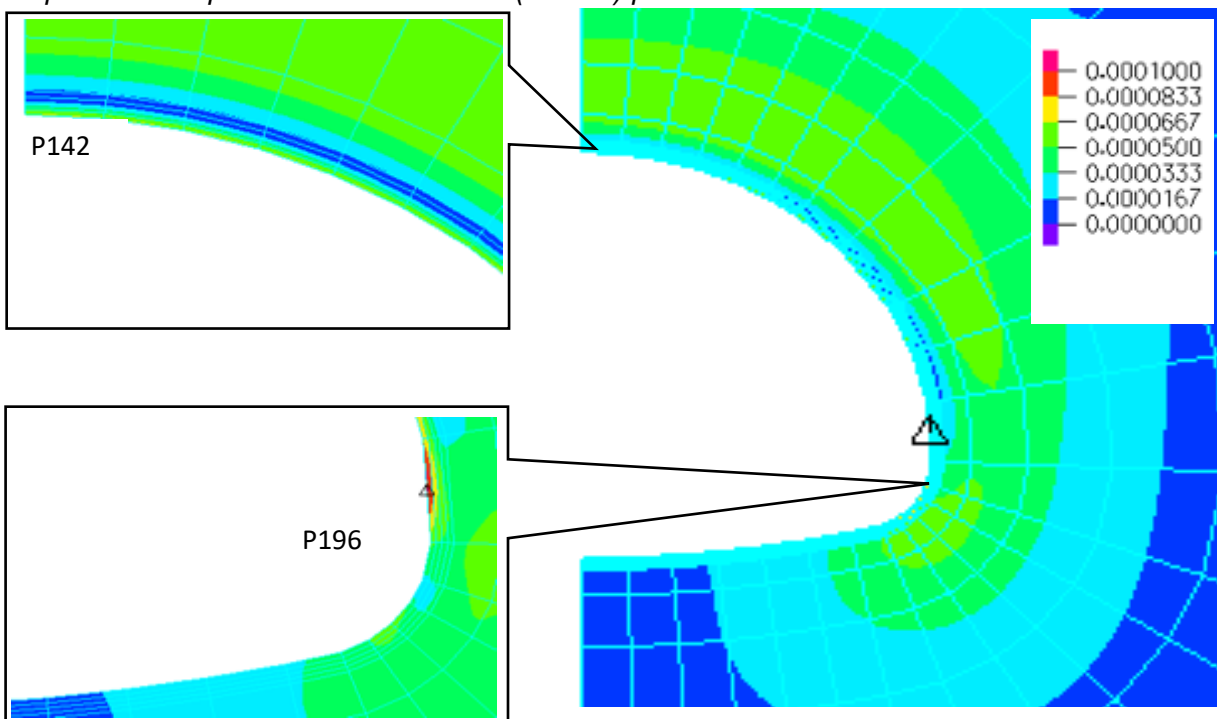
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 78

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 2C: Cuatro tuberías de enfriamiento

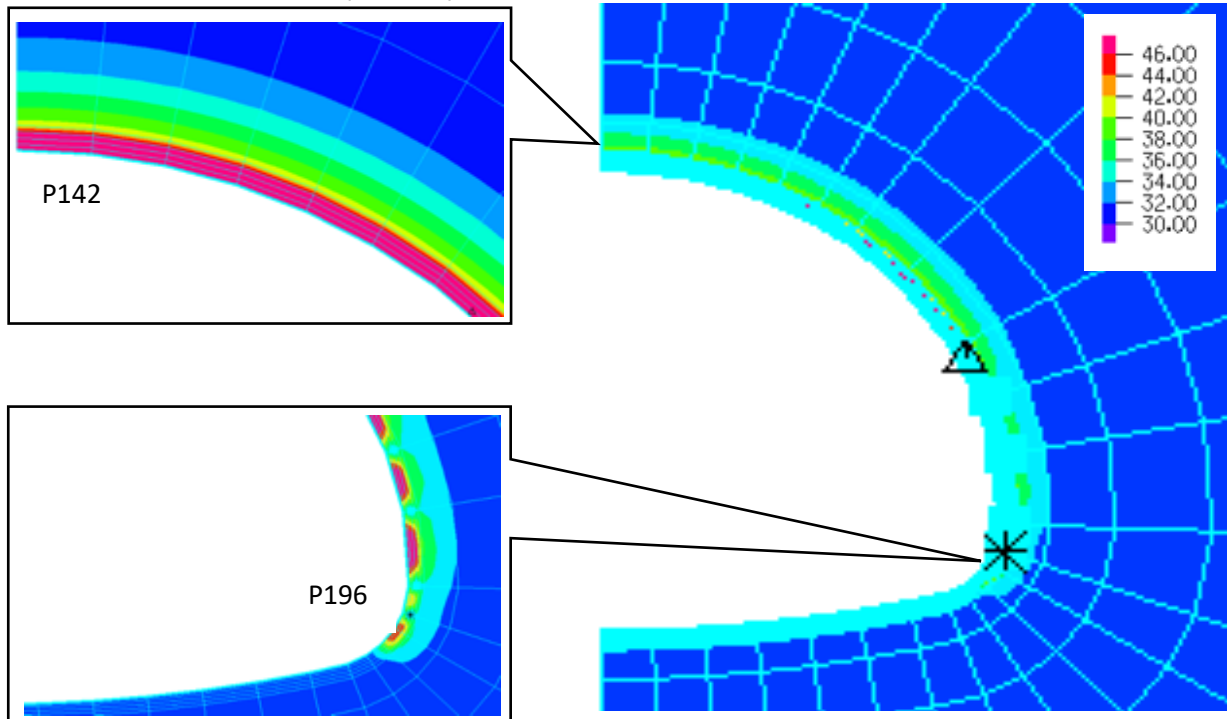
En este sub-caso se aplican las mismas condiciones que en el caso 2A, excepto que se consideran 2 tuberías de enfriamiento, espaciadas 50cm entre ellas, en cada extremo del recubrimiento. Este sub-caso considera también la temperatura de Yanagawa, indicada líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el Primer de ADINA (2021).

La figura 79 muestra la distribución de temperaturas medidas 15 horas después del vaciado. De esta figura se puede notar que las temperaturas alcanzan valores cercanos a los 45°C a lo largo de todo el concreto, excepto en la zona cercana a las tuberías.

La figura 80 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en puntos importantes del recubrimiento de concreto. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 142 (centro del recubrimiento), y 196 (extremo). 15h después del vaciado, se alcanza 50°C en el centro del recubrimiento y 40°C en los extremos, valores que lentamente descienden hasta alcanzar la temperatura ambiental, lo que coincide con el caso 2A y 2B.

Figura 79

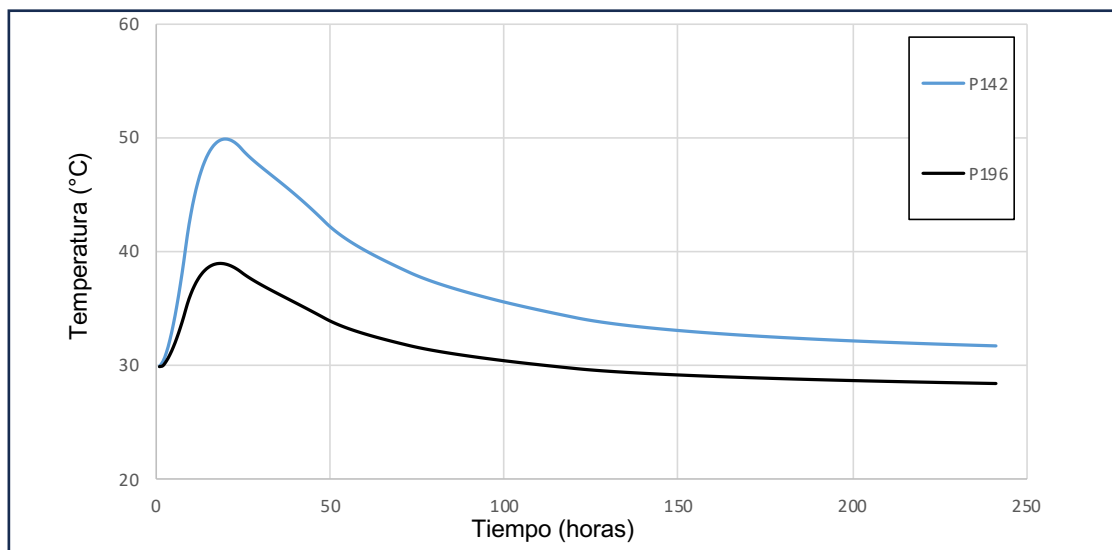
Reporte de temperaturas (Celsius) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 80

Reporte de temperaturas (Celsius) para los nodos 142, y 196.

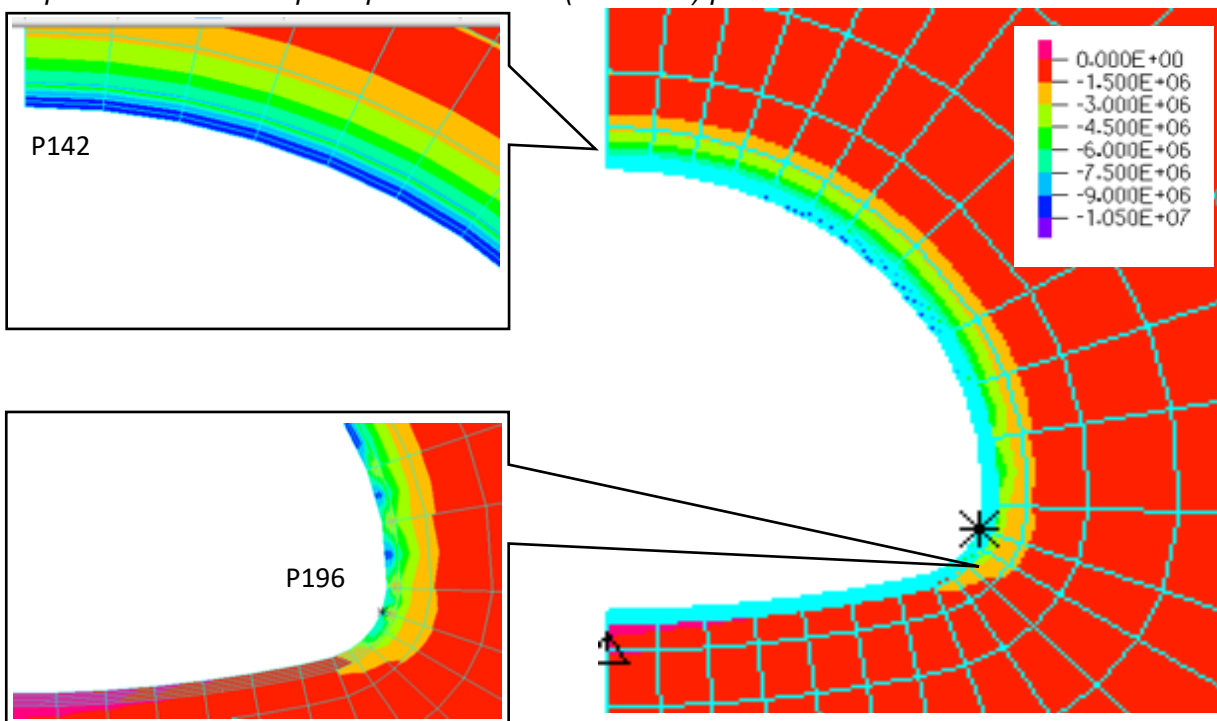


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 81 muestra la distribución de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para el patrón térmico mostrado en la figura 79. Los valores mínimos se producen en la superficie interior de los bloques y toman un valor pico en los extremos del recubrimiento, 9MPa.

Figura 81

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascuales) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

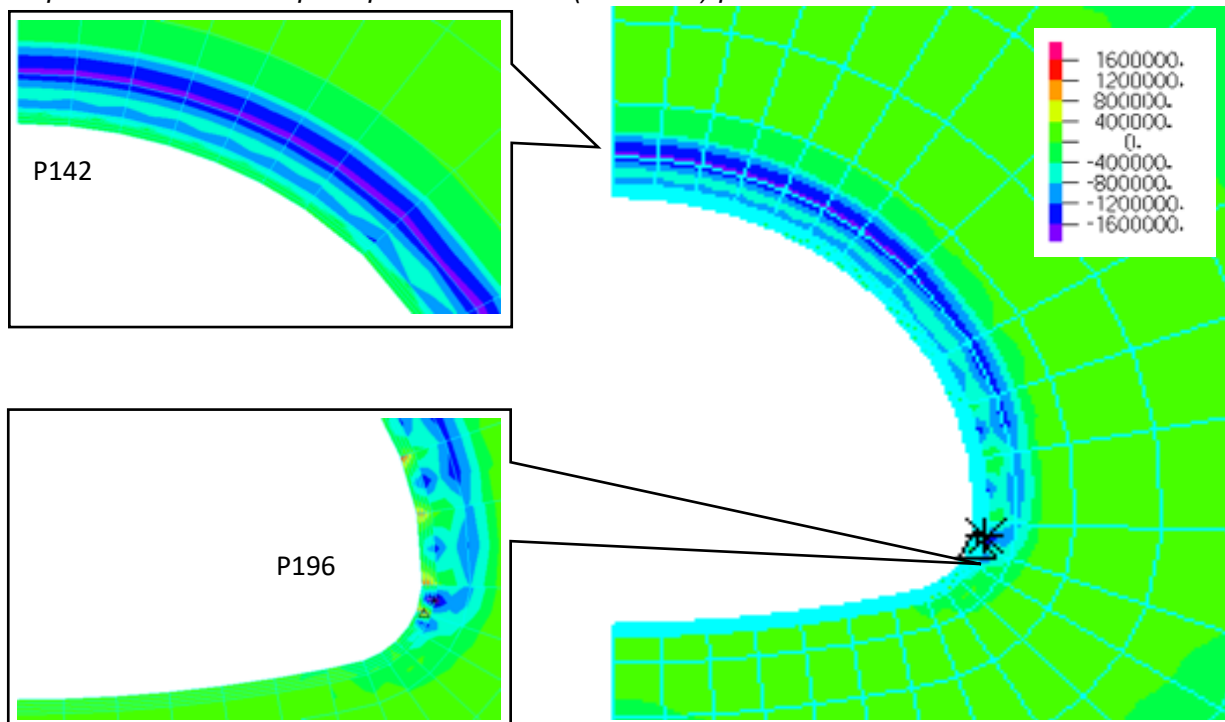
La figura 82 muestra las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para el patrón térmico mostrado en la figura 79. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado y no alcanzan 1MPa. Para la zona de influencia de las tuberías este valor está por debajo de los 0.5MPa, al igual que en el caso 2B.

La figura 83 muestra la distribución de los esfuerzos de corte máximos para el patrón térmico mostrado en la figura 79. Los valores máximos se producen cerca de la superficie del volumen vaciado y se mantienen por debajo de los 4MPa. Para la zona de influencia de las tuberías este valor está por debajo de los 2MPa, al igual que en el caso 2B.

La figura 84 muestra las magnitudes de los desplazamientos para el patrón térmico mostrado en la figura 79. Nótese que, al igual que en el sub-caso 1A, los valores máximos se producen en la superficie del volumen vaciado, y no superan un décimo de milímetro. Para la zona de las tuberías este valor es bastante pequeño, muy por debajo de una fracción de milímetro, al igual que en el caso 2B.

Figura 82

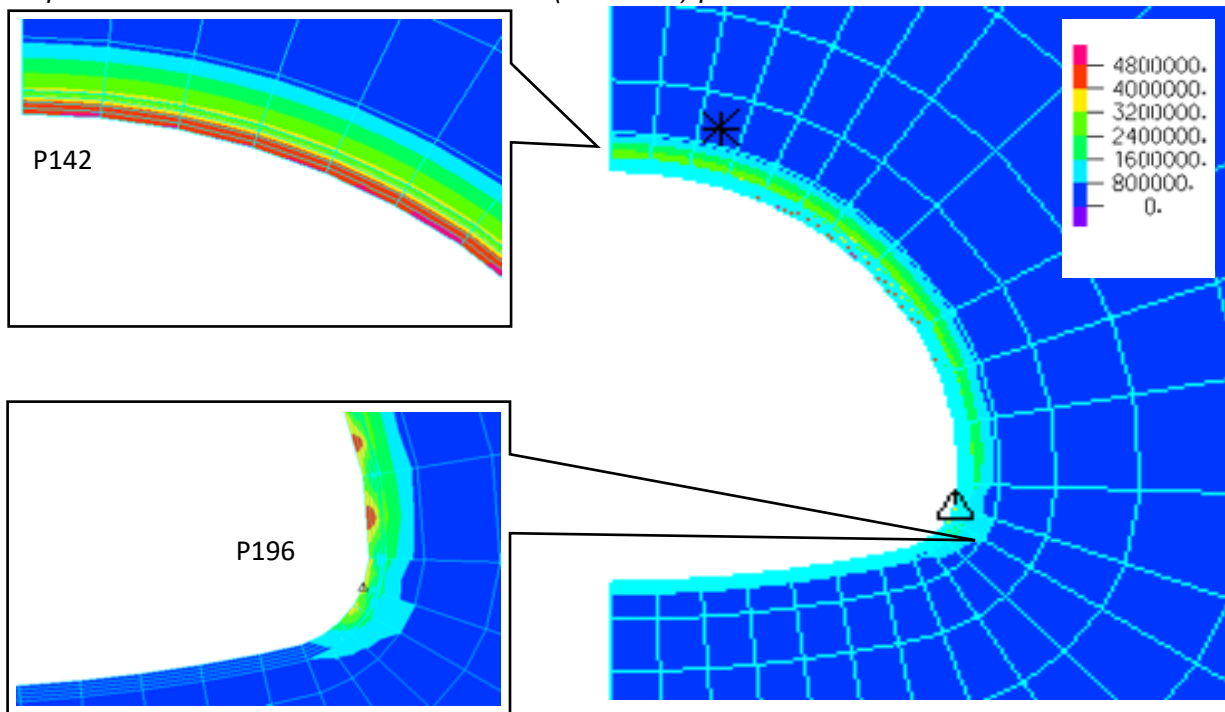
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 83

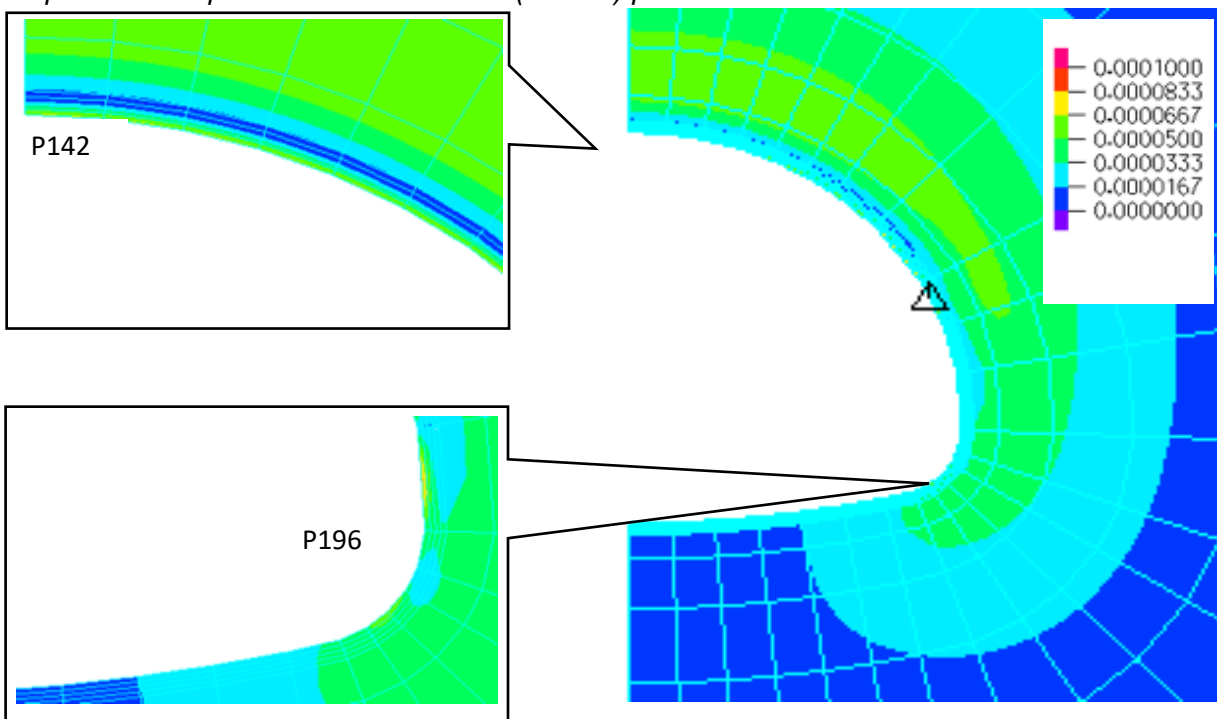
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 84

Reporte de desplazamientos máximos (metros) para 18h



Fuente: Reportes creados en ADINA

4.4.4 Análisis de resultados

Temperatura

En el sub-caso 2A, caso original: sin metodologías de enfriamiento, se puede observar que las temperaturas alcanzan los 50°C en el centro de la estructura de concreto. Por lo expuesto en el capítulo II, este rango térmico no debería impactar negativamente el concreto en términos de resistencia y porosidad. Por lo tanto, no sería necesario implementar metodologías de enfriamiento. Sin embargo, a fin de explorar la efectividad de estas metodologías se prepararon dos casos adicionales con tuberías de enfriamiento.

El uso de tuberías de enfriamiento, como se muestra en los sub-casos 2B y 2C, demuestra el potencial de lograr el control térmico completo, pero los resultados demuestran que para esta estructura se depende altamente de un arreglo y espaciamiento adecuados. La colocación de las tuberías disminuye las temperaturas y esfuerzos con gran eficiencia en un rango de influencia cercano. Para poder impactar en todo el recubrimiento serían necesarias más tuberías uniformemente distribuidas a lo largo de la estructura.

Esfuerzos y desplazamientos

Como se puede apreciar en los sub-casos presentados, reducir la variación térmica logra disminuir los esfuerzos y los desplazamientos. Tomando los límites de esfuerzos

considerados en el primer caso, se nota que la estructura no afronta riesgos desde un punto de vista térmico. En los sub-casos analizados, la compresión está por debajo de los 10MPa y la tracción por debajo de 1MPa. En los lugares donde se consideraron tuberías de enfriamiento los esfuerzos no resultan significativos.

Por último, el nivel de deformaciones máximo suele ocurrir en la superficie de los volúmenes colocados, y en todos los casos está por debajo del orden de los milímetros. Para una estructura de este tipo, dichos valores no resultan perjudiciales.

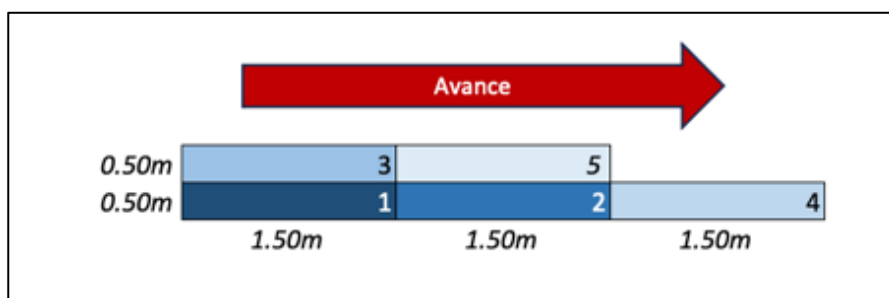
4.5 Caso 3: Análisis tridimensional de una losa de cimentación

4.5.1 Descripción del caso

Este caso corresponde al problema de una losa de concreto presentada en la tesis de Gutiérrez (2017). Las dimensiones de la misma son: 30m x 49.2m x 1m. La misma que fue vaciada secuencialmente en volúmenes de 0.50 de espesor, 1.50m de largo y un ancho igual al de la losa (30m), como se indica en la figura 85. Los detalles de la colocación no se presentan en la tesis mencionada por lo que la duración del vaciado de cada volumen se estimó en una hora. Sin embargo, en la tesis se resaltan procedimientos de vibrado para evitar las juntas frías, también se menciona que la temperatura del ambiente osciló alrededor de los 20°C y la del concreto fresco alrededor de los 28°C durante la operación. Dichos parámetros fueron considerados en el análisis por el MEF.

Figura 85

Secuencia de vaciados



4.5.2 Descripción del modelo

En este caso se modeló la losa completa. Para ello se declararon 66 volúmenes a colocarse secuencialmente, de acuerdo a lo descrito previamente. Posteriormente, estos volúmenes fueron subdivididos para generar los elementos finitos. Se optó por hacer un refinamiento de la malla en los extremos para reducir los errores de interpolación, los mismos

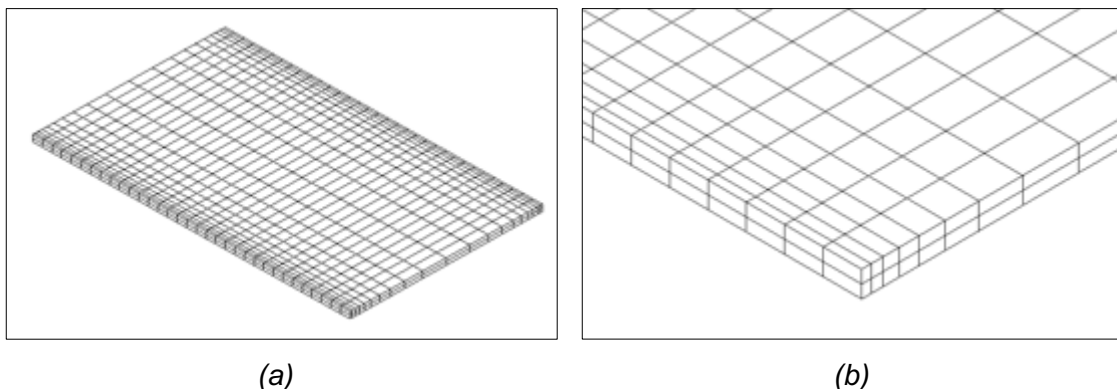
que fueron detectados en enmallados uniformes. En los modelos se utilizaron elementos finitos de ADINA del tipo 3D-Solid, conformados por hexaedros de 27 nodos. También se usaron elementos superficiales de convección para representar las zonas de intercambio de calor. La malla de elementos finitos y su refinamiento en los extremos se muestra en las figuras 86a y 86b.

Para el análisis de esfuerzos se restringió la traslación horizontal y vertical en la base del modelo, representando las restricciones de la cimentación. Sin embargo, en las zonas de encofrados se permitió la traslación vertical. Los esfuerzos en los elementos se determinaron en base al cambio de temperaturas estimado en el análisis térmico.

El modelo térmico se corrió para 400 pasos de 1 hora cada uno, y el modelo de esfuerzos se corrió solamente para los instantes críticos seleccionados. En los sub-casos 3E (vaciado lento) y 3F (vaciado acelerado) se modificaron el paso y el tiempo de análisis.

Figura 86

a) Malla de elementos finitos, b) Refinamiento de la malla en los extremos



Fuente: Reportes creado con ADINA

4.5.3 Sub-casos de análisis y resultados

Para el caso 3 se consideraron ocho sub-casos. Es importante notar que en cada sub-caso se cambió una sola condición respecto al sub-caso original 3A.

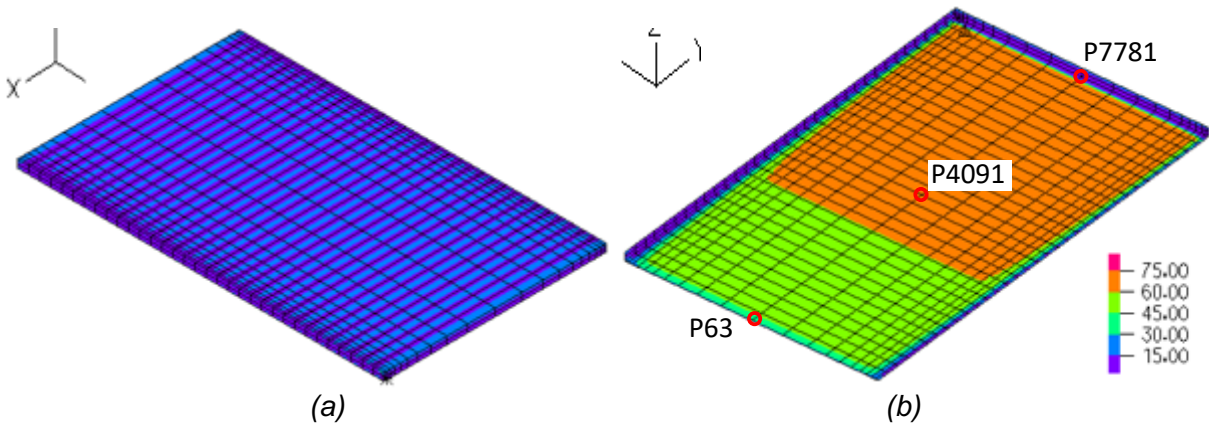
Sub-caso 3A: Caso Original

Este sub-caso considera una temperatura ambiental de 20°C, de acuerdo a lo discutido líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Además, el concreto fresco se consideró a 28°C.

Las figuras 87a, y 87b muestran la distribución de temperatura 105 horas después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir en la base de la losa y alcanzan valores cercanos a los 60°C.

Figura 87

Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior

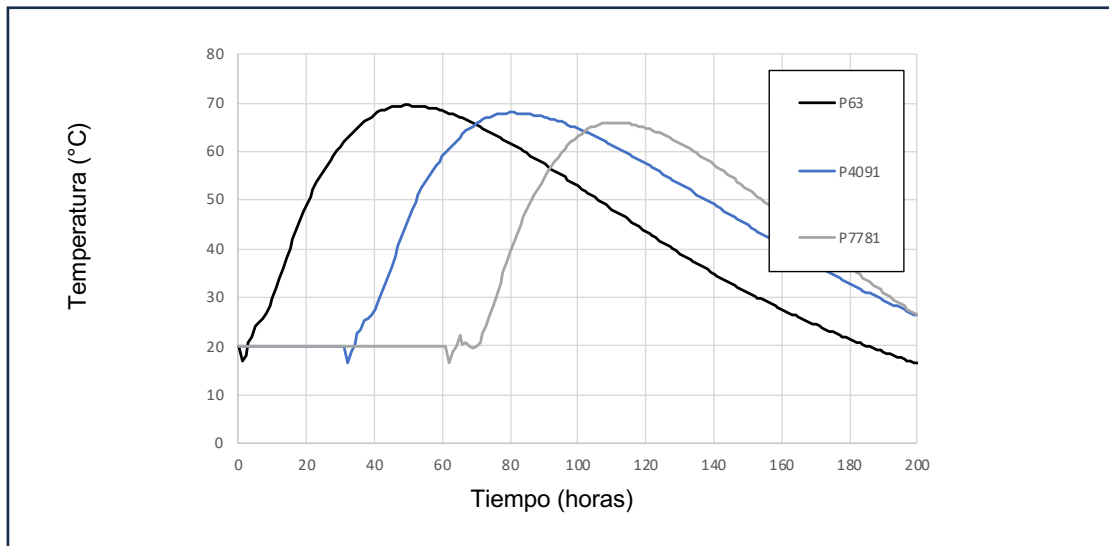


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 88 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en la base de la losa en el eje de simetría. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 63 (izquierda: inicio del vaciado), 4091 (centro) y 7781 (derecha: fin del vaciado). En los tres nodos se alcanza un pico cercano a los 70°C que lentamente descende hasta la temperatura ambiental.

Figura 88

Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781

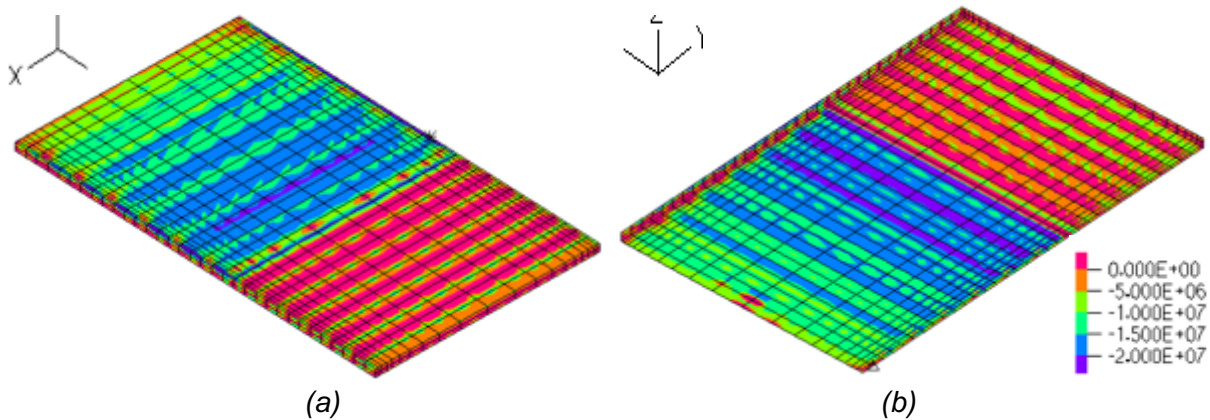


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 89a y 89b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 87. Los valores mínimos se producen cerca de la franja central de la losa, alcanzando los 15MPa.

Figura 89

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

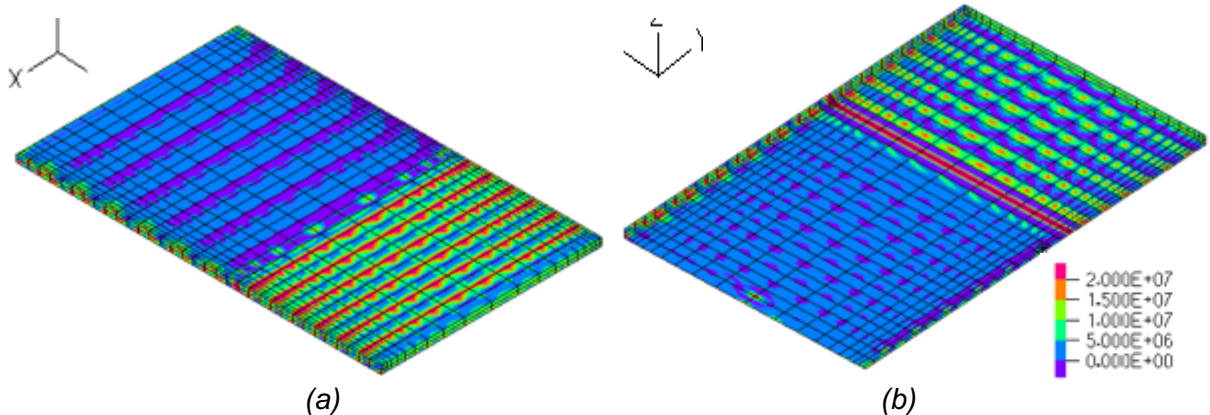


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 90a y 90b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 87. Los valores máximos exceden en algunos puntos los 15MPa.

Figura 90

Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

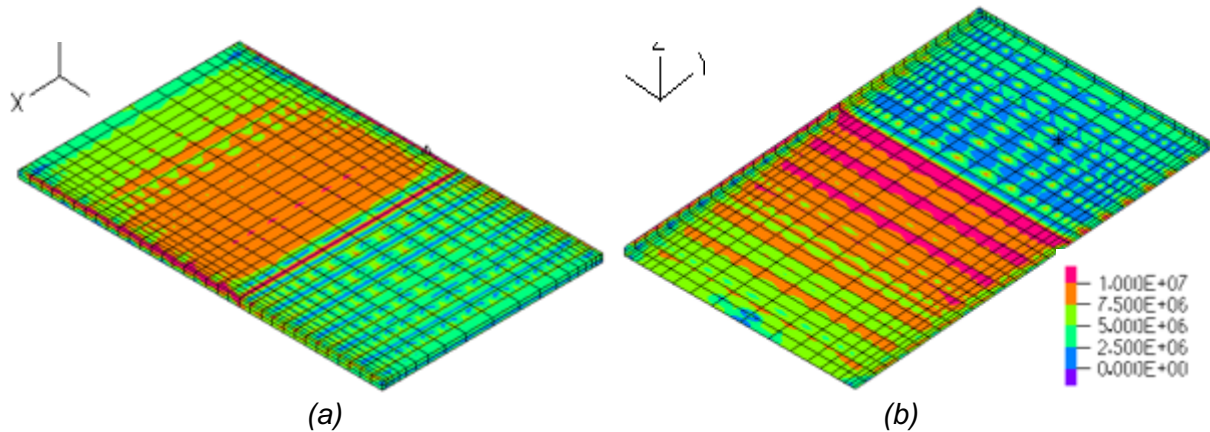


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 91a y 91b muestran las magnitudes de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 87. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, en estas zonas se sobrepasan los 8MPa.

Figura 91

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

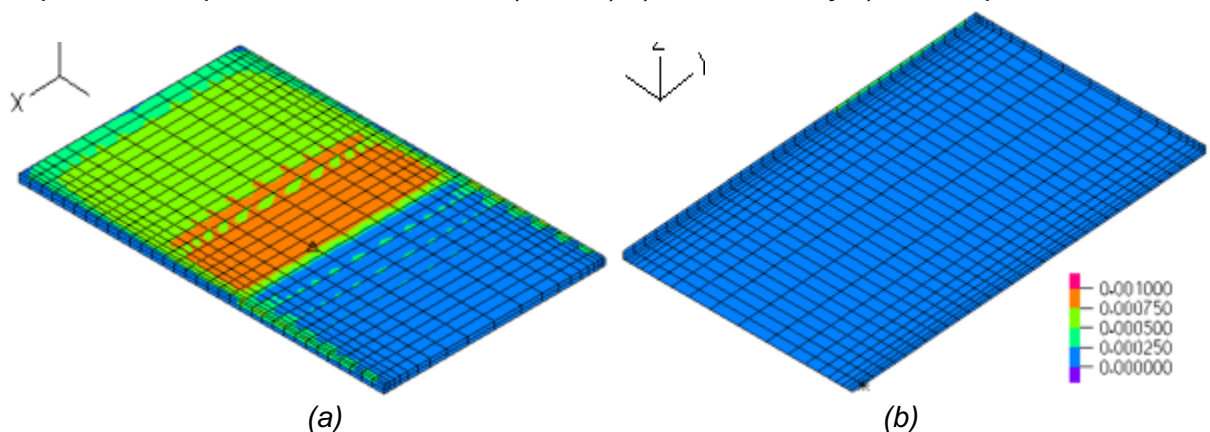


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 92a y 92b muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para las temperaturas mostradas en la figura 87. Nótese que los desplazamientos mayores se producen en la superficie de la losa, pero no sobrepasan de 1mm.

Figura 92

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior



Fuente: Reportes creados en ADINA

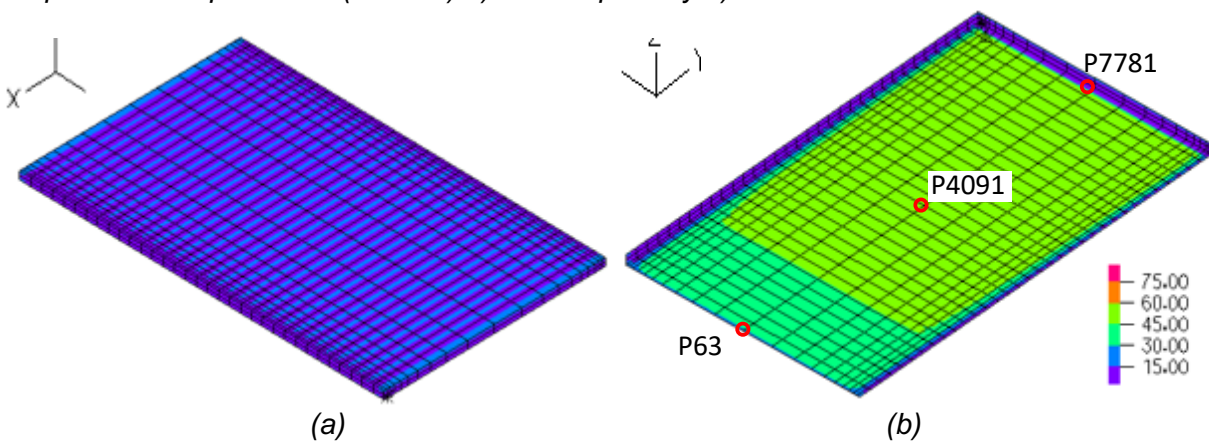
Sub-caso 3B: Cemento Tipo I de EE. UU.

En este sub-caso se aplican las mismas condiciones que se usaron en el caso 3A, excepto que se consideró un cemento alternativo. Este sub-caso considera una temperatura ambiental de 20°C, de acuerdo a lo discutido líneas arriba. Se utilizó la curva de generación de calor correspondiente a un concreto fabricado con cemento del tipo I de origen estadounidense, al igual que en los otros sub-casos con una temperatura de 28°C.

Las figuras 93a, y 93b muestran la distribución de temperatura 105 horas después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir en la base de la losa y sobrepasan los 45°C.

Figura 93

Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior



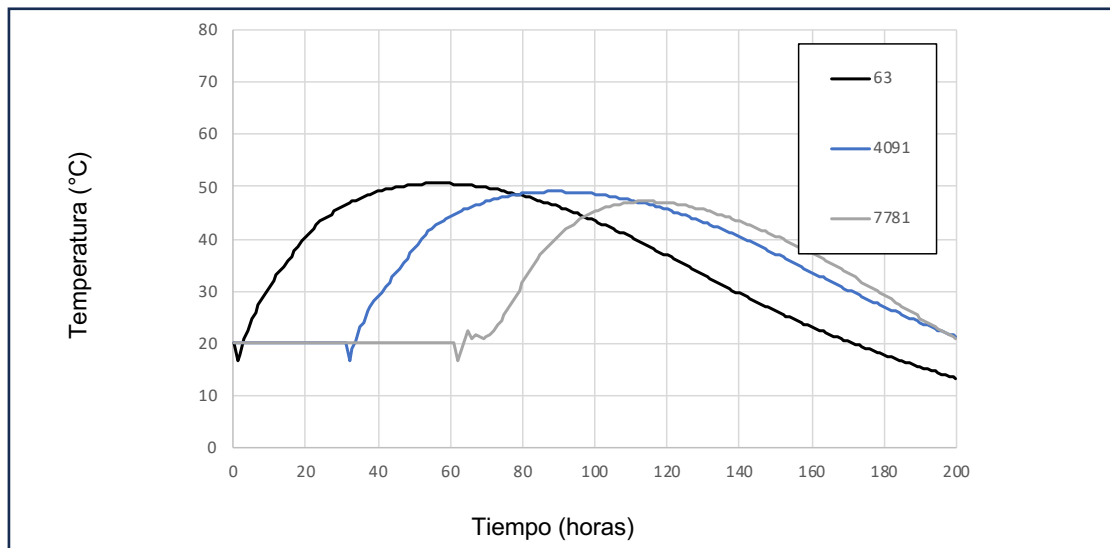
Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 94 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en la base de la losa en el eje de simetría. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 63 (izquierda: inicio del vaciado), 4091 (centro) y 7781 (derecha: fin del vaciado). En los tres nodos se alcanza un pico cercano a los 50°C, 20°C por debajo del sub-caso 3A, que lentamente desciende hasta la temperatura ambiental.

Las figuras 95a y 95b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 93. Los valores mínimos se producen cerca de la franja central de la losa, alcanzando compresiones superiores a los 10MPa.

Figura 94

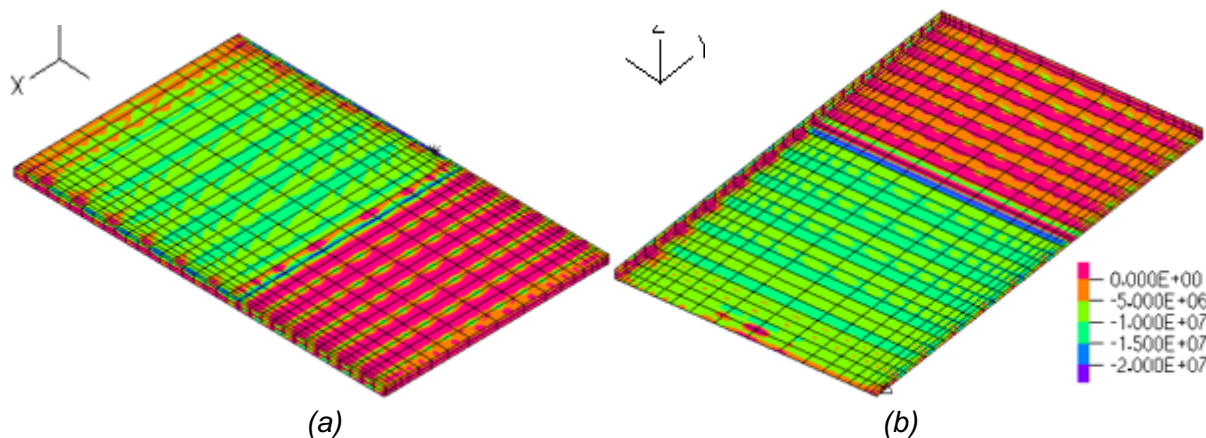
Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 95

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

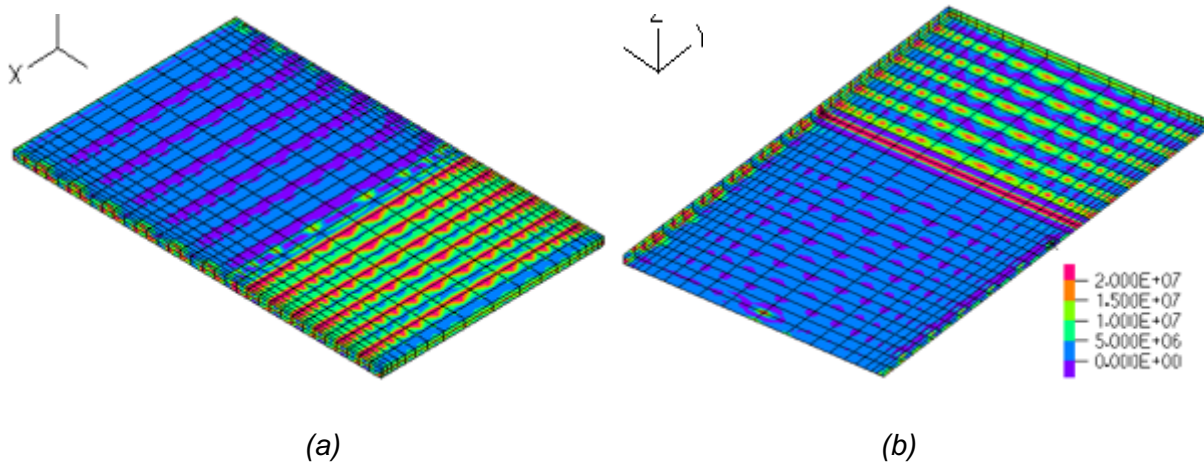


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 96a y 96b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 93. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, excediendo en algunos casos los 15MPa.

Figura 96

Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

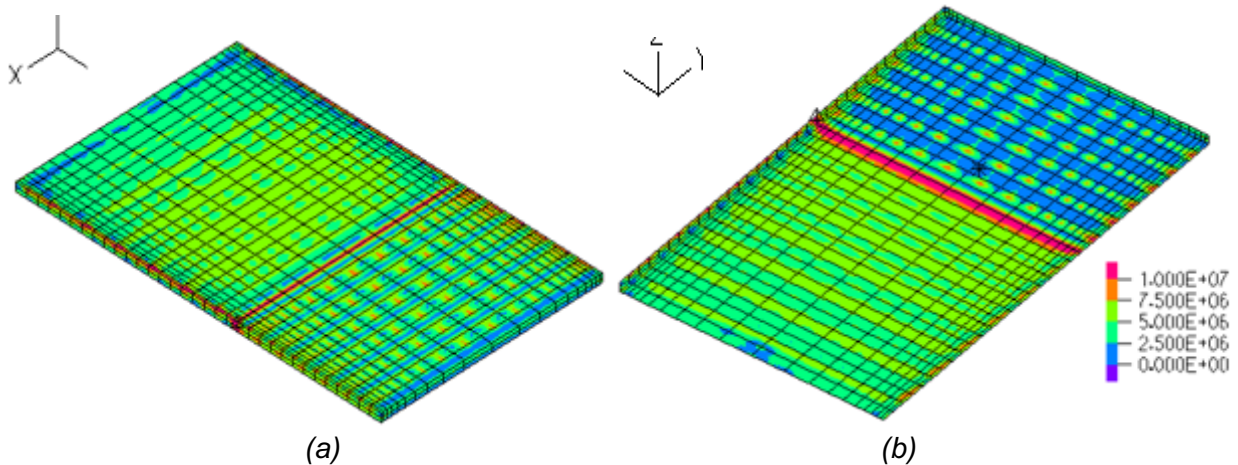


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 97a y 97b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 93. Los valores máximos sobrepasan los 5MPa.

Figura 97

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

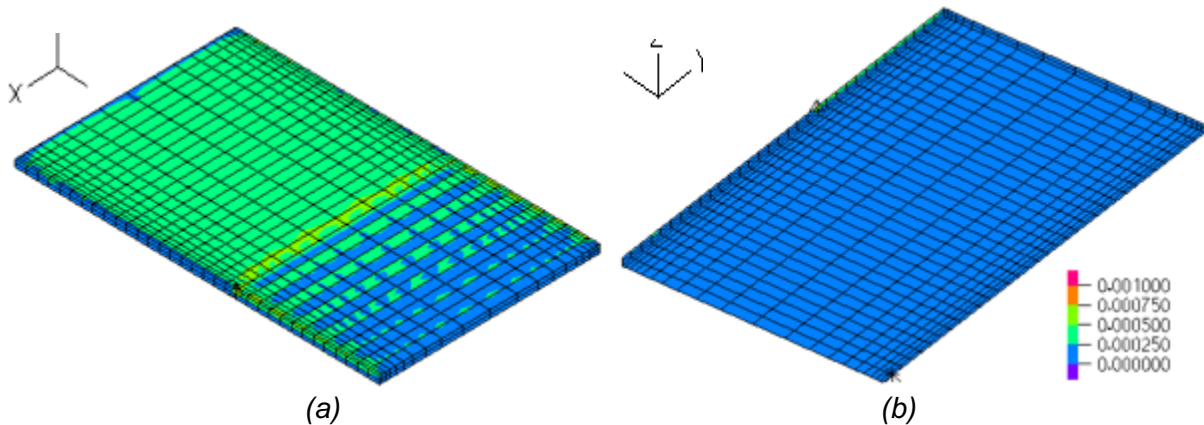


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 98a y 98b muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para las temperaturas mostradas en la figura 93. Nótese que los desplazamientos se producen solamente en la superficie de la losa. Los valores máximos son ligeramente más bajos que en el sub-caso 3A, pero no sobrepasan de 0.5 mm.

Figura 98

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior



Fuente: Reportes creados en ADINA

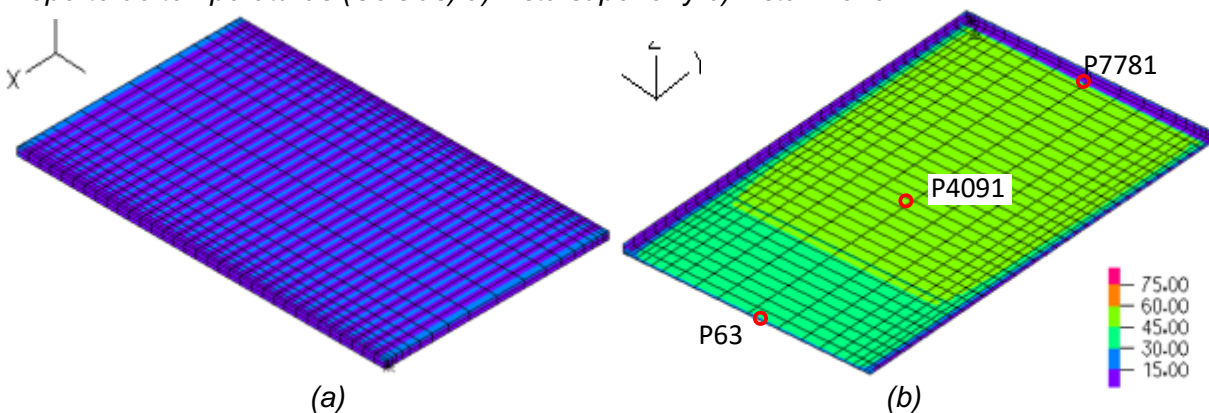
Sub-caso 3C: Cemento Tipo I de Corea

En este sub-caso se aplican las mismas condiciones que se usaron en el caso 3A, excepto que se consideró un cemento alternativo. Este sub-caso considera una temperatura ambiental de 20°C, de acuerdo a lo discutido líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021), excepto por utilizarse la curva de generación de calor correspondiente a un concreto fabricado con cemento del tipo I de origen coreano, al igual que en los otros sub-casos con una temperatura de 28°C. Nótese que los resultados se acercan a los del sub-caso 3B.

Las figuras 99a, y 99b muestran la distribución de temperatura 105 horas después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir en la base de la losa y alcanzan valores cercanos a los 45°C.

Figura 99

Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior

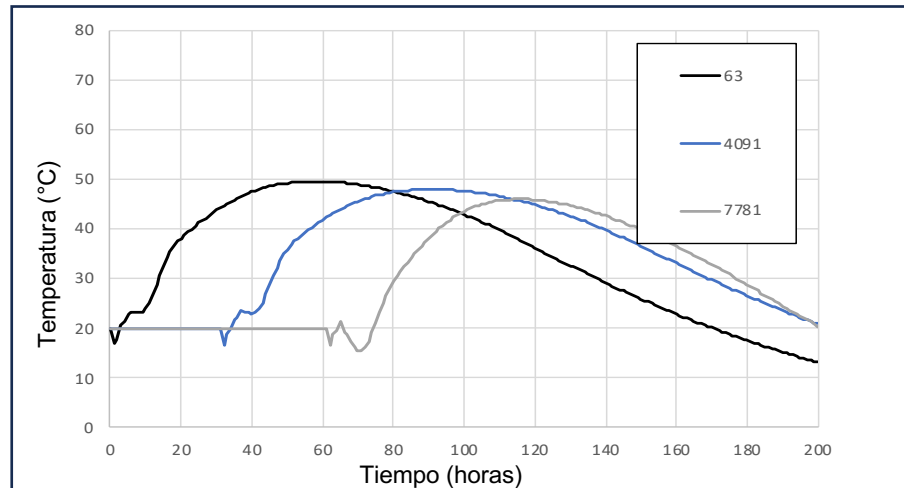


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 100 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en la base de la losa en el eje de simetría. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 63 (izquierda: inicio del vaciado), 4091 (centro) y 7781 (derecha: fin del vaciado). En los tres nodos se alcanza un pico cercano a los 50°C, 20°C por debajo del sub-caso 3A, que lentamente desciende hasta la temperatura ambiental.

Figura 100

Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781

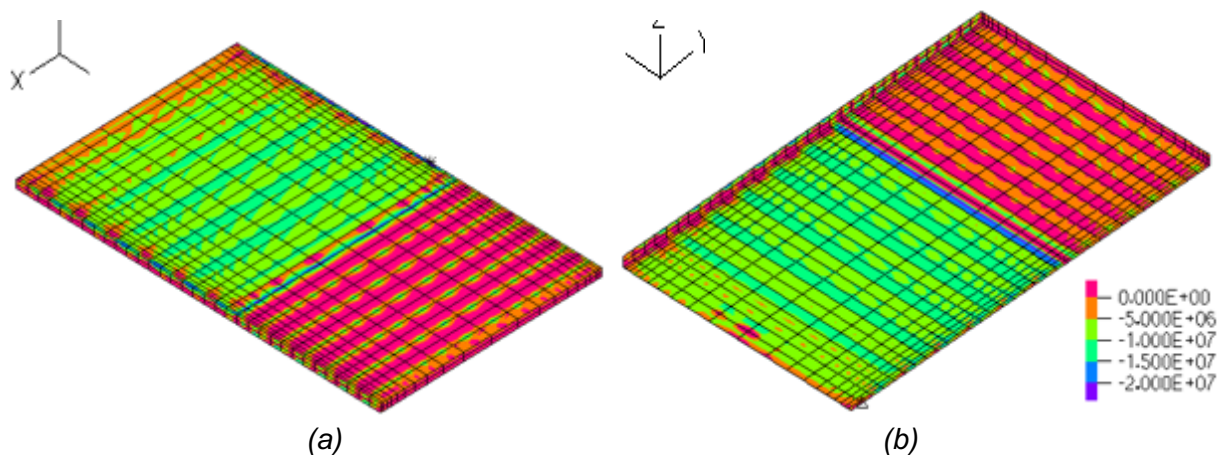


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 101a y 101b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 99. Los valores mínimos se producen cerca de la franja central de la losa, alcanzando los 10MPa.

Figura 101

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascals) a) vista inferior y b) vista superior

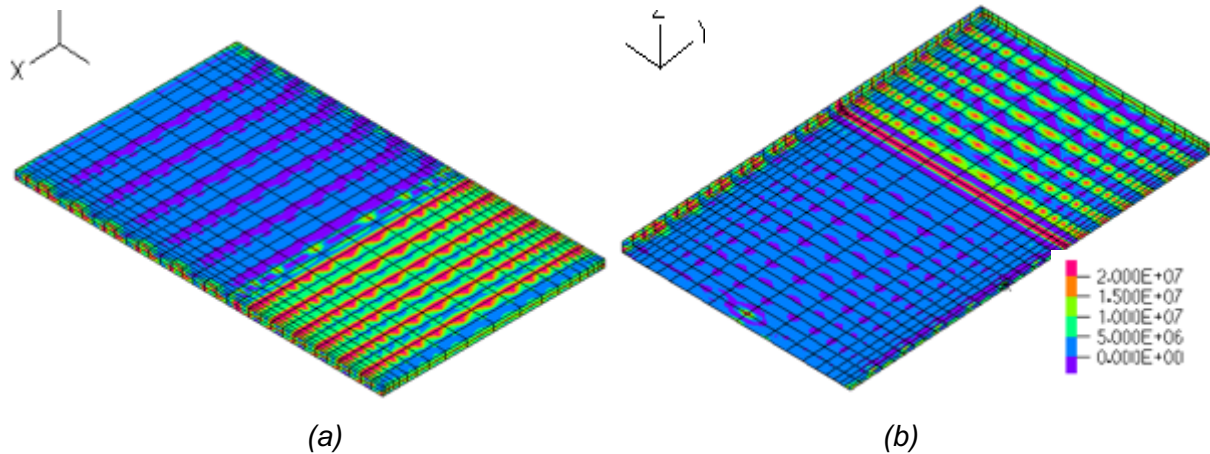


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 102a y 102b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 99. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, superando los 10MPa.

Figura 102

Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

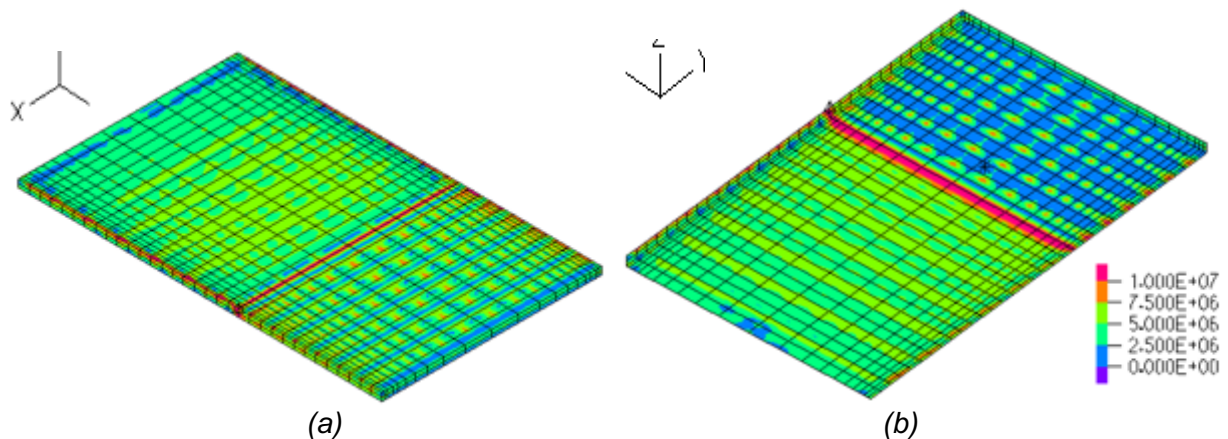


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 103a y 103b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 99. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, estas zonas sobrepasan los 5MPa.

Figura 103

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

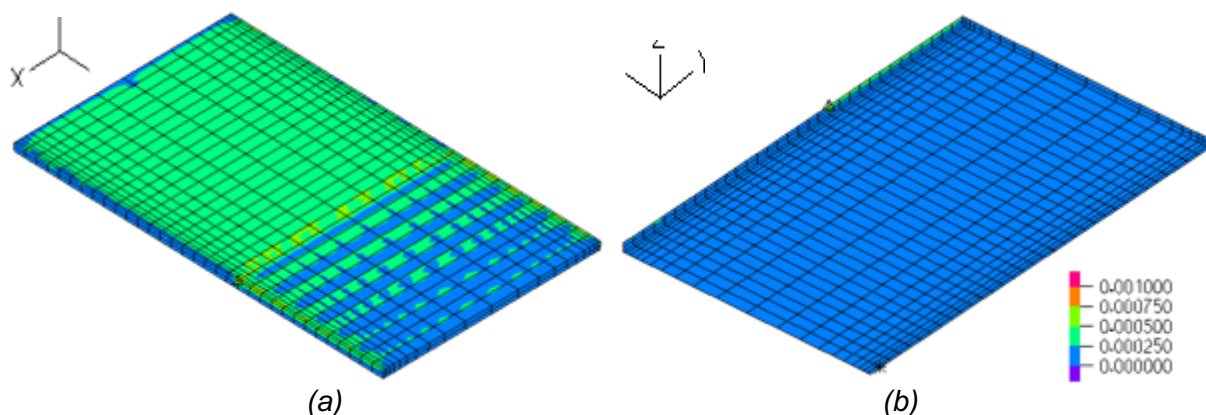


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 104a y 104b muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para las temperaturas mostradas en la figura 93. Nótese que los desplazamientos son apreciables solamente en la superficie de la losa. Los valores máximos se producen en el tramo central de la losa, y son ligeramente más bajos que en el sub-caso 3A, pero no sobrepasan de 0.5 mm.

Figura 104

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior



Fuente: Reportes creados en ADINA

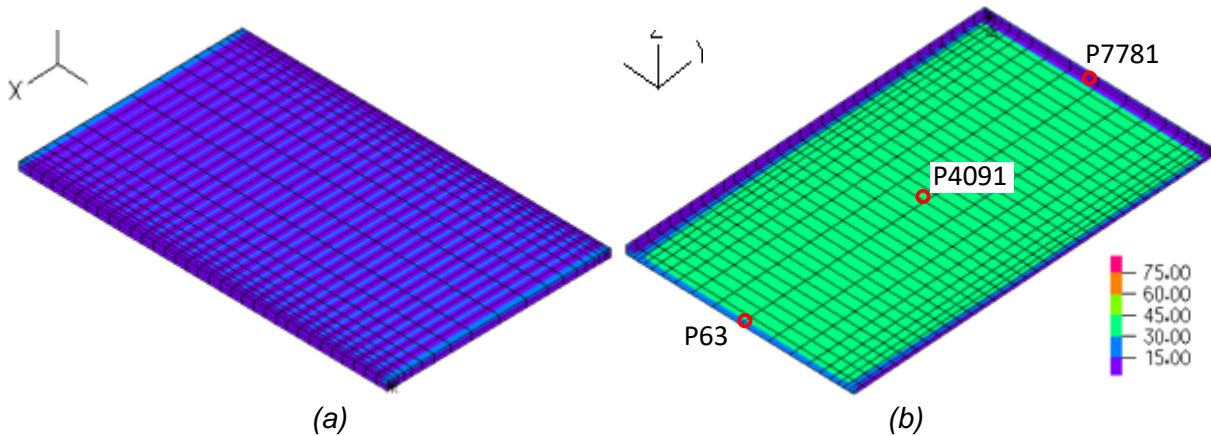
Sub-caso 3D: Cemento Tipo IV de Corea

En este sub-caso se aplican las mismas condiciones que se usaron en el caso 3A, excepto que se consideró un cemento alternativo. Este sub-caso considera una temperatura ambiental de 20°C, de acuerdo a lo discutido líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021), excepto que se utilizó la curva de generación de calor correspondiente a un concreto fabricado con cemento del tipo IV de origen coreano, al igual que en los otros sub-casos con una temperatura inicial del concreto de 28°C.

Las figuras 105a, y 105b muestran la distribución de temperatura 105 horas después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir en la base de la losa y alcanzan valores superiores a los 30°C.

Figura 105

Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior

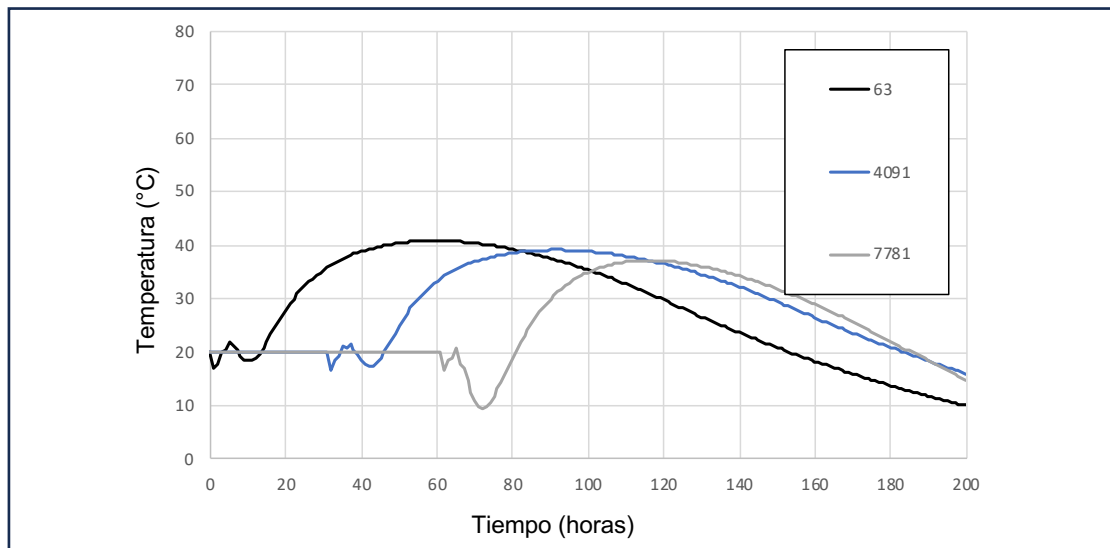


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 106 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en la base de la losa en el eje de simetría. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 63 (izquierda: inicio del vaciado), 4091 (centro) y 7781 (derecha: fin del vaciado). En los tres nodos se alcanza un pico cercano a los 40°C, 30°C por debajo del sub-caso 3A, que lentamente descende hasta la temperatura ambiental.

Figura 106

Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781

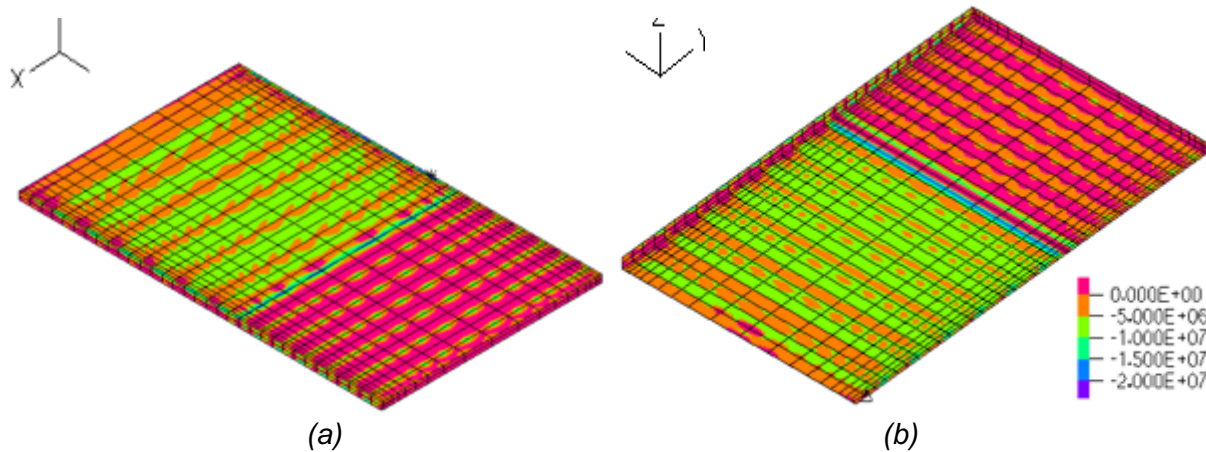


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 107a y 107b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 105. Los valores mínimos se producen cerca de la franja central de la losa, en donde las compresiones superan los 5MPa.

Figura 107

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

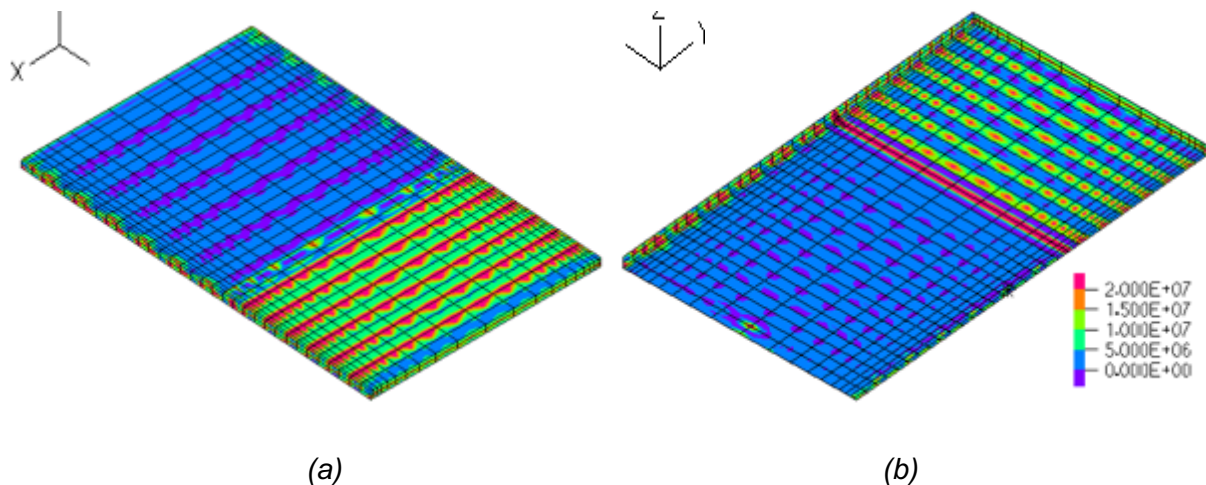


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 108a y 108b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 105. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, superando compresiones de 5MPa.

Figura 108

Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

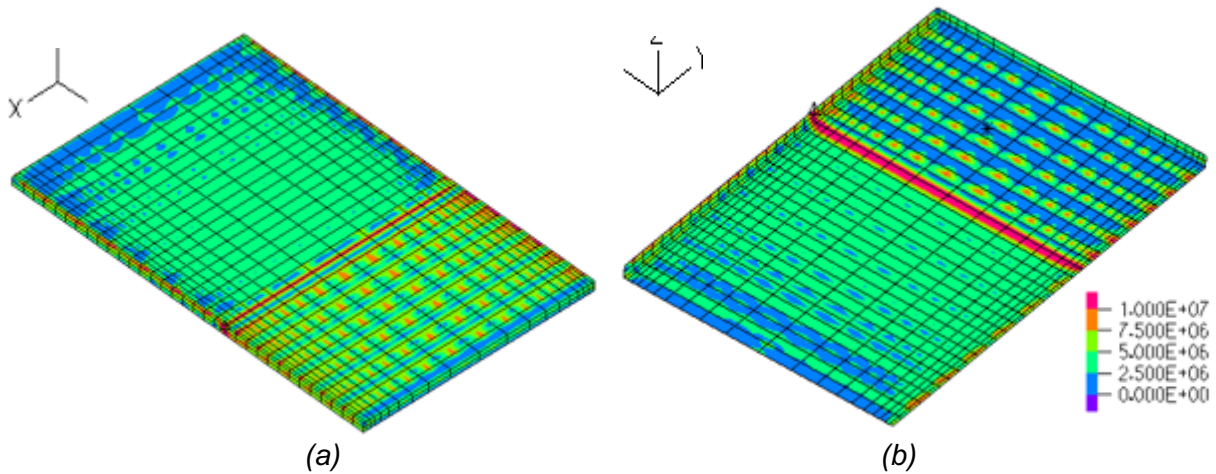


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 109a y 109b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 105. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, los valores máximos sobrepasan los 2.5MPa.

Figura 109

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

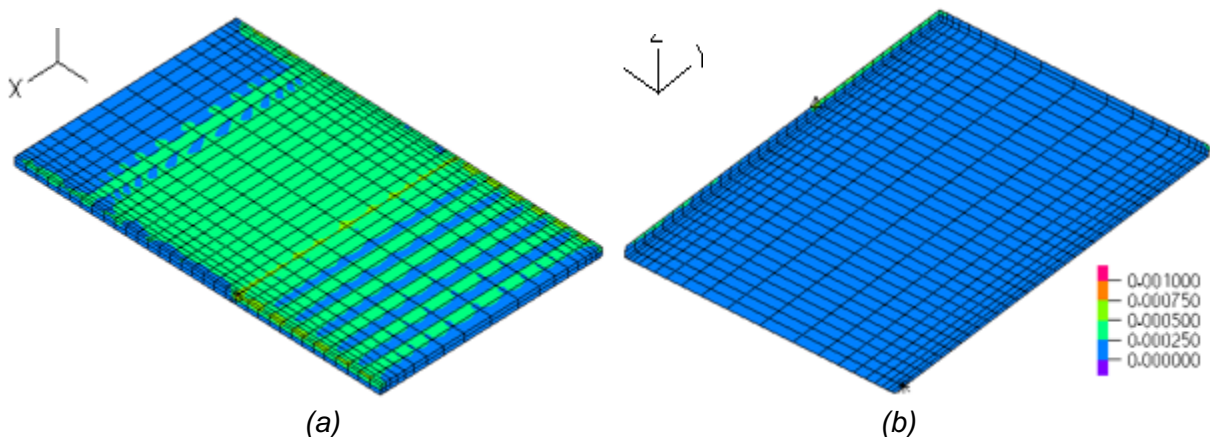


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 110a y 110b muestran las magnitudes de los desplazamientos para las temperaturas mostradas en la figura 105. Nótese que los desplazamientos más importantes se producen en la superficie de la losa. Los valores máximos se producen en el tramo central de la losa, y son más bajos que en los sub-casos anteriores; tampoco sobrepasan 0.5 mm.

Figura 110

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 3E: Vaciado lento

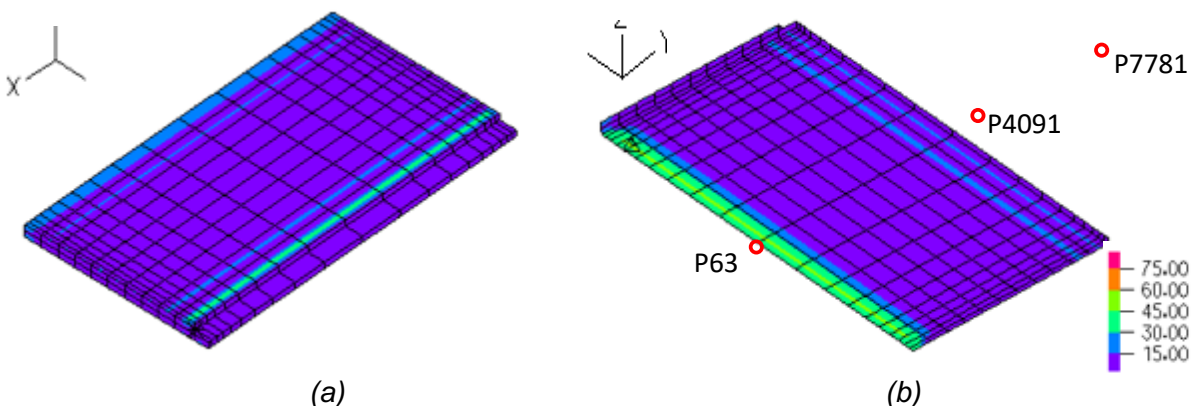
En este sub-caso se aplican las mismas condiciones que se usaron en el caso 3A, excepto que se consideró un vaciado acelerado como parte del proceso constructivo. Este sub-caso considera una temperatura ambiental de 20°C, de acuerdo a lo discutido líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). En este caso se consideró que los bloques de concreto, que en los sub-casos anteriores se colocaban cada hora, se colocan cada dos horas, al igual que en los otros sub-casos con una temperatura de 28°C.

Las figuras 111a, y 111b muestran la distribución de temperaturas 42 horas después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir en la base de la losa y superan los 45°C.

La figura 112 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en la base de la losa en el eje de simetría. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 63 (izquierda: inicio del vaciado), 4091 (centro) y 7781 (derecha: fin del vaciado). En los tres nodos se alcanza un pico cercano a los 30°C, 40°C por debajo del sub-caso 3A, que lentamente descende hasta la temperatura ambiental.

Figura 111

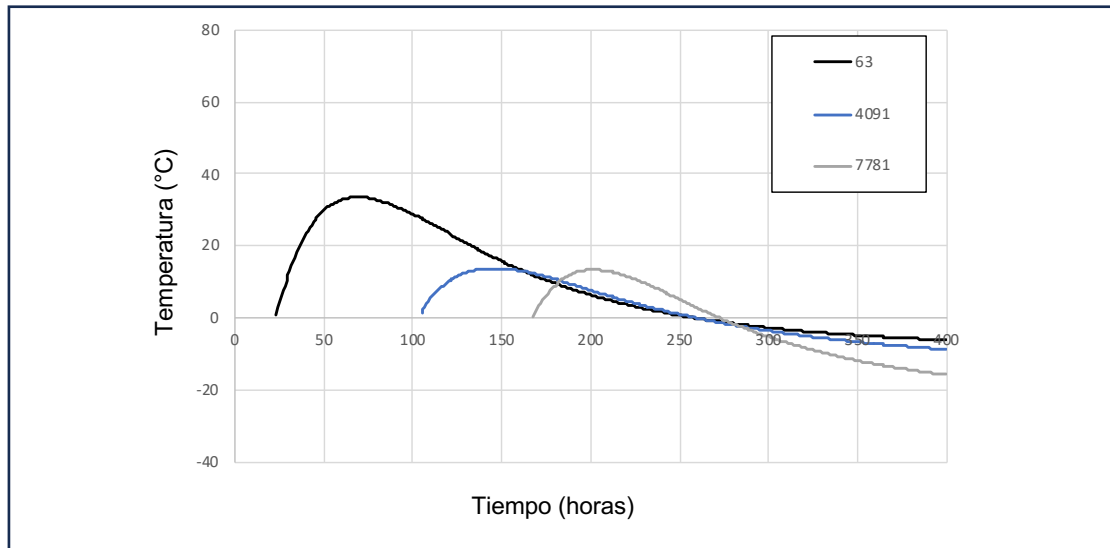
Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 112

Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781

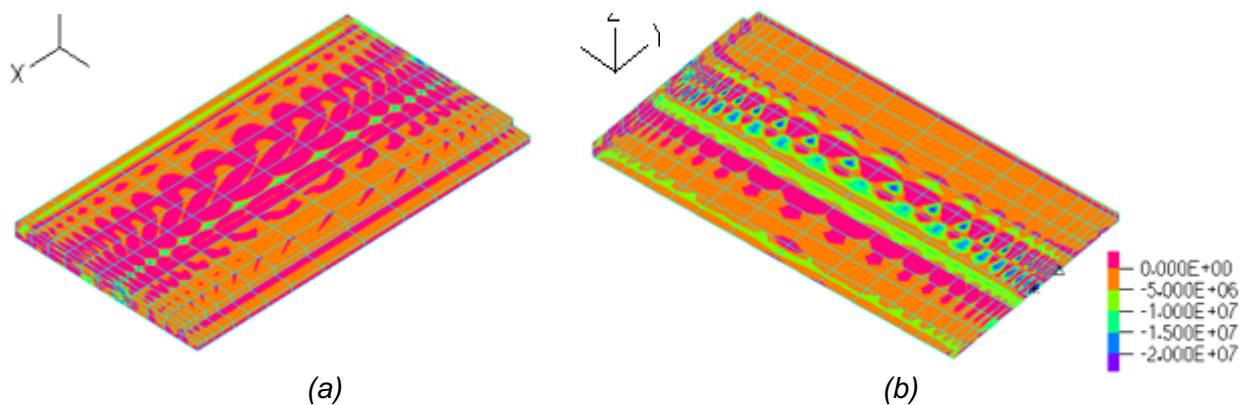


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 113a y 113b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (comprensiones) para las temperaturas mostradas en la figura 111. Los valores mínimos se producen cerca de la franja central de la losa, sin sobrepasar generalmente los 10MPa.

Figura 113

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascals) a) vista inferior y b) vista superior

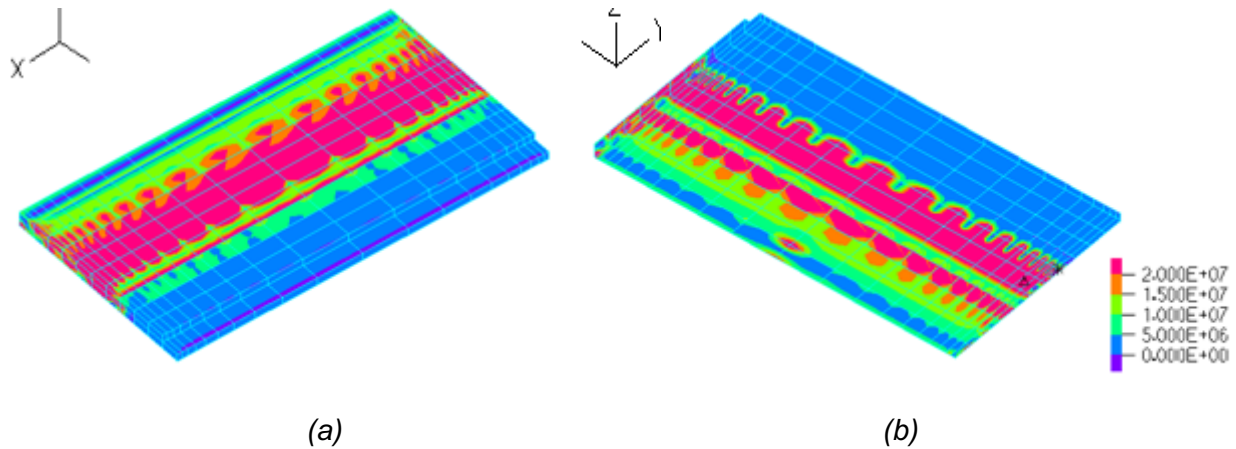


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 114a y 114b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 111. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, superando los 15MPa.

Figura 114

Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

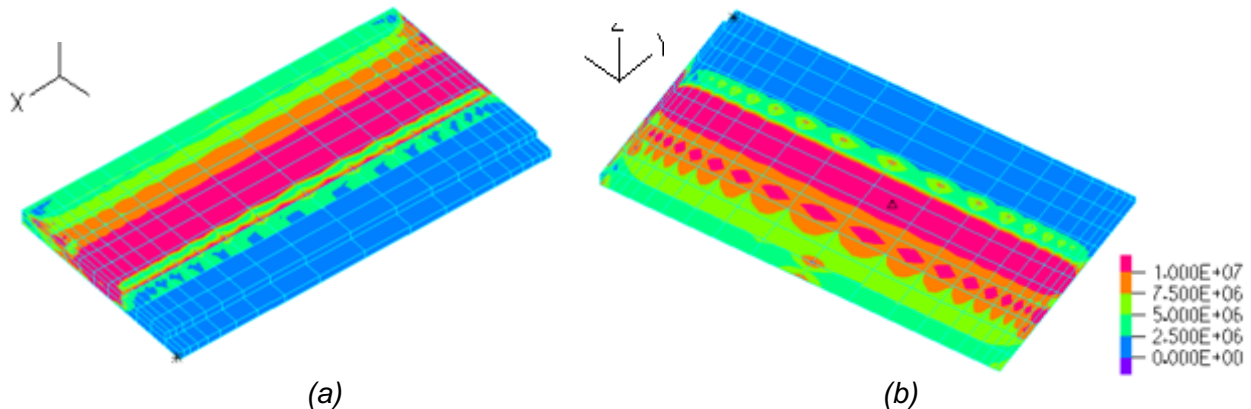


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 115a y 115b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 111. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, superando los 8MPa.

Figura 115

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

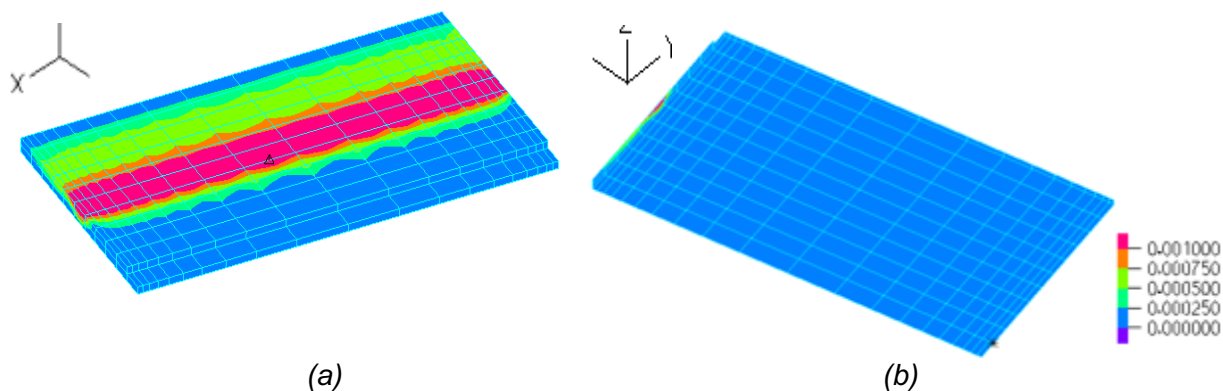


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 116a y 116b muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para las temperaturas mostradas en la figura 111. Nótese que los desplazamientos se producen solamente en la superficie de la losa. Los valores máximos se producen en el tramo central de la losa vaciada, y son comparables a los del sub-caso 3A, pero no sobrepasan de 0.5 mm.

Figura 116

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior



Fuente: Reportes creados en ADINA

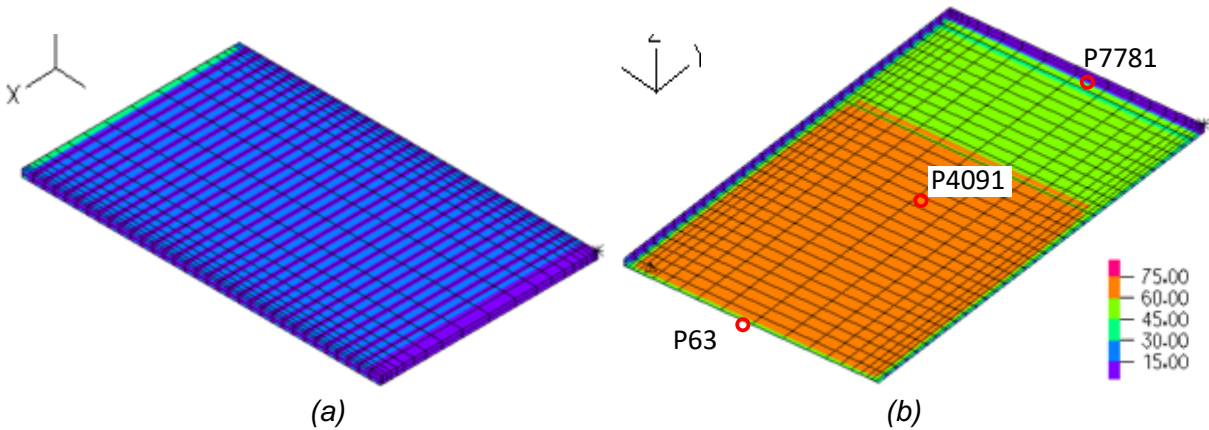
Sub-caso 3F: Vaciado acelerado

En este sub-caso se aplican las mismas condiciones que se usaron en el caso 3A, excepto que se consideró un vaciado acelerado de los bloques de concreto. Este sub-caso considera una temperatura ambiental de 20°C, de acuerdo a lo discutido líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). En este caso se consideró que los bloques de concreto, que en los primeros sub-casos anteriores se colocaban cada hora, se colocan cada media hora, al igual que en los otros sub-casos con una temperatura de 28°C.

Las figuras 117a, y 117b muestran la distribución de temperatura 46 horas después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir en la base de la losa y alcanzan valores superiores a los 60°C, como en el sub-caso 3A.

Figura 117

Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior

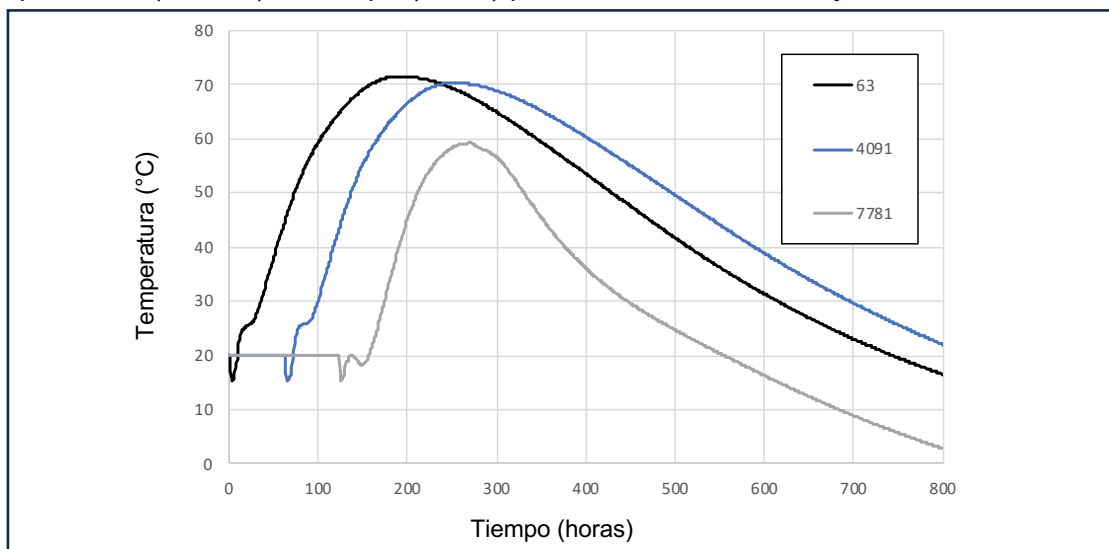


Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 118 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en la base de la losa en el eje de simetría. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 63 (izquierda: inicio del vaciado), 4091 (centro) y 7781 (derecha: fin del vaciado). Al interior se alcanzan picos cercanos a los 70°C, como en el sub-caso 3A, que lentamente descende hasta la temperatura ambiental.

Figura 118

Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781

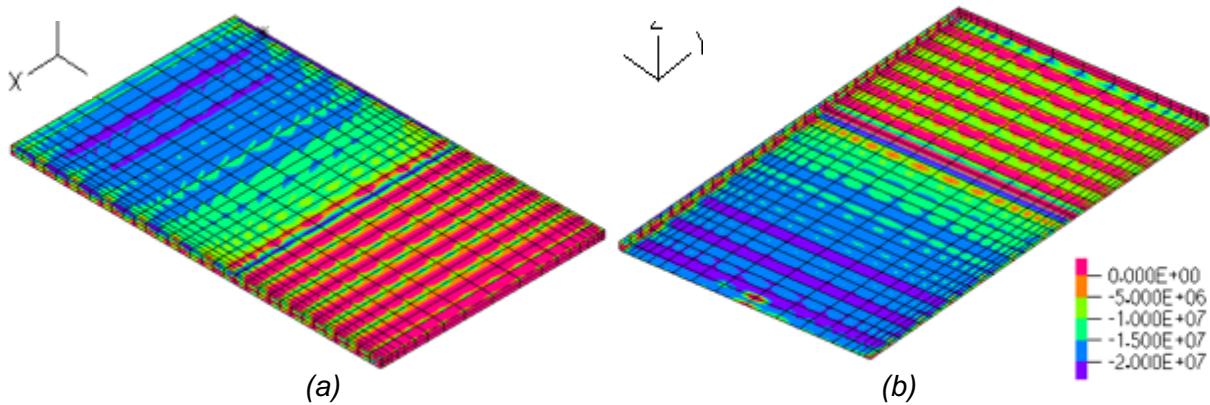


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 119a y 119b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 117. Los valores mínimos se producen cerca de la franja central de la losa, superando los 15MPa.

Figura 119

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascuales) a) vista inferior y b) vista superior

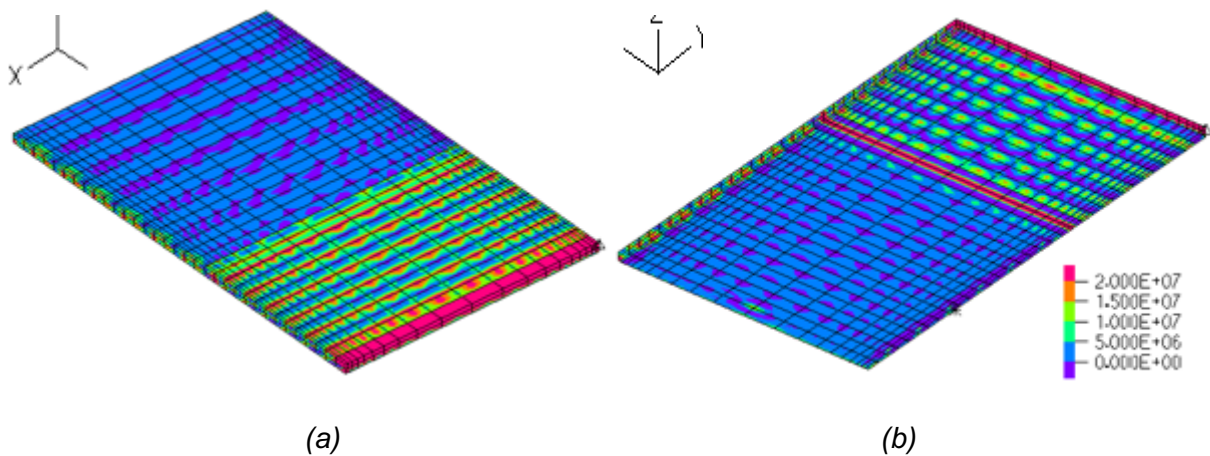


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 120a y 120b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 117. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, estos valores alcanzan los 5MPa.

Figura 120

Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascuales) a) vista inferior y b) vista superior

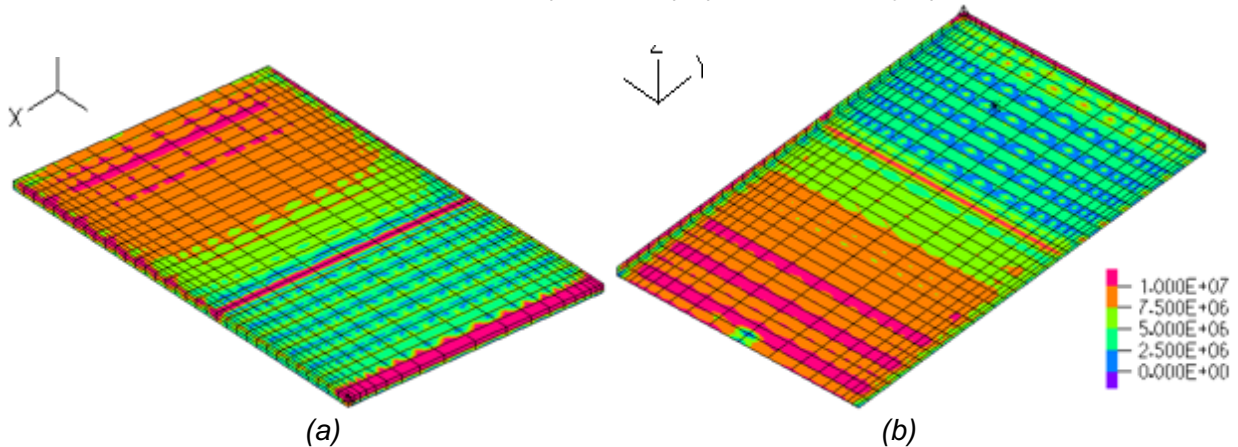


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 121a y 121b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 117. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, estos valores sobrepasan los 7.5MPa.

Figura 121

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

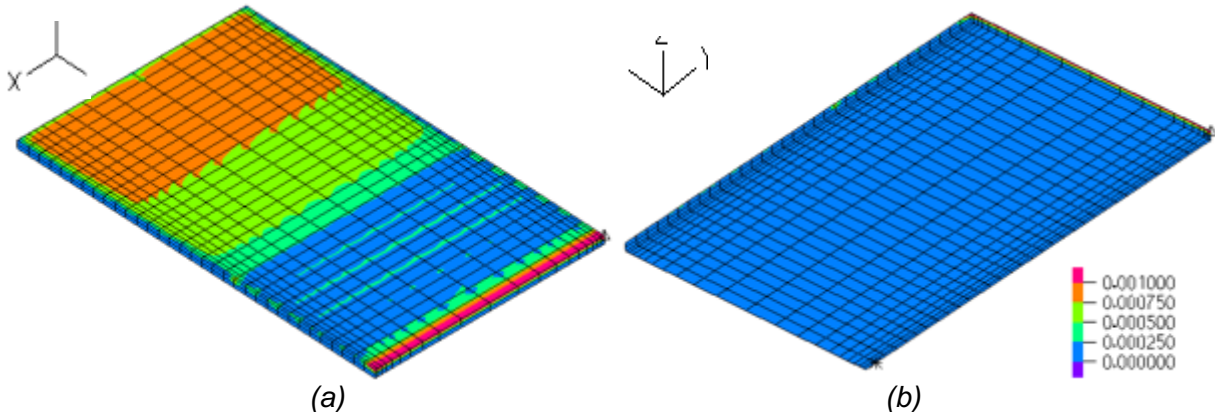


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 122a y 122b muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para las temperaturas mostradas en la figura 117. Nótese que los desplazamientos se producen solamente en la superficie de la losa. Los valores máximos se producen en el extremo de la losa, y son comparables a los del sub-caso 3A, pero no sobrepasan de 0.75 mm.

Figura 122

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior



Fuente: Reportes creados en ADINA

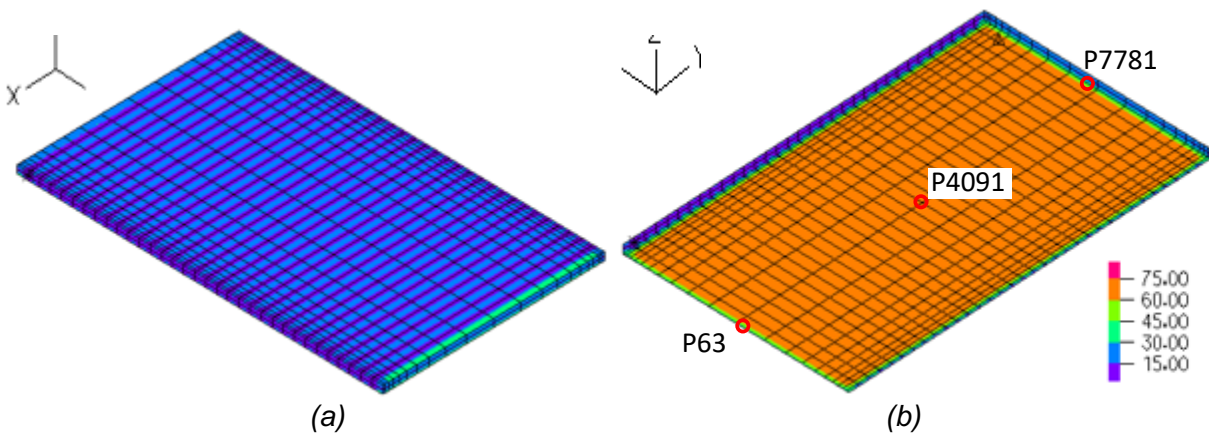
Sub-caso 3G: Vaciado completo

En este sub-caso se aplican las mismas condiciones que se usaron en el caso 3A, excepto que se consideró que la losa podría vaciarse completamente de una vez. Este sub-caso considera una temperatura ambiental de 20°C, de acuerdo a lo discutido líneas arriba, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Además de ello se consideró que todo el concreto podría colocarse a la vez, al igual que en los otros sub-casos con una temperatura de 28°C.

Las figuras 123a, y 123b muestran la distribución de temperatura 44 horas después del vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir en la base de la losa y superan los 60°C.

Figura 123

Reporte de temperaturas (Celsius) a) vista superior y b) vista inferior



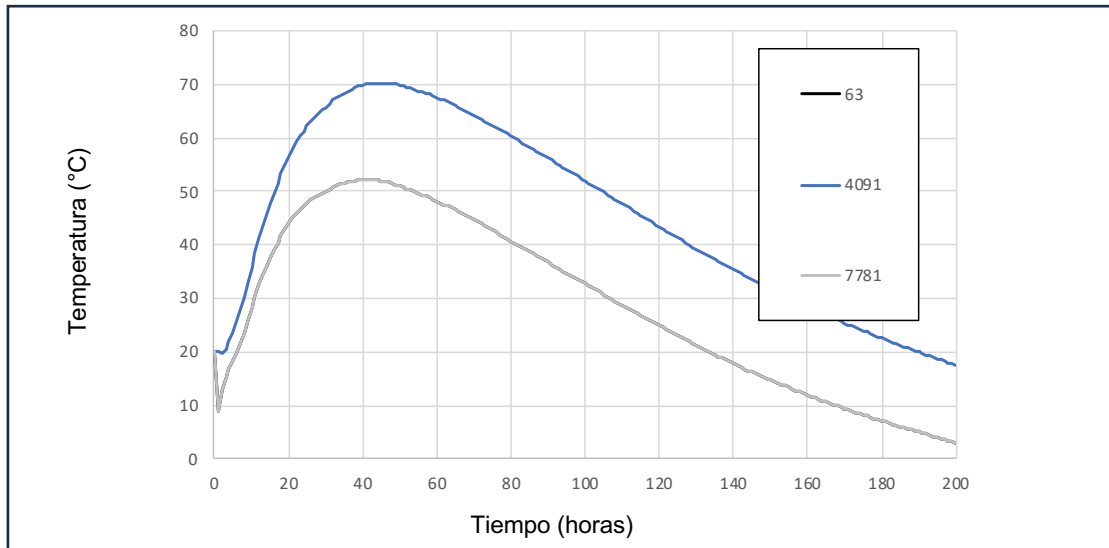
Fuente: Reportes creados en ADINA

La figura 124 presenta la evolución de las temperaturas en los nodos ubicados en la base de la losa en el eje de simetría. Los nodos que corresponden a esas ubicaciones de acuerdo a la malla del MEF son: 63 (izquierda: inicio del vaciado), 4091 (centro) y 7781 (derecha: fin del vaciado). Al interior de la estructura se alcanza un pico de 70°C, similar al del sub-caso 3A, que lentamente descende hasta la temperatura ambiental.

Las figuras 125a y 125b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 123. Los valores mínimos se producen cerca de la franja central de la losa, alcanzando los 20MPa.

Figura 124

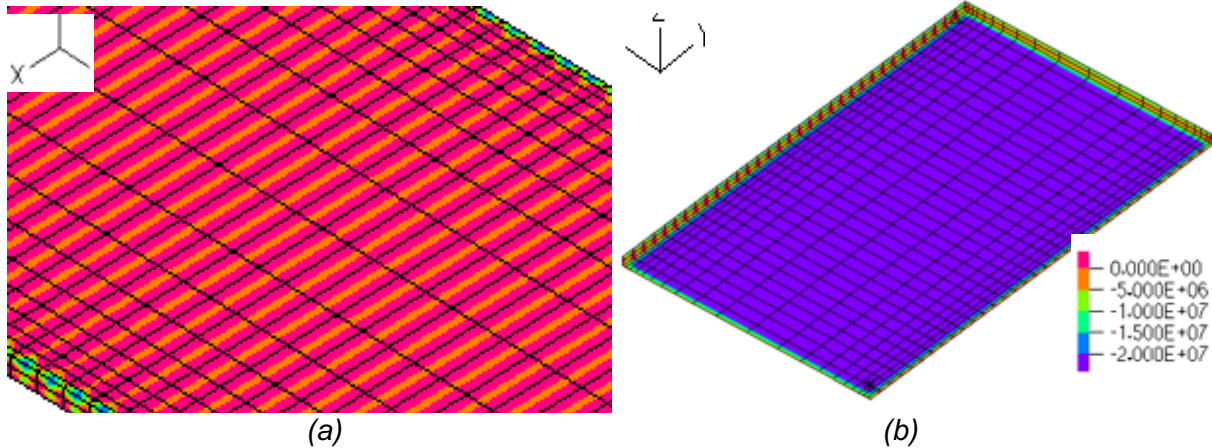
Temperaturas (Celsius) vs tiempo (horas) para los nodos 63, 4091 y 7781



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 125

Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascuales) a) vista inferior y b) vista superior



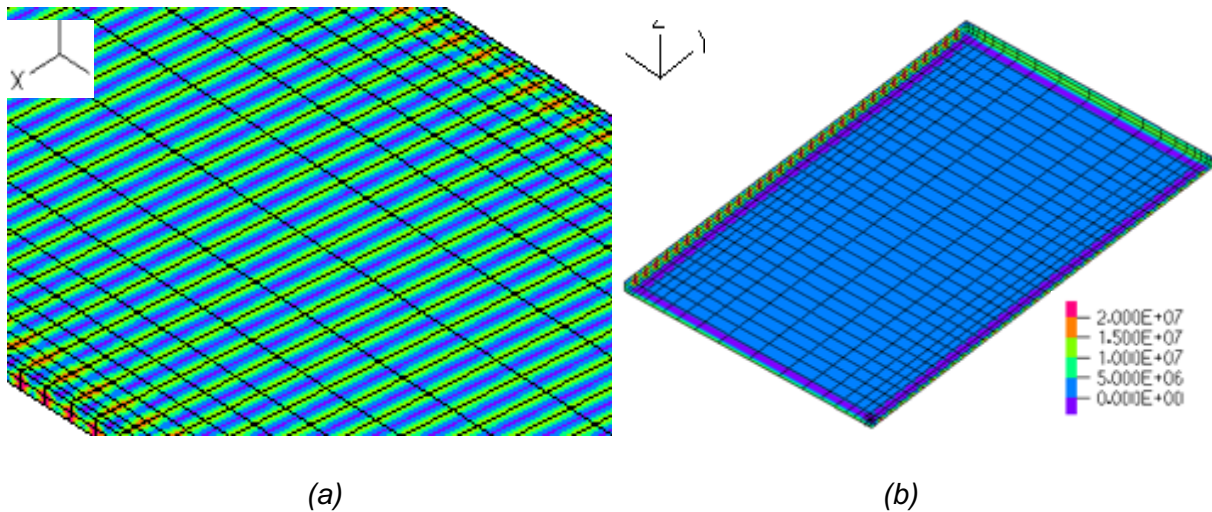
Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 126a y 126b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 123. Los valores máximos se producen cerca de la franja central y superan los 5MPa.

Las figuras 127a y 127b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 123. Los valores máximos se producen cerca de la franja central, en general los valores sobrepasan los 10MPa.

Figura 126

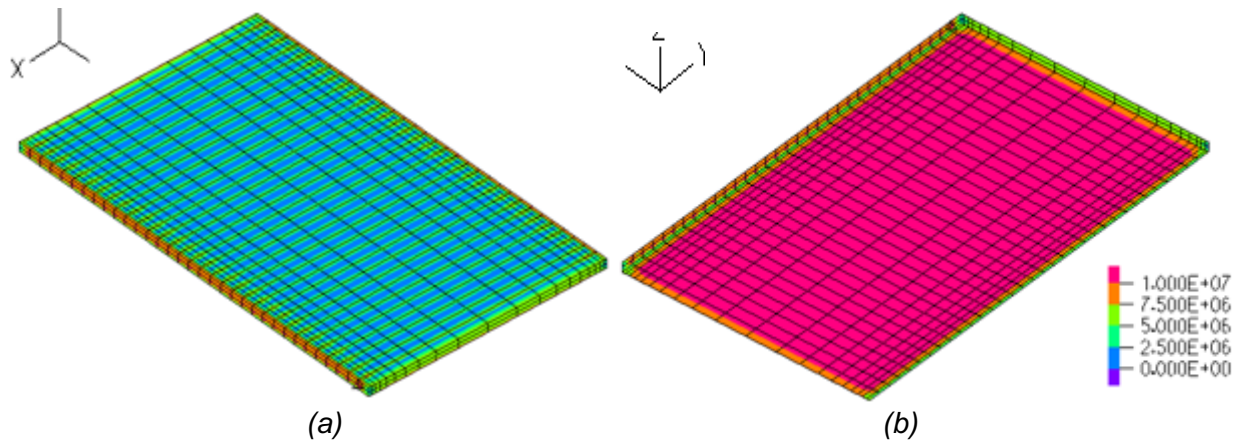
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 127

Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) vista inferior y b) vista superior

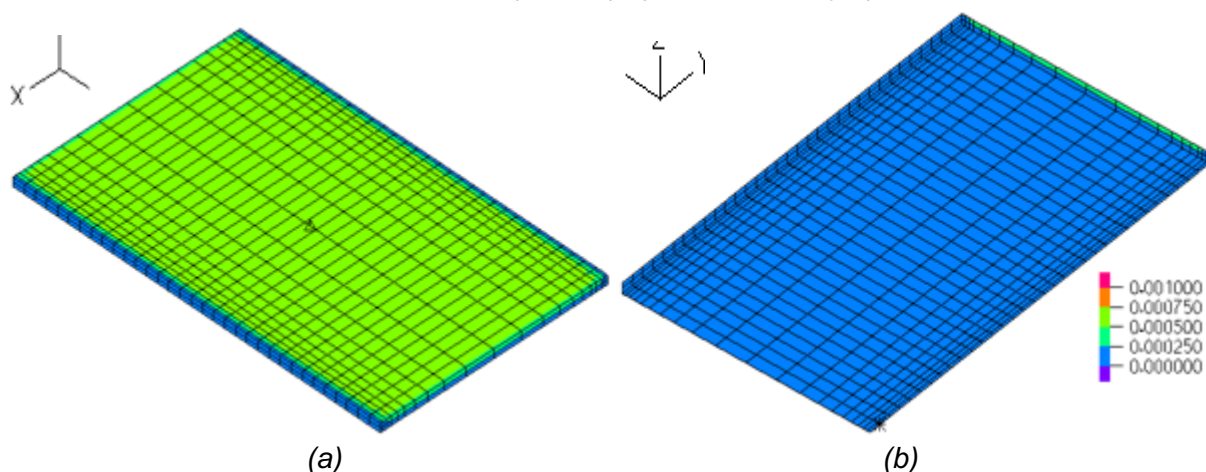


Fuente: Reportes creados en ADINA

Las figuras 128a y 128b muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para las temperaturas mostradas en la figura 123. Nótese que los desplazamientos se producen solamente en la superficie de la losa. Los valores máximos son comparables a los del sub-caso 3A, pero no sobrepasan de 0.75 mm.

Figura 128

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) vista inferior y b) vista superior



Fuente: Reportes creados en ADINA

4.5.4 Análisis de resultados

Temperatura

En el sub-caso 3A, caso original: sin metodologías de enfriamiento, se puede observar que las temperaturas alcanzan los 75°C en algunos tramos de la losa. Además, dichas temperaturas permanecen por varias semanas. Por lo expuesto en el capítulo II, hay evidencia de que temperaturas por encima de los 70°C pueden impactar negativamente el concreto en términos de resistencia y porosidad. Por lo tanto, es necesario controlar la generación de calor al interior del concreto fresco.

El uso de cementos alternativos; como se probó en los sub-casos 3B, 3C y 3D; puede reducir las temperaturas significativamente, previniendo para este caso el rango pernicioso para este tipo de estructuras. Los cementos del tipo I de origen estadounidense o coreano desarrollaron picos de 60°C, 15°C por debajo de los picos logrados con el cemento considerado en el Primer de ADINA (2021), lo que los mantiene en el rango perjudicial. Pero, el cemento del tipo IV de origen coreano es efectivo para el control térmico, ya que mantiene las temperaturas por debajo de los 45°C.

Desde el punto de vista del proceso constructivo, la velocidad de vaciado tiene un impacto importante en las temperaturas máximas. Los casos 3E, 3F y 3G demuestran que disminuir la velocidad de vaciado a la mitad del sub-caso original reduce los picos térmicos hasta 30°C, mientras que duplicar la velocidad del vaciado original puede elevar la temperatura hasta los 75°C, picos similares a realizar todo el vaciado en conjunto, como en el caso 3G. Es

importante notar que el caso original (3A) también muestra picos de 75°C. Por lo que se puede concluir que para este tipo de estructura colocar las capas cada hora produce valores similares a vaciar todo el conjunto y que sería necesario esperar al menos dos horas entre vaciado de capas para lograr una reducción significativa de las temperaturas. No se debe olvidar que las temperaturas pronosticadas en los casos 3A, 3F y 3G están en el rango nocivo para el concreto.

Esfuerzos y desplazamientos

Como se puede apreciar en los sub-casos presentados, reducir la variación térmica logra disminuir los esfuerzos, aunque no de una manera lineal.

En los sub-casos evaluados en esta sección, excepto en los sub-casos 3D, cemento tipo IV, y 3E, vaciado lento, se superan los 20MPa límites para los esfuerzos de compresión establecidos en las secciones previas. Por lo que se puede concluir que un cemento de bajo calor o la reducción de la velocidad de colocación pueden controlar el nivel de esfuerzos de compresión para este tipo de estructura.

A nivel de desplazamientos, en todos los casos se calcula que estos se mantendrán por debajo de 1mm, lo que resulta poco significativo para este tipo de estructura.

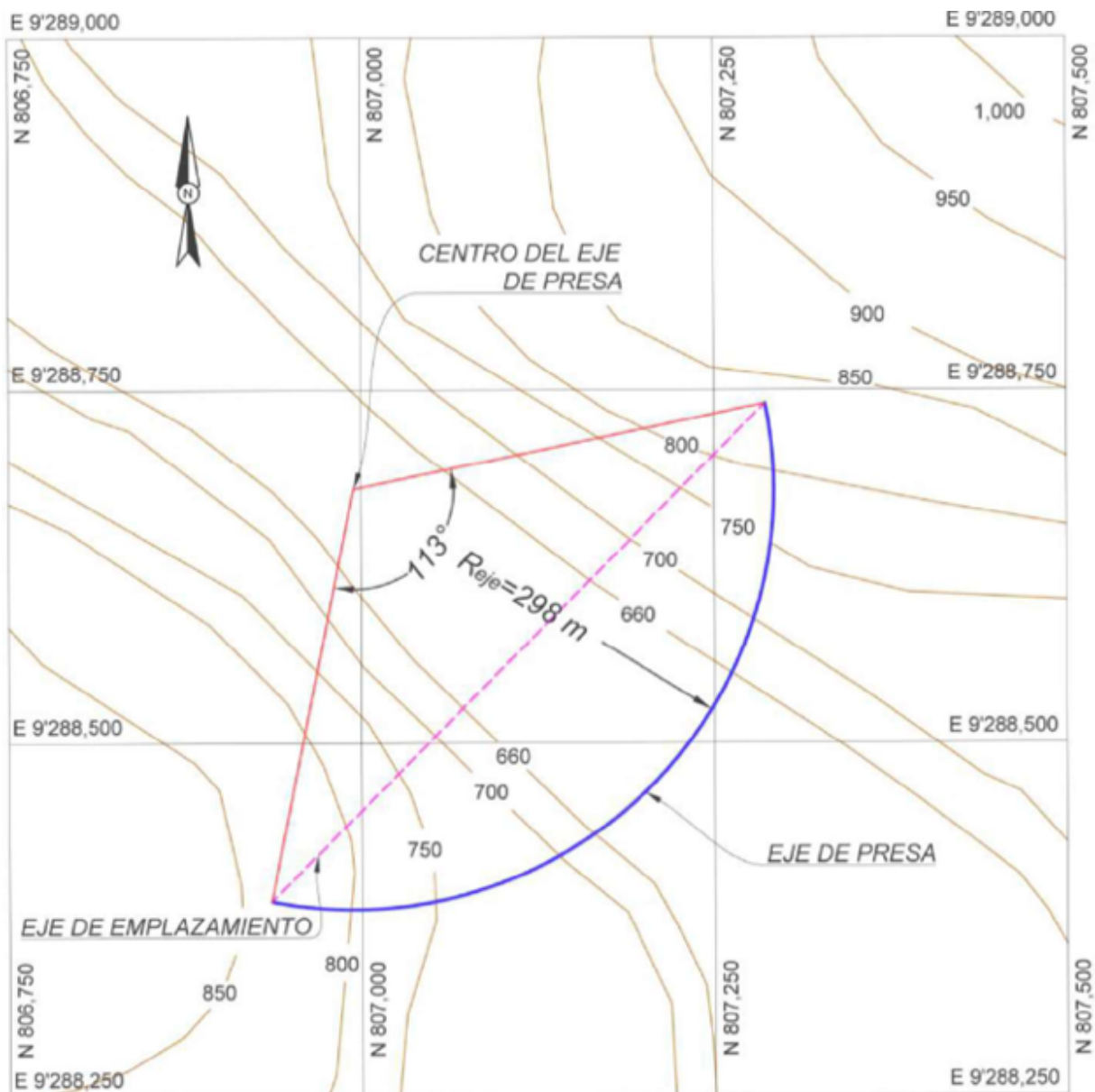
4.6 Análisis de una presa de tipo arco en concreto armado

4.6.1 Descripción del caso

Este caso corresponde a la presa Chadín, una presa de tipo arco, que fue pre-dimensionada y analizada para efectos hidrodinámicos en la tesis de Vela (2018). Para este ejercicio se propone una presa en la cuenca del río Marañón entre las provincias de Luya y Chachapoyas. Siguiendo el procedimiento sugerido por el U.S. Army Corps of Engineers para el diseño de este tipo de presas, se propuso una distancia de 497m entre estribos y 298m de radio, en la zona de la corona. La configuración geométrica de la presa se muestra en la figura 129. El procedimiento también permite pre-dimensionar el cuerpo de la presa. Las figuras 130, 131 y 132 permiten apreciar el perfil, la vista superior y la vista frontal.

Figura 129

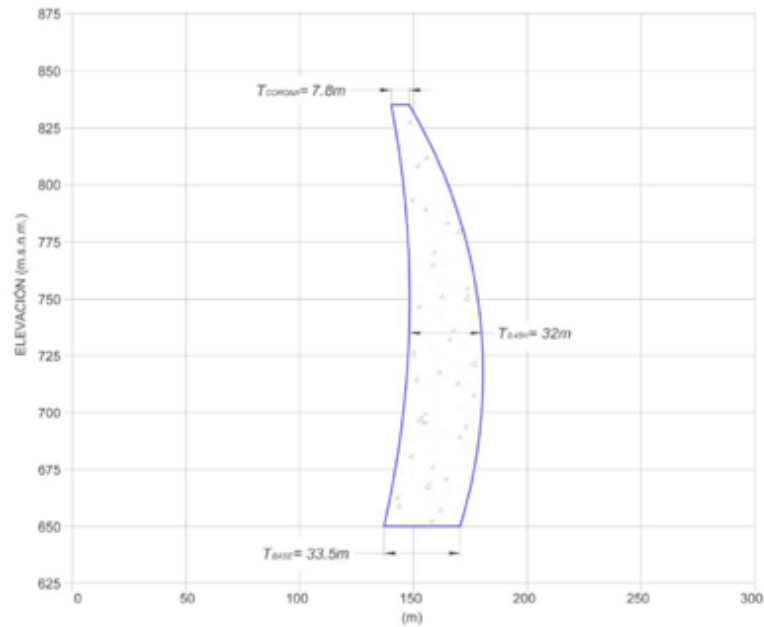
Eje de la presa Chadín



Fuente: Tomado de Vela (2018)

Figura 130

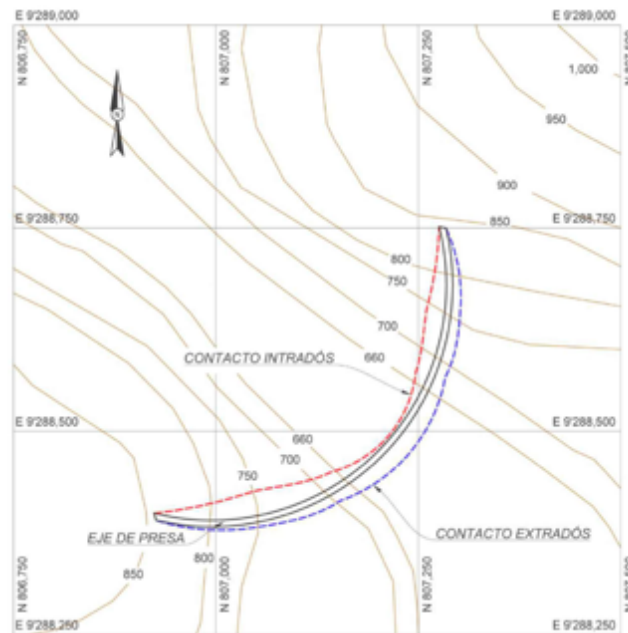
Dimensiones del volado central



Fuente: Tomado de Vela (2018)

Figura 131

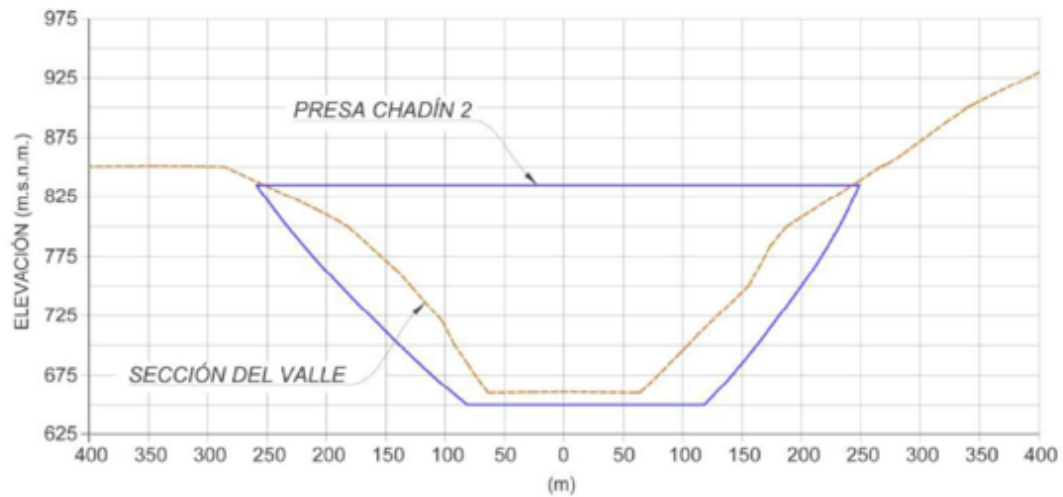
Vista en planta de la presa Chadín



Fuente: Tomado de Vela (2018)

Figura 132

Elevación frontal de la presa Chadín

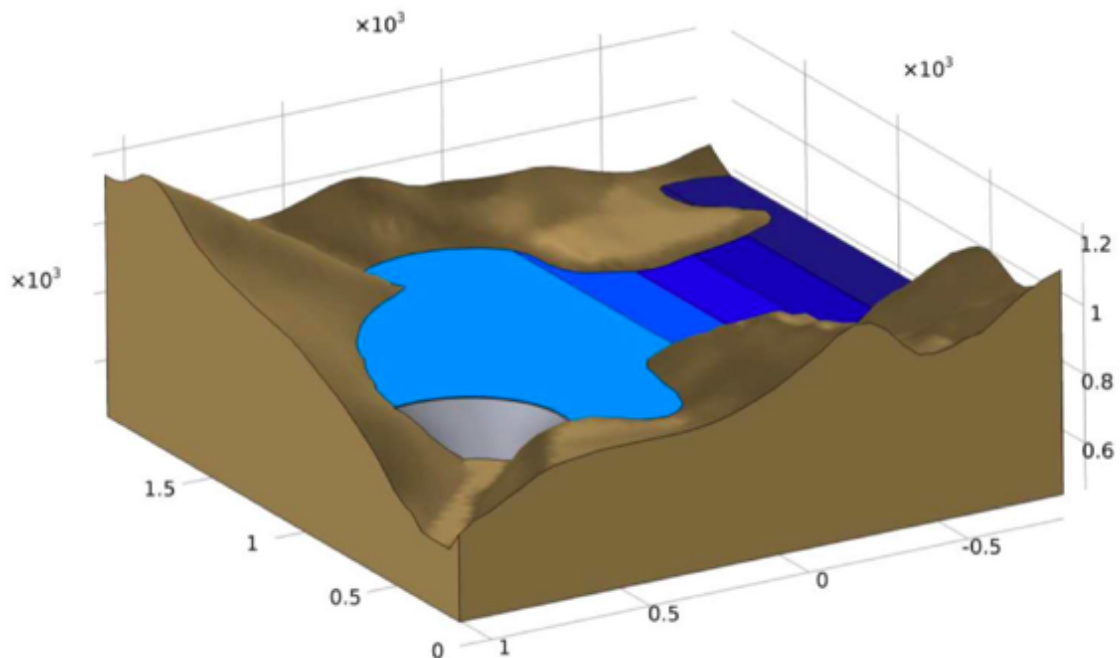


Fuente: Tomado de Vela (2018)

La figura 133 muestra una elevación de la topografía en la que se emplazará presa y la superficie del embalse lleno.

Figura 133

Vista 3D de la presa Chadín



Fuente: Tomado de Vela (2018)

Debido a que el proceso constructivo no fue cubierto en la tesis de Vela (2018), se optó por asumir valores razonables para el vertido del concreto. Se supusieron segmentos de aproximadamente 50m de largo que se construirían secuencialmente hasta alcanzar 35 ó 50m de altura, con vaciados de 5m de altura para lograr las alturas propuestas para los segmentos, siguiendo experiencias similares en otras presas de concreto.

4.6.2 Descripción del modelo

Por tratarse de un problema simétrico, se analizó sólo la mitad derecha del modelo, suponiéndose que no hay intercambio de calor con el lado izquierdo. La presa se subdividió en 36 segmentos, 18 en cada lado, que cuentan con 50m de ancho aproximadamente y entre 35 y 50m de altura. Cada uno de estos segmentos se construirá intercaladamente para permitir la difusión de calor, por lo cual no habrá paredes coincidentes durante los vaciados. Además de ello, cada volumen estará compuesto de capas de 5m que serán vaciadas cada 96h para procurar la difusión de la mayor parte del calor de hidratación. La figura 134 muestra algunas vistas de la malla de elementos finitos utilizada.

Se utilizan funciones de tiempo para indicar la colocación de una capa nueva de concreto. También se declaran funciones de tiempo para indicar el tiempo activo de las superficies que actuarán como elementos de convección. En la mayoría de casos, las superficies de las capas sólo estarán activas hasta la colocación de la siguiente capa.

Para el análisis de esfuerzos, se restringió la traslación horizontal y vertical en los extremos, donde se apoyaría en roca, y en la base del modelo. En el eje de simetría se restringe la traslación horizontal, pero se permite la traslación vertical. Los esfuerzos se calculan en base al cambio de temperaturas obtenido en el análisis térmico.

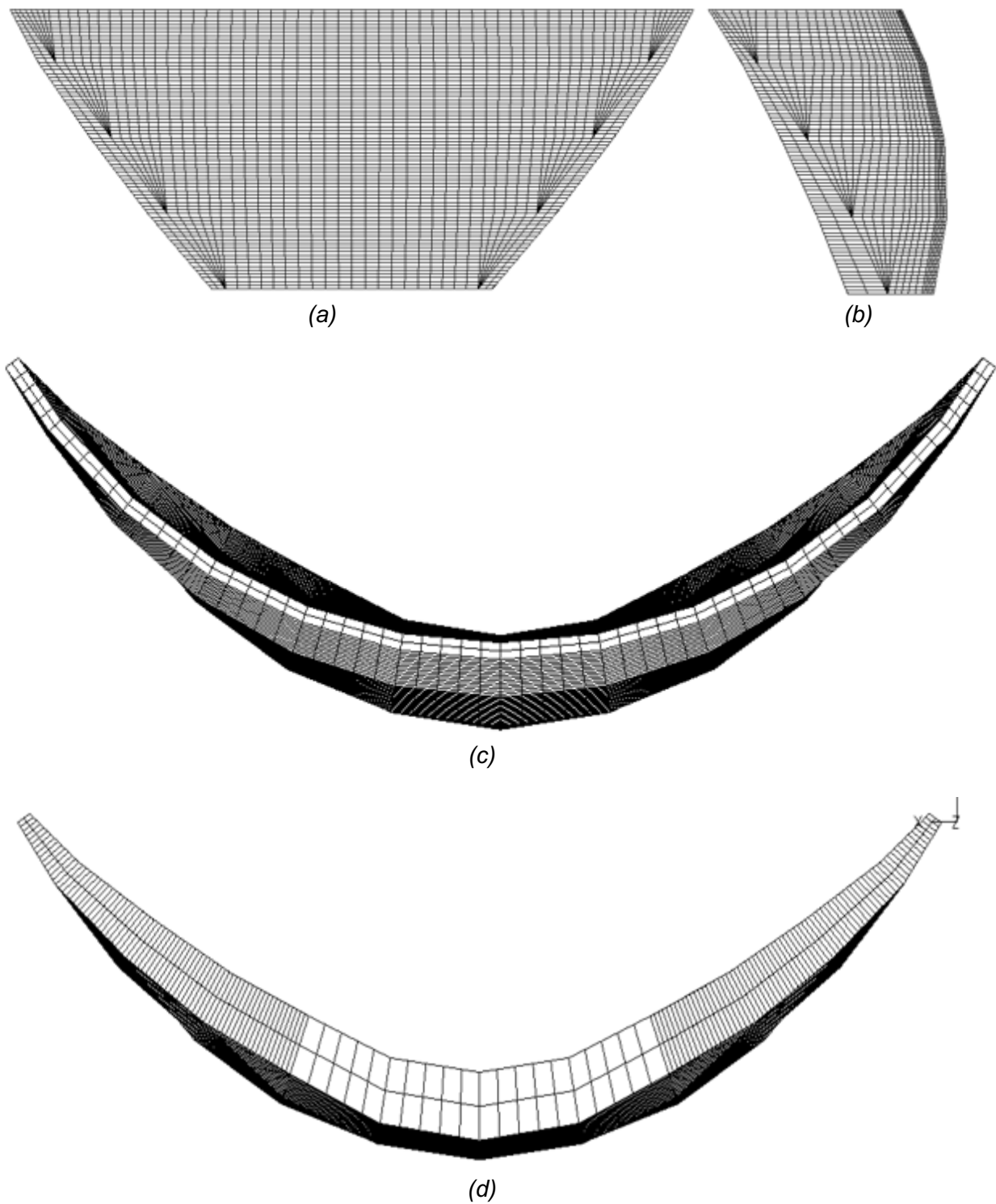
El modelo térmico se corrió para 6400 pasos de 1 hora cada uno, y el modelo de esfuerzos se corrió solamente para los instantes críticos seleccionado en base a picos de temperaturas.

4.6.3 Sub-casos de análisis y resultados

Para el caso 4 se consideraron cinco sub-casos. Es importante notar que en cada sub-caso se cambió una sola condición respecto al sub-caso 4A.

Figura 134

Malla de elementos finitos a) vista frontal, b) vista lateral, c) vista superior y d) vista inferior



Fuente: Reportes creado con ADINA

Sub-caso 4A: Caso original

En este sub-caso se aplican las condiciones básicas expuestas en la descripción del caso. Este sub-caso considera la temperatura de Chachapoyas, registrada por SENAMHI y mostrada en la sección 4.1, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Además de considerar el proceso constructivo ya mencionado.

Las figuras 135a, y 135b muestran la distribución de temperatura 91 días después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas se producen en los extremos de los bloques, donde se alcanzan valores que superan los 80°C.

Las figuras 136a y 136b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 135. Los valores mínimos están dispersos, pero se pueden identificar concentraciones en los límites de los bloques, superándose los 10MPa.

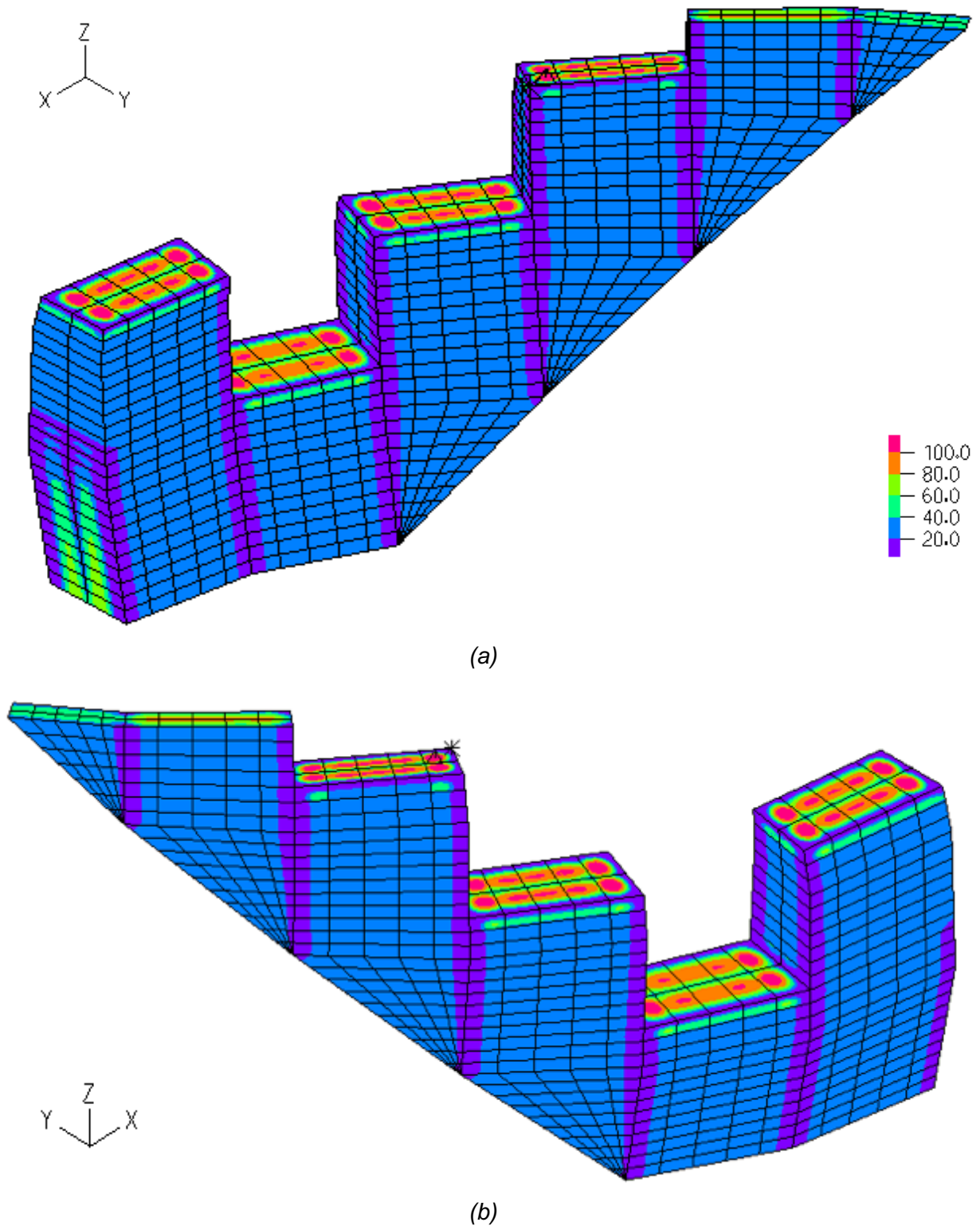
Las figuras 137a y 137b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 135. Los valores máximos están concentrados en los límites de los bloques, especialmente en las esquinas, superándose tracciones de 10MPa.

Las figuras 138a y 138b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 135. Los valores máximos se producen en los límites de los bloques, en donde se sobrepasan los 5MPa.

Las figuras 139a y 139b muestran las magnitudes de los desplazamientos máximos para las temperaturas mostradas en la figura 135. Nótese que los desplazamientos se producen en los bloques con mayor altitud. Los valores máximos se producen en los extremos superiores de la presa, como resultado de la acumulación de deformaciones, y alcanzan los 10cm.

Figura 135

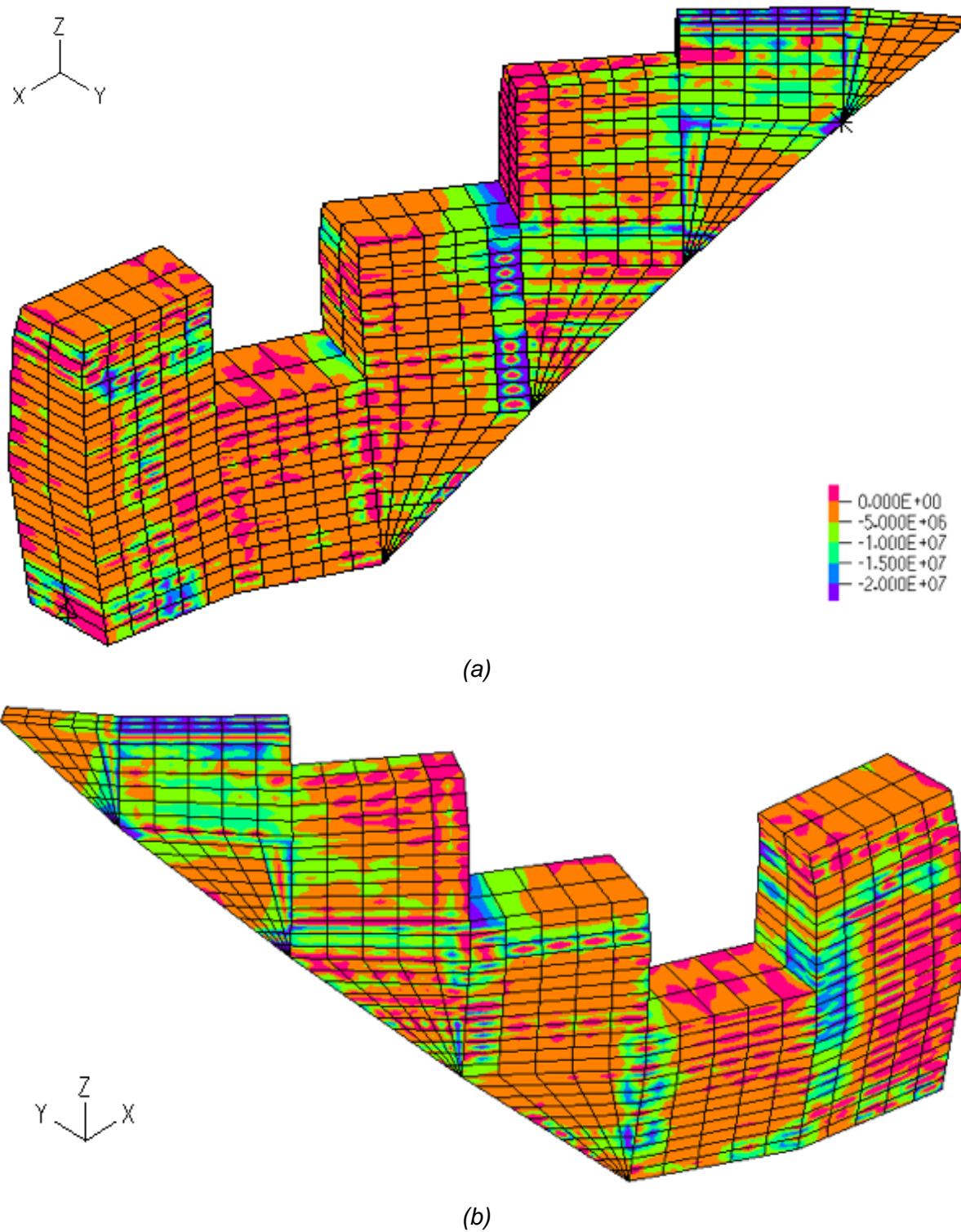
Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 136

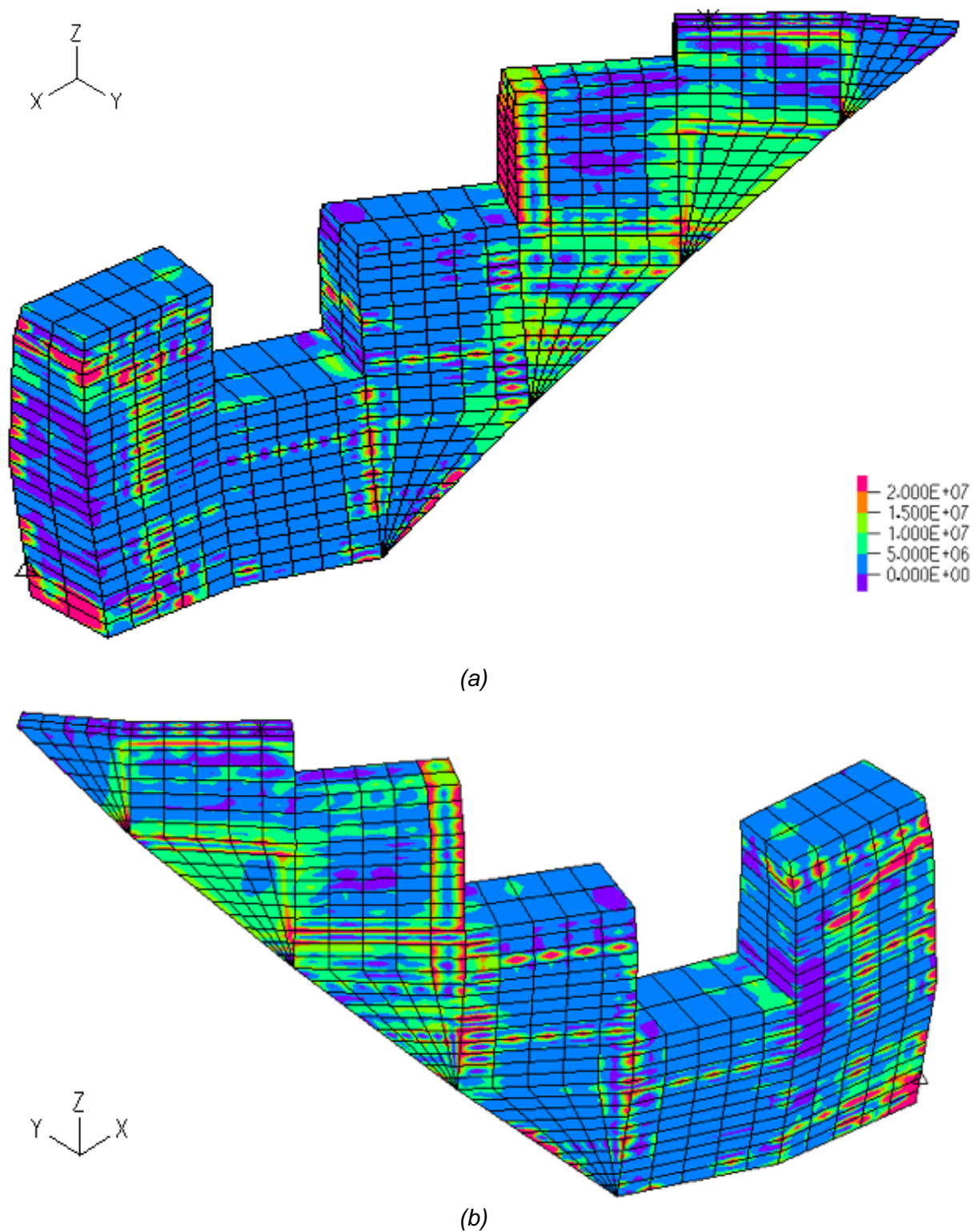
Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 137

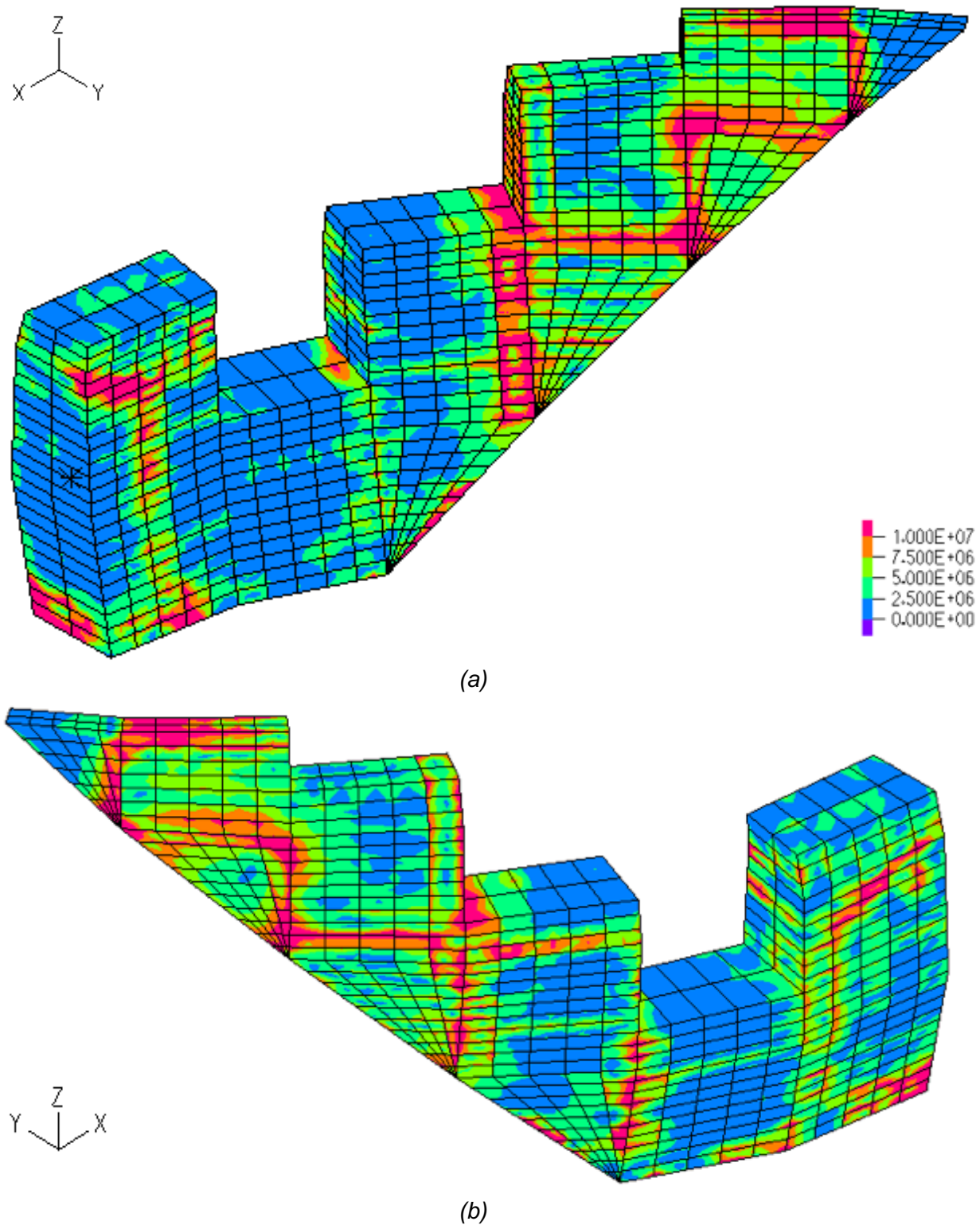
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 138

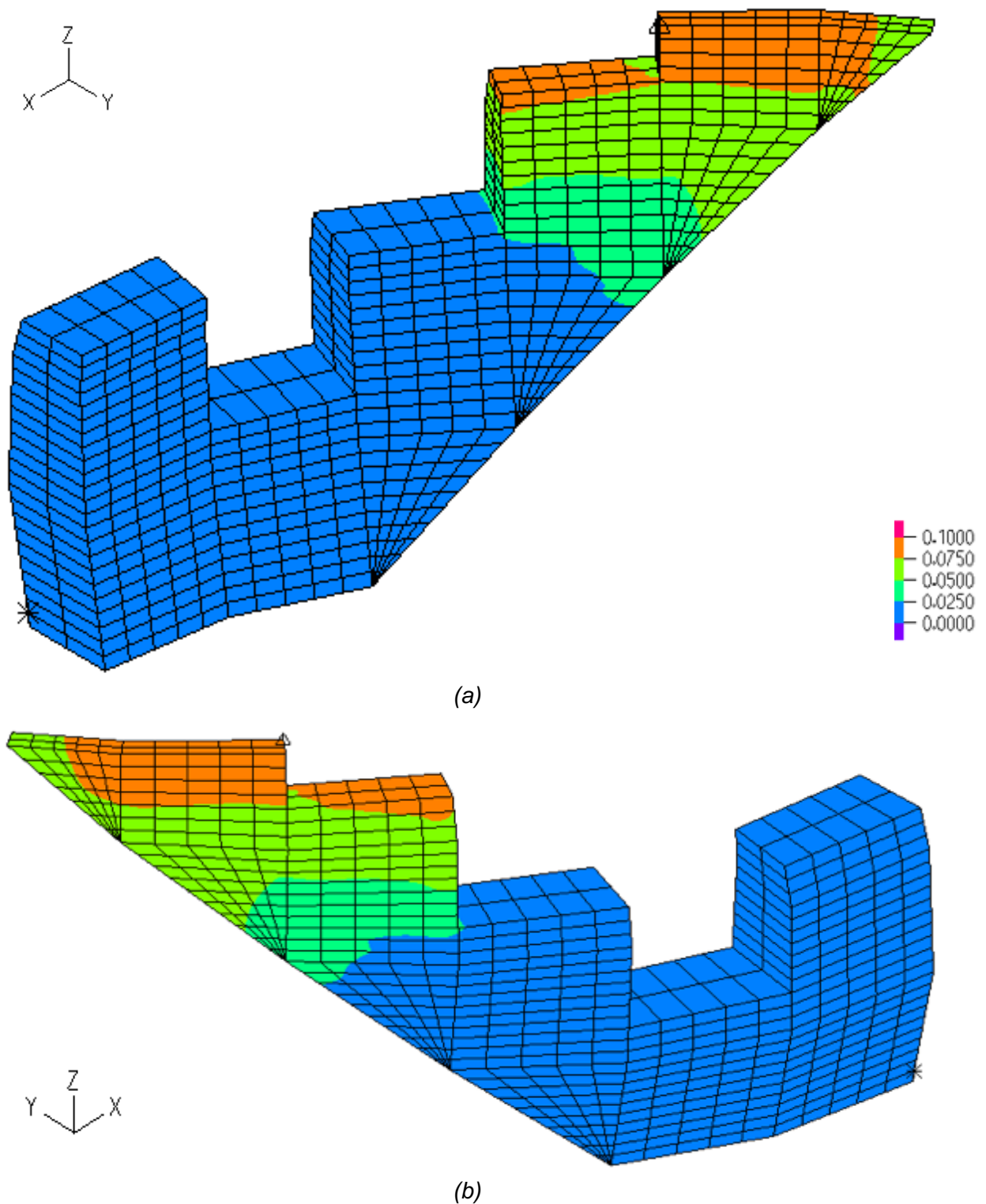
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 139

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 4B: Concreto colocado a 5°C

En este sub-caso se aplican las condiciones utilizadas en el sub-caso 4A, excepto que se considera que el concreto ha sido enfriado al momento de colocarse. Este sub-caso considera la temperatura de Chachapoyas, registrada por SENAMHI y mostrada en la sección 4.1, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Además de considerar el proceso constructivo mencionado en la descripción. Se considero una temperatura inicial de 5°C para el concreto colocado.

Las figuras 140a, y 140b muestran la distribución de temperatura 91 días (2184 horas) después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas se producen en los extremos de los bloques y superan los 60°C, es decir 20°C por debajo de aquellas observadas en el sub-caso 4A.

Las figuras 141a y 141b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 140. Los valores mínimos están dispersos, pero se pueden identificar concentraciones en los límites de los bloques, con compresiones superiores a los 10MPa.

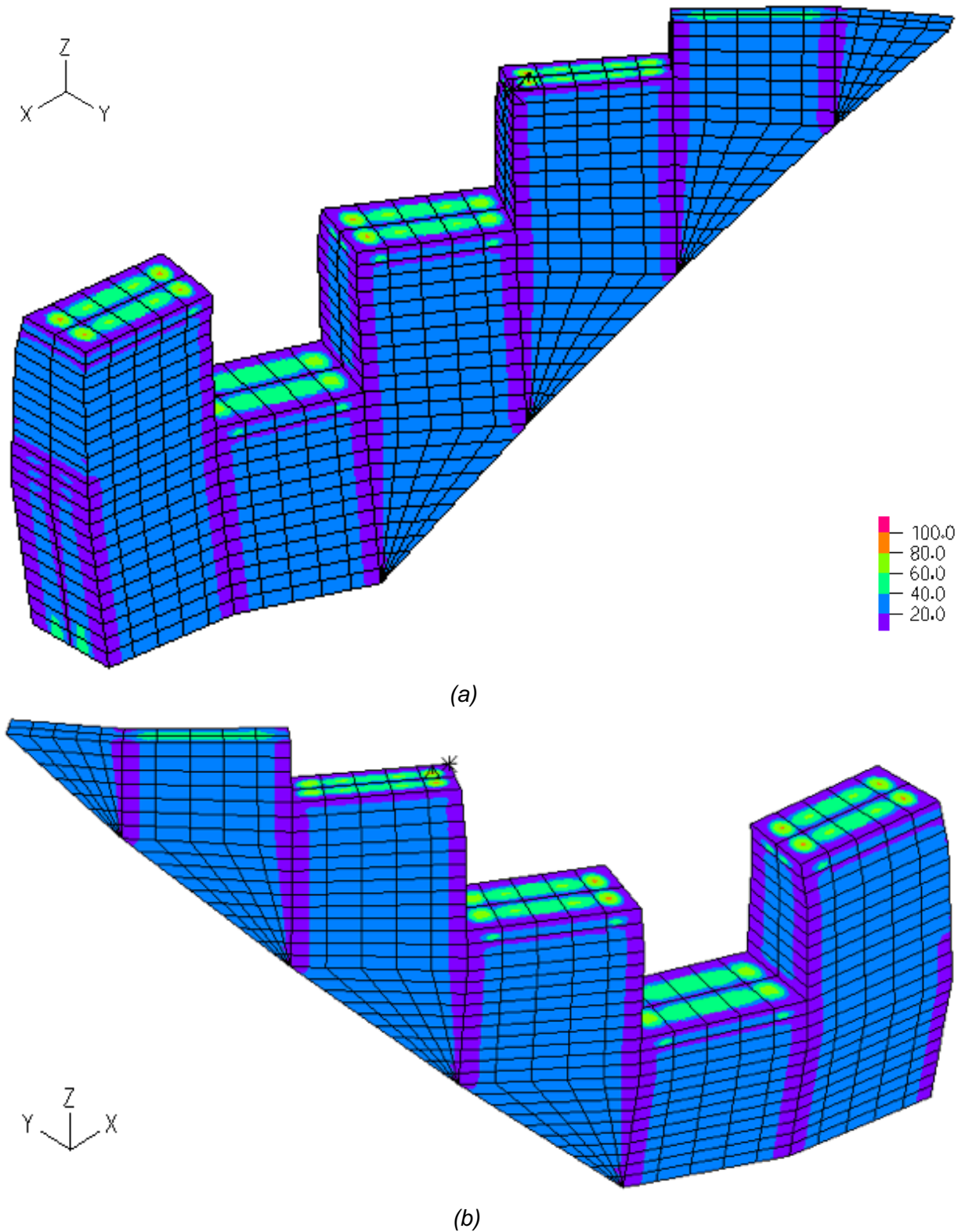
Las figuras 142a y 142b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 140. Los valores máximos están concentrados en los límites de los bloques, especialmente en las esquinas, superando los 10MPa.

Las figuras 143a y 143b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 140. Los valores máximos se producen en los límites de los bloques, los mismos que sobrepasan los 5MPa.

Las figuras 144a y 144b muestran las magnitudes de los desplazamientos para las temperaturas mostradas en la figura 140. Nótese que los desplazamientos se producen en los bloques con mayor altitud. Los valores máximos se producen en los extremos superiores de la presa, como resultado de la acumulación de deformaciones, y alcanzan los 5 cm, ligeramente menores a los del sub-caso 4A.

Figura 140

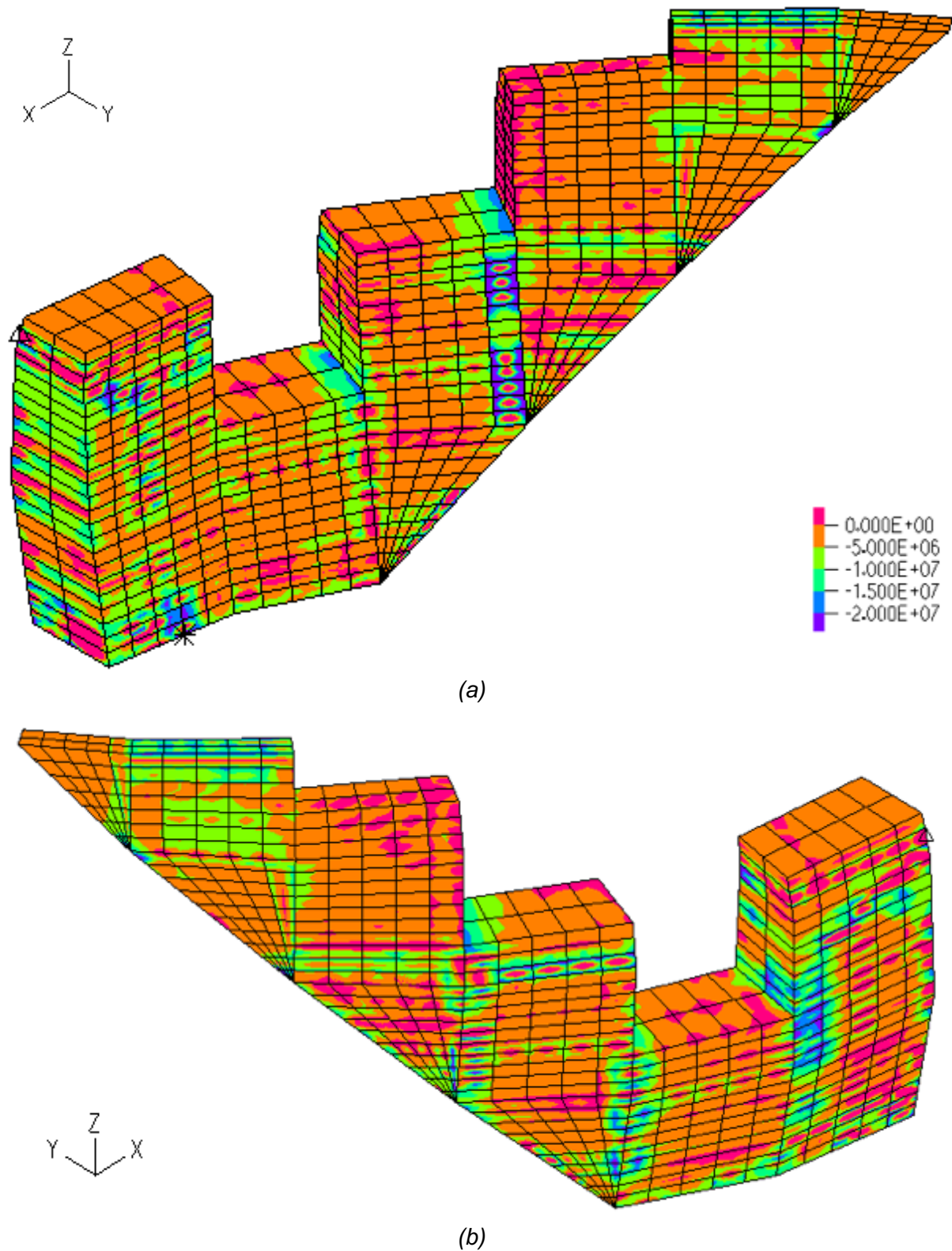
Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 141

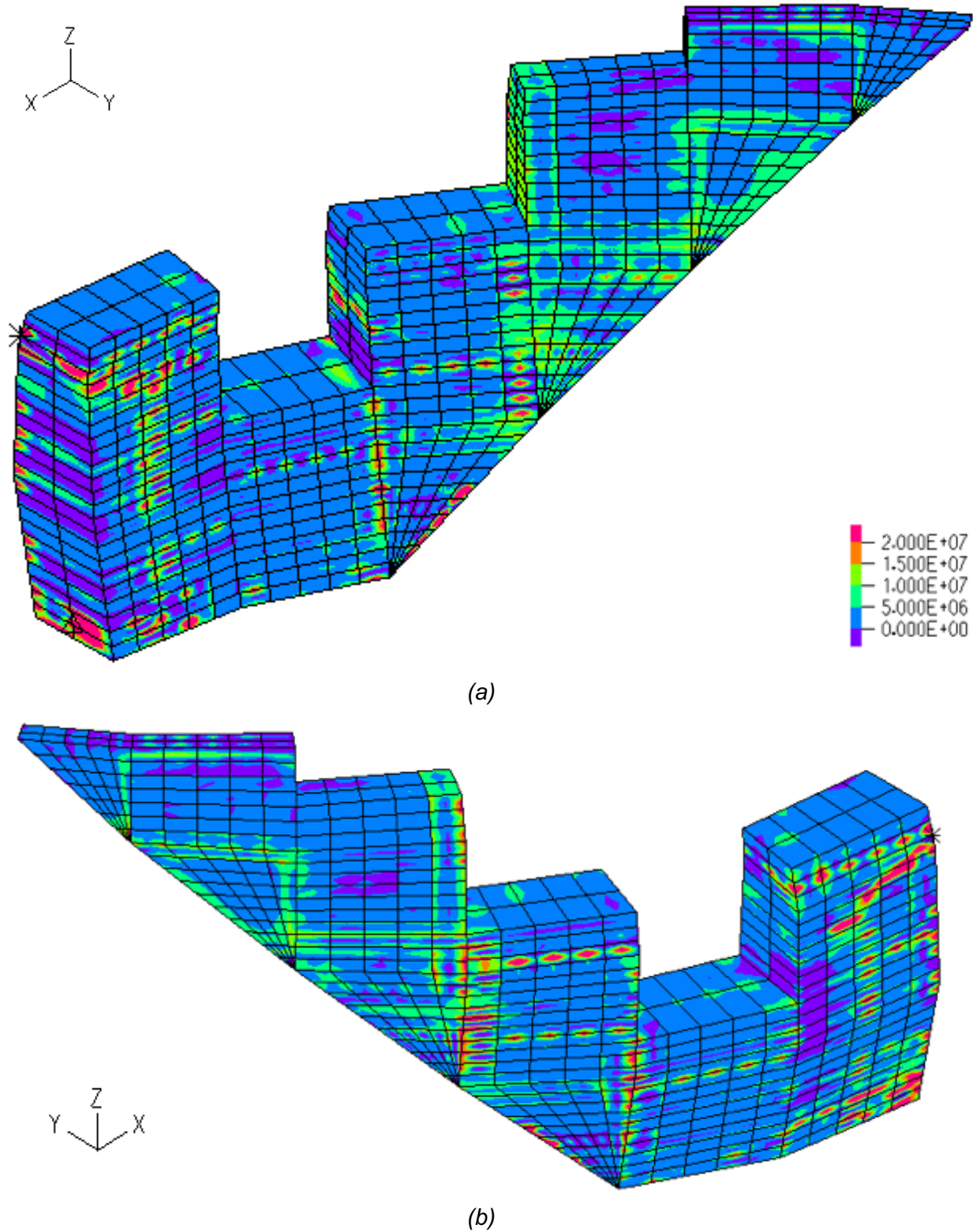
Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 142

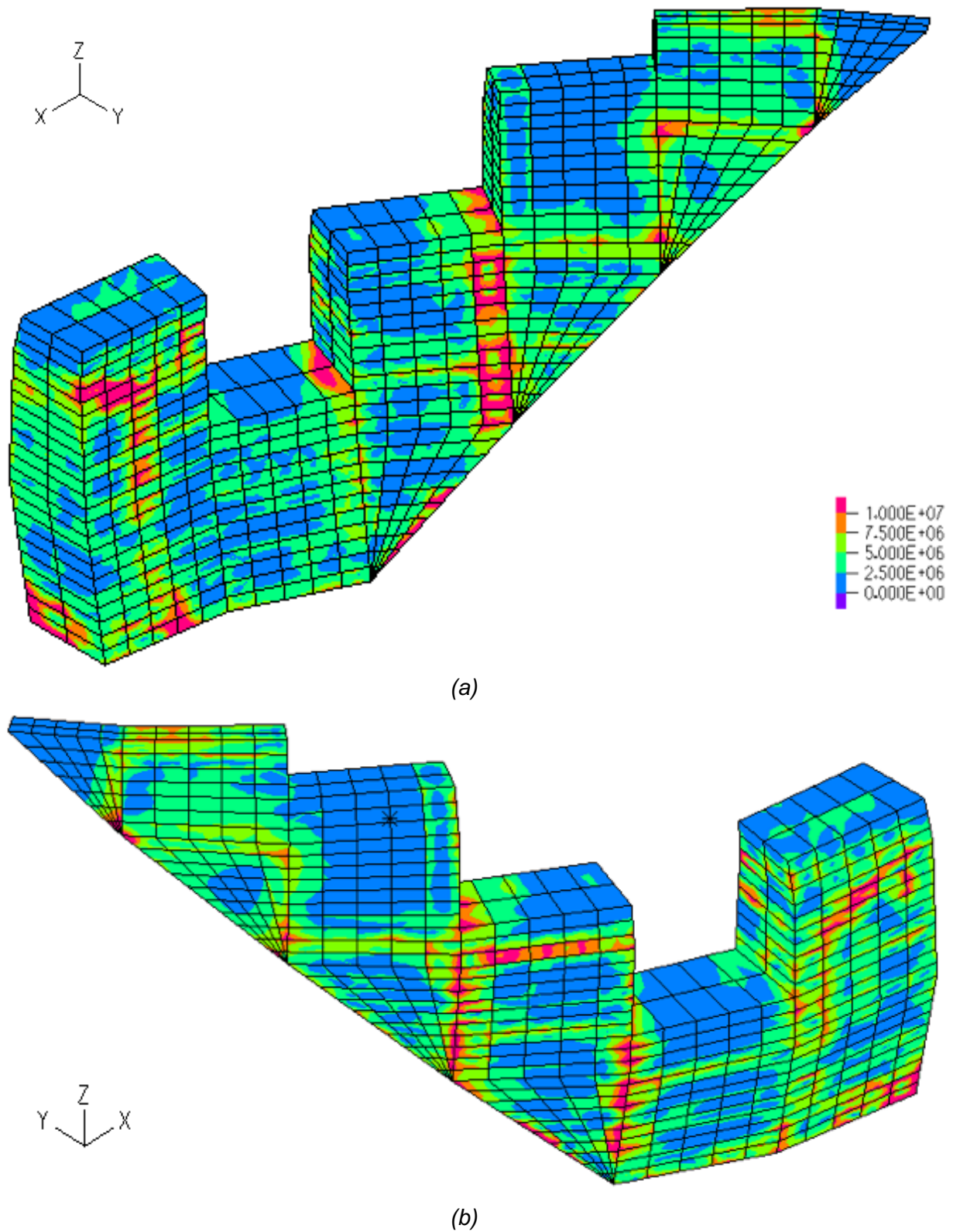
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 143

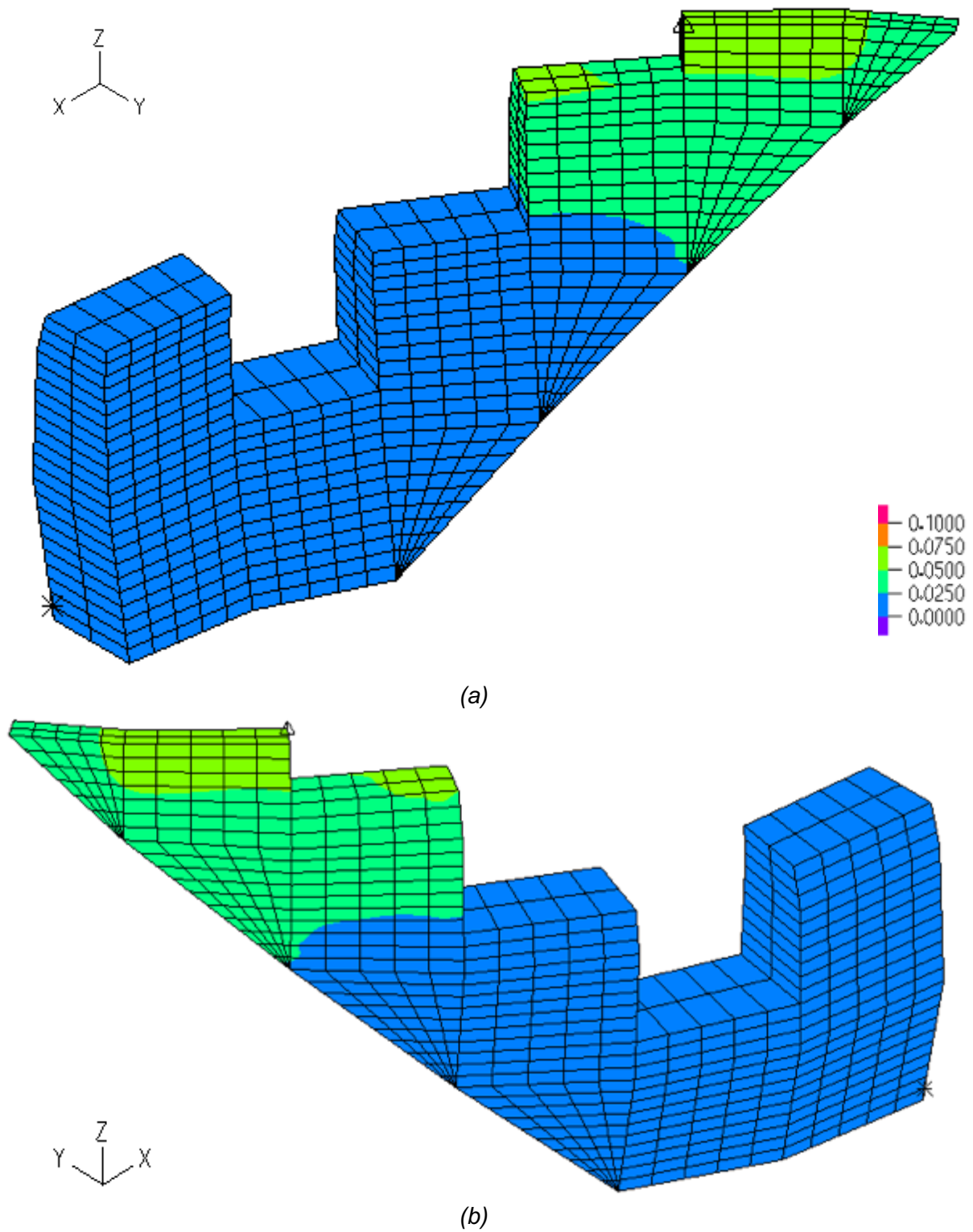
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 144

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 4C: Cemento Tipo I (EE. UU.)

En este sub-caso se aplican las condiciones básicas expuestas en la descripción del caso, excepto que se considera la curva de calor que produciría un cemento del tipo I de origen estadounidense. Este sub-caso considera la temperatura de Chachapoyas, registrada por SENAMHI y mostrada en la sección 4.1, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Además de considerar el proceso constructivo mencionado en la descripción. La curva de calor del cemento se obtuvo de los reportes presentados por Soo (2010).

Las figuras 145a, y 145b muestran la distribución de temperatura 91 días después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas se producen en los extremos de los bloques y superan los 60°C.

Las figuras 146a y 146b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 145. Los valores mínimos están dispersos, pero se pueden identificar concentraciones en los límites de los bloques, alcanzando los 10MPa.

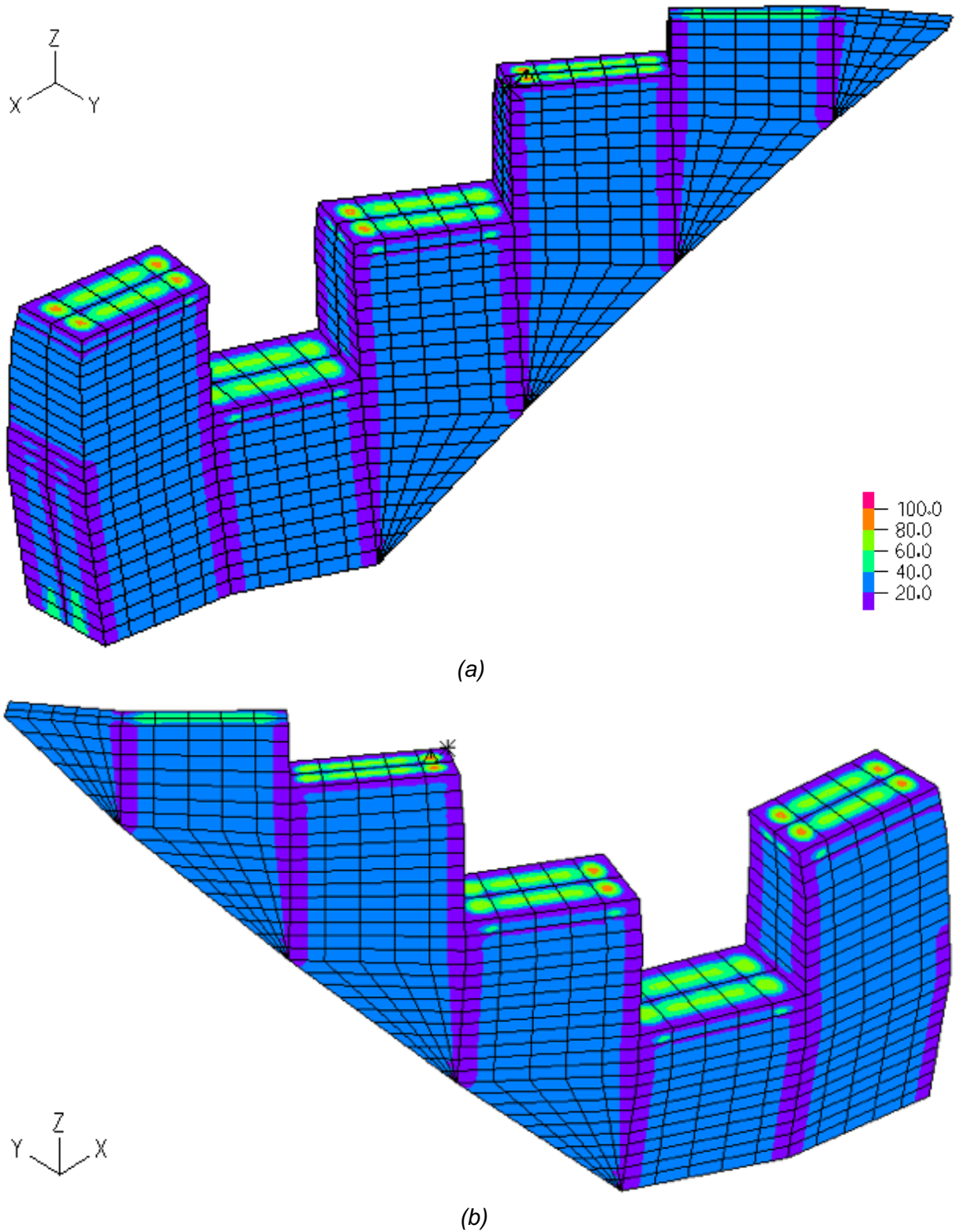
Las figuras 147a y 147b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 145. Los valores máximos están concentrados en los límites de los bloques, especialmente en las esquinas, calculándose temperaturas superiores a los 10MPa.

Las figuras 148a y 148b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 145. Los valores máximos se producen en los límites de los bloques y superan los 5MPa

Las figuras 149a y 149b muestran las magnitudes de los desplazamientos para las temperaturas mostradas en la figura 145. Nótese que los desplazamientos se producen en los bloques con mayor altitud. Los valores máximos se producen en los extremos superiores de la presa, como resultado de la acumulación de deformaciones, y alcanzan los 5cm.

Figura 145

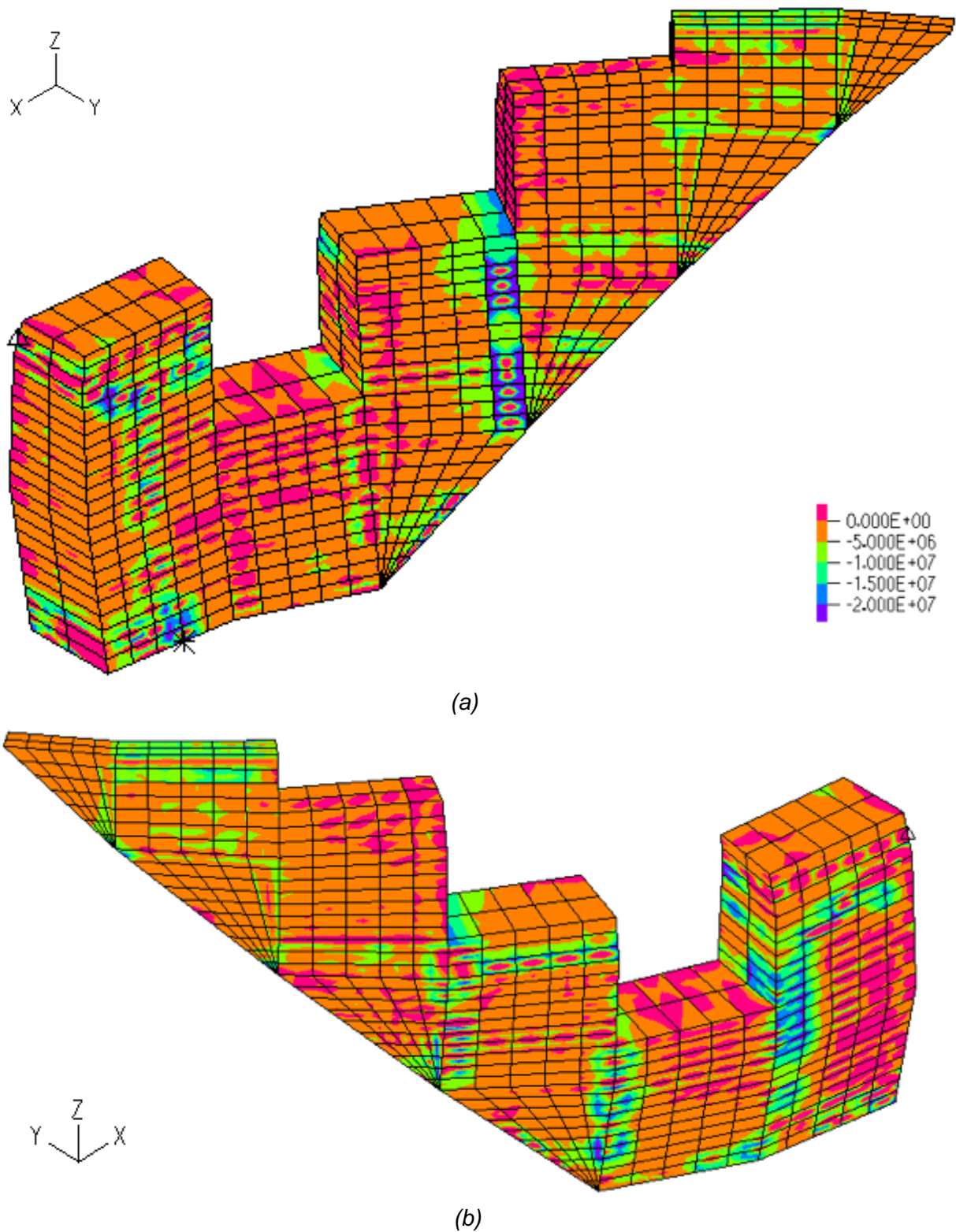
Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 146

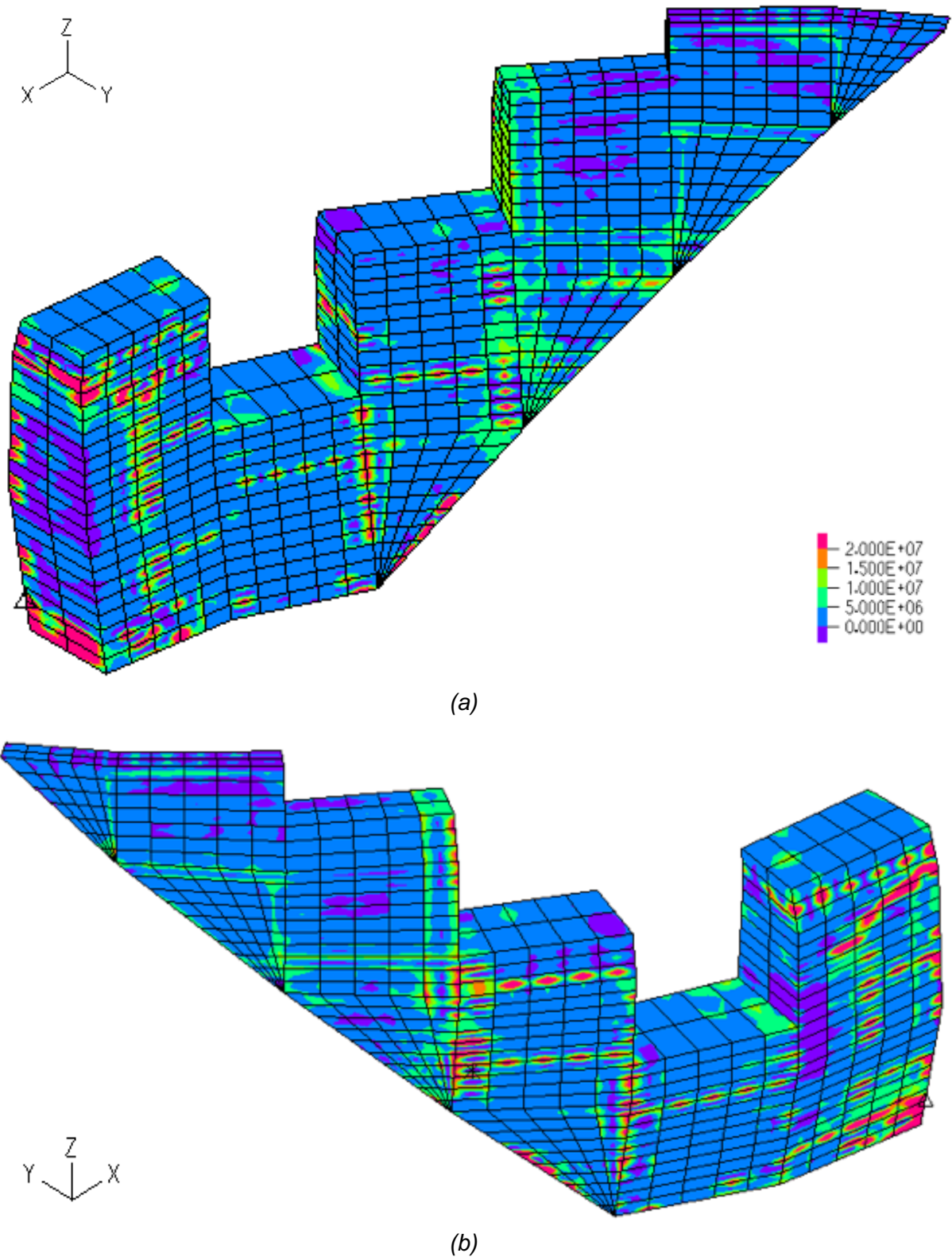
Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 147

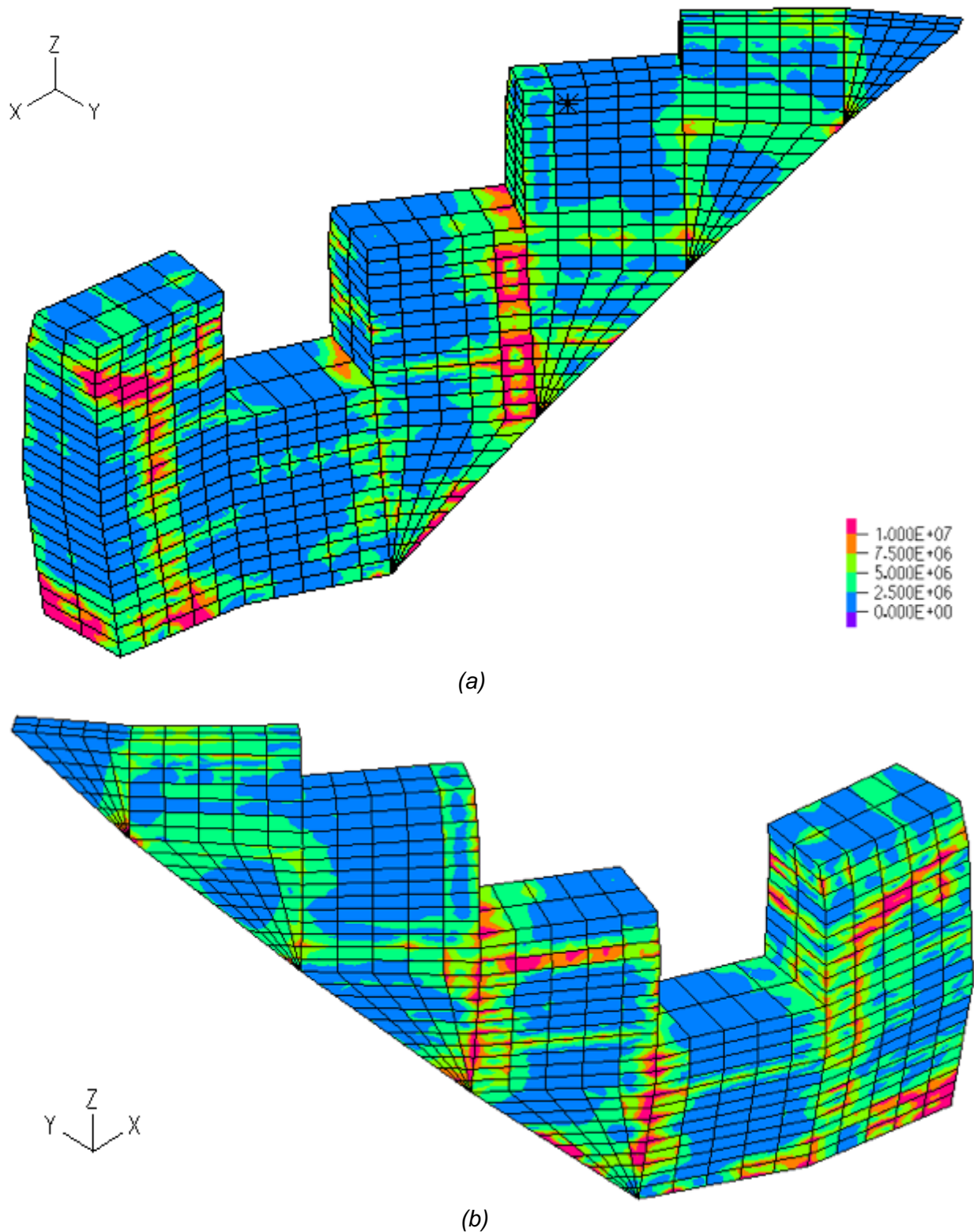
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 148

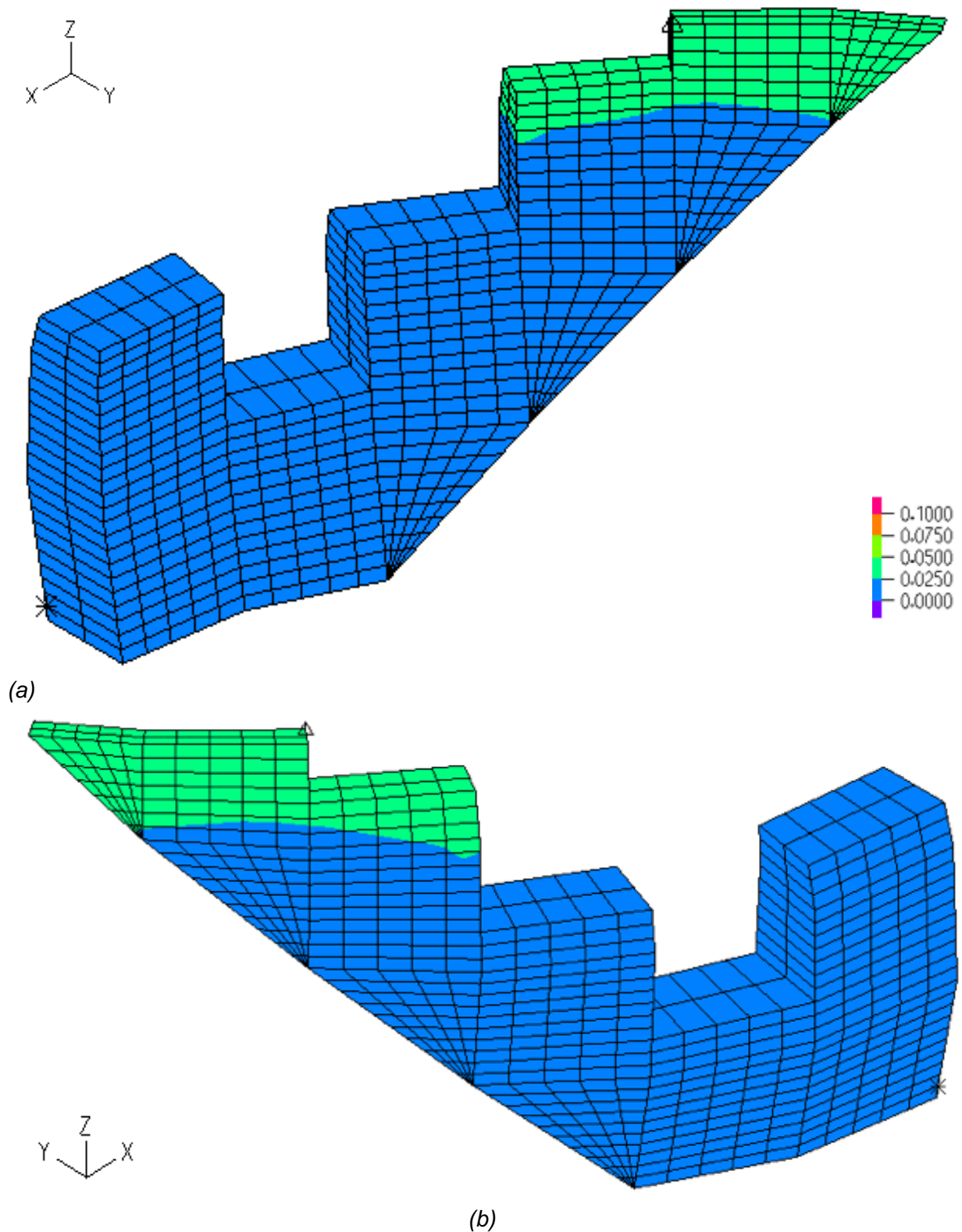
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 149

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 4D: Cemento Tipo I (Corea)

En este sub-caso se aplican las condiciones básicas consideradas para el sub-caso 4A, excepto que se utilizó la curva de calor para un cemento del tipo I de origen coreano, de acuerdo a lo reportado por Soo (2010). Este sub-caso considera la temperatura de Chachapoyas, registrada por SENAMHI y mostrada en la sección 4.1, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Además de considerar el proceso constructivo mencionado en la descripción.

Las figuras 150a, y 150b muestran la distribución de temperatura 91 días después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas se producen en los extremos de los bloques y alcanzan valores cercanos a los 60°C. Los valores son ligeramente más bajos respecto a los mostrados en el sub-caso 4C.

Las figuras 151a y 151b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 150. Los valores mínimos están dispersos, pero se pueden identificar concentraciones en los límites de los bloques, alcanzando los 10MPa.

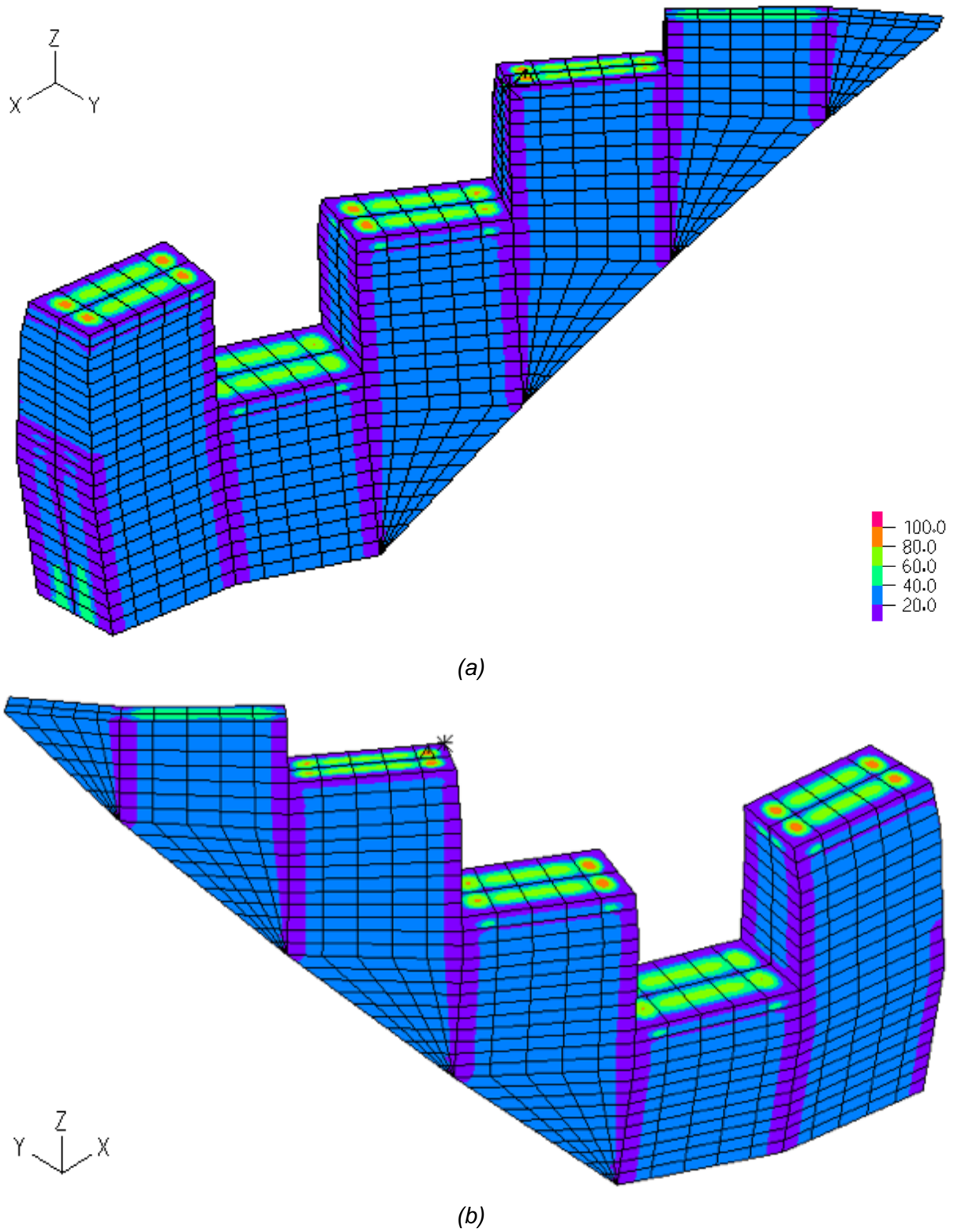
Las figuras 152a y 152b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 150. Los valores máximos están concentrados en los límites de los bloques, especialmente en las esquinas, superando los 10MPa.

Las figuras 153a y 153b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 150. Los valores máximos se producen en los límites de los bloques y sobrepasan los 5MPa.

Las figuras 154a y 154b muestran las magnitudes de los desplazamientos para las temperaturas mostradas en la figura 150. Los valores máximos se producen en los extremos superiores de la presa, como resultado de la acumulación de deformaciones, y alcanzan los 5cm, con valores máximos comparables a los del sub-caso 4C.

Figura 150

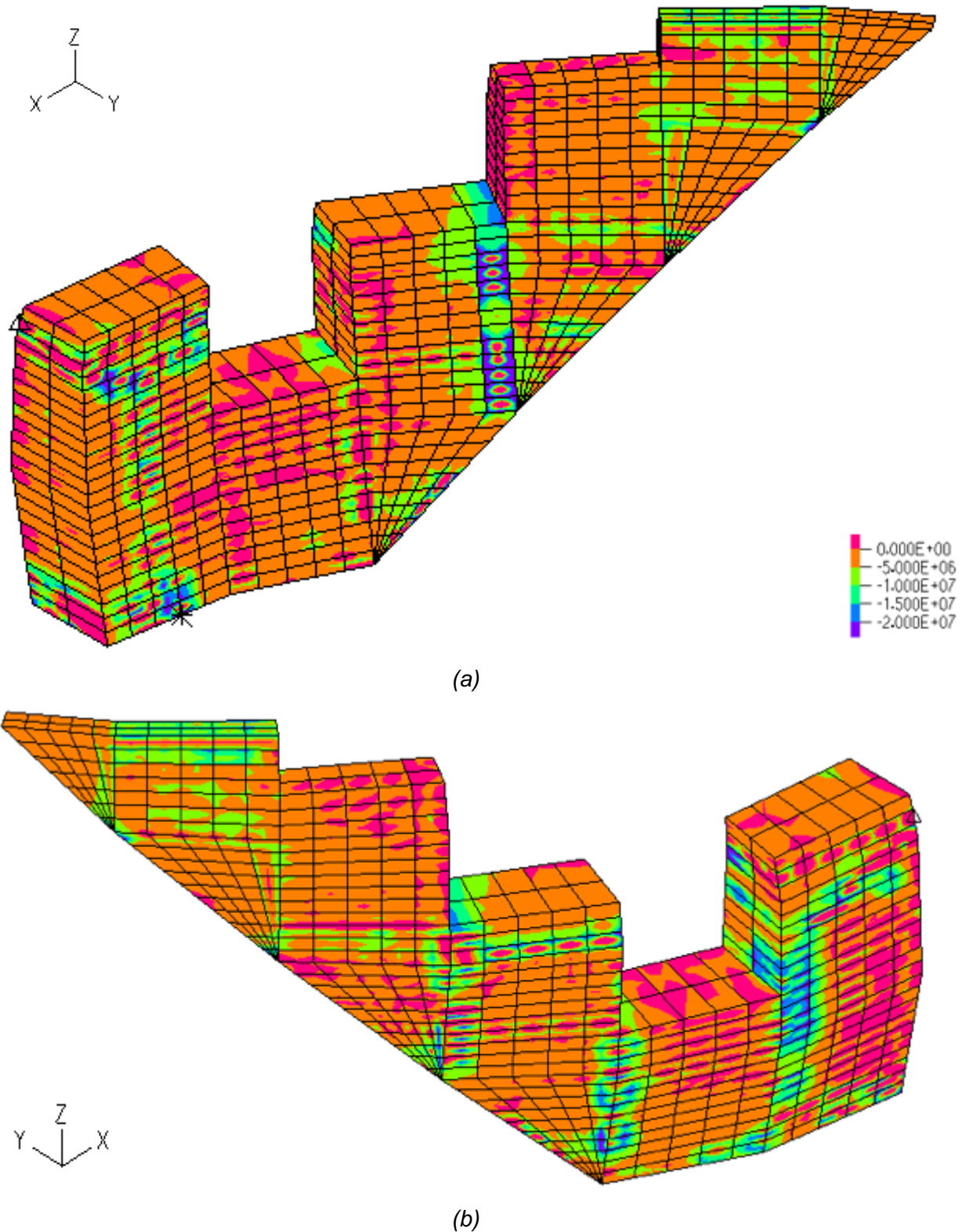
Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 151

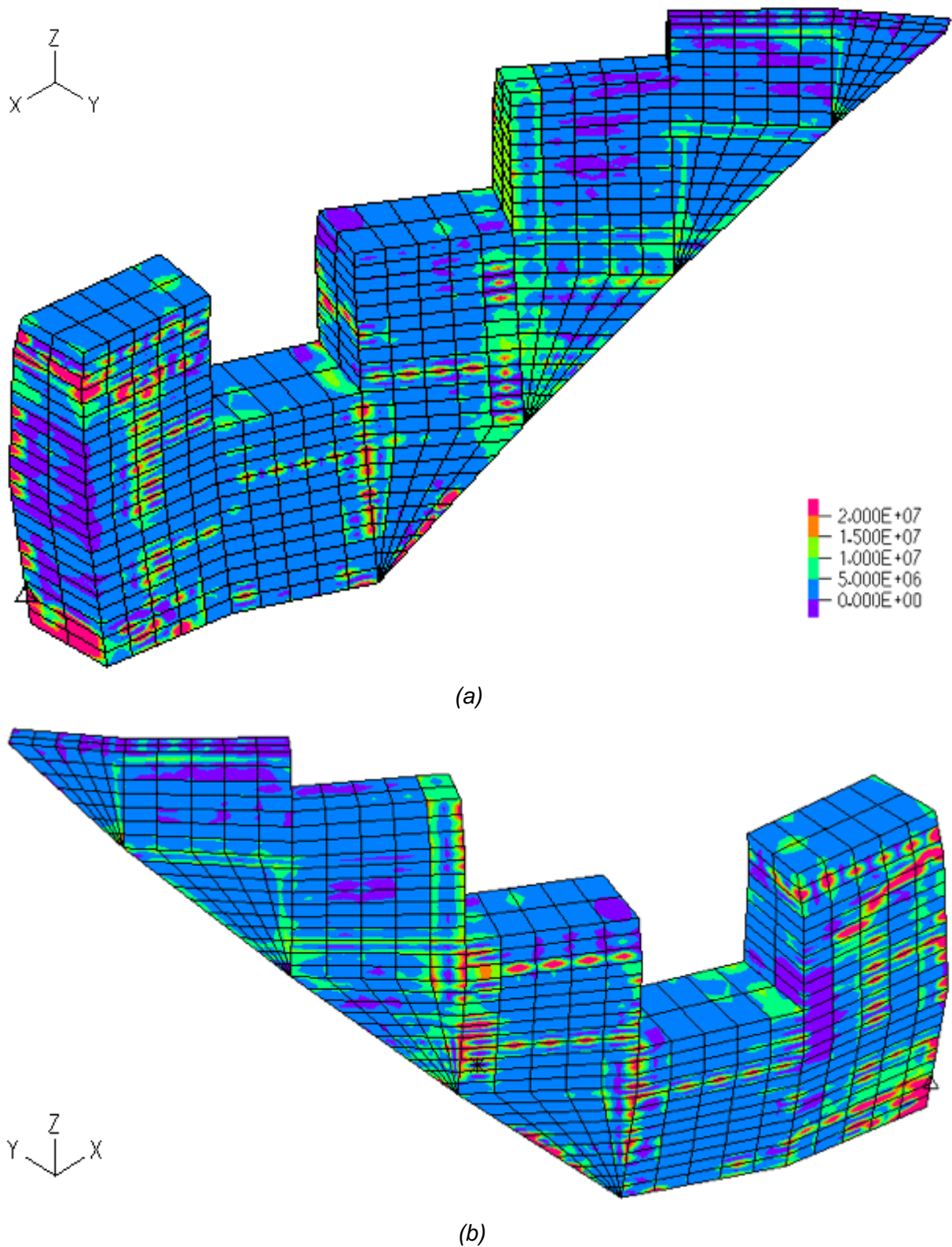
Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 152

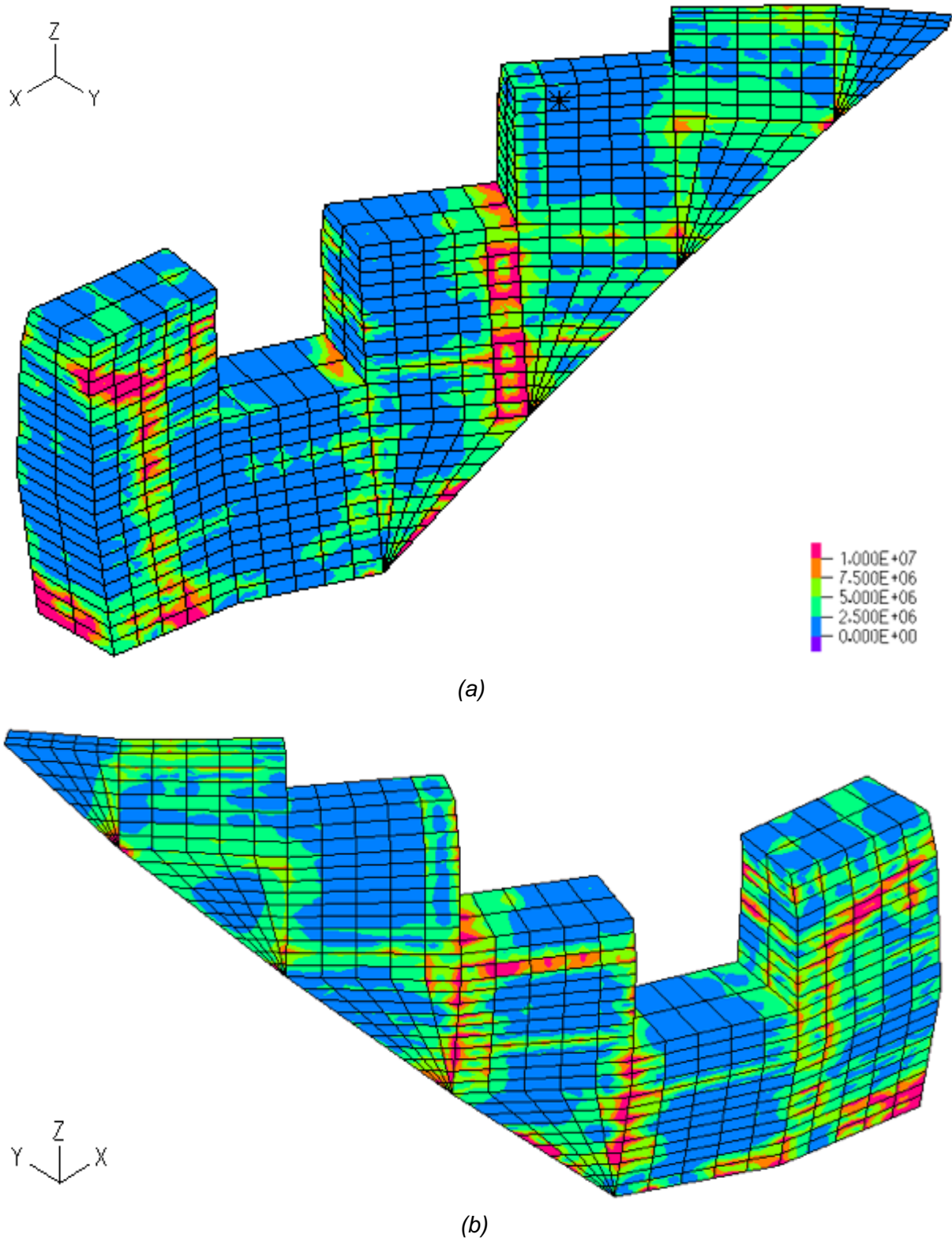
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 153

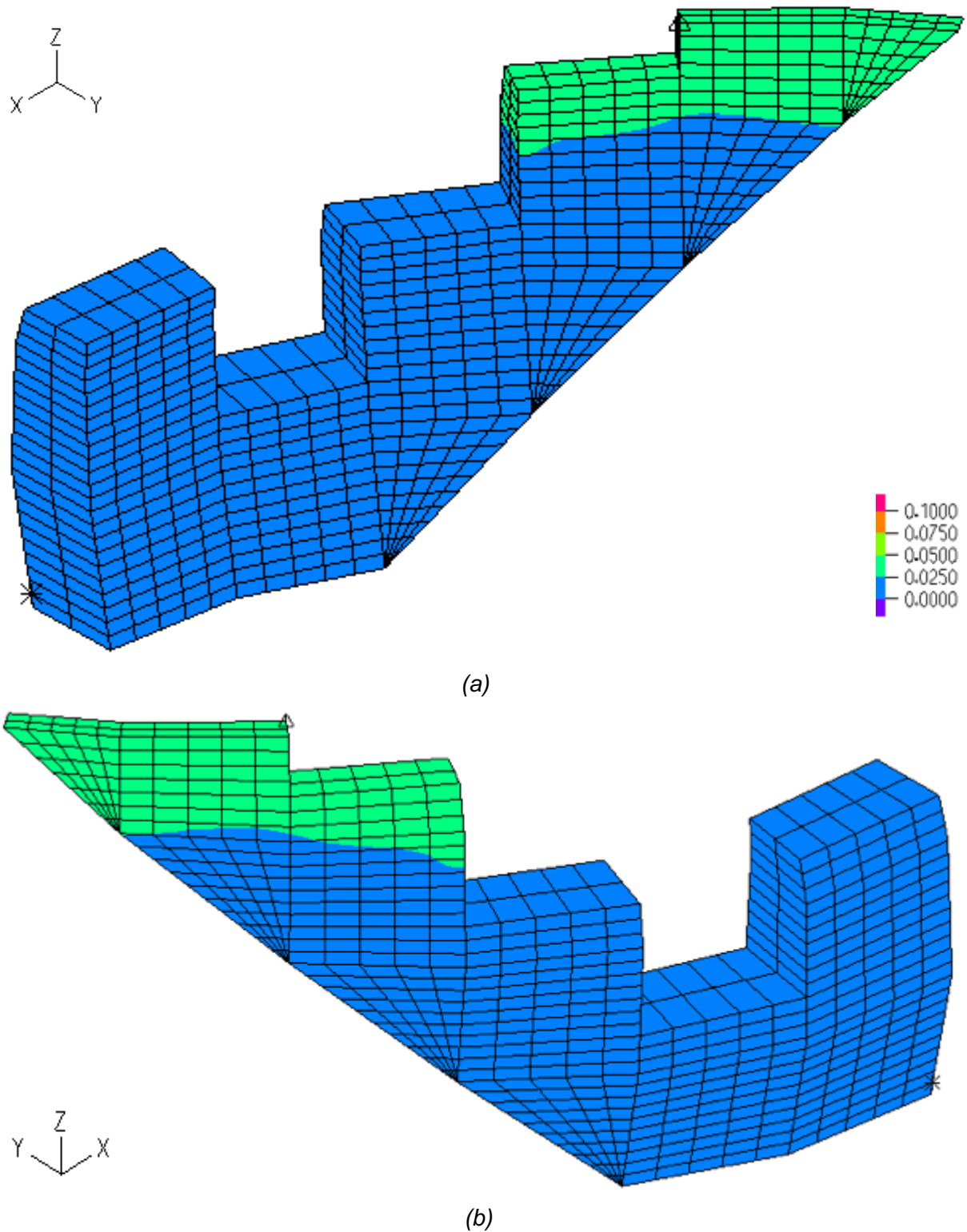
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 154

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Sub-caso 4E: Cemento Tipo IV (Corea)

En este sub-caso se aplican las condiciones consideradas en el sub-caso 4^a, excepto que se consideró una curva de generación de calor para cemento del tipo IV de origen coreano, de acuerdo a lo reportado por Soo (2010). Este sub-caso considera la temperatura de Chachapoyas, registrada por SENAMHI y mostrada en la sección 4.1, y las propiedades térmicas/mecánicas usadas en el problema 25 del Primer de ADINA (2021). Además de considerar el proceso constructivo mencionado en la descripción.

Las figuras 155a, y 155b muestran la distribución de temperatura 91 días (2184 horas) después de iniciado el vaciado. De estas figuras se puede notar que los valores máximos de las temperaturas suelen ocurrir en los extremos de los bloques y alcanzan valores superiores a los 60°C.

Las figuras 156a y 156b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales mínimos (compresiones) para las temperaturas mostradas en la figura 155. Los valores mínimos están dispersos, pero se pueden identificar concentraciones en los límites de los bloques, alcanzándose compresiones superiores a los 10MPa.

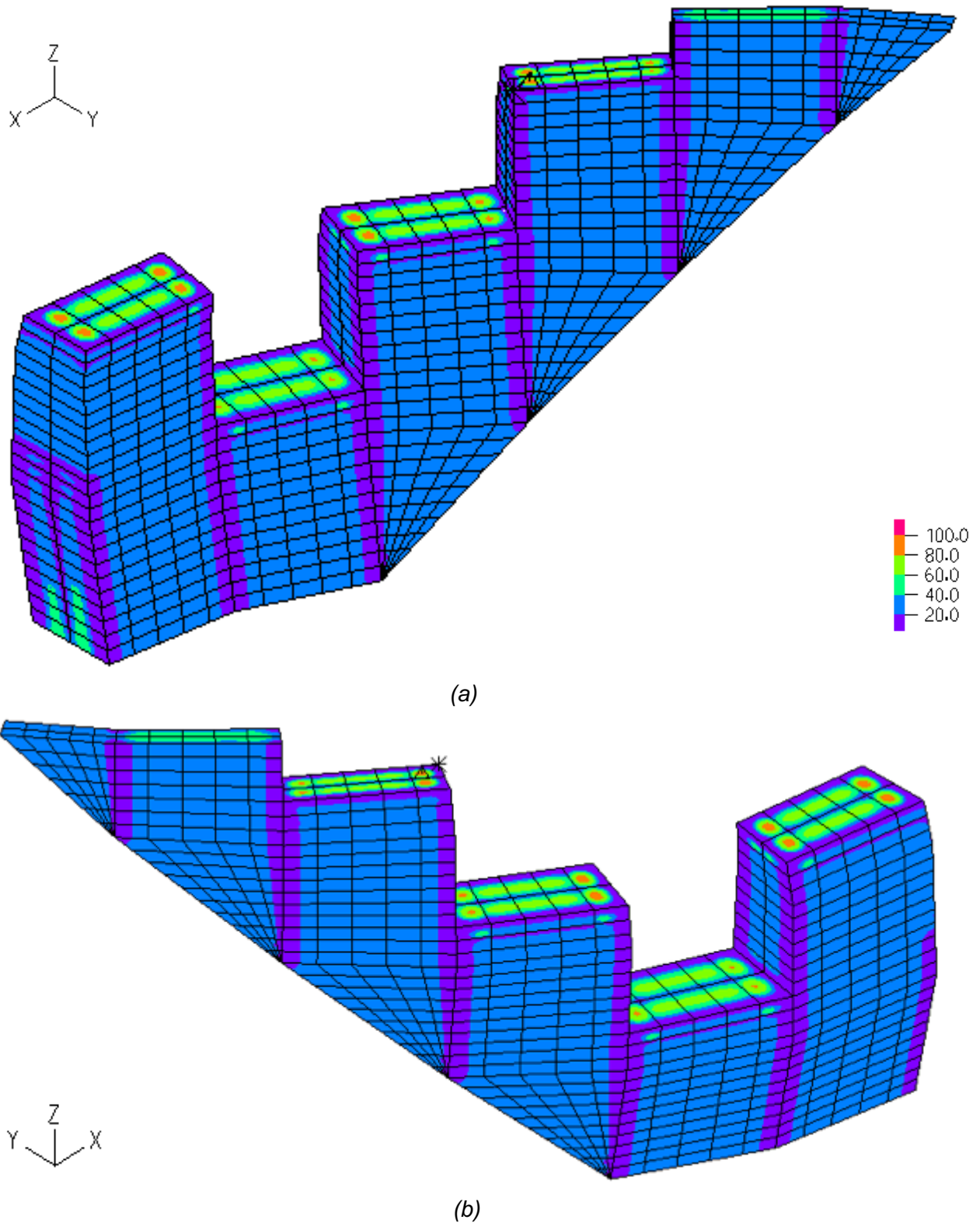
Las figuras 157a y 157b muestran las distribuciones de los esfuerzos principales máximos (tracciones) para las temperaturas mostradas en la figura 155. Los valores máximos están concentrados en los límites de los bloques, especialmente en las esquinas, superándose en estas zonas los 10MPa.

Las figuras 158a y 158b muestran las distribuciones de los esfuerzos de corte máximos para las temperaturas mostradas en la figura 155. Los valores máximos se producen en los límites de los bloques, superándose los 5MPa.

Las figuras 159a y 159b muestran las magnitudes de los desplazamientos para las temperaturas mostradas en la figura 155. Los valores máximos se producen en los extremos superiores de la presa, como resultado de la acumulación de deformaciones, y alcanzan los 5cm.

Figura 155

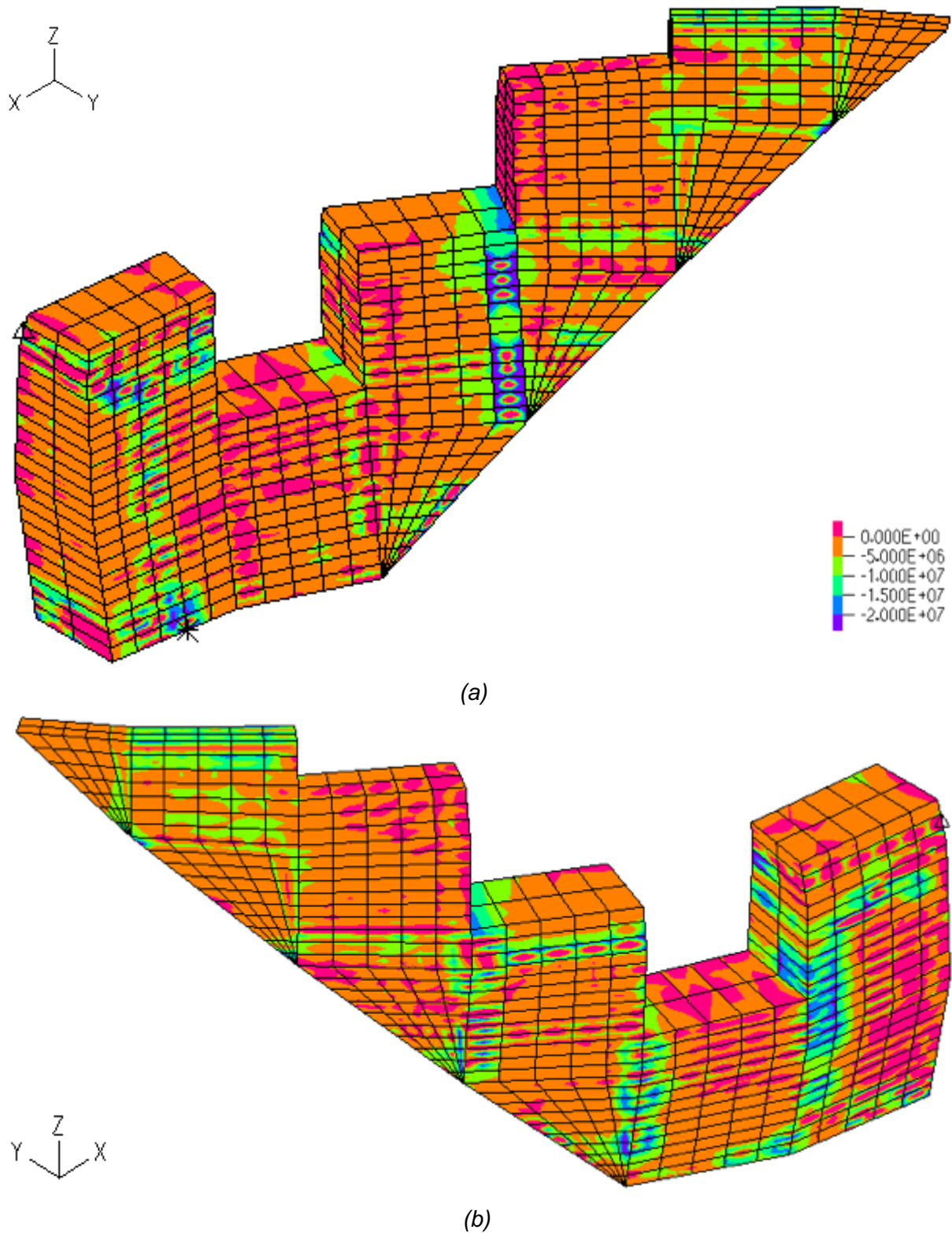
Reporte de temperaturas (Celsius) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 156

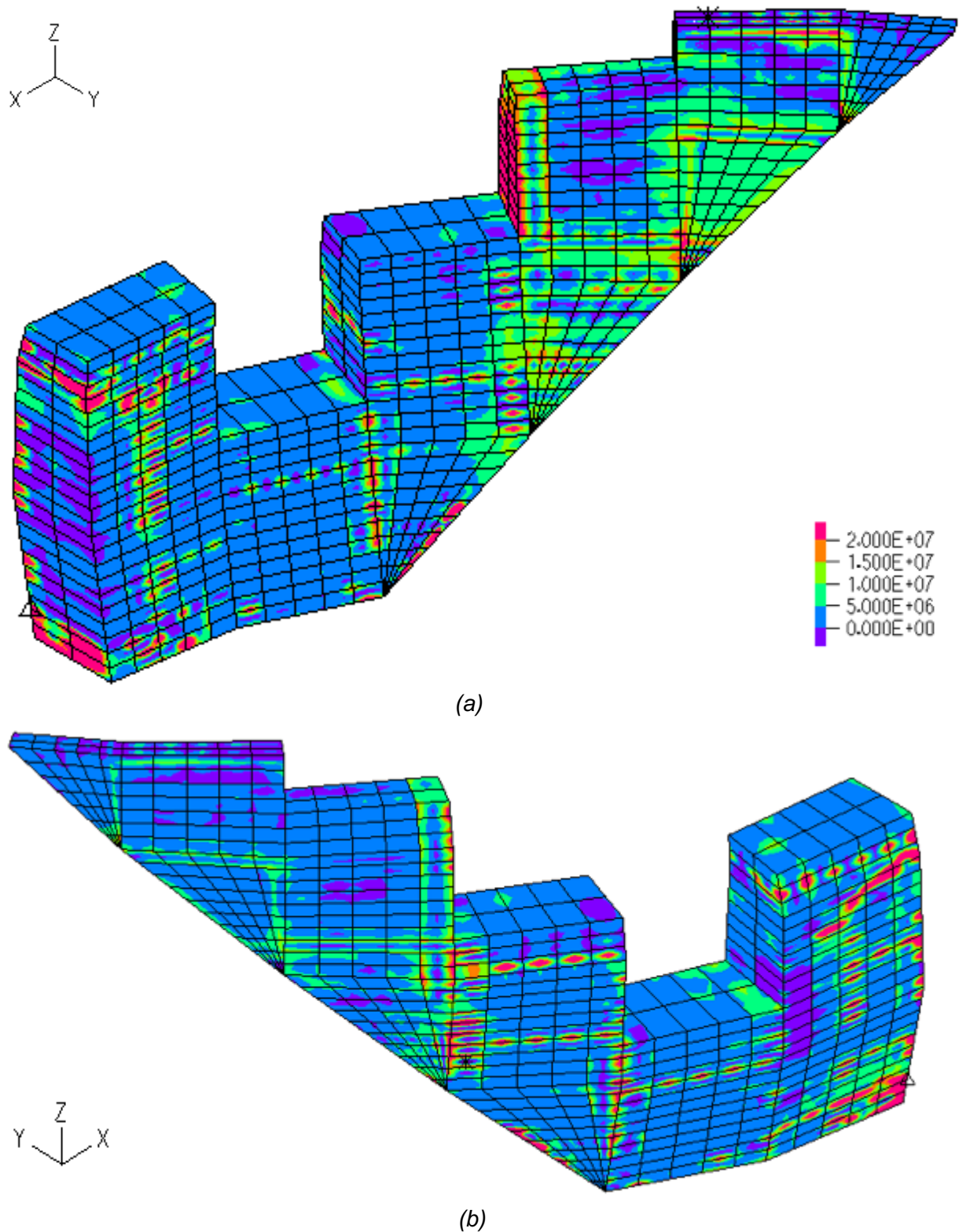
Reporte de esfuerzos principales mínimos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 157

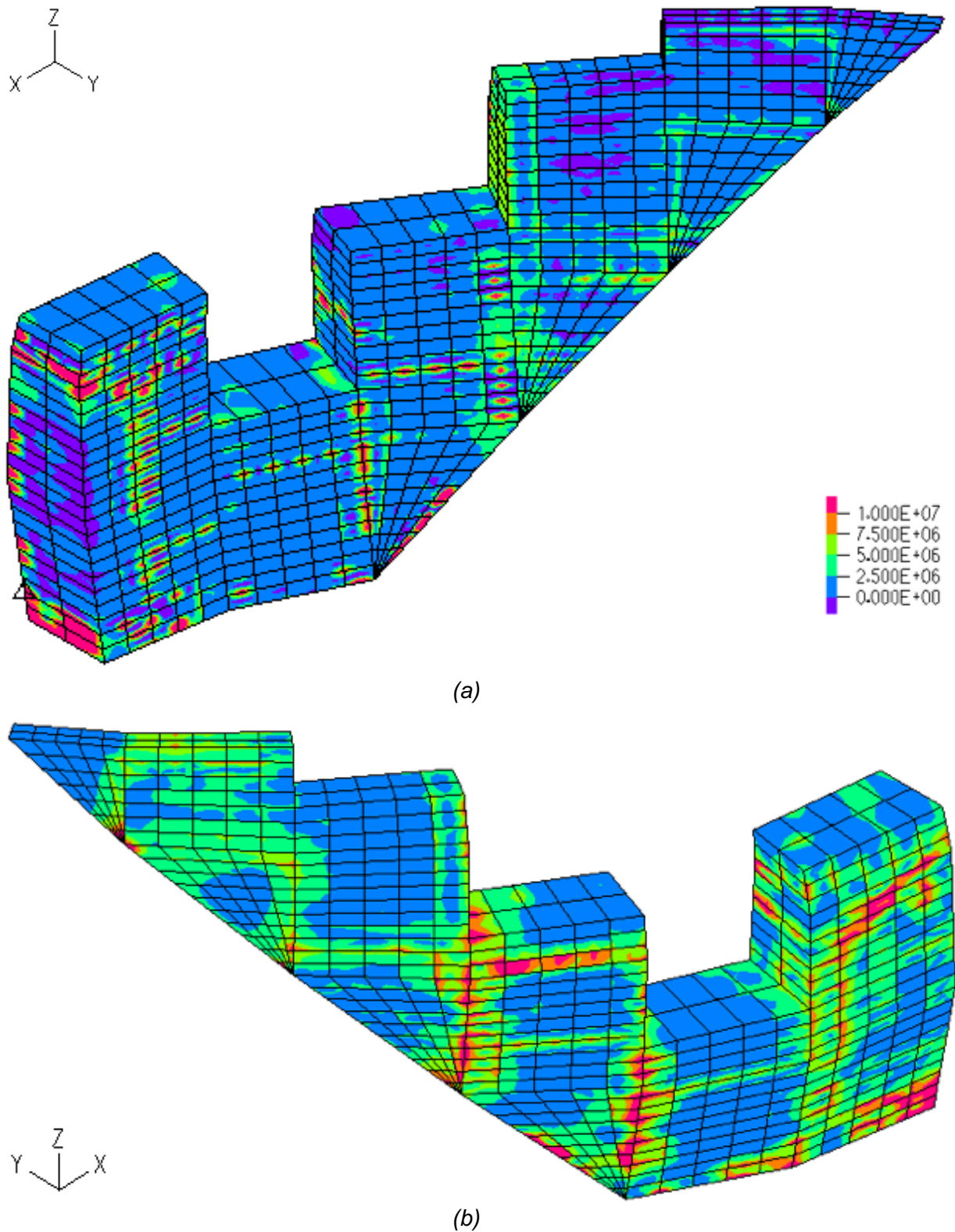
Reporte de esfuerzos principales máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 158

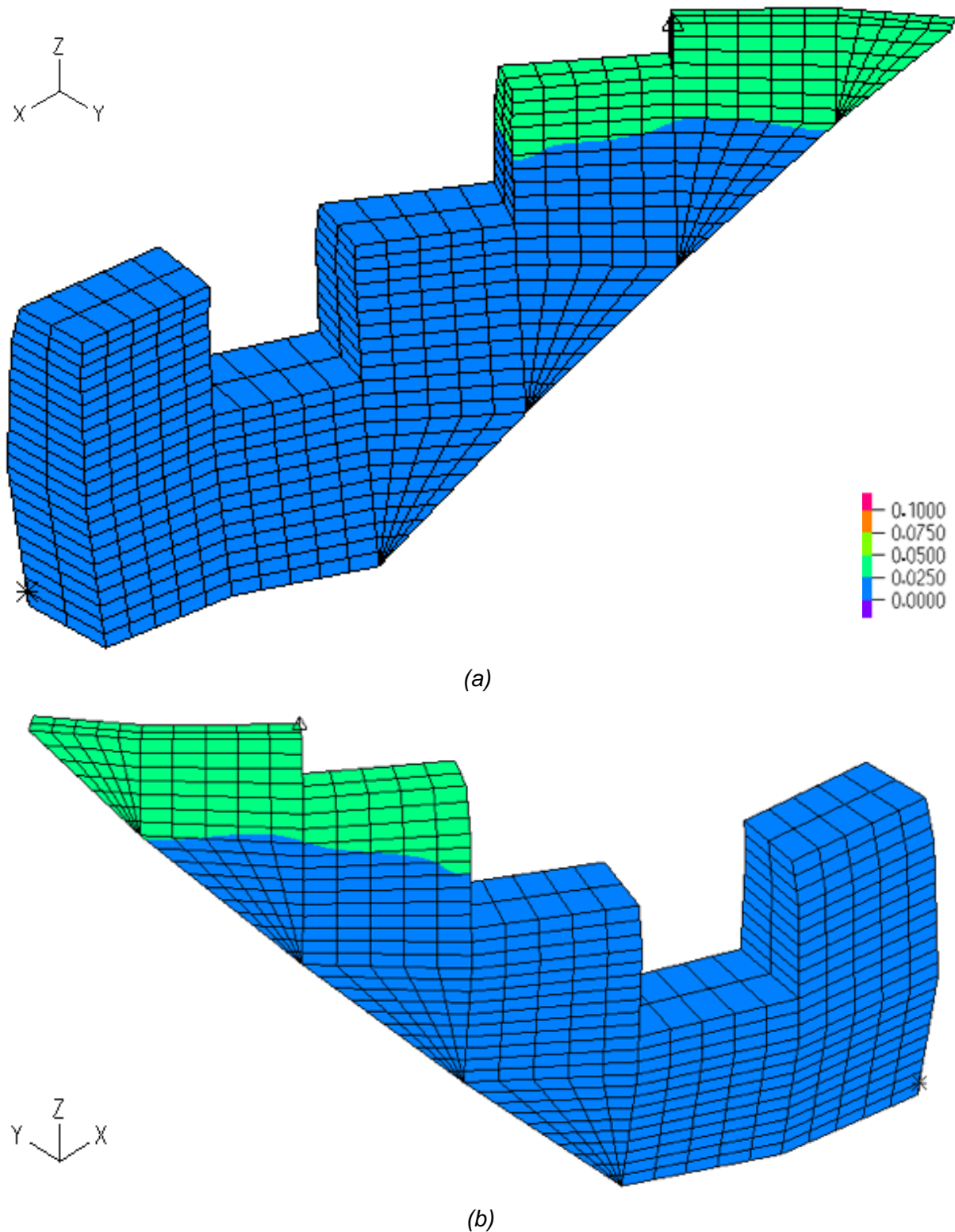
Reporte de esfuerzos cortantes máximos (Pascales) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

Figura 159

Reporte de desplazamientos máximos (metros) a) aguas abajo y b) aguas arriba



Fuente: Reportes creados en ADINA

4.6.4 Análisis de resultados

Temperatura

En el sub-caso 4A, caso original: sin metodologías de enfriamiento, se puede observar que las temperaturas alcanzan los 80°C en una parte importante de cada bloque colocado, aunque en porciones reducidas se registran 100°C o más. Dichas temperaturas permanecen por encima de los 70°C, el rango pernicioso para el concreto, durante algunas semanas. Las metodologías implementadas en los otros sub-casos logran controlar la temperatura y en algunos casos previenen picos superiores a los 70°C.

El enfriamiento del concreto, como se demuestra en el sub-caso 4B (concreto colocado a 5°C) logra reducir las temperaturas significativamente y disminuye los picos hasta 60°C, al menos 20°C respecto al sub-caso 4A. Lo cual resalta la efectividad de esta metodología para lograr el control térmico en este tipo de estructuras.

El uso de cementos alternativos; como se probó en los sub-casos 4C, 4D y 4E; puede reducir las temperaturas. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la selección del tipo adecuado de cemento es importante. Los cementos del tipo I de origen estadounidense o coreano desarrollaron picos muy similares a los logrados con el cemento considerado en el Primer de ADINA (2021), lo que los mantiene en el rango perjudicial. Sin embargo, el cemento del tipo IV es efectivo para el control térmico, ya que mantiene las temperaturas por debajo de los 70°C.

Esfuerzos y desplazamientos

Como se puede apreciar en los sub-casos presentados, reducir la variación térmica logra disminuir los esfuerzos, aunque no de una manera lineal. A fin de evaluar el impacto de los esfuerzos generados, se utilizó la misma referencia de las secciones anteriores.

En todos los sub-casos evaluados el concreto experimenta esfuerzos de compresión superiores a los 20Mpa, aunque usualmente en zonas reducidas. Por lo cual sería necesario implementar metodologías adicionales para el control térmico.

En cuanto a los esfuerzos de tracción y de corte, se experimentan en casi todos los sub-casos valores superiores a los 20MPa y 10 MPa, respectivamente. Por lo tanto, sería necesario controlar mejor el desarrollo de estos esfuerzos.

Por último, el nivel de deformaciones máximo suele ocurrir en los puntos más elevados de la presa, y alcanza 5-10 cm para todos los sub-casos. A pesar de que estos desplazamientos son importantes, es muy razonable que se corrijan como parte del proceso constructivo.

Conclusiones

En este trabajo se han revisado la teoría y los parámetros térmicos que permiten modelar numéricamente el comportamiento del concreto masivo. También se han analizado cuatro casos de aplicación utilizando parámetros generales del concreto, ya que no se dispone de información específica de los materiales locales. Sin embargo, se han tomado en cuenta las condiciones climáticas del país.

- La generación de calor en estructuras de concreto masivo requiere de un análisis térmico detallado, que tome en cuenta la geometría, las características de los materiales, y las condiciones de borde (restricciones de desplazamiento y condiciones ambientales). Frecuentemente, estos análisis permiten una elección eficiente de las metodologías de control térmico. Para tres de los casos estudiados en esta tesis, la temperatura superó los 70°C por lo que podría concluirse que sin el control adecuado dichas estructuras podrían sufrir de aparición de fisuras, reducción de la resistencia o incremento en la porosidad. Gutiérrez (2017) notó visualmente que las losas que alcanzaban temperaturas mayores a los 70°C producían un número de fisuras muy superior a losas similares con temperaturas menores.
- Es importante notar que se debe obtener la curva de generación de calor específica para el concreto a emplearse. La cantidad de calor que liberan los cementos, incluso dentro de la misma tipología, puede diferir significativamente. Por otra parte, a pesar de que el cemento usualmente determina la cantidad de calor a liberarse, el uso de adiciones y/o aditivos también puede impactar en la cantidad de calor generado.
- Las metodologías de control térmico pueden reducir significativamente los picos térmicos al interior de las estructuras. Sin embargo, su eficiencia puede diferir de acuerdo a las características del volumen fabricado y su entorno. Por lo que se puede concluir que la selección de las metodologías de enfriamiento deberá hacerse en base a un análisis de costos que tome en cuenta las tecnologías necesarias y su eficiencia.
- La colocación de concreto enfriado a 5°C tuvo eficiencia notable. En el caso 1 (vaciado en roca) y el caso 4 (presa tipo arco) logró disminuir los picos en alrededor de 20°C. Dicho valor es comparable a la diferencia térmica entre el concreto y el medio ambiente. Sin embargo, debe notarse que una implementación en campo puede ser compleja y costosa. En obra, el enfriamiento del concreto se puede conseguir protegiendo los agregados del sol directo, añadiendo agua al hielo o proporcionando nitrógeno líquido

directamente dentro de los camiones mezcladores. Además de que deberá planearse y monitorearse la ruta hasta el punto de vaciado.

- Las tuberías de enfriamiento son altamente eficientes para controlar la temperatura. Como se pudo notar en el caso 1 (vaciado en roca) y caso 2 (túnel en roca) una correcta elección del espaciamiento es crítica para generar el impacto deseado. En el caso 1, se demostró que un espaciamiento de 2.5m entre tuberías controla el problema de las temperaturas, pero un arreglo a 5m permite el desarrollo de temperaturas por encima de los 100°C. Por otra parte, la conductividad de las tuberías y la temperatura a la que circula el fluido también son importantes.
- El uso de cementos alternativos también demuestra un alto potencial en el control térmico dependiendo de la situación. Los cementos de tipo I analizados, aunque con pequeñas diferencias entre ellos, lograron disminuir los picos térmicos en al menos 15°C respecto al cemento considerado en el Primer de ADINA (2021) para el caso 1 (vaciado en roca) y el caso 3 (losa de cimentación). Aunque en el caso 4 (presa tipo arco) los picos fueron muy similares a la situación original. Por otra parte, el cemento de tipo IV demuestra una eficiencia notoria en el control del calor. Para todos los sub-casos en que dicho cemento fue evaluado la temperatura se mantuvo por debajo de los 70°C, por lo que podría prevenir los efectos perniciosos de la temperatura.
- El proceso constructivo también puede tener un impacto significativo, como se evidencia en el caso 3 (losa de cimentación) y el caso 4 (presa tipo arco). En el caso de la losa el vaciado de capas de concreto espaciadas 1 hora o menos produjo los mismos picos que vaciar la losa a la vez. Mientras que vaciar las capas cada 2 horas redujo los picos en alrededor de 40°C. Por otra parte, en el caso de la presa, es evidente que la selección del proceso constructivo permitió tener picos moderados con acumulaciones de calor en segmentos reducidos de los bloques, que podrían controlarse con tuberías localizadas o con cementos de bajo calor de hidratación.
- También debería notarse que los cálculos se realizaron bajo simplificaciones razonables. Por ejemplo, no se incluye la variación térmica a lo largo del año. Tampoco se consideraron no linealidades del material para los análisis de temperaturas y de esfuerzos. De tener acceso a ese grado de detalle, por ejemplo, el cronograma de ejecución, la calidad de los resultados podría beneficiarse.
- El tipo de elementos finitos y la malla también pueden influir en los resultados, especialmente los picos. Por una parte, un enmallado más fino incrementa la calidad de los resultados al proporcionar una mejor base para la interpolación, pero, por otra

parte, incrementa el tiempo de procesamiento de manera significativa. Algunos sub-casos corrieron por más de 30 minutos en ADINA usando un procesador Intel-Core-i3, y puede muchas veces superar las capacidades del procesador. Por ello es necesario perseguir el balance necesario entre la precisión buscada dentro de las capacidades del entorno de procesamiento.

- Los resultados obtenidos por el MEF son compatibles con los resultados de los ábacos del ACI 207.2R-07. Los valores de temperatura máxima para la losa de cimentación del caso 3 obtenidos por el MEF y por los ábacos, acorde a los cálculos presentados por Gutiérrez (2017), difieren en 2%.
- Por otra parte, el MEF produjo resultados cercanos a los resultados de campo en términos de los valores pico de las temperaturas y su evolución en el tiempo. Las temperaturas recopiladas por Gutiérrez (2017) son alrededor del 3% menores a las calculadas con el MEF, nótese que esta diferencia es de 7% al compararse con los resultados de los ábacos. Además, el número de horas que fueron necesarias para alcanzar el pico térmico en la cimentación difiere en tan sólo 4h, 10%, con el tiempo calculado por el MEF. Gutiérrez (2017) concluyó que había un 80% de diferencia entre el valor de campo y el obtenido mediante ábacos.
- Las conclusiones anteriores se refieren a una estructura de geometría muy simple. Los ábacos del ACI 207.2R-07 consideran aspectos muy importantes, como son las características de los materiales o las condiciones ambientales, pero son muy limitadas en cuanto a la influencia de la geometría, el proceso constructivo y sobre todo algunas de las posibles metodologías de control térmico, entre otros aspectos relevantes.
- En la tesis se ha mostrado la factibilidad de emplear el MEF para estudiar la distribución espacial y la evolución de las temperaturas en estructuras de concreto masivo. Por ejemplo, los resultados del MEF podrían servir para determinar la ubicación y el espaciamiento de las tuberías de enfriamiento, además del tiempo durante el cual debería circular el agua enfriada. Se trata de herramientas que hoy están al alcance de las oficinas de ingeniería. Cabe anotar que en la mayoría de casos presentados en la tesis los modelos fueron procesados en menos de un minuto en una computadora estándar. En el modelo más complejo, la presa de concreto, se requirió un tiempo mucho mayor, pero plenamente justificado por la magnitud de la obra.

Recomendaciones

- Deben estudiarse las curvas de calor para los cementos comerciales en el territorio nacional. Durante el desarrollo de esta tesis no fue posible acceder a registros térmicos de los cementos peruanos. Dicho parámetro es específico de la fabricación de cada cemento y necesario para poder hacer un análisis térmico de los concretos que se pueden fabricar. Por lo cual se recomienda realizar investigaciones para caracterizar térmicamente a los cementos comerciales, o idealmente conseguir que los fabricantes publiquen y actualicen esta información regularmente.
- Se requiere evaluar la influencia de los aditivos en el calor a generarse. Es importante recalcar que la fabricación semiindustrial de concreto está enfocada en la reducción de cemento para abaratar costos, lo que usualmente se logra con aditivos reductores de agua que permiten mantener la relación agua cemento y por tanto la resistencia. Por otra parte, los aditivos aceleradores de fragua podrían tener un impacto en la velocidad con la que el calor se genera.
- Tampoco fue posible acceder a las propiedades conductivas de los materiales de frontera, encofrado o tuberías, por lo que dichos parámetros también deberían investigarse. En esta tesis se utilizaron los valores referenciales provistos por el Primer de ADINA (2010), ya que se notó poca influencia en los resultados.
- Se recomienda la inclusión de guías para la evaluación térmica de bloques masivos de concreto dentro de la norma E060 y por tanto la obligatoriedad de este tipo de análisis cuando sea pertinente para un mejor control de calidad.
- Se recomienda documentar el desarrollo de las temperaturas y aparición de fisuras en proyectos de concreto masivo. Esta información podría contrastarse con resultados de análisis numéricos y contribuir con la calidad de futuros análisis a través de la calibración. Por otra parte, esta información también sería valiosa para caracterizar y tratar las patologías propias del concreto masivo, especialmente del que se fabrica en el territorio nacional.

Referencias bibliográficas

- American Concrete Institute Committee 116 (2000). *Cement and Concrete Terminology*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 122 (2014). *Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 207 (1970). Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures. *ACI Journal Proceedings*, 67 (4), 273-309.
- American Concrete Institute Committee 207 (2007). *Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 207 (2020). *Report on Cooling and Insulating Systems for Mass*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 207 (2021). *Mass Concrete - Guide*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 211 (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 224 (2001). *Control of Cracking in Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute Committee 305 (2020). *Guide to Hot Weather Concreting*. American Concrete Institute.
- Angelucci, M. (2018). Concrete hydration temperatures for the design of crack-width reinforcement in water-retaining structures – Design values versus in-situ values. *MATEC Web of Conferences*, 199, 1-9.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201819911014>
- Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis Inc. (2021). *ADINA Primer*. ADINA R&D.
- Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis Inc. (2021). *ADINA User Interface Command Reference Manual Volume II: Thermal*. ADINA R&D.
- Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis Inc. (2021). *Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA*. ADINA R&D.
- Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis Inc. (2021). *Theory and Modeling Guide Volume II: Thermal*. ADINA R&D.
- Barkanov, E. (2001). *Introduction to the Finite Element Method*. Riga Technical University.

- Bathe, K. (2014). *Finite Element Procedures* (2^a ed.). Klaus-Jurgen Bathe.
https://web.mit.edu/kjb/www/Principal_Publications/FEP_Binder.2nd_Edition_7th_Printing%201-2021.hybrid.pdf
- Candelas, L. (2008). *El concreto masivo* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM.
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/345798>
- Chao, L. & Yang, L. (2017). Optimization of Cooling Pipes Inside Mass Concrete Bridge Pile Cap. *World Conference on Humanities and Social Sciences*, 2, 25-30.
https://webofproceedings.org/proceedings_series/ESSP/WCHSS%202017/WCHSS005.pdf
- Chen, W. (2007). *Plasticity in reinforced concrete* (1^a ed.). J. Ross Publishing.
- Chen, W. y Han, D. (1988). *Plasticity for structural engineers*. Springer-Verag.
- Elkhadiri, I., Elkhadiri, M. & Puertas, F. (2009). Effect of curing temperature on cement hydration. *Ceramics – Silikáty*, 53(2), 65-75.
https://www.irsm.cas.cz/materialy/cs_content/2009/Elkhadiri_CS_2009_0000.pdf
- Gamarra, M. y Gil, L. (2015). *Inventario de Presas en el Perú*. Autoridad Nacional del Agua.
<https://hdl.handle.net/20.500.12543/2424>
- Gutiérrez, H. (2017). *Variación de la temperatura y su influencia en la fisuración en concretos masivos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
<http://hdl.handle.net/20.500.14076/5917>
- Iman, A., Payam S., Zahiruddin H., & Norhayati, M. (2018). Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering*, 20, 81-93.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>
- Japan Society of Civil Engineers (2007). *Standard Specifications for Concrete Structures – 2007 “Materials and construction”*. Japan Society of Civil Engineers.
https://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/JGC16_Standard%20Specifications_Materials%20and%20Construction_1.1.pdf
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.
- Lin, Y. (2015). *Thermal Stress Analysis for Early Age Mass Concrete Members* [Tesis doctoral, West Virginia University]. The research repository WVU.
<https://doi.org/10.33915/etd.6090>

- Ministerio de Economía y Finanzas (2022). Decreto Supremo N° 242-2022-EF, por el que se aprueba el Plan nacional de infraestructura sostenible para la competitividad 2022-2025. Diario Oficial El Peruano del 2 de octubre del 2022.
https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_privada/planes/PNISC_2022_2025_V2.pdf
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2019). *Propuesta de Norma E.060 Concreto Armado*. SENCICO
<https://www.cip.org.pe/publicaciones/2021/enero/portal/e.060-concreto-armado-sencico.pdf>
- Ottazzi, G. (2011). *Diseño en concreto armado*. ACI Perú.
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Labrincha, J. & John, V. (2013). *Eco-efficient concrete*. Woodhead Publishing.
- Research Center of Computational Mechanics (2014). *ASTEA MACS for Windows Ver 8*. Research Center of Computational Mechanics Inc.
- Segerlind, S. (1991). *Applied Finite Element Analysis* (2ª ed.). Wiley.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2021). *Climas del Perú - Mapa de Clasificación Climática Nacional*. SENAMHI
<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>
- Soo, K. (2010). *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement* [Tesis de maestría, Iowa State University]. ISU Digital Repository.
<https://doi.org/10.31274/etd-180810-763>
- Thurston, S. (1978). *Thermal Stresses in Concrete Structures* [Tesis doctoral, University of Canterbury]. University of Canterbury Repository.
<http://hdl.handle.net/10092/11851>
- Thurston, S. , Priestley M., & Cdoke N. (1980). Thermal Analysis of Thick Concrete Sections. *ACI Journal Proceedings*, 77 (5), 347-357.
- United States Army Corps of Engineers (1994). *Arch Dam Design*. USACE Publications
https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/em_1110-2-2201.pdf
- United States Army Corps of Engineers (2024, 1 de marzo). *Dams of the Nation*. National inventory of dams.
<https://nid.sec.usace.army.mil/>
- United States Bureau of Reclamation (2015, 12 de marzo). *The story of Hoover Dam - essays - Concrete*. Bureau of Reclamation.
<https://www.usbr.gov/lc/hooverdam/history/essays/concrete.html>

- Vega, E. (2021, 16 de marzo). Consumo per cápita de cemento en el Perú retrocedió a niveles de hace diez años. *El Comercio*.
<https://elcomercio.pe/economia/peru/consumo-per-capita-de-cemento-en-el-peru-retrocedio-a-niveles-de-hace-diez-anos-sector-construccion-cemento-capeco-ncze-noticia>
- Vela, Y. (2018). *Efectos Hidrodinámicos en Presas De Arco* [Tesis de ingeniero civil, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
<http://hdl.handle.net/20.500.14076/15747>
- Yang, Z., Song, J., Hu, Y., & Lee, K. (2020). Discussion on Temperature Control Method of Cooling Water Pipe for Mass Concrete Construction. *E3S Web of Conferences*, 165, 1-7.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016504037>
- Zienkiewicz, O., Taylor, R. y Zhu, J. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (7ª ed.). Butterworth-Heinemann.

Anexos

ANEXO I. Mapa de Clasificación climática del Perú	1
ANEXO II. Diseño de mezcla y resistencia para varios tipos de presas.....	2

ANEXO I. Mapa de Clasificación climática del Perú



Fuente: SENAMHI (2021)

ANEXO II. Diseño de mezcla y resistencia en presas

Diseños de mezcla usados en presas construidas entre 1936 y 1995

No.	Name of dam (country)	Year completed	Type	Cement		Pozzolan		Sand		Coarse aggregate		Maximum size aggregate, in. (mm)	Water, lb/yd ³ (kg/m ³)	w/cm	Entrained air, %	Density, lb/yd ³ (kg/m ³)	WRA used
				Type	lb/yd ³ (kg/m ³)	Type	lb/yd ³ (kg/m ³)	lb/yd ³ (kg/m ³)	lb/yd ³ (kg/m ³)	Type	lb/yd ³ (kg/m ³)						
1	Hoover (U.S.)	1936	Arch gravity	IV	380 (225)	—	0	931 (552)	2679 (1589)	Limestone and granite	9.0 (225)	220 (130)	0.58	0	155.9 (2498)	No	
2	Norris (U.S.)	1936	Straight gravity	II	338 (200)	—	0	1264 (750)	2508 (1487)	Dolomite	6.0 (150)	227 (135)	0.67	0	156.0 (2499)	No	
3	Bonneville (U.S.)	1938	Gravity	Portland pozzolan	329 (195)	—	0	1094 (649)	2551 (1513)	Basalt	6.0 (150)	251 (149)	0.76	0	156.4 (2505)	No	
4	Bartlett (U.S.)	1939	Multiple arch	IV	466 (276)	—	0	1202 (713)	2269 (1346)	Quartzite and granite	3.0 (75)	270 (160)	0.58	0	154.8 (2480)	No	
5	Grand Coulee (U.S.)	1942	Straight gravity	II and IV	377 (224)	—	0	982 (582)	2568 (1523)	Basalt	6.0 (150)	226 (134)	0.60	0	153.8 (2464)	No	
6	Kentucky (U.S.)	1944	Straight gravity	II	338 (200)	—	0	967 (573)	2614 (1550)	Limestone	6.0 (150)	213 (126)	0.63	0	153.2 (2454)	No	
7	Shasta (U.S.)	1945	Curved gravity	IV	370 (219)	—	0	906 (537)	2721 (1614)	Andesite and slate	6.0 (150)	206 (122)	0.56	0	155.7 (2494)	No	
8	Hungry Horse (U.S.)	1952	Arch gravity	II	188 (111)	Fly ash	90 (53)	842 (499)	2820 (1672)	Sandstone	6.0 (150)	130 (77)	0.47	3.0	150.7 (2415)	No	
9	Detroit (U.S.)	1953	Straight gravity	II and IV	226 (134)	—	0	1000 (593)	2690 (1595)	Diorite	6.0 (150)	191 (113)	0.85	5.5	152.1 (2437)	No	
10	Monticello (U.S.)	1957	Arch	II LA	212 (126)	Calcinated diatomaceous clay	70 (42)	770 (457)	2960 (1756)	Graywacke sandstone quartzite	6.0 (150)	161 (96)	0.57	2.7	154.6 (2477)	No	
11	Flaming Gorge (U.S.)	1962	Arch gravity	II	188 (111)	Calc. shale	94 (56)	729 (432)	2900 (1720)	Limestone and sandstone	6.0 (150)	149 (88)	0.53	3.5	150.4 (2409)	No	
12	Glen Canyon (U.S.)	1963	Arch gravity	II	188 (111)	Pumicite	94 (56)	777 (461)	2784 (1651)	Limestone, chaledonic chert, and sandstone	6.0 (150)	153 (91)	0.54	3.5	148.0 (2371)	No	
		1963	Arch gravity	II	188 (111)	Pumicite	90 (53)	800 (474)	2802 (1662)		6.0 (150)	140 (83)	0.50	3.5	148.9 (2385)	Yes	
13	Yellowtail (U.S.)	1965	Arch gravity	II	197 (117)	Fly ash	85 (50)	890 (526)	2817 (1670)	Limestone and andesite	6.0 (150)	139 (82)	0.49	3.0	152.9 (2449)	No	
14	Morrow Point (U.S.)	1967	Thin arch	II	373 (221)	—	0	634 (376)	2851 (1691)	Andesite, tuff, and basalt	4.5 (114)	156 (93)	0.42	4.3	148.7 (2382)	Yes	
15	Dworshak (U.S.)	1972	Gravity	II	211 (125)	Fly ash	71 (42)	740 (439)	2983 (1770)	Crushed granite gneiss	6.0 (150)	164 (97)	0.59	3.5	154.4 (2473)	No	
16	Libby (U.S.)	1972	Gravity	II	148 (88)	Fly ash	49 (29)	903 (536)	2878 (1708)	Natural quartzite gravel	6.0 (150)	133 (79)	0.68	3.5	152.3 (2439)	No	
17	Lower Granite (U.S.)	1973	Gravity	II	145 (86)	Milled volcanic cinders	49 (29)	769 (456)	3096 (1837)	Natural basaltic gravel	6.0 (150)	138 (82)	0.71	3.5	155.4 (2490)	Yes	
18	Pueblo (U.S.)	1974	Buttress	II LA	226 (134)	—	75 (44)	952 (565)	2589 (1535)	Granite, shist, limestone, dolomite	3.5 (89)	168 (100)	0.56	3.5	148.5 (2379)	Yes	
19	Crystal (U.S.)	1976	Thin arch	II LA	390 (231)	—	0	829 (492)	2740 (1625)	Shist, altered volcanics	3.0 (75)	183 (109)	0.47	3.5	153.4 (2457)	Yes	
20	Richard B. Russell (U.S.)	1982	Gravity	II	226 (134)	Fly ash	59 (35)	822 (488)	2958 (1755)	Crushed granite	6.0 (150)	173 (103)	0.57	3.4	157.0 (2515)	Yes	
				II	173 (103)	Fly ash	73 (43)	864 (513)	2935 (1741)	Crushed granite	6.0 (150)	177 (105)	0.67	3.4	156.0 (2499)	Yes	
21	Rosens (Switzerland)	1948	Arch	I	421 (250)	—	0	—	—	Limestone	3.1 (79)	225 (133)	0.53	0	—	No	
22	Pieve di Cadore (Italy)	1949	Arch gravity	Ferric-pozzolanic	253 (150)	Natural	84 (50)	1180 (700)	2089 (1239)	Limestone	4.7 (120)	213 (126)	0.63	2.0	159.9 (2560)	Yes	
23	Francisco Madero (Mexico)	1949	Round-head buttress	IV	372 (221)	—	0	893 (530)	2381 (1412)	Rhyolite and basalt	6.0 (150)	223 (132)	0.60	—	—	—	
24	Chastang (France)	1951	Arch gravity	250/315	379 (225)	—	0	759 (450)	2765 (1640)	Granite	9.8 (250)	169 (100)	0.45	—	150.8 (2415)	—	
25	Salmonde (Portugal)	1953	Thin arch	II	421 (250)	—	0	739 (438)	2621 (1554)	Granite	7.9 (200)	225 (133)	0.54	0	148.4 (2376)	—	
26	Warragamba (Australia)	1960	Straight gravity	II	330 (196)	—	0	848 (503)	2845 (1687)	Porphyry and granite	6.0 (150)	175 (104)	0.53	0	154.2 (2469)	No	
27	Krasnoarsk (U.S.S.R.)	About 1970	Straight gravity	IV and portland blast furnace	388 (230)	—	0	—	—	Granite	3.9 (100)	213 (126)	0.55	—	—	Yes	
28	Ilha Solteira (Brazil)	1974	Gravity	II	138 (82)	Calcinated clay	46 (27)	788 (468)	3190 (1893)	Quartzite gravel, crushed basalt	6.0 (150)	138 (82)	0.75	3.5	159.3 (2552)	No	
29	Itaipu (Brazil-Paraguay)	1982	Hollow gravity buttress	II	182 (108)	Fly ash	22 (13)	981 (582)	3096 (1837)	Crushed basalt	6.0 (150)	143 (85) 170 (101)	0.70	4.0	158.4 (2537)	No	
30	Peace Site 1 (Canada)	1979	Gravity	I	158 (94)	Fly ash	105 (63)	967 (575)	2610 (1549)	Quartzite limestone sandstone	3 (75)	144 (85)	0.67	3.6	148.5 (2379)	Yes	
31	Theodore Roosevelt modification (U.S.)	1995	Arch gravity	II LA	216 (128)	Fly ash	54 (32)	954 (566)	2672 (1585)	Granite	4.0 (100)	144 (85)	0.53	4.0	149.7 (2397)	Yes	

*Pounds mass.

Fuente: Tomado de ACI 207.1R-05

Razón agua / cemento versus resistencia nominal del concreto para varias presas

Dam	Country	Cement or cement-pozzolan, lb/yd ³ (kg/m ³)	Water, lb/yd ³ (kg/m ³)	Predominant aggregate type	Maximum size aggregate, in. (mm)	w/cm	90-day strength, psi (MPa)	Cement efficiency at 90 days, psi/lb/yd ³ (MPa/kg/m ³)
La Palisse	France	506 (300)	250 (148)	Granite	4.7 (120)	0.49	4790 (33.0)	9.5 (0.111)
Chastang	France	379 (225)	169 (100)	Granite	9.8 (250)	0.45	3770 (26.0)	9.9 (0.115)
L'Aigle	France	379 (225)	211 (125)	Granite	9.8 (250)	0.56	3200 (22.1)	8.4 (0.098)
Pieve di Cadore	Italy	337 (200)	213 (126)	Dolomite	4.0 (100)	0.63	6400 (44.1)	19.0 (0.220)
Forte Baso	Italy	404 (240)	238 (141)	Pophyry	3.9 (98)	0.59	4920 (33.9)	12.2 (0.141)
Cabrilo	Portugal	370 (220)	195 (116)	Granite	5.9 (150)	0.53	4150 (28.6)	11.2 (0.130)
Salamonde	Portugal	420 (249)	225 (133)	Granite	7.9 (200)	0.54	4250 (29.3)	10.1 (0.118)
Castelo Bode	Portugal	370 (220)	180 (107)	Quartzite	7.9 (200)	0.49	3800 (26.2)	10.3 (0.119)
Rossens	Switzerland	420 (249)	225 (133)	Glacial mixture	2.5 (64)	0.54	5990 (41.3)	14.3 (0.166)
Mauvoisin	Switzerland	319 (189)	162 (96)	Gneiss	3.8 (96)	0.51	4960 (34.2)	15.5 (0.181)
Zervreila	Switzerland	336 (199)	212 (126)	Gneiss	3.8 (96)	0.63	3850 (26.5)	10.5 (0.133)
Hungry Horse	U.S.	188-90 (111-53)	130 (77)	Sandstone	6.0 (150)	0.47	3100 (21.4)	11.2 (0.130)
Glen Canyon	U.S.	118-94 (111-56)	153 (99)	Limestone	6.0 (150)	0.54	3810 (26.3)	13.5 (0.160)
Lower Granite	U.S.	145-49 (86-29)	138 (82)	Basalt	6.0 (150)	0.71	2070 (14.3)	10.7 (0.124)
Libby	U.S.	148-49 (88-29)	133 (79)	Quartzite	6.0 (150)	0.68	2460 (17.0)	12.5 (0.145)
Dworshak	U.S.	211-71 (125-42)	164 (97)	Granite	6.0 (150)	0.58	3050 (21.0)	10.8 (0.126)
Dworshak	U.S.	198-67 (117-40)	164 (97)	Gneiss	6.0 (150)	0.62	2530 (17.4)	9.5 (0.111)
Dworshak	U.S.	168-72 (100-43)	166 (98)	Gneiss	6.0 (150)	0.69	2030 (14.0)	8.5 (0.098)
Dworshak	U.S.	174-46 (130-27)	165 (98)	Gneiss	6.0 (150)	0.75	1920 (13.2)	8.7 (0.084)
Pueblo	U.S.	226-75 (134-44)	168 (100)	Granite, limestone, dolomite	3.5 (89)	0.56	3000* (20.7)	10.0 (0.116)
Crystal	U.S.	390 (231)	183 (109)	Shist and altered volcanics	3.0 (75)	0.47	4000† (27.6)	10.3 (0.119)
Flaming Gorge	U.S.	188-94 (111-56)	149 (88)	Limestone and sandstone	6.0 (150)	0.53	3500 (24.1)	12.4 (0.144)
Krasnoyarsk	U.S.S.R.	388 (230)	213 (126)	Granite	3.9 (100)	0.55	3280 (22.6)	8.5 (0.098)
Ilha Solteira	Brazil	138-46 (82-27)	132 (82)	Quartzite gravel, crushed basalt	6.0 (150)	0.75	3045 (21.0)	16.5 (0.193)
Itaipu	Brazil	182-22 (108-13)	143 (85)	Crushed basalt	6.0 (150)	0.70	2610 (18.0)	12.8 (0.149)
Theodore Roosevelt modification	U.S.	270 (160)	144 (85)	Granite	4.0 (100)	0.53	4500 (31.0)	16.7 (0.194)

*Strength at 80 days.

†Strength at 1 year.

Fuente: Tomado de ACI 207.1R-05