



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

CONTROL DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA EN HORMIGONES MASIVOS  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

LUIS FELIPE TAPIA QUEZADA

PROFESORA GUÍA:  
CARMEN PAZ MUÑOZ EFFA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MILENKO OGAZ CARRASCO  
FEDERICO DELFIN ARIZTIA

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: LUIS FELIPE TAPIA QUEZADA  
FECHA: 05/2019  
PROF. GUÍA: CARMEN PAZ MUÑOZ EFFA

## CONTROL DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA EN HORMIGONES MASIVOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ

La base de este trabajo está en analizar la validez del método de madurez como herramienta de control del gradiente de temperatura en estructuras masivas de hormigón, lo cual se puede corroborar utilizando la curva de resistencia, que es producto de su interacción entre las temperaturas registradas a lo largo del tiempo. El estudio cuenta con datos provenientes de proyectos reales (edificio Padre Hurtado, Región Metropolitana y edificio Infinity, Región de Valparaíso), donde el cálculo del índice de madurez está predefinido por los sensores SmartRock, y que se adecuan a los coeficientes calibrados correspondientemente a la obra para estimación de resistencia. Ambos proyectos son de carácter habitacional, y fueron monitoreados en época de verano, específicamente, entre diciembre y marzo.

Dentro del desarrollo de este informe, se trabajó en post de verificar las posibles relaciones observables y cuantificables en cuanto al desarrollo de la resistencia, de manera comparativa, entre aquellos proyectos que sufrieron problemas de gradiente de temperatura mayores a 20 [°C], con aquellos que no. Con esto, se podrá buscar una tendencia en el comportamiento de las mediciones, agregando también, el factor de temperatura de colocación y de ambiente y su efecto sobre el desarrollo de las resistencias.

Para esto, se definieron conceptos claves como hormigón masivo, método de madurez, control de gradientes de temperatura y sus patologías dentro de las estructuras de concreto masivo, bajo normativas nacionales.

El estudio se dividió en dos partes: Análisis de curvas de resistencias y su efecto en el desarrollo de gradientes de temperatura a edades tempranas, para superficie y núcleo por separado, y, con el fin de considerar la unidad completa en análisis, se desarrolla el concepto de “diferencia de resistencias” entre núcleo y superficie del elemento, el cual se evalúa también para edades tempranas (de manera acumulativa y por tramos temporales, además de un factor promedio en el tiempo). Ambos análisis serán evaluados bajo curvas de tendencia mediante un modelo de regresión polinómica, y sus coeficientes característicos.

Los resultados descartan un análisis en base a curvas de tendencia, ya que no se aprecia un patrón que indique un comportamiento común en aquellos proyectos que presentan problemas de gradiente de temperatura, a pesar de que el modelo polinómico era lo suficientemente representativo con los datos estudiados. Para el caso de análisis por curvas de resistencia, la temperatura ambiente es directamente proporcional al desarrollo de resistencias a nivel de núcleo, no así en superficie, donde es variable. Para la temperatura de colocación, se reitera el mismo comportamiento a nivel de núcleo, con un desarrollo de resistencia variable en superficie.

En cuanto a la diferencia de resistencias entre núcleo y superficie, aquellos ejes que sobrepasan la diferencia de 1 [MPa] tienden a presentar problemas de gradiente de temperatura. En cuanto a diferencias de resistencia promedio, no se obtiene una tendencia concluyente y se descarta también como alternativa de análisis.

*Para Josefina, la luz de mis días.*

*Para las futuras generaciones.*

*Perdón por quedarnos sentados mientras sucedía.*

# Agradecimientos

# Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivo General .....	2
1.2.	Objetivos Específicos.....	2
1.3.	Alcances .....	2
2.	Marco Teórico .....	6
2.1.	Hormigón Masivo .....	6
2.2.	Método de Madurez .....	7
2.3.	Patologías del Hormigón Masivo debido a Gradiente de Temperatura .....	9
2.4.	Control de Gradiente de Temperatura en Hormigones Masivos.....	11
3.	Metodología.....	13
3.1.	Revisión bibliográfica .....	13
3.2.	Obtención y Procesamiento de Datos .....	15
3.3.	Análisis Gráfico de Datos .....	20
4.	Resultados.....	23
4.1.	Resumen Proyectos .....	23
4.2.	Curva de desarrollo de resistencias .....	24
4.2.1.	Desarrollo de resistencias. Proyecto Padre Hurtado.....	24
4.2.2.	Desarrollo de resistencias. Proyecto Infinity.....	30
4.3.	Curva para diferencia de resistencia acumulativa y por tramo .....	36
4.3.1.	Diferencia de resistencia acumulativa. Proyecto Padre Hurtado.....	36
4.3.2.	Diferencia de resistencia por tramo. Proyecto Padre Hurtado.....	38
4.3.3.	Diferencia de resistencia acumulativa. Proyecto Infinity.....	44
4.3.4.	Diferencia de resistencia por tramo. Proyecto Infinity.....	46
4.4.	Diferencia de resistencias: Análisis global para ambos proyectos.....	51
5.	Conclusiones.....	53
	Bibliografía.....	55
	ANEXO A .....	56
	ANEXO B .....	68
	ANEXO C .....	87
	ANEXO D .....	100

# Índice de Tablas

Tabla 1: Resumen Proyecto Padre Hurtado.....	23
Tabla 2: Resumen Proyecto Infinity.....	23
Tabla 3: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 8.....	27
Tabla 4: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 12.....	28
Tabla 5: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje L-Asc.....	28
Tabla 6: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 7.....	34
Tabla 7: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje D.....	34
Tabla 8: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 6.....	34
Tabla 9: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 16.....	35
Tabla 10: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 8.....	41
Tabla 11: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 12.....	41
Tabla 12: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje L-Asc.....	41
Tabla 13: Valor promedio de diferencia de resistencias entre superficie y núcleo, para ejes correspondientes al proyecto Padre Hurtado.....	42
Tabla 14: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 7.....	48
Tabla 15: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje D.....	48
Tabla 16: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 6.....	49

Tabla 17: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 16 .....	49
Tabla 18: Valor promedio de diferencia de resistencias entre superficie y núcleo, para ejes correspondientes al proyecto Infinity .....	50

# Índice de Figuras

Figura 1: Edificio Padre Hurtado, vista de fachada proyectada .....	3
Figura 2: Ubicación proyecto Padre Hurtado (marcador rojo P).....	3
Figura 3: Proyecto Infinity Reñaca, vista proyectada fachada .....	4
Figura 4: Ubicación proyecto Infinity (marcador rojo I).....	5
Figura 5: Ejemplo de curva de madurez, para función temperatura-tiempo .....	8
Figura 6: Fisuración del hormigón provocada por retracción por secado .....	10
Figura 7: Efecto de la temperatura de colocación del hormigón en el aumento de temperatura en el hormigón masivo, con $223 \text{ kg/m}^3$ de cemento.....	11
Figura 8: Diagrama de flujo, correspondiente a Metodología de trabajo .....	13
Figura 9: Esquema de colocación y medición con sensores SmartRock.....	16
Figura 10: Planilla de cálculo base entregada por sensor SmartRock. Ejemplo para sensor superficie, en eje L-Ascensor, proyecto Padre Hurtado. ....	17
Figura 11: Formato final de planilla de cálculo, para datos obtenidos en cada eje de estudio. Ejemplo para sensor superficie y núcleo, en eje L-Ascensor, proyecto Padre Hurtado .....	18
Figura 12: Estandarización de datos, cálculo de gradiente de temperatura y diferencia de resistencia. Ejemplo en eje L-Ascensor, proyecto Padre Hurtado .....	19
Figura 13: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (6 hrs).....	24
Figura 14: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (6 hrs).....	24
Figura 15: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (12 hrs).....	25
Figura 16: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (12 hrs).....	25
Figura 17: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (18 hrs).....	25
Figura 18: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (18 hrs).....	26
Figura 19: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (24 hrs).....	26
Figura 20: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (24 hrs).....	26
Figura 21: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (48 hrs).....	27
Figura 22: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (48 hrs).....	27
Figura 23: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (6 hrs).....	30
Figura 24: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (6 hrs) .....	31
Figura 25: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (12 hrs).....	31
Figura 26: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (12 hrs) .....	31
Figura 27: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (18 hrs).....	32



Figura 28: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (18 hrs) .....	32
Figura 29: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (24 hrs) .....	32
Figura 30: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (24 hrs) .....	33
Figura 31: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (36 hrs) .....	33
Figura 32: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (36 hrs) .....	33
Figura 33: Diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	37
Figura 34: Diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	37
Figura 35: Diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	37
Figura 36: Diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	38
Figura 37: Diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	38
Figura 38: Diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	39
Figura 39: Diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	39
Figura 40: Diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	39
Figura 41: Diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	40
Figura 42: Diferencia de resistencia por tramo (24-48 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado .....	40
Figura 43: Diferencia de resistencia acumulativa promedio, para ejes correspondientes al proyecto Padre Hurtado .....	43
Figura 44: Diferencia de resistencia por tramo promedio, para ejes correspondientes al proyecto Padre Hurtado .....	43
Figura 45: Diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity....	44
Figura 46: Diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity..	44
Figura 47: Diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity..	45

Figura 48: Diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity..	45
Figura 49: Diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity..	45
Figura 50: Diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity ....	46
Figura 51: Diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity ..	46
Figura 52: Diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity	47
Figura 53: Diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity	47
Figura 54: Diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity	47
Figura 55: Diferencia de resistencia acumulativa promedio, para ejes correspondientes al proyecto Infinity .....	50
Figura 56: Diferencia de resistencia por tramo promedio, para ejes correspondientes al proyecto Infinity .....	51
Figura 57: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 8.....	57
Figura 58: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 8 .....	57
Figura 59: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 8.....	58
Figura 60: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 12.....	58
Figura 61: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 12 .....	59
Figura 62: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 12.....	59
Figura 63: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje L-Asc.....	60
Figura 64: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje L-Asc .....	60
Figura 65: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje L-Asc.....	61
Figura 66: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 7.....	61
Figura 67: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 7 .....	62
Figura 68: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 7.....	62
Figura 69: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje D.....	63
Figura 70: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje D .....	63
Figura 71: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje D.....	64
Figura 72: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 6.....	64
Figura 73: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 6 .....	65
Figura 74: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 6.....	65
Figura 75: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 16.....	66
Figura 76: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 16 .....	66
Figura 77: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 16.....	67
Figura 78: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (6 hrs) ..	69

Figura 79: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (12 hrs)	69
Figura 80: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (18 hrs)	70
Figura 81: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (24 hrs)	70
Figura 82: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (48 hrs)	71
Figura 83: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (6 hrs)	71
Figura 84: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (12 hrs)	72
Figura 85: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (18 hrs)	72
Figura 86: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (24 hrs)	73
Figura 87: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (48 hrs)	73
Figura 88: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (6 hrs)	74
Figura 89: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (12 hrs)	74
Figura 90: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (18 hrs)	75
Figura 91: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (24 hrs)	75
Figura 92: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (48 hrs)	76
Figura 93: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (6 hrs)	76
Figura 94: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (12 hrs)	77
Figura 95: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (18 hrs)	77
Figura 96: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (24 hrs)	78
Figura 97: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (36 hrs)	78
Figura 98: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (6 hrs)	79
Figura 99: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (12 hrs)	79
Figura 100: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (18 hrs)	80

Figura 101: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (24 hrs)	80
Figura 102: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (36 hrs)	81
Figura 103: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (6 hrs)	81
Figura 104: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (12 hrs)	82
Figura 105: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (18 hrs)	82
Figura 106: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (24 hrs)	83
Figura 107: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (36 hrs)	83
Figura 108: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (6 hrs)	84
Figura 109: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (12 hrs)	84
Figura 110: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (18 hrs)	85
Figura 111: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (24 hrs)	85
Figura 112: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (36 hrs)	86
Figura 113: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	88
Figura 114: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	88
Figura 115: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	88
Figura 116: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	89
Figura 117: Curva diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	89

Figura 118: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	89
Figura 119: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	90
Figura 120: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	90
Figura 121: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	90
Figura 122: Curva diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	91
Figura 123: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	91
Figura 124: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	91
Figura 125: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	92
Figura 126: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	92
Figura 127: Curva diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	92
Figura 128: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	93
Figura 129: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	93
Figura 130: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	93
Figura 131: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	94
Figura 132: Curva diferencia de resistencia acumulativa (36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	94
Figura 133: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D94	
Figura 134: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	95

Figura 135: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	95
Figura 136: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	95
Figura 137: Curva diferencia de resistencia acumulativa (36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	96
Figura 138: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	96
Figura 139: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	96
Figura 140: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	97
Figura 141: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	97
Figura 142: Curva diferencia de resistencia acumulativa (36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	97
Figura 143: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	98
Figura 144: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	98
Figura 145: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	98
Figura 146: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	99
Figura 147: Curva diferencia de resistencia acumulativa (36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	99
Figura 148: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	101
Figura 149: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	101
Figura 150: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	101
Figura 151: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	102

Figura 152: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8	102
Figura 153: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	102
Figura 154: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	103
Figura 155: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	103
Figura 156: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	103
Figura 157: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12	104
Figura 158: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	104
Figura 159: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	104
Figura 160: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	105
Figura 161: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	105
Figura 162: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc	105
Figura 163: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	106
Figura 164: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	106
Figura 165: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	106
Figura 166: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	107
Figura 167: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7	107

Figura 168: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	107
Figura 169: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	108
Figura 170: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	108
Figura 171: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	108
Figura 172: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D	109
Figura 173: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	109
Figura 174: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	109
Figura 175: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	110
Figura 176: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	110
Figura 177: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6	110
Figura 178: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	111
Figura 179: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	111
Figura 180: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	111
Figura 181: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	112
Figura 182: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16	112





# 1. Introducción

El hormigón se presenta como uno de los principales y más utilizados materiales en la industria de la construcción chilena, posicionándose por sobre elementos como la madera o el acero, debido a su excelente comportamiento en una zona donde las solicitaciones sísmicas predominan en el diseño de las estructuras de todo tipo, asegurando a lo largo de la historia, excelentes estándares de calidad en todo el territorio nacional. Consientes de este contexto, y motivado por iniciativas de estado, tales como “Construye 2025”, han fomentado la investigación e innovación en cuanto a los métodos disponibles para aprovechar al máximo sus propiedades, y reducir las problemáticas que incluye todas sus posibles interacciones en obra, y los variados microclimas presentes en Chile, que añaden una amplia gama de factores ambientales que deben ser considerados al momento de estimar su comportamiento, no tan solo en su confección, si no que a lo largo de su ciclo de vida.

Acorde al avance de las necesidades de los proyectos de ingeniería, aparecen dentro de los innumerables tipos de aplicaciones aquellas que requieren un uso de grandes cantidades de esta mezcla para su ejecución. Ejemplo de esto son las extensas losas de fundaciones para centros comerciales y amplias estructuras de contención en proyectos hidroeléctricos y de control del abastecimiento hídrico, integradas en la categoría de estructuras de “hormigón masivo”. En su definición, estas estructuras deben ser afectas a medias de control debido al calor de hidratación que producen, que si se suma a factores que apoyen una disipación de calor a nivel de superficie, pueden generar gradientes térmicos, los cuales para evitar agrietamientos, no pueden superar los 20 [°C] (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Si bien, estos cambios de temperatura pueden tener variadas razones, se maneja con propiedad la influencia de la temperatura de colocación y ambiente sobre los niveles de calor adiabático que se alcanzan en la unidad completa, y que serán parte de la información entregada como base teórica del estudio.

Surge la pregunta ¿Cómo se puede identificar que una unidad de hormigón masiva tendrá estas problemáticas, fuera de solo medir la temperatura en el núcleo y en la superficie? Para esto, se tomará la base de una metodología que, si bien es antiguo, recientemente fue normalizado, y ha ingresado al rubro como herramienta para optimizar los métodos constructivos: el método de madurez.

Este método, relaciona los registros de temperatura a través del tiempo, para entregar una estimación del desarrollo de resistencias en cierto instante dado, sin necesidad de realizar los ensayos convencionales. Con esto, se abren varias posibilidades, donde las relaciones de temperatura de colocación y ambiente en el desarrollo de estas resistencias serán dispuestas al análisis, con datos obtenidos de proyectos reales.

Además, se buscará un camino adicional para poder identificar cuando una unidad de hormigón masivo da señales de posibles problemas con el desarrollo de gradientes de temperatura. Este análisis no se basará en solo contar con una medida de temperaturas para poder predecir un efecto adverso, si no que agregará el desarrollo de resistencias como parámetro a evaluar con dicho fin. Se incluirá, al igual que como se mencionó para el desarrollo de temperaturas, el análisis del efecto de la temperatura de colocación y ambiente sobre la evolución de la curva de resistencias, todo enfocado a las edades tempranas del hormigón en proceso de fraguado.

## 1.1. Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el método de madurez como una herramienta en el control del gradiente de temperatura en hormigones masivos, tanto en su prevención como en su evaluación durante el fraguado.

## 1.2. Objetivos Específicos

- Identificar las patologías asociadas al desarrollo de gradientes de temperatura en el hormigón masivo.
- Analizar el efecto de la temperatura ambiente y de colocación en el desarrollo de resistencias en hormigones masivos, mediante el método de madurez, con datos obtenidos de proyectos reales.
- Proponer indicadores en el desarrollo de resistencias, que impliquen gradientes de temperatura por sobre el límite establecido, par control en obra.

## 1.3. Alcances

A modo de resumen, este estudio abarca aquellas estructuras del tipo losa de fundación para edificios con fines habitacionales, ubicados en la zona central del país (específicamente en la V región de Valparaíso y región Metropolitana), cuya altura máxima no supere los 26 pisos, hormigonadas en época de verano en el hemisferio sur (entre diciembre y marzo del siguiente año), con temperaturas ambiente fluctuantes entre 13,9 [°C] y 29,7 [°C], y una temperatura de mezcla en el rango de los 13,5 [°C] y 30 [°C].

Los alcances de este trabajo se definen en base a los proyectos estudiados, según sus características principales, con el fin de delimitar sus resultados para posteriores referencias.

Para esto, se pondrán a disposición los principales aspectos a considerar para cada proyecto, y así englobar en un resumen los márgenes de validez de los resultados.

- **Proyecto Padre Hurtado**

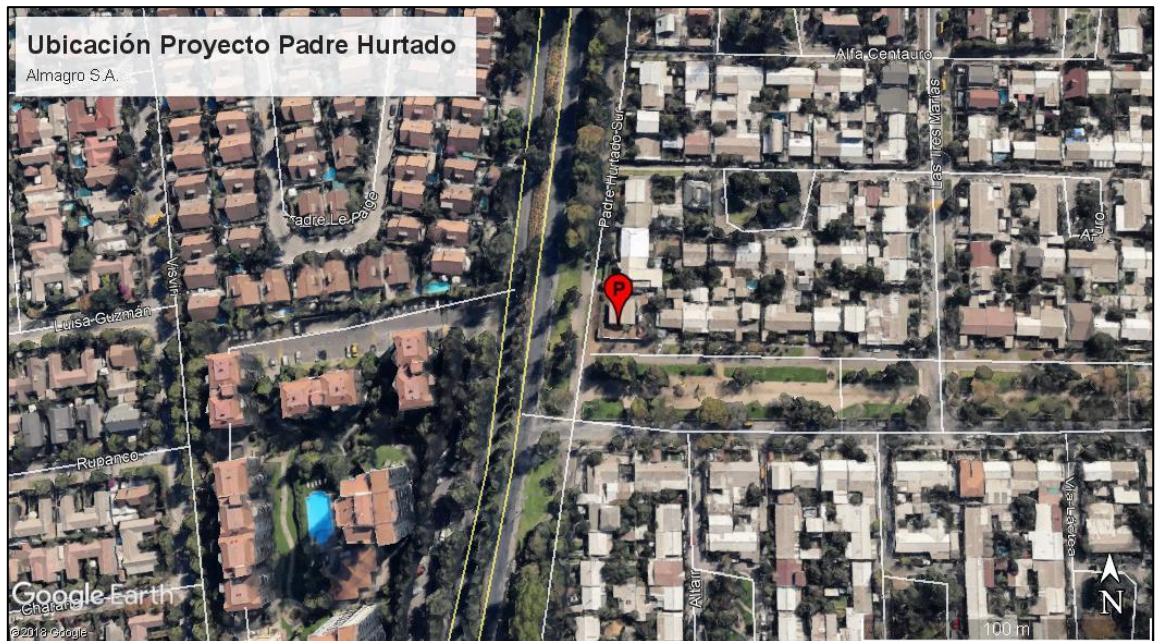
Edificio de tipo habitacional (ver *Figura 1*), ubicado en la comuna de Las Condes, Región Metropolitana (ver *Figura 2*), en base a 87 departamentos distribuidos en 16 pisos. Propiedad de la constructora Almagro S.A. El proyecto tiene fecha de entrega para el primer semestre del año 2020. Para este proyecto, la estructura monitoreada fue denominada como “Losa Fundación (Núcleo)”, en tres de sus ejes: Eje 8 (28 días), Eje 12 (7 días) y Eje L-Ascensor (28 días). Los datos correspondientes se obtienen entre el 26 de febrero y el 26 de marzo del año 2018. En cuanto a rangos de temperatura ambiente al momento de hormigonado, estas se encuentran entre los 13,85 [°C] y 29,18 [°C] (ver *Tabla 1*). Para la temperatura de colocación del hormigón, los valores límites están entre los 13,5 [°C] y 29,5 [°C] (ver *Tabla 1*).

Figura 1: Edificio Padre Hurtado, vista de fachada proyectada



(Fuente: <https://www.almagro.cl/proyecto/edificio-padre-hurtado/>)

Figura 2: Ubicación proyecto Padre Hurtado (marcador rojo P)



(Fuente: Google Earth Pro)

- **Proyecto Infinity**

Edificio de tipo habitacional (ver *Figura 3*), ubicado en la comuna de Viña del Mar, Región de Valparaíso (ver *Figura 4*), en base a 175 departamentos distribuidos en 26 pisos. Propiedad de la inmobiliaria Miramar. El proyecto tiene fecha de entrega para el segundo semestre del año 2019. Para este proyecto, la estructura monitoreada fue denominada como “Losa Fundación”, en cuatro de sus ejes: Eje 7 (10 días), Eje D (14 días), Eje 6 (18 días) y Eje 16 (7 días). Los datos correspondientes se obtienen entre el 11 de diciembre del año 2017 al 12 de febrero del año 2018. En cuanto a rangos de temperatura ambiente al momento de hormigonado, estas se encuentran entre los 22,00 [°C] y 29,69 [°C] (ver *Tabla 2*). Para la temperatura de colocación del hormigón, los valores límites están entre los 22,17 [°C] y 30,01 [°C] (ver *Tabla 2*).

Figura 3: Proyecto Infinity Reñaca, vista proyectada fachada



(Fuente: <http://infinityrenaca.cl/>)

Figura 4: Ubicación proyecto Infinity (marcador rojo I)



(Fuente: Google Earth Pro)

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Hormigón Masivo

Según el American Concrete Institute, en su comité (o comisión) 116R, el hormigón masivo puede ser definido como “cualquier volumen de hormigón con dimensiones lo suficientemente grandes como para requerir que se tomen medidas para hacer frente a la generación de calor a partir de la hidratación del cemento y el cambio de volumen asociado, para minimizar el agrietamiento” (ACI116.1R, 2000). A nivel nacional, y de acuerdo a las normas vigentes, esta categoría de hormigón se define como “aquellas unidades de hormigón cuya menor dimensión supere los 0,8 [m]” (NCh170, 2016), lo que, a diferencia de lo indicado por el ACI 116R, no sugiere tomar medidas en cuanto a la generación de calor dentro de la unidad masiva. Esta definición concuerda con la mayoría de las instituciones que trabajan con esta categoría de hormigón, cuyas experiencias han confluído hacia el concepto de “cualquier elemento cuya menor dimensión es igual o mayor a 3 [pies] (0,9 [m])” (Gagda & VanGeem, Enero, 2002).

Para antes del siglo XX, el hormigón en grandes cantidades era solo utilizado en represas, de pequeñas dimensiones, y cuya confección era realizada de manera totalmente manual, sin la capacidad de poder comprobar los efectos de la razón agua/cemento, ni tampoco se manejaba la concepción de consistencia del hormigón. Pasado el año 1900, se realizan grandes avances, y de manera muy rápida, en cuanto a la trabajabilidad y propiedades de esta categoría de estructuras, motivados por la necesidad de poseer un mayor suministro eléctrico en los nacientes centros urbanos modernos, y, por ende, una mayor demanda en la confección de centrales hidroeléctricas de mayores dimensiones (ACI207.1R, 2005). Este desarrollo implicó un aumento del campo de uso donde las estructuras de hormigón de grandes dimensiones tuvieron cabida, extendiéndose hasta la actualidad, donde está presente en diversos proyectos de ingeniería, tales como fundaciones (de muelles, grandes edificios y centros comerciales), pilas (socializado), paredes gruesas, líneas de túneles, y en general, cualquier estructura de concreto con sección gruesa (ACI207.1R, 2005).

El hormigón utilizado para estos casos, incluye en su composición materiales como el cemento (principalmente Portland, tipo I, II, IV y V; Mezclado, tipo P, IP, S, IS, I(PM) e I(SM); Hidráulico, tipo GU, MS, HS, MH y LH), agregados (cuyo porcentaje de fino afecta a la trabajabilidad del hormigón como unidad), agua, y frecuentemente puzolanas, entre otros adicionales que puedan influir en propiedades específicas, dependiendo de las necesidades de cada proyecto. Sin embargo, a pesar de las diferencias que puedan identificarse, el objetivo principal de las proporciones de la mezcla para hormigón masivo es optimizar la selección de materiales que produzcan un hormigón que cumpla los requerimientos de la estructura, principalmente con respecto a su economía, trabajabilidad, estabilidad dimensional (minimizar el agrietamiento), bajo aumento de temperatura, resistencia adecuada, durabilidad y, en caso de estructuras hidráulicas, baja permeabilidad (ACI207.1R, 2005).

Tal como lo indica su definición, estas estructuras poseen una problemática provocada por el aumento de temperatura a nivel del núcleo de la unidad, que se eleva por sobre la temperatura que se registra a nivel de superficie, que corresponde a la temperatura ambiente. Esto provoca gradientes de temperatura, que, si son excesivos, provocaran tensiones internas de tracción debido a esta retracción diferencial entre ambos niveles, produciendo fisuras que, con el paso del tiempo, pueden penetrar más profundamente en el hormigón (ACI224.1R, 1994).

Existen indicaciones sobre el origen y límite de estas temperaturas, además de tratamientos desarrollados en vías de evitar las problemáticas anteriormente mencionadas. Sin embargo, serán expuestas con mayor profundidad en la sección 2.4 Control de Gradiente de Temperatura en Hormigones Masivos.

## 2.2.Método de Madurez

Convencionalmente, y de acuerdo a lo que indica la NCh170.Of1985: Hormigón – Requisitos Generales, la resistencia potencial a la compresión del hormigón debe ser obtenida a través del ensayo de probetas cilíndricas, que actuaran como muestras representativas de la resistencia real del concreto colocado en sitio. Sin embargo, en su revisión correspondiente al año 2016, se recomienda utilizar un método alternativo, de carácter no invasivo, para la determinación de la resistencia real, tal como se indica en el punto 15.2.2.4: “La resistencia del hormigón colocado se debe estimar preferentemente por medio de métodos de madurez o en su defecto por medio de probetas conservadas en condiciones similares a las del hormigón colocado” (NCh170, 2016). Además de esto, en la sección 15.2.1 - NOTA 2, se recomienda “tener presente lo establecido en ASTM C1074” como una guía para su correcta utilización.

Esta metodología, de manera conceptual, se define como “una técnica para estimar la resistencia del hormigón, que basa en el supuesto de que las muestras de una mezcla de hormigón dada alcanzan resistencias iguales, si alcanzan valores iguales del índice de madurez” (ASTM-C1074, 2004). Su base está en relacionar el tiempo de fraguado con el calor de hidratación producido debido a la reacción álcali-acuosa del cemento, y el correspondiente registro de temperaturas que esto genera. Estos dos valores, temperatura y tiempo, se relacionan de manera matemática en el “coeficiente de madurez”, originando la máxima de que dos hormigones con el mismo índice de madurez poseen la misma resistencia, independiente del método de curado. Con esto, se estima dicho factor para el hormigón colocado en obra, y se compara con aquel que fue calibrado para el mismo tipo de mezcla en ensayos previos en laboratorio.

Pero ¿Cómo se obtiene dicha madurez? La ASTM C1074 ha dispuesto de dos funciones para su cálculo:

- Cálculo factor temperatura-tiempo (ecuación de Nurse-Saul).

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \cdot \Delta t \quad (2.2.1)$$

Donde:

$M(t)$ : el factor temperatura-tiempo en el tiempo  $t$ , medido en °C-días o °C-horas

$\Delta t$ : un intervalo de tiempo, medido en días u horas

$T_a$ : temperatura promedio del concreto en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , medido en °C

$T_0$ : datum o temperatura basal, medida en °C

- Cálculo de edad equivalente (ecuación de Arrhenius).

$$t_e = \sum e^{-Q \cdot (\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s})} \cdot \Delta t \quad (2.2.2)$$

Donde:



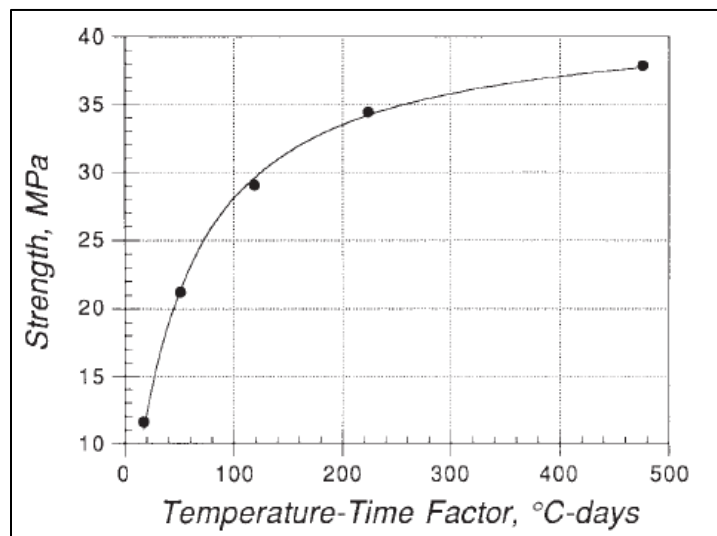
- $t_e$ : edad equivalente en una temperatura específica  $T_s$ , medida en días u horas
- $Q$ : energía de activación, dividida por la constante de los gases, medida en K
- $T_a$ : temperatura promedio del concreto durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , medida en K
- $T_s$ : temperatura específica, medida en K
- $\Delta t$ : un intervalo de tiempo, medido en días u horas

La norma chilena para hormigones (NCh 170-2016) define la función de madurez utilizando la función del factor temperatura-tiempo, en su sección 3.21. Si bien, en la ASTM C1074 se entregan métodos para determinar el datum  $T_0$ , en el punto 15.2.1 - NOTA 2 de la NCh 170-2016 se indica que este valor “se puede considerar igual a cero”.

El modo práctico de aplicación de la madurez y de relación entre la resistencia con las combinaciones de temperatura-tiempo de colocación, siguen la siguiente ruta:

- Para una dosificación específica de hormigón, en laboratorio, se elaboran 15 probetas cilíndricas (a partir de hormigón confeccionado según NCh 1018), cuya mezcla sea similar a la que posea la unidad cuya resistencia se estimará a partir de estos resultados.
- Para obtener el registro de temperaturas del hormigón en el tiempo, se utilizarán 2 de estas probetas, ambas monitoreadas con sensores de temperatura ubicados, como mínimo, a  $\pm 15$  [mm] desde el centro de los ejemplares. Los sensores deben tener una precisión de  $\pm 1$  [°C].
- El resto de las probetas, se mantendrán en curado de tipo húmedo, y se ensayarán a compresión en grupos de a tres, al día 1, 3, 7, 14 y 28. Para cada una de estas fechas, se debe obtener el índice de madurez promedio del trío de muestras ensayadas, con base del registro de temperatura descrito en el punto anterior. Estos coeficientes de madurez obtenidos se grafican en un formato de °C-días (o °C-horas) versus resistencia (medida en MPa). Luego de esto, se ajusta la mejor curva de tendencia posible, y se obtiene la “curva de madurez” (ver *Figura 5*), con la que podrá ser evaluada la resistencia lograda en el hormigón colocado.

Figura 5: Ejemplo de curva de madurez, para función temperatura-tiempo



(Fuente: ASTM C1074 of 2004)

En la actualidad, se cuenta con una norma a nivel nacional, que regula la aplicación del método de madurez: la NCh 3565-2018: Hormigón – Estimación de Resistencia Mecánica – Método de la Madurez. Entre sus alcances, se definen aquellos procesos donde puede utilizarse como un criterio válido de estimación de resistencia a la compresión, los cuales se enumeran a continuación:

- Aserrado de juntas
- Descimbre y desmolde
- Retiro de protecciones térmicas en tiempo frío
- Apertura a tránsito de pavimentos
- Pre y post tensado de elementos

Como adicional, se entrega una recomendación para su uso en el caso de los hormigones del tipo masivo, sugiriendo que “En aquellos casos de condiciones de hormigonado y endurecimiento del hormigón con temperaturas del hormigón sobre 40°C de forma prolongada (como por ejemplo hormigones masivos, hormigones curados al vapor), la estimación de resistencia mediante el método, sobre 7 días, se debiera estudiar” (NCh3565, 2018).

### **2.3. Patologías del Hormigón Masivo debido a Gradiente de Temperatura**

El agrietamiento interno se identifica como la principal patología del hormigón del tipo masivo, el cual en caso de no identificarse y/o tratarse, puede tomar dimensiones que afectarán el desempeño final de la estructura, en cuanto a su capacidad de admisión de cargas, como en su durabilidad.

La reparación de una estructura dañada depende, exclusivamente, de la identificación del factor que provocó la fisura. “Los procedimientos de reparación exitosos a largo plazo son aquellos que atacan no solo a las propias fisuras, sino también a las causas de la fisuración.” (ACI224.1R, Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón, 1993)

Para el caso del hormigón, las fisuras se clasifican como:

- Fisuras en hormigón en estado plástico
- Fisuras en hormigón endurecido

En el estudio de fisuraciones en hormigón endurecido, es donde se encuentran dos procesos que atañen directamente al origen del agrietamiento para los concretos masivos: Retracción por secado y tensiones de origen térmico.

La retracción por secado es provocada por la pérdida de humedad de la pasta cementicia, que produce cambios de volumen en la estructura. Estos cambios de volumen producen tensiones internas de tracción, que, al sobrepasar el límite de tracción para el hormigón, genera grietas (ver **Error! Reference source not found.**). En el caso del hormigón masivo, estas tensiones se producen debido a la retracción diferencial entre la superficie y el núcleo, siendo la mayor retracción en superficie la que provoca el desarrollo de fisuras, que pueden penetrar más en el interior de hormigón a medida que pasa el tiempo. (ACI224.1R, Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón, 1993).

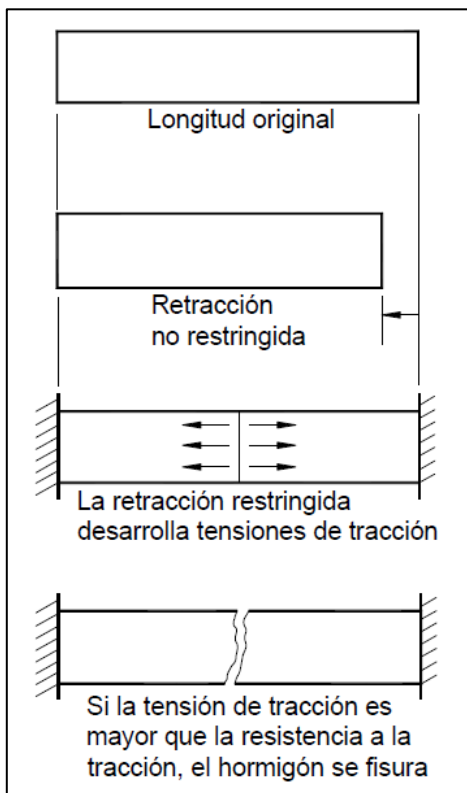
En cuanto a las tensiones de origen térmico, estas se producen por la diferencia de temperaturas dentro de una estructura, que pueden tener su origen en la pérdida de calor de hidratación a diferentes velocidades, o por condiciones climáticas que enfrían o calientan una parte de la estructura a una mayor tasa de velocidad o temperatura que la otra. Esto, al igual que en la

retracción por secado, origina tensiones de tracción debido al cambio volumétrico, que, si superan la capacidad de deformación por tracción, origina fisuras. El caso de diferencial debido a pérdida de calor de hidratación a distintas tasas solo afecta al hormigón masivo, mientras que la influencia de las condiciones climáticas puede afectar a cualquier estructura. (ACI224.1R, Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón, 1993)

No obstante, además de ser el resultado de las causas relacionadas con los materiales (retracción por secado; gradiente térmico no lineal provocado por calor de hidratación), las fisuras en un elemento masivo pueden tener su origen en causas estructurales, o una combinación de ambas. (ACI224.R, 2001) La disminución de volumen en las capas debajo de la superficie, pueden producir fisuras de tipo superficial. La fisuración aleatoria (como consecuencia de los materiales) pueden atravesar un elemento de hormigón y tener anchos variables, desde casi imperceptibles hasta de grandes dimensiones. Sin embargo, las fisuras del tipo estructural, generalmente se deben al exceso de sollicitación del elemento, debido a una carga puntual o a combinaciones de estas. (ACI224.R, 2001)

Si bien, ambas causas se definieron de manera separada, ambas poseen un elemento en común: fisuración por tensiones de tracción y variación diferencial de volumen debido al secado o al desarrollo de gradientes térmicos. Esto puede ser controlado con la correcta utilización de juntas de retracción, (para el caso de retracción por secado, adicionalmente pueden controlarse con un detallado de las armaduras y uso de cemento compensador de la retracción) o con cualquiera de los métodos mencionados en la sección 2.4 Control de Gradiente de Temperatura en Hormigones Masivos.

Figura 6: Fisuración del hormigón provocada por retracción por secado



Fuente: (ACI224.R, 2001)

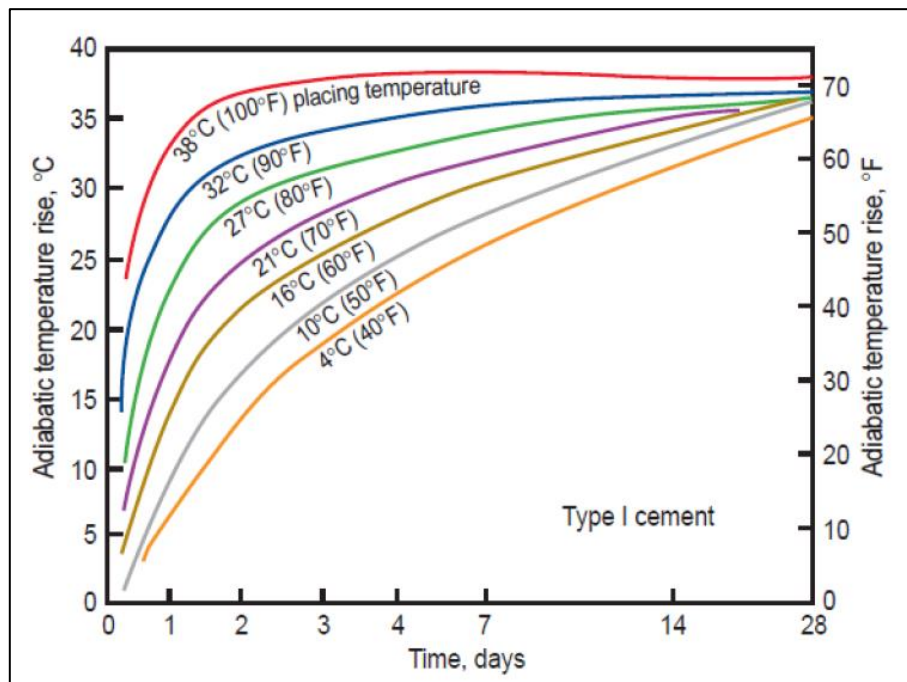
## 2.4. Control de Gradiente de Temperatura en Hormigones Masivos

Tal como se mencionó en la sección 2.1 (Hormigón Masivo), parte de la definición del hormigón masivo tiene que ver con la necesidad de aplicar medidas que contrarresten el efecto del calor de hidratación producido en su interior, que contrasta con la rápida pérdida de temperatura a nivel de superficie. El no control de estos factores puede tener repercusiones dentro de la integridad de la estructura, tanto en su composición (presencia de agrietamiento) como en su desempeño final (fallas producto del agrietamiento no controlado).

Según la literatura disponible, “El aumento de temperatura en el hormigón masivo se relaciona con su temperatura inicial, la temperatura ambiente, el tamaño del elemento de hormigón (relación volumen-área superficial y dimensión mínima) y el tipo y la cantidad de los materiales cementantes” (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Estos factores tendrán influencia en el calor de hidratación originado, como también en el proceso de secado. Para el caso de este trabajo, se entregará una reseña para los efectos de la temperatura inicial y ambiente, que son parte de los objetivos específicos propuestos.

Para el momento de su colocación, la norma NCh 170-2016, en su sección 11.7, indica que no debe ser menor a 5 [°C] (este límite protege al hormigón de los efectos que implica una temperatura cercana al punto de congelación del agua (0 [°C])) ni mayor a 35 [°C]. La temperatura ambiente tiene influencia en la temperatura de la mezcla al momento de hormigonar, y esta última, determina la tasa de desarrollo de la temperatura adiabática que ocurre al interior de la unidad masiva (ver *Figura 7*).

Figura 7: Efecto de la temperatura de colocación del hormigón en el aumento de temperatura en el hormigón masivo, con 223 kg/m<sup>3</sup> de cemento



(Fuente: (ACI207.2R, 2007))

Como adicionales, se debe mencionar que la norma NCh 170-2016 indica, en su sección 11.8.1.3, que “tanto al momento del hormigonado como durante el período de endurecimiento inicial del

hormigón, se deben adoptar medidas para asegurar que la temperatura del hormigón colocado no descienda de 5 [°C]. Para estos efectos, se debe medir la temperatura del hormigón colocando a una profundidad de 5 [cm] de la superficie expuesta y a una distancia mayor o igual que 5 [cm] de cualquier borde”.

En cuanto a los gradientes de temperatura, originados por la diferencia entre la generación de calor de hidratación a nivel de núcleo y el calor disipado a nivel de superficie. Los datos provenientes de la experiencia empírica recomiendan mantener un diferencial de temperatura no superior a 20 [°C] (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). Sin embargo, la ACI207.2R provee una guía para estimar gradientes superiores a este valor límite, que, dependiendo de las propiedades del hormigón estudiado, pueda asegurar el mínimo agrietamiento.

Además, es la misma ACI207.2R la que define los puntos básicos para controlar el desarrollo de temperaturas en el hormigón masivo, que se resumen en los siguientes cuatro puntos (ACI207.2R, 2007):

- Control del contenido de cemento, donde la selección del tipo y la cantidad de este elemento puede disminuir el potencial generador de calor del concreto.
- Preenfriamiento, donde enfriar los ingredientes disminuye la temperatura de colocación (que como se ve en la *Figura 7*, implica menor desarrollo de temperaturas)
- Post enfriamiento, donde remover el calor del concreto con tuberías de enfriamiento internas limita el aumento de temperatura.
- Gestión de la construcción, donde los esfuerzos están enfocados en proteger la estructura de los diferenciales excesivos de temperatura, por conocimiento del manejo del concreto, programación de la construcción y sus procedimientos.

Sin embargo, existen proyectos que requieren una variedad de procedimientos para disminuir la generación de calor en el sistema del hormigón, que se enumeran a continuación (ACI207.2R, 2007):

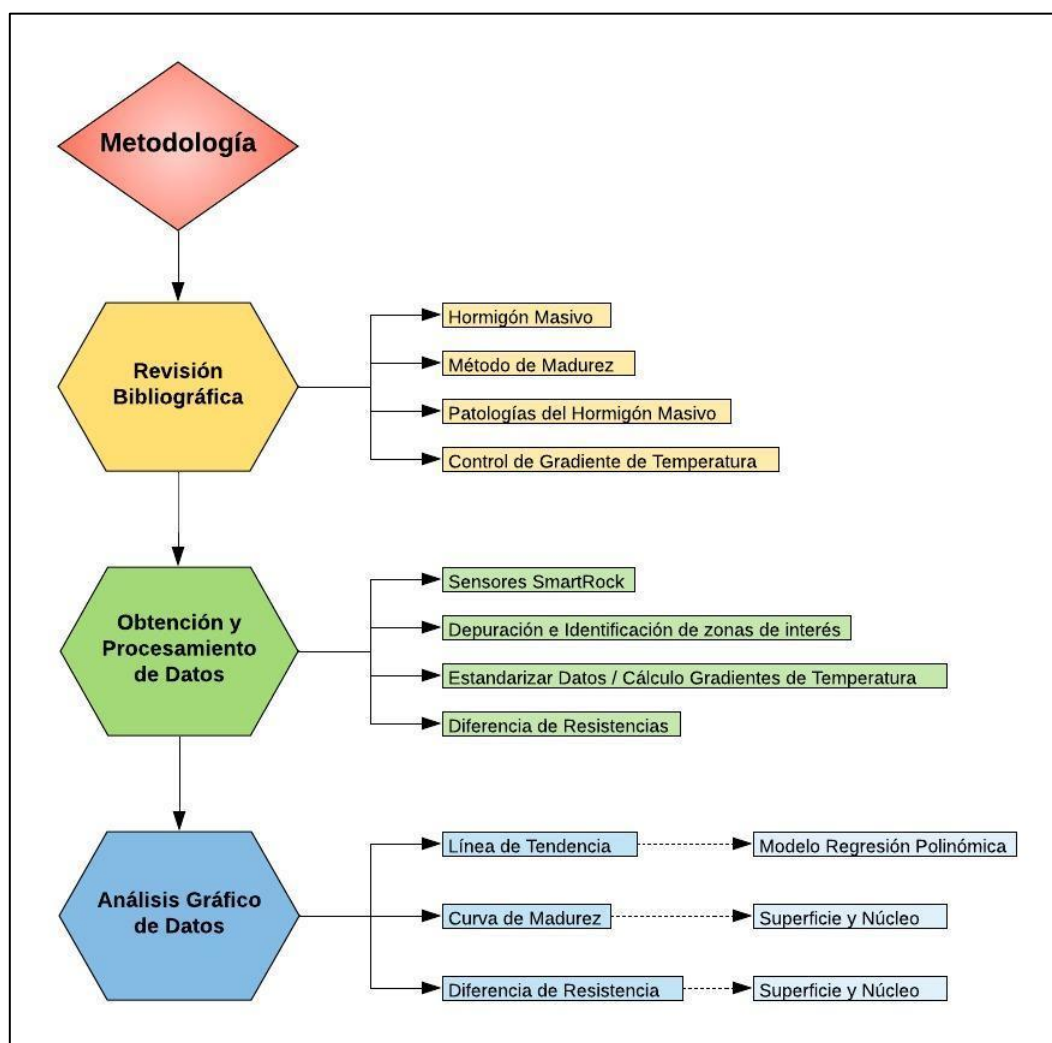
- Uso de puzolanas
- El cuidadoso control del grado de agregados, y el uso de agregados de gran tamaño en mezclas eficientes con bajos contenidos de cemento
- Pre enfriado de los agregados y el agua utilizada para la mezcla, para bajar temperatura de colocación
- Incorporación de aire y otras mezclas químicas para mejorar las propiedades frescas y de endurecimiento del concreto
- Utilizar las dimensiones apropiadas del bloque en su colocación
- Coordinar el programa de construcción con los cambios estacionales
- Utilizar curado con agua para evitar la evaporación en la superficie por frío
- Disipación del calor del hormigón endurecido circulando agua fría por una red de tuberías internas
- Aislar las superficies para minimizar los diferenciales de temperatura entre el interior y exterior del concreto

Los efectos del no control del desarrollo de temperaturas en el hormigón, enfocados en el no control del gradiente de temperatura para estructuras masivas, se expondrán en la sección a continuación.

### 3. Metodología

A continuación, se describe el procedimiento de trabajo para lograr los objetivos propuestos, en cada una de sus etapas. A modo de resumen, se entrega el diagrama de flujo correspondiente al trabajo realizado (ver *Figura 8*).

Figura 8: Diagrama de flujo, correspondiente a Metodología de trabajo



(Fuente: elaboración Propia)

#### 3.1.Revisión bibliográfica

Dentro del trabajo a desarrollar, surgen conceptos y métodos que deben ser definidos para su posterior uso como referencia dentro del análisis de los resultados obtenidos. Además de lo anterior, uno de los objetivos específicos del trabajo tiene como fin dar la información suficiente al lector para comprender cuales son las consecuencias principales dentro de las estructuras el no control del gradiente que se provoca debido a diferenciales de temperatura en el proceso de fraguado, entre superficie y núcleo de una estructura del tipo masiva (ver Objetivos Específicos).

Para cumplir con lo dicho, se dividirá la información a entregar en 4 ejes principales, los cuales se describen a continuación.

- **Hormigón masivo**

Se propone este punto como partida, ya que es esta estructura en específico la que se define en base a su potencial de sufrir daños debido al exceso de calor de hidratación, que se produce a nivel de núcleo y que puede originar temperaturas drásticamente superiores a lo que ocurre en la superficie de dicho elemento. Como base para definir este tipo de estructura, se utilizará el documento oficial que rige los hormigones en Chile (NCh170: “*Hormigón – Requisitos Generales*”) además del documento que entrega la American Concrete Institute (ACI), con las regulaciones internacionales estándar para esta categoría de hormigón (en este caso, la ACI 207.1R: “*Guide to Mass Concrete*”). En base a estas referencias, se entregará una definición, características principales y ejemplos de estructuras que pueden incluirse en esta denominación dentro de las estructuras de hormigón (ver Hormigón Masivo).

- **Método de Madurez**

Siendo esta la base de la estimación de las resistencias a utilizar, como datos de ingreso para la obtención de resultados, es necesario proveer un marco general sobre sus características y aplicación, debido a su irrupción reciente en el mercado y la escasa normativa vigente que existe a nivel nacional (hasta el momento). Y es debido a esto último que la mayor parte de la información entregada tendrá su origen en organismos internacionales de normativas y recomendaciones, tales como la American Society for Testing and Materials, o ASTM, y su documento oficial (ASTM C1074-04: “*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*”) que define de manera completa las formas de estimación, sus aplicaciones y las principales características de esta metodología. Como apoyo adicional, se mantendrá la normativa nacional vigente para hormigones en Chile (NCh170: “*Hormigón – Requisitos Generales*”), incluyendo algunos aspectos de la normativa en desarrollo en conjunto entre la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) y el Instituto Nacional de Normalización (INN), que regula la correcta aplicación del método de madurez a nivel nacional (NCh 3565: *Hormigón – Estimación de la Resistencia Mecánica – Método de Madurez*).

- **Patologías del Hormigón Masivo debido a Gradiente de Temperatura**

Este capítulo entregará información acerca de los daños producidos por el no control de las diferencias de temperatura en hormigones masivos, a causa del desarrollo de gradientes térmicos en la etapa de fraguado, incluyendo un repaso en aquellos métodos prácticos para su evaluación y posterior reparación. La base de este capítulo se encuentra en documentos provistos por la American Concrete Institute (ACI), en aquellos puntos que respectan al desarrollo de fisuras en estructuras masivas de hormigón (ACI 207.2R – 10: “*Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*”; ACI224R: “*Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón*”, Capítulo 7 “*Control de la Fisuración en el Hormigón Masivo*”; ACI224.1R-93: “*Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras*”).

- **Control de Gradiente de Temperatura en Hormigones Masivos**

La diferencia de temperaturas que ocurre entre el centro de una estructura (producido por el calor de hidratación característico de la mezcla de hormigón en sus componentes) y su superficie (afectada por la temperatura ambiente y otros factores climáticos adicionales) es lo que se define como gradiente de temperatura y es la base de la problemática en estudio dentro

de este trabajo, por los efectos adversos que esto puede traer a la integridad de la masa de hormigón. Entendiendo la existencia de este dispar desarrollo de temperaturas, es que en esta sección se darán a conocer los principales factores que influyen en el origen de estos gradientes térmicos, que indican las normativas y recomendaciones vigentes en cuanto a la presencia de esta situación, la importancia que tiene el correcto monitoreo de la temperatura en una estructura masiva en la etapa de fraguado, además de los métodos existentes para controlar su ocurrencia, en etapas previas, posteriores e incluso en el mismo proceso del hormigonado. Como guía principal, se utilizará la sección “*Controlling Temperatures in Mass Concrete*”, de los autores John Gajda y Martha G. VanGeem, publicado en “*Concrete Internacional*”, Vol. 24, enero 2002, además de la normativa chilena vigente para hormigones (NCh170: “*Hormigón – Requisitos Generales*”).

### 3.2. Obtención y Procesamiento de Datos

Para cumplir con los objetivos trazados al inicio de este trabajo, es necesario disponer del desarrollo de las resistencias dentro de una estructura de hormigón masivo. Para esto, se dispone de dos proyectos (ver Alcances), que fueron monitoreados en su proceso de hormigonado y posterior fraguado en su losa de fundación. A continuación, se entregará un esquema de cómo fueron obtenidos estos datos, para su posterior manejo y análisis que permitan cumplir los objetivos propuestos.

#### ▪ Obtención de datos: Sensores SmartRock

Para conocer el desarrollo de las resistencias de una estructura, utilizando el método convencional, sería necesario disponer de probetas para ensayos a compresión para cada momento en el que se quiera conocer su valor. Sin embargo, utilizando el método de madurez, solo es necesario conocer el desarrollo de la temperatura en el tiempo luego del hormigonado, además de la calibración de la curva de madurez (en estos casos, provista por la hormigonera). Con el fin de tener disponible este registro de temperatura, se utilizaron sensores SmartRock, cuya principal novedad es su calidad de “inalámbrico”, y que puede entregar un informe a través de una aplicación para smartphone, el cual se conecta por bluetooth al o los sensores disponibles. Para este caso, se conectan dos sensores en la unidad monitoreada: uno a nivel de núcleo y otro cerca de la superficie expuesta al ambiente, uniéndolos a las secciones de armadura disponible para mantener su ubicación en el hormigonado (ver *Figura 9*). Luego de esto, se calibra el sensor con la curva de madurez correspondiente al hormigón a utilizar (ingresándolo en la aplicación), con lo que se puede obtener, en el momento que se requiera, el desarrollo de temperatura, madurez y resistencia del elemento, en una plantilla de informe predeterminada por los desarrolladores.

Además de esto, existe la opción de entregar una planilla en formato “.csv” (Microsoft Excel Comma Separated Values File) donde, además de entregar datos propios del sensor en un cuadro resumen (Project Name, Section Name, Sensor Name, Units, Maturity Calibration, Pouring Time, como los más relevantes a mencionar), dispone de los siguientes valores correspondientes a cada monitoreo programado:

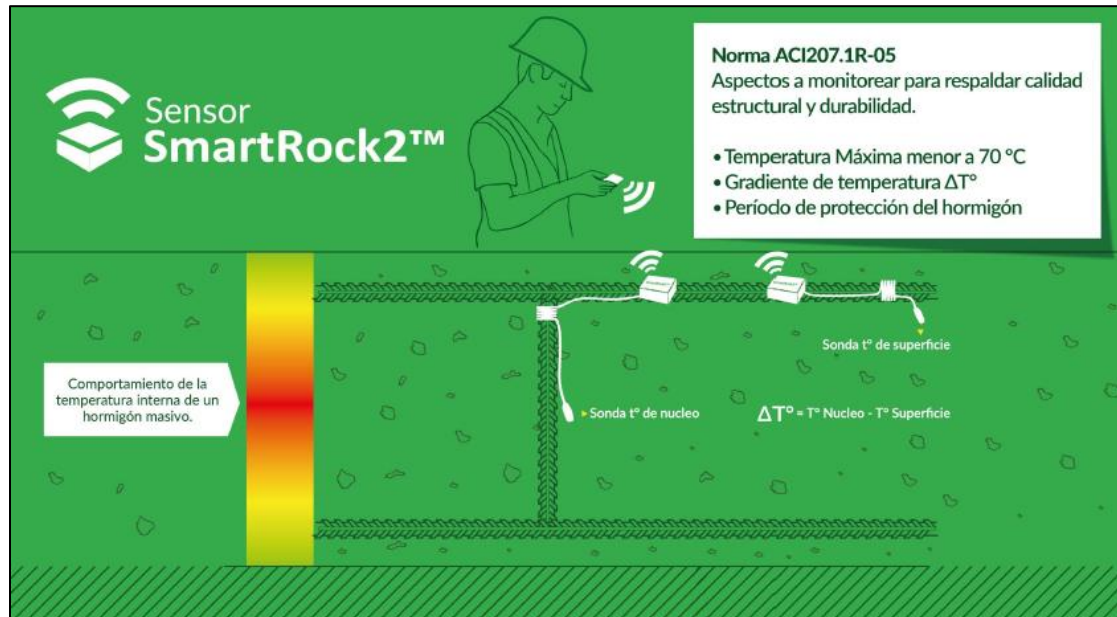
- Sample No. (Número de muestra)
- Date Time (Fecha, en formato DD/MM/YYYY HH:MM am/pm)
- Temperature (Temperatura, en unidades de grados Celsius [°C])
- Maturity (Madurez, en unidades de grados Celsius por hora [°C-hrs])



- Strength (Resistencia, en unidades de mega Pascales [MPa])
- Status (Estado, que puede ser Antes/Instante Previo/Después de la colocación)

Sin embargo, el formato del documento presenta los datos separados por una coma, y para poder usarlos como base de cálculo, se traspasan a formato “.xlsx” (Microsoft Excel Worksheet), que luego de adecuar el formato de la planilla, resultan en lo presentado en la *Figura 10*). Esto se realizó para cada par de sensores presentes (núcleo y superficie) por punto de estudio, en ambos proyectos disponibles.

Figura 9: Esquema de colocación y medición con sensores SmartRock



(Fuente: Reporte Hormigón Masivo, Grupo BDL)

Figura 10: Planilla de cálculo base entregada por sensor SmartRock. Ejemplo para sensor superficie, en eje L-Ascensor, proyecto Padre Hurtado.

	A	B	C	D	E	F
1						
2	Concrete Temperature and Estimated Compressive Strength Report					
3	Project Name	Obra Padre Hurtado				
4	Section Name	Losa Fundación Núcleo				
5	Sensor Name	Sensor corto eje L/ascensor				
6	Units	Metric				
7	Maturity Calibration	Demo mix 2				
8	Method Name	Temperature Time Factor				
9	Calibration coefficient	1.00	9.70			
10	Datum temperature [Degree C]	0				
11	Recording Start Time	2018-02-23 10:56 a. m.				
12	Pouring Time	2018-02-27 2:00 p. m.				
13	Strength [Mpa]	42.1				
14	Maturity [Degree C-hrs]	17275				
15	Time Locale	-04 -04:00:00				
16						
17	Sample No.	Date Time	Temperature [Degree C]	Maturity [Degree C-hrs]	Strength [Mpa]	Status
18	1	2/23/2018 10:56:04 a. m.	23,41	0,00	0,00	Before Pouring
19	2	2/23/2018 11:26:04 a. m.	22,22	0,00	0,00	Before Pouring
20	3	2/23/2018 11:56:04 a. m.	24,79	0,00	0,00	Before Pouring
21	4	2/23/2018 12:26:04 p. m.	27,39	0,00	0,00	Before Pouring
22	5	2/23/2018 12:56:04 p. m.	27,08	0,00	0,00	Before Pouring
23	6	2/23/2018 1:26:04 p. m.	29,87	0,00	0,00	Before Pouring
24	7	2/23/2018 1:56:04 p. m.	27,99	0,00	0,00	Before Pouring
25	8	2/23/2018 2:26:04 p. m.	29,22	0,00	0,00	Before Pouring
26	9	2/23/2018 2:56:04 p. m.	29,50	0,00	0,00	Before Pouring
27	10	2/23/2018 3:26:04 p. m.	29,45	0,00	0,00	Before Pouring
28	11	2/23/2018 3:56:04 p. m.	31,65	0,00	0,00	Before Pouring
29	12	2/23/2018 4:26:04 p. m.	29,59	0,00	0,00	Before Pouring
30	13	2/23/2018 4:56:04 p. m.	29,87	0,00	0,00	Before Pouring
31	14	2/23/2018 5:26:04 p. m.	32,32	0,00	0,00	Before Pouring
32	15	2/23/2018 5:56:04 p. m.	32,99	0,00	0,00	Before Pouring

(Fuente: Elaboración Propia, en base a datos obtenidos en software Microsoft Excel)

▪ **Depuración de datos e identificación de zonas de interés**

Con las planillas de datos disponibles, es necesario tener en cuenta solo aquellos valores que aportan al estudio de los gradientes. Los sensores comienzan a medir a temperatura apenas son instalados y activados, pero la resistencia comienza a medirse cuando entra en contacto con la mezcla de hormigón. Por lo tanto, todos los datos obtenidos anteriormente deben ser descartados. Para esto, uniendo en una sola planilla los datos correspondientes a núcleo y superficie de un eje de monitoreo, utilizando un formato de tabla, se filtran por la columna de “Status”, donde se dejan solo aquellos que posean la etiqueta de Instante Previo (*Previous Pouring*) y Después (Before Pouring), que refiere a las etapas de colocación de hormigón. El resultado de esta depuración se muestra en la *Figura 11*.

Figura 11: Formato final de planilla de cálculo, para datos obtenidos en cada eje de estudio. Ejemplo para sensor superficie y núcleo, en eje L-Ascensor, proyecto Padre Hurtado

SENSOR SUPERFICIAL EJE(L)-ASC					SENSOR NÚCLEO EJE(L)-ASC						
Sample No.	Date Time	Temperature (Degrees C)	Maturity (Days-C-hrs)	Strength (Mpa)	Status	Sample No.	Date Time	Temperature (Degrees C)	Maturity (Days-C-hrs)	Strength (Mpa)	Status
195	2/27/2018 11:56:04 a. m.	18.66	0.00	0.00	Before Pouring	195	2/27/2018 11:57:09 a. m.	25.90	0.00	0.00	Previous Pouring
196	2/27/2018 12:26:04 p. m.	22.44	0.00	0.00	Before Pouring	196	2/27/2018 12:27:09 p. m.	25.97	11.60	11.30	After Pouring
197	2/27/2018 12:56:04 p. m.	19.32	0.00	0.00	Before Pouring	197	2/27/2018 12:57:09 p. m.	25.82	24.50	14.50	After Pouring
198	2/27/2018 1:26:04 p. m.	24.65	0.00	0.00	Before Pouring	198	2/27/2018 1:27:09 p. m.	25.86	37.40	16.30	After Pouring
199	2/27/2018 1:56:04 p. m.	22.33	0.00	0.00	Previous Pouring	199	2/27/2018 1:57:09 p. m.	25.99	50.40	17.50	After Pouring
200	2/27/2018 2:26:04 p. m.	23.08	9.70	10.60	After Pouring	200	2/27/2018 2:27:09 p. m.	26.17	63.40	18.50	After Pouring
201	2/27/2018 2:56:04 p. m.	20.33	20.30	19.70	After Pouring	201	2/27/2018 2:57:09 p. m.	26.49	76.60	19.30	After Pouring
202	2/27/2018 3:26:04 p. m.	21.16	30.60	13.40	After Pouring	202	2/27/2018 3:27:09 p. m.	27.08	90.00	20.00	After Pouring
203	2/27/2018 3:56:04 p. m.	21.51	41.50	16.70	After Pouring	203	2/27/2018 3:57:09 p. m.	27.83	104.00	20.60	After Pouring
204	2/27/2018 4:26:04 p. m.	21.69	52.10	17.70	After Pouring	204	2/27/2018 4:27:09 p. m.	28.90	118.00	21.10	After Pouring
205	2/27/2018 4:56:04 p. m.	21.69	63.00	18.50	After Pouring	205	2/27/2018 4:57:09 p. m.	30.15	133.00	21.60	After Pouring
206	2/27/2018 5:26:04 p. m.	21.73	73.80	19.10	After Pouring	206	2/27/2018 5:27:09 p. m.	31.61	148.00	22.10	After Pouring
207	2/27/2018 5:56:04 p. m.	22.61	84.90	19.70	After Pouring	207	2/27/2018 5:57:09 p. m.	33.71	164.00	22.50	After Pouring
208	2/27/2018 6:26:04 p. m.	22.55	96.10	20.20	After Pouring	208	2/27/2018 6:27:09 p. m.	36.79	182.00	22.90	After Pouring
209	2/27/2018 6:56:04 p. m.	21.60	107.00	20.70	After Pouring	209	2/27/2018 6:57:09 p. m.	38.28	201.00	23.30	After Pouring
210	2/27/2018 7:26:04 p. m.	21.12	118.00	21.10	After Pouring	210	2/27/2018 7:27:09 p. m.	39.23	220.00	23.70	After Pouring
211	2/27/2018 7:56:04 p. m.	20.90	128.00	21.40	After Pouring	211	2/27/2018 7:57:09 p. m.	39.97	240.00	24.10	After Pouring
212	2/27/2018 8:26:04 p. m.	20.63	139.00	21.80	After Pouring	212	2/27/2018 8:27:09 p. m.	40.73	260.00	24.40	After Pouring
213	2/27/2018 8:56:04 p. m.	20.33	149.00	22.10	After Pouring	213	2/27/2018 8:57:09 p. m.	41.44	281.00	24.70	After Pouring
214	2/27/2018 9:26:04 p. m.	20.15	159.00	22.40	After Pouring	214	2/27/2018 9:27:09 p. m.	42.16	302.00	25.10	After Pouring
215	2/27/2018 9:56:04 p. m.	19.93	169.00	22.60	After Pouring	215	2/27/2018 9:57:09 p. m.	42.83	323.00	25.30	After Pouring
216	2/27/2018 10:26:04 p. m.	19.71	179.00	22.90	After Pouring	216	2/27/2018 10:27:09 p. m.	43.40	344.00	25.60	After Pouring
217	2/27/2018 10:56:04 p. m.	19.49	189.00	23.10	After Pouring	217	2/27/2018 10:57:09 p. m.	43.98	366.00	25.90	After Pouring
218	2/27/2018 11:26:04 p. m.	19.36	198.00	23.30	After Pouring	218	2/27/2018 11:27:09 p. m.	44.50	388.00	26.10	After Pouring
219	2/27/2018 11:56:04 p. m.	19.16	208.00	23.50	After Pouring	219	2/27/2018 11:57:09 p. m.	44.97	411.00	26.40	After Pouring
220	2/28/2018 12:26:04 a. m.	19.32	218.00	23.70	After Pouring	220	2/28/2018 12:27:09 a. m.	45.44	433.00	26.60	After Pouring
221	2/28/2018 12:56:04 a. m.	19.27	227.00	23.90	After Pouring	221	2/28/2018 12:57:09 a. m.	45.86	456.00	26.80	After Pouring
222	2/28/2018 1:26:04 a. m.	19.32	237.00	24.00	After Pouring	222	2/28/2018 1:27:09 a. m.	46.23	479.00	27.00	After Pouring
223	2/28/2018 1:56:04 a. m.	19.45	247.00	24.20	After Pouring	223	2/28/2018 1:57:09 a. m.	46.53	502.00	27.20	After Pouring
224	2/28/2018 2:26:04 a. m.	19.67	257.00	24.40	After Pouring	224	2/28/2018 2:27:09 a. m.	46.84	526.00	27.40	After Pouring
225	2/28/2018 2:56:04 a. m.	19.84	266.00	24.50	After Pouring	225	2/28/2018 2:57:09 a. m.	47.08	549.00	27.60	After Pouring
226	2/28/2018 3:26:04 a. m.	20.06	276.00	24.70	After Pouring	226	2/28/2018 3:27:09 a. m.	47.33	573.00	27.80	After Pouring
227	2/28/2018 3:56:04 a. m.	20.41	287.00	24.80	After Pouring	227	2/28/2018 3:57:09 a. m.	47.52	597.00	27.90	After Pouring
228	2/28/2018 4:26:04 a. m.	20.90	297.00	25.00	After Pouring	228	2/28/2018 4:27:09 a. m.	47.70	620.00	28.10	After Pouring
229	2/28/2018 4:56:04 a. m.	21.47	307.00	25.10	After Pouring	229	2/28/2018 4:57:09 a. m.	47.83	644.00	28.20	After Pouring
230	2/28/2018 5:26:04 a. m.	22.17	318.00	25.50	After Pouring	230	2/28/2018 5:27:09 a. m.	47.89	668.00	28.40	After Pouring

(Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos en software Microsoft Excel)

### ■ Estandarización de mediciones y obtención de gradientes de temperatura

Cada sensor mide temperatura cada 30 minutos (por defecto), pero para efectos de gradiente de temperatura, es necesario que se esté comparando la medición en el mismo instante en núcleo y superficie, o al menos, uno que se aproxime a ser el mismo. Para esto, se estandarizan las mediciones, ubicando un cero absoluto para ambos sensores, desde donde se podrá ajustar las mediciones en intervalos fijos de 30 minutos, lo cual toma importancia al momento de identificar los instantes donde ocurran anomalías. Este cero absoluto también toma forma de hora inicial, lo que se ajusta con la hora de hormigonado. Además de esto, se programa una columna que muestre el número de día al que corresponde la medición (que cambia cada 24 horas de muestreo). Estas serán las 3 primeras columnas que se aprecian en la Figura 12.

Con esto, se procede a medir el gradiente de temperatura, bajo la siguiente fórmula:

$$\Delta T^{\circ} = |T^{\circ}_{i}{}^{\text{Núcleo}} - T^{\circ}_{i}{}^{\text{Superficie}}| [^{\circ}\text{C}] \quad (3.2.1)$$

Donde:

- $\Delta T^{\circ}$ : Gradiente de temperatura, medido en grados Celsius [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- $T^{\circ}_{i}{}^{\text{Núcleo}}$ : Temperatura registrada en el sensor del núcleo, para la muestra i.
- $T^{\circ}_{i}{}^{\text{Superficie}}$ : Temperatura registrada en el sensor del núcleo, para la muestra i.

La función valor absoluto entrega las magnitudes del gradiente y evita la incoherencia de valores negativos para esta diferencia. Esta operación se hace para todas las muestras disponibles para cada eje, y se presenta en la cuarta columna de la Figura 12, donde se señalan además aquellos valores que excedan los 20 [ $^{\circ}\text{C}$ ] que es límite definido como permitido en la sección 2.4 Control de Gradiente de Temperatura en Hormigones Masivos. Además, en la parte superior de dicha columna, se expone el valor máximo registrado para el gradiente de temperatura en el eje correspondiente.

Con estos datos disponibles, se procede a graficar un resumen para cada eje monitoreado donde se presentan:

- Desarrollo de temperatura en el tiempo (para núcleo y superficie)
- Desarrollo de gradiente de temperatura en el tiempo
- Curva de resistencia en el tiempo (para núcleo y superficie)

Estos gráficos están disponibles en el ANEXO A. Cabe mencionar además que, para el caso de la curva de resistencia en el tiempo, es necesario separar las gráficas entre núcleo y superficie, ya que, debido a su dispar desarrollo de temperaturas, implica una diferencia en la tasa de desarrollo de resistencia en ambas secciones, la cual será una de las bases de la comparativa en los análisis posteriores. Se incluye también en la curva de resistencia, en aquellos ejes que excedieron el gradiente máximo, una demarcación diferente (color rojo) para aquellas resistencias que se desarrollaron en un gradiente de temperatura mayor a 20 [°C] entre núcleo y superficie.

Figura 12: Estandarización de datos, cálculo de gradiente de temperatura y diferencia de resistencia. Ejemplo en eje L-Ascensor, proyecto Padre Hurtado

	P	Q	R	S	T	U
	Intervalo	Intervalo	Intervalo	Máx. $\Delta T^\circ$ [°C]	Máx. $\Delta Res$ [Mpa]	
	0:30:00	0,5	1	27,27	7,90	
	Hora	Tiempo [hrs]	Día	$\Delta T^\circ$ [°C]	Diferencia Resistencia [Mpa]	
12:30:00	0	1	✓ 3,33	11,3		
13:00:00	0,5	1	✓ 2,59	14,5		
13:30:00	1	1	✓ 1,21	16,3		
14:00:00	1,5	1	✓ 3,46	17,5		
14:30:00	2	1	✓ 4,09	7,9		
15:00:00	2,5	1	✓ 6,16	5,6		
15:30:00	3	1	✓ 5,92	4,6		
16:00:00	3,5	1	✓ 6,34	3,9		
16:30:00	4	1	✓ 7,21	3,4		
17:00:00	4,5	1	✓ 8,46	3,1		
17:30:00	5	1	✓ 9,88	3		
18:00:00	5,5	1	✓ 11,10	2,8		
18:30:00	6	1	✓ 14,44	2,7		
19:00:00	6,5	1	✓ 16,68	2,6		
19:30:00	7	1	✓ 18,11	2,6		
20:00:00	7,5	1	✓ 19,07	2,7		
20:30:00	8	1	✗ 20,10	2,6		
21:00:00	8,5	1	✗ 21,11	2,6		
21:30:00	9	1	✗ 22,01	2,7		
22:00:00	9,5	1	✗ 22,90	2,7		
22:30:00	10	1	✗ 23,69	2,7		
23:00:00	10,5	1	✗ 24,49	2,8		
23:30:00	11	1	✗ 25,14	2,8		
0:00:00	11,5	1	✗ 25,61	2,9		
0:30:00	12	1	✗ 26,12	2,9		
1:00:00	12,5	1	✗ 26,59	2,9		
1:30:00	13	1	✗ 26,91	3		
2:00:00	13,5	1	✗ 27,08	3		
2:30:00	14	1	✗ 27,17	3		
3:00:00	14,5	1	✗ 27,24	3,1		
3:30:00	15	1	✗ 27,27	3,1		
4:00:00	15,5	1	✗ 27,11	3,1		
4:30:00	16	1	✗ 26,80	3,1		
5:00:00	16,5	1	✗ 26,36	3,1		

(Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos en software Microsoft Excel)

▪ **Concepto de diferencia de resistencias**

Tal como se definió anteriormente, al separar las curvas de resistencia entre el núcleo y la superficie se abre una opción de comparativa entre ambas, en cuanto a su desarrollo en el tiempo. No suficiente con esto, se agrega opción adicional para la evaluación del comportamiento de las resistencias, en busca de estimar la presencia de un gradiente de temperatura fuera el límite propuesto. Para esto, se obtiene el valor correspondiente a la diferencia entre la resistencia del núcleo y la resistencia en superficie para un mismo instante de su desarrollo en el tiempo, tal como lo indica la siguiente fórmula:

$$\Delta Res = |Res_i^{Núcleo} - Res_i^{Superficie}| [MPa] \quad (3.2.2)$$

Donde:

- $\Delta Res$ : Diferencia de resistencia, medida en mega pascales [MPa].
- $Res_i^{Núcleo}$ : Resistencia estimada en el sensor del núcleo, mediante método de madurez, para la muestra en el instante  $i$ .
- $Res_i^{Superficie}$ : Resistencia estimada en el sensor de superficie, mediante método de madurez, para la muestra en el instante  $i$ .

Al igual que en el caso del gradiente de temperatura, se agrega la función valor absoluto para evitar los valores de resistencia a la compresión negativas, ya que solo nos interesa la magnitud de la diferencia.

Este valor se muestra en la quinta columna de la *Figura 12*, además de identificar la diferencia máxima ocurrida en la parte superior de la misma.

### 3.3. Análisis Gráfico de Datos

Con el fin de encontrar una relación entre el desarrollo de resistencias con la posible ocurrencia de un gradiente de temperatura por sobre el máximo permitido, es que se dispone de un análisis por tramos temporales, tanto de la curva de resistencia para núcleo y superficie, como para los valores de la diferencia de resistencia entre ambas secciones. Esto tiene por objetivo un estudio más focalizado, en cuanto a la búsqueda de parámetros que sugieran una tendencia a edades tempranas, sobre la presencia o no presencia de un gradiente de temperatura excesivo, además de mostrar la posible influencia de las temperaturas ambiente y de colocación dentro de estos fenómenos que se quieren evitar.

Uno de los parámetros a evaluar en las gráficas, que se describirán a continuación, es la “línea de tendencia”, y los coeficientes que las definen, que actuarán como una “regla” para poder estudiar comparativamente todas las curvas construidas. Para el caso de este trabajo, el modelo de regresión utilizado será de tipo polinomial, cuya ecuación de la curva se define como:

$$Res(t) = \pm a \cdot t^2 \pm b \cdot t \pm c \quad (3.3.1)$$

Donde:

- $a$ : coeficiente cuadrático
- $b$ : coeficiente lineal
- $c$ : coeficiente de posición
- $Res(t)$ : Resistencia en función del tiempo [MPa]
- $t$ : Tiempo [hrs]

El objetivo de esta regresión es evaluar la variación de estos coeficientes, principalmente del  $a$  y el  $b$ , y comparar su comportamiento entre aquellos ejes que si tuvieron problemas de gradiente de

temperatura por sobre los 20 [°C] con los aquellos que no, estudiando sus valores en cada tramo de tiempo.

La efectividad de este modelo será cuantificada por medio del coeficiente de determinación o  $R^2$ , el cual se mueve entre 0 y 1, y que indicará la validez con la que se representa a la totalidad de los datos dentro de la curva de tendencia. Si bien, en un principio, se optó por utilizar un modelo de regresión lineal para describir la tendencia de los datos, fueron los bajos valores de  $R^2$  que se obtuvieron los que descartaron la validez de ese modelo, cuestión que cambió drásticamente con la opción de una regresión polinomial, obteniendo curvas más representativas en la mayoría de los casos.

#### ▪ **Análisis de curva de madurez por tramo, para superficie y núcleo**

Para ambos proyectos en estudio, se construye la curva de desarrollo de resistencia, para núcleo y superficie, para cada eje monitoreado. Esto se hace para periodos definidos de tiempo, que difieren en su valor final entre proyectos, pero que fueron seleccionados convenientemente, con el fin de poder representar íntegramente las singularidades térmicas en el proceso de fraguado. Para cada proyecto, los intervalos de estudio fueron los siguientes:

- Proyecto Padre Hurtado: 6, 12, 18, 24 y 48 hrs después del hormigonado.
- Proyecto Infinity: 6, 12, 18, 24 y 36 hrs después del hormigonado.

Para cada curva de desarrollo, se agregará una línea de tendencia, en base a un modelo de regresión polinomial, cuyos coeficientes se entregan además en la sección de Resultados (ver desde *Tabla 3* hasta *Tabla 9*).

Las gráficas construidas para cada sensor, en ambos proyectos, se muestran en detalle en el ANEXO B. Además de lo anterior, se entrega, para cada proyecto y tramo de tiempo estudiado, una gráfica resumen que separa el desarrollo de resistencias en superficie y en núcleo, con el fin de facilitar su comprensión y posterior análisis (ver desde *Figura 13* hasta *Figura 22* para Proyecto Padre Hurtado; desde *Figura 23* hasta *Figura 32* para Proyecto Infinity).

#### ▪ **Análisis de diferencia de resistencia por tramo, para superficie y núcleo**

Se grafican, para cada eje en ambos proyectos, el valor de la diferencia de resistencia entre superficie y núcleo para cada tramo de tiempo en estudio (que coinciden con los tramos entregados en el punto anterior), con los objetivos ya mencionados en la sección 3.2 Obtención y Procesamiento de Datos, en el punto correspondiente a la diferencia de resistencias. Como adicional, se agregará una gráfica que estudie los tramos de tiempo por separado, no de modo acumulativo como se había hecho hasta ahora, con el fin de focalizar la comparación de la variación de los datos en cada tramo de tiempo, y no solo siguiendo una línea que comience desde el momento de hormigonado.

Aquellas gráficas globales del período en estudio se definirán como “Gráficos acumulativos por tramo” (ver ANEXO C), y aquellas gráficas que tomen cada tramo de tiempo de manera individual, serán denominados como “Gráficos por tramo” (ver ANEXO D). Para cada curva de valores, se agregará una línea de tendencia, en base a un modelo de regresión polinomial, cuyos coeficientes se entregan, al igual que en el caso de las curvas de resistencia, en la sección de Resultados (ver desde *Tabla 10* hasta *Tabla 17*).

A modo de resumen, en la sección de Resultados se disponen los gráficos, acumulativos y por tramo de tiempo, para cada proyecto, incluyendo cada eje correspondiente dentro del periodo

de tiempo abarcado (ver desde *Figura 33* hasta *Figura 42* para Proyecto Padre Hurtado; ver desde *Figura 45* hasta *Figura 54* para Proyecto Infinity).

## 4. Resultados

A continuación, se presentarán los resultados provenientes del análisis de datos, para ambos proyectos en estudio (Padre Hurtado e Infinity). Para su mejor comprensión, serán expuestos de forma separada, según el proyecto al que correspondan.

### 4.1. Resumen Proyectos

Como parte del análisis de los resultados gráficos, se presentan los aspectos principales para cada proyecto estudiado, en cada uno de sus ejes (para Proyecto Padre Hurtado, ver *Tabla 1*; para Proyecto Infinity, ver *Tabla 2*). Esto, con el objetivo de dar un resumen que sirva como base para facilitar un posterior análisis de la información entregada por las gráficas.

Tabla 1: Resumen Proyecto Padre Hurtado

Sensor	Padre Hurtado					
	Eje 8		Eje 12		Eje L - Asc	
	Superficie	Núcleo	Superficie	Núcleo	Superficie	Núcleo
T° Ambiente [°C]	29,18	21,60	16,20	13,85	22,53	25,9
T° Colocación [°C]	29,50	21,20	13,50	17,17	22,08	25,77
Gradiente T° Máx. [°C]	18,39		24,03		27,27	
Intervalo Gradiente [hrs-hrs]	-		[13-20,5]		[8-19,5]	
Resistencia Final Gradiente [Mpa]	-	-	27,0	28,8	26,2	29,2
Dif. Resistencia Máx. [Mpa]	1,50		1,80		7,90	
Tiempo Dif. Resist. Máx. [hrs]	377,5		23,0		2,5	

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 2: Resumen Proyecto Infinity

Sensor	Infinity							
	Eje 7		Eje D		Eje 6		Eje 16	
	Superficie	Núcleo	Superficie	Núcleo	Superficie	Núcleo	Superficie	Núcleo
T° Ambiente [°C]	22,00	23,63	29,69	28,53	29,22	27,58	28,53	29,13
T° Colocación [°C]	22,17	23,59	28,63	29,36	29,50	28,44	29,13	30,01
Gradiente T° Máx. [°C]	6,00		20,14		15,68		10,03	
Intervalo Gradiente [hrs-hrs]	-		[35,5-38]		-		-	
Resistencia Final Gradiente [Mpa]	-	-	18,5	21,6	-	-	-	-
Dif. Resistencia Máx. [Mpa]	1,20		3,40		2,30		1,30	
Tiempo Dif. Resist. Máx. [hrs]	0,5		63,0		126,5		77,00	

(Fuente: Elaboración Propia)



## 4.2. Curva de desarrollo de resistencias

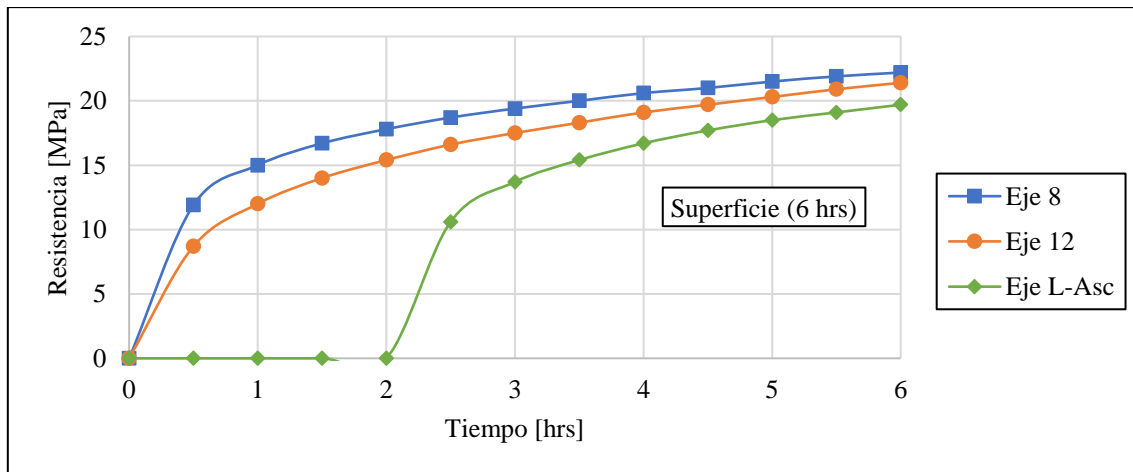
Tal como se mencionó anteriormente, cada proyecto fue analizado por tramos temporales, definidos convenientemente, con el fin de obtener información que permita establecer el comportamiento de las curvas de resistencia en edades tempranas, y comparar aquellos ejes donde hubo desarrollo de gradiente de temperatura por sobre el límite establecido ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) con aquellos que no.

A continuación, se presentan de forma separada las gráficas correspondientes para cada proyecto en estudio, de forma separada.

### 4.2.1. Desarrollo de resistencias. Proyecto Padre Hurtado.

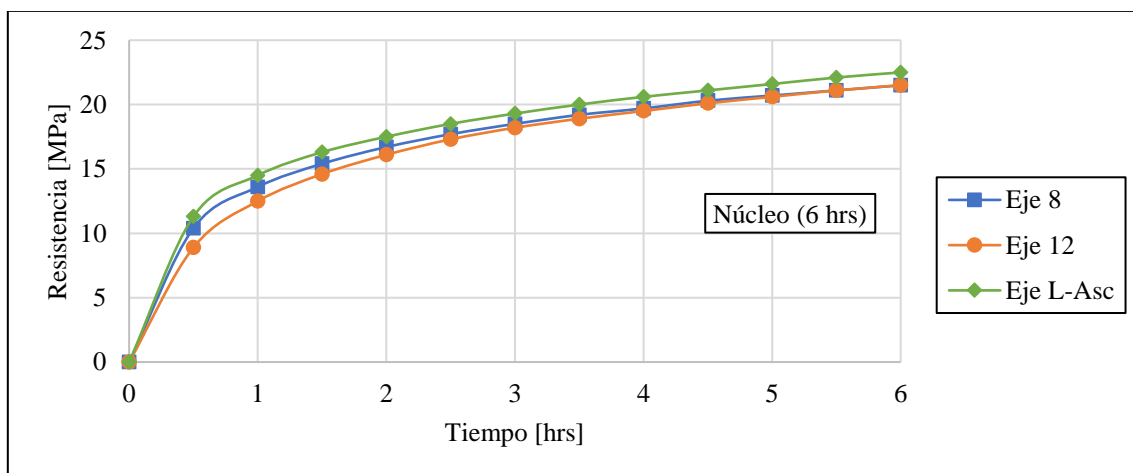
Para el edificio Padre Hurtado, se presentaron las siguientes curvas de desarrollo de resistencias, que como se mencionó anteriormente, serán analizadas por períodos de tiempo, a las 6, 12, 18, 24 y 48 horas después del hormigonado, de manera separada, para el sensor de superficie y núcleo. Las gráficas correspondientes se presentan desde la *Figura 13* hasta la *Figura 22*.

Figura 13: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (6 hrs)



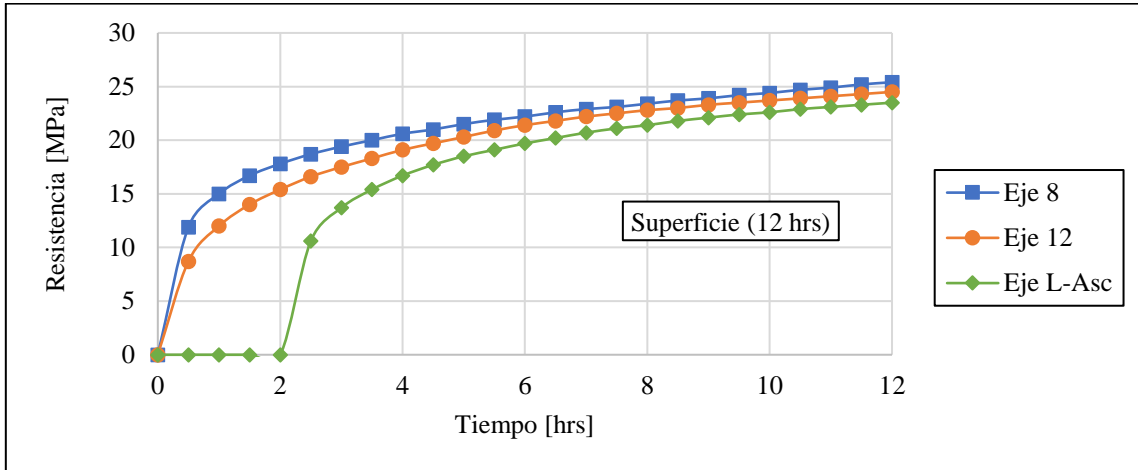
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 14: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (6 hrs)



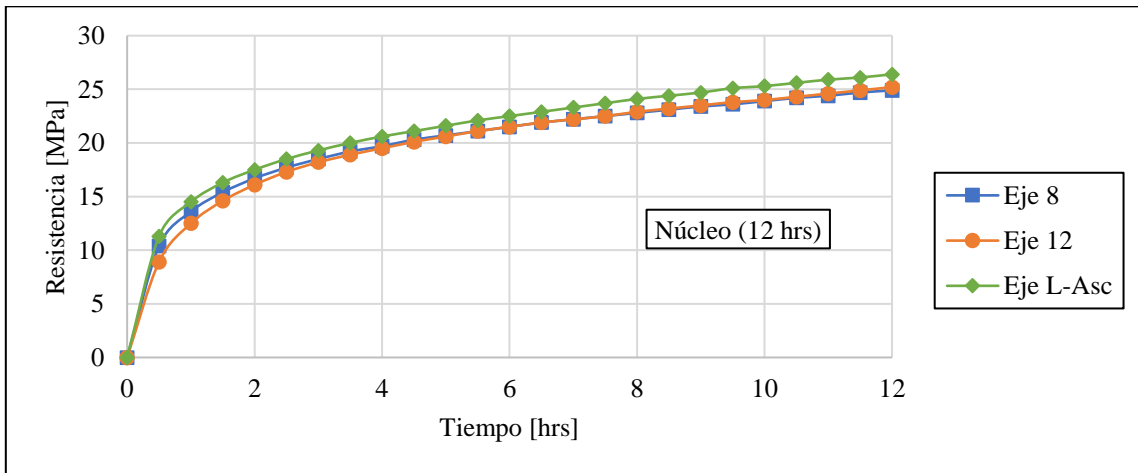
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 15: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (12 hrs)



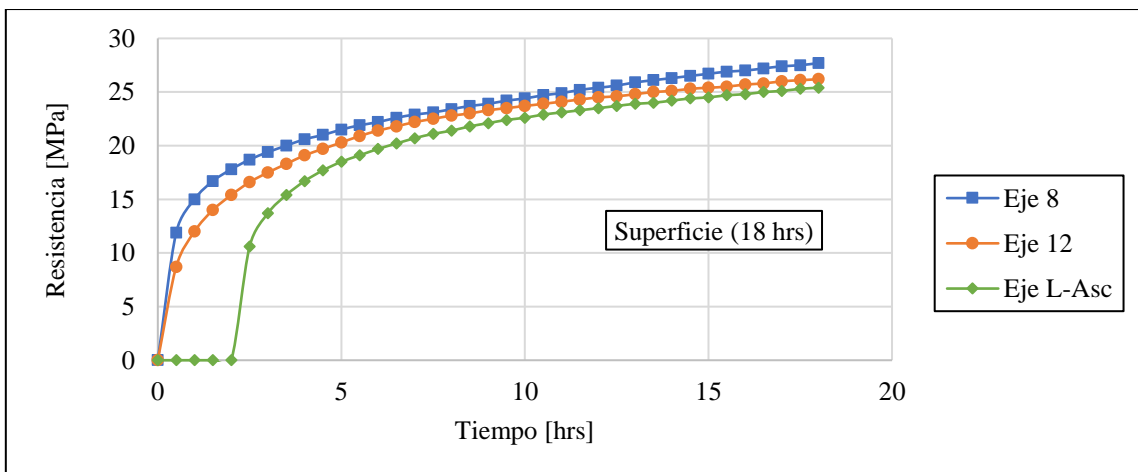
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 16: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (12 hrs)



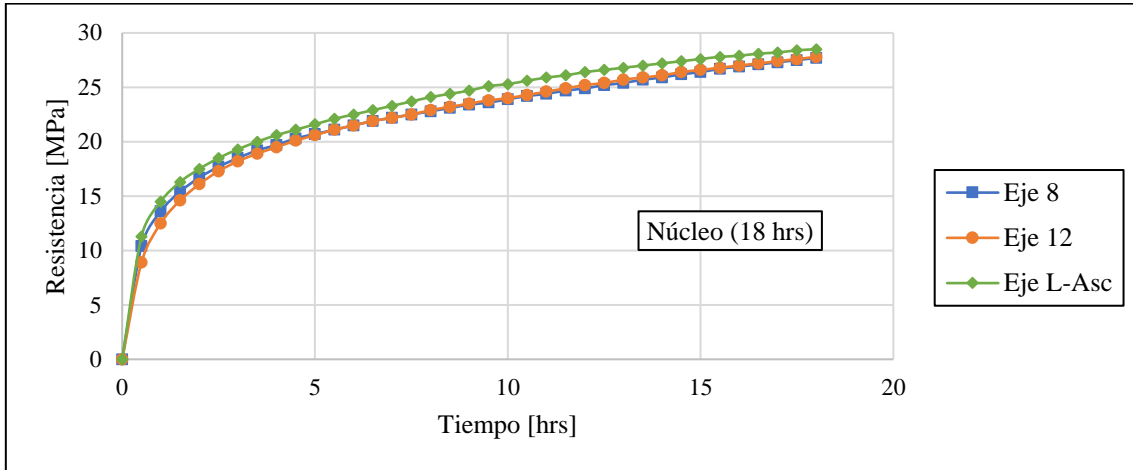
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 17: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (18 hrs)



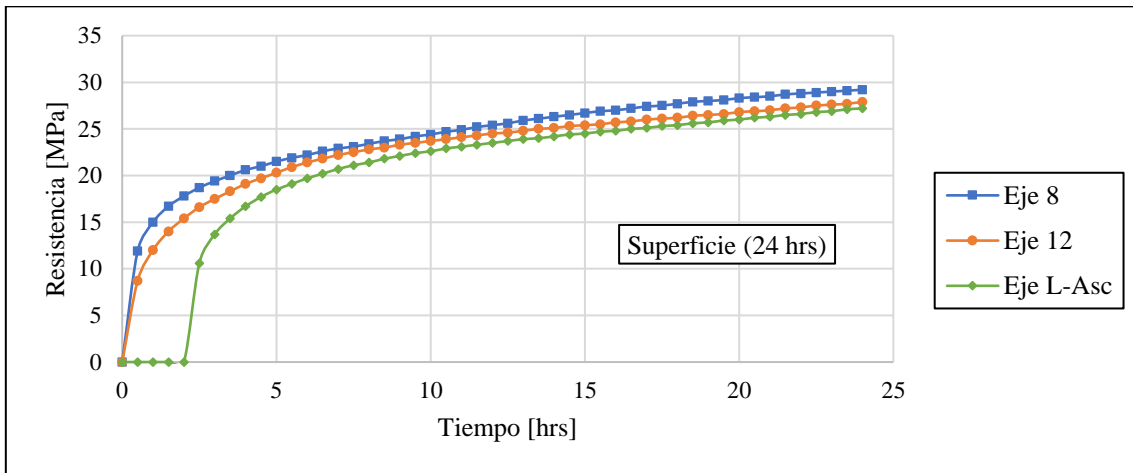
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 18: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (18 hrs)



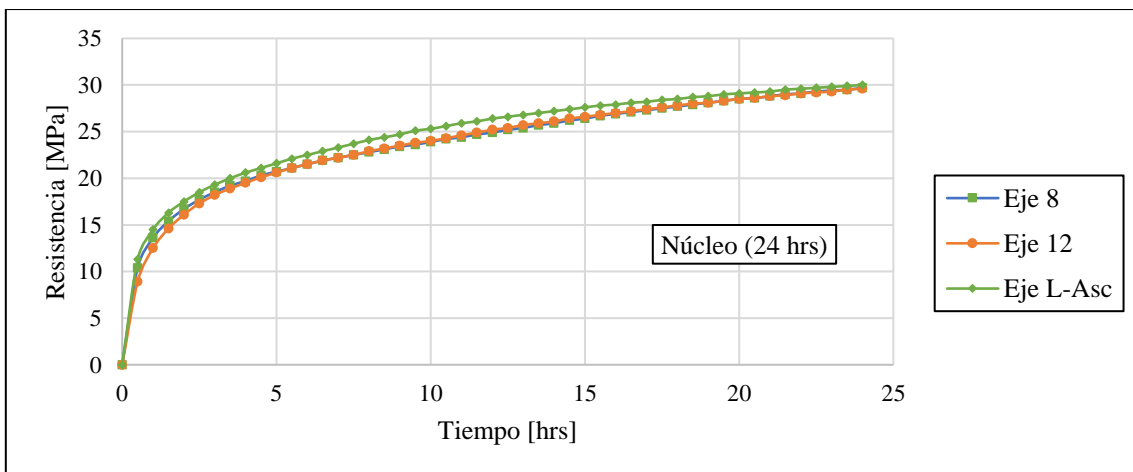
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 19: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (24 hrs)



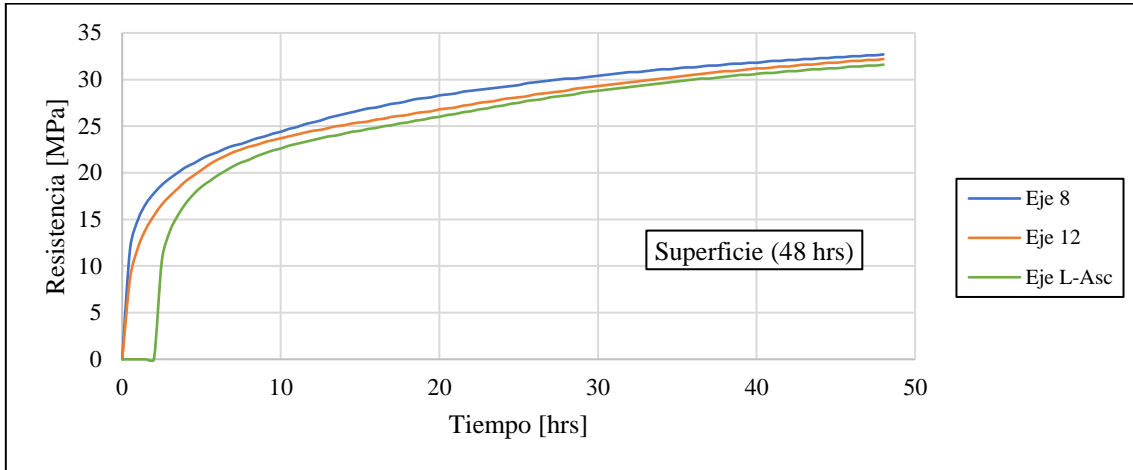
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 20: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (24 hrs)



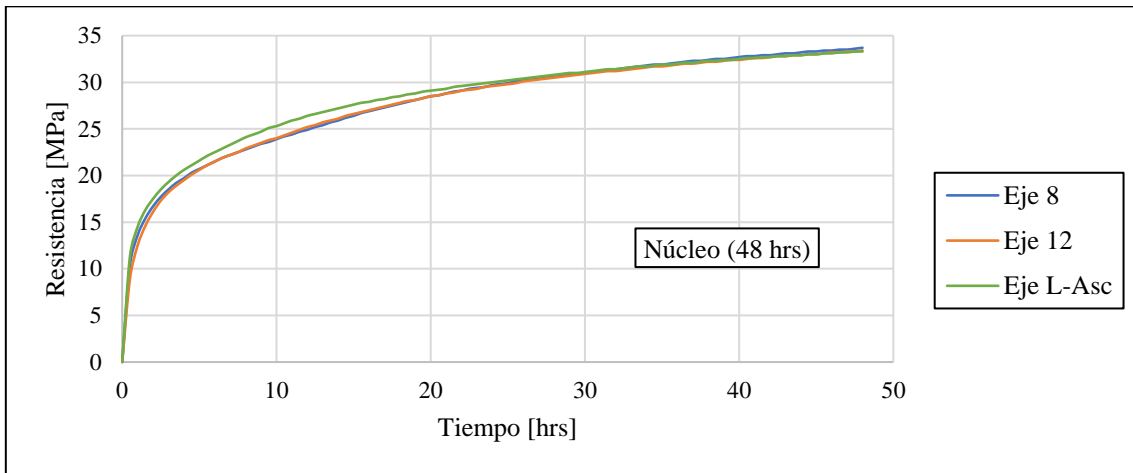
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 21: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor superficie (48 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 22: Desarrollo de resistencias proyecto Padre Hurtado, sensor núcleo (48 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

Como se indicó en la sección 3.3 Análisis Gráfico de Datos, cada una de estas curvas tuvo como complemento una línea de tendencia, bajo el modelo de regresión polinomial. Los coeficientes de cada una (coeficiente cuadrático ' $a$ ', lineal ' $b$ ' y de determinación ' $R^2$ ') para los 3 ejes correspondientes, en superficie y núcleo, se entregan en las tablas a continuación.

Tabla 3: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 8

Padre Hurtado
---------------

Eje 8						
Coeficientes Regresión Polinomial						
Superficie				Núcleo		
Tiempo [hrs]	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
6	-0,8272	7,4795	0,8589	-0,7854	7,274	0,8939
12	-0,1871	3,4455	0,8181	-0,1862	3,486	0,8554
18	-0,0754	2,176	0,8217	-0,0743	2,2121	0,8549
24	-0,0415	1,622	0,8365	-0,0403	1,6568	0,8705
48	-0,0109	0,8454	0,869	-0,0117	0,9276	0,9046

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 4: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 12

Padre Hurtado						
Eje 12						
Coeficientes Regresión Polinomial						
Superficie				Núcleo		
Tiempo [hrs]	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
6	-0,7017	6,9443	0,9316	-0,7706	7,3414	0,9285
12	-0,2014	3,7652	0,9081	-0,194	3,6717	0,8874
18	-0,0911	2,5002	0,8847	-0,0813	2,3872	0,8797
24	-0,0487	1,8063	0,8668	-0,0452	1,7982	0,885
48	-0,0106	0,8504	0,8726	-0,0125	0,9623	0,898

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 5: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje L-Asc

Padre Hurtado						
Eje L-Asc						
Coeficientes Regresión Polinomial						
Superficie				Núcleo		
Tiempo [hrs]	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
6	-0,5734	7,4933	0,9119	-0,8074	7,4762	0,8801
12	-0,2834	5,4861	0,9329	-0,1867	3,5732	0,855
18	-0,1372	3,6335	0,8931	-0,0826	2,3868	0,8611
24	-0,073	2,5817	0,8584	-0,0471	1,8058	0,8662
48	-0,0169	1,2344	0,8332	-0,0122	0,9135	0,8693

(Fuente: Elaboración Propia)

Un aspecto por considerar en el análisis es que, para el “Eje L-Asc”, el contacto del hormigón en el sensor del núcleo tiene un desfase de 2 horas con respecto al inicio de las mediciones en superficie, lo que explica que, para la curva correspondiente al “sensor superficie”, las primeras 4 mediciones tienen valor 0 [MPa].

En cuanto a los valores de ' $R^2$ ', para todas las curvas en estudio, este sobrepasa el 86% de representatividad, por lo que se considera válido el modelo de regresión polinomial en estos casos.

Tal como indica la *Tabla 1*, se aprecia un problema de gradiente de temperatura mayor a 20 [°C] en los ejes L-Asc y 12, a las 8 y 13 horas después del hormigonado, respectivamente.

Para los valores de temperatura ambiente, es el eje 8 el que posee el más alto registro a nivel de superficie (29,18 [°C]) y que, además, es quien desarrolla mayores valores de resistencia en el tiempo de análisis. Similar es lo ocurrido a nivel de núcleo, ahora correspondido por el eje L-Asc, quien posee el mayor registro para esta magnitud (25,9 [°C]), y que también desarrolla mayores valores de resistencia en el tiempo en comparación a los demás ejes en estudio. En el otro extremo, es el eje 12 quien posee los menores registros en superficie (16,2 [°C]) y a nivel de núcleo (13,85 [°C]). Sin embargo, es solo en este último caso donde también posee el menor desarrollo de resistencia, a diferencia de la superficie, donde la menor tasa de resistencia la posee el eje L-Asc.

En cuanto a la temperatura ambiente y su efecto en el desarrollo de gradientes, es el eje 8 donde se aprecia una mayor diferencia de magnitud entre la superficie y el núcleo (7,58 [°C]) en comparación a las diferencias de temperatura para el eje 12 (2,35 [°C]) y el eje L-Asc (3,37 [°C]). Esto sugiere una posible tendencia, donde a mayor diferencia de temperatura ambiente entre superficie y núcleo, disminuye el riesgo de presentar un problema de gradiente de temperatura en las primeras 48 horas luego del hormigonado.

Pasando al análisis de la temperatura de la mezcla al momento del hormigonado, en el caso de la superficie, es nuevamente el eje 8 quien posee el mayor registro (29,5 [°C]), que como ya se había mencionado, es también el eje que posee un mayor desarrollo de resistencia en el tiempo en este nivel. Para el núcleo, el eje L-Asc nuevamente es quien tiene el mayor valor de temperatura (25,77 [°C]), coincidiendo nuevamente con su mayor desarrollo de resistencia en el tiempo, en este nivel y en comparación a los demás ejes. Para el caso opuesto, es el eje 12 el que nuevamente posee los menores registros a nivel de superficie (13,5 [°C]) y núcleo (17,17 [°C]). Sin embargo, y coincidiendo con el caso de la temperatura ambiente, es solo en el núcleo donde mantiene esta tendencia en cuanto a resistencias, ya que en superficie quien tiene la menor tasa de desarrollo es el eje L-Asc.

Para el caso de la temperatura de colocación, es el eje 8 nuevamente quien registra la mayor diferencia de temperatura entre superficie y núcleo (8,3 [°C]), en comparación al eje 12 (3,67 [°C]) o al eje L-Asc (3,69 [°C]), lo cual sigue la misma tendencia mostrada para el efecto de la diferencia de la temperatura ambiente entre superficie y núcleo en el desarrollo de gradientes de temperatura por sobre el límite establecido. Como dato adicional, aquellos ejes que excedieron los 20 [°C] de gradiente, al momento de hormigonar, tenían una temperatura de mezcla a nivel de núcleo mayor a lo que se registró en la superficie.

Para definir la relación entre el desarrollo de resistencia con el desarrollo de un gradiente de temperatura mayor a 20 [°C], se optó por la comparación de los coeficientes correspondientes a las líneas de tendencia aplicadas para cada curva en busca de encontrar una tendencia en la variación de estos valores con el tiempo. Sin embargo, este análisis debe ser descartado, debido a la nula presencia de un patrón que indique este fenómeno, al menos en lo que a coeficientes ' $a$ ' y ' $b$ ' respecta.

No obstante, a ello, se aprecian ciertos aspectos cualitativos importantes en las curvas de resistencia, que se mencionan a continuación:

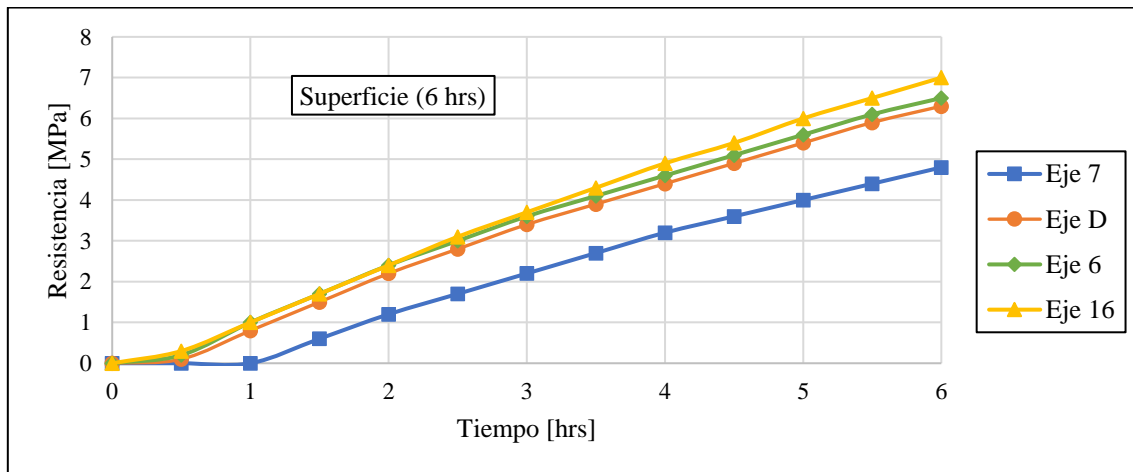
- Para las curvas correspondientes al desarrollo de resistencias en superficie, se mantiene un orden ascendente en cuanto a valores de resistencias logrados en el tiempo, siendo el eje L-Asc el de menor resistencia alcanzada y el eje 8 el de mayor resistencia lograda. Este orden, sin embargo, se ve modificado en el caso del desarrollo de resistencias a nivel de núcleo, ya que luego de las primeras 6 horas, se permuta el orden entre el eje 8 y el eje 12.
- Para el eje L-Asc, se denota una diferencia clara entre el desarrollo de resistencias a nivel de superficie y de núcleo, siendo en el primer caso aquel que menor resistencia alcanza en el periodo de estudio, pero en el segundo caso, es aquel que mayor resistencia logra de los 3 ejes estudiados.

Estos aspectos serán claves dentro de las bases de análisis en los siguientes puntos, ya que es en la comparación de diferencia de resistencias donde podrán tomar una forma cuantitativa por sobre un mero análisis visual de las gráficas presentes.

#### 4.2.2. Desarrollo de resistencias. Proyecto Infinity.

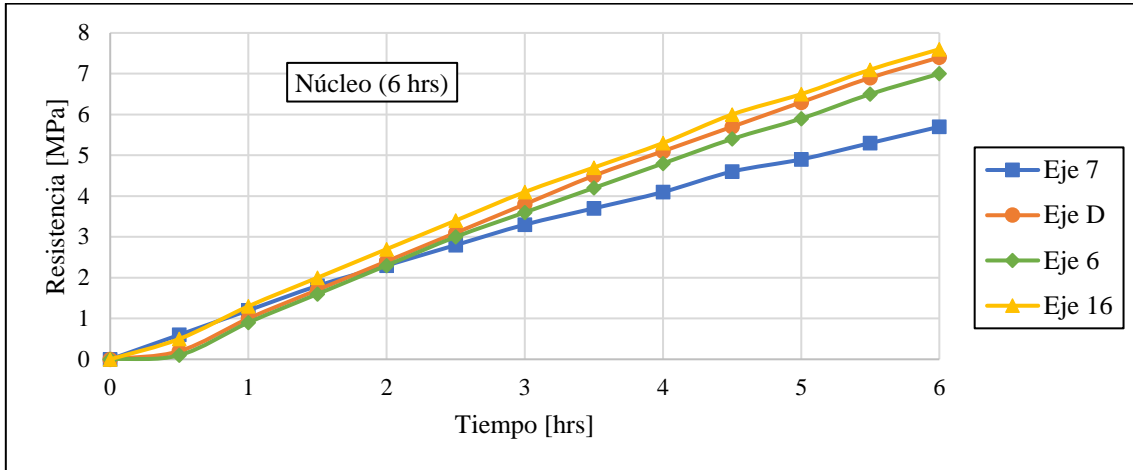
Para el edificio Infinity, se presentaron las siguientes curvas de desarrollo de resistencias, que como se mencionó anteriormente, serán analizadas por períodos de tiempo, a las 6, 12, 18, 24 y 36 horas después del hormigonado, de manera separada, para el sensor de superficie y núcleo. Las gráficas correspondientes se presentan desde la *Figura 23* hasta la *Figura 32*.

Figura 23: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (6 hrs)



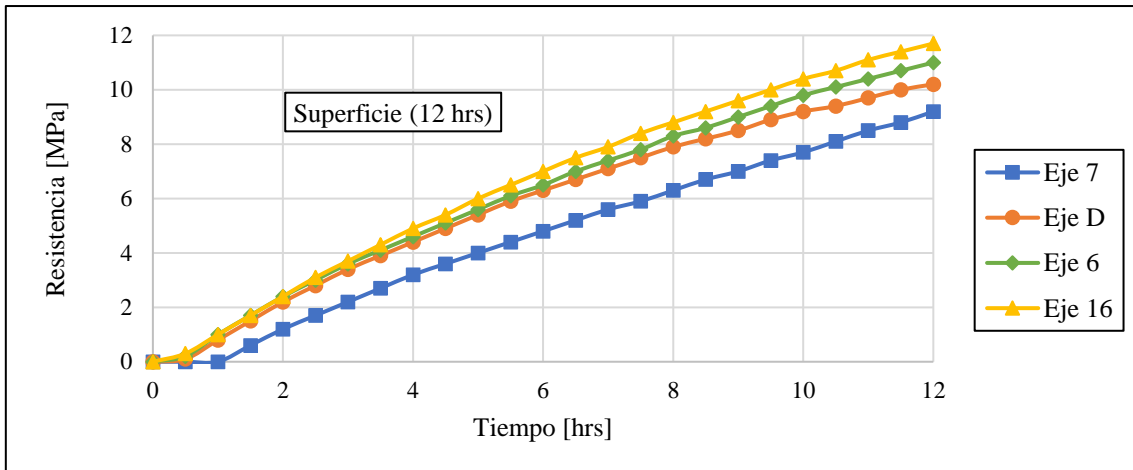
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 24: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (6 hrs)



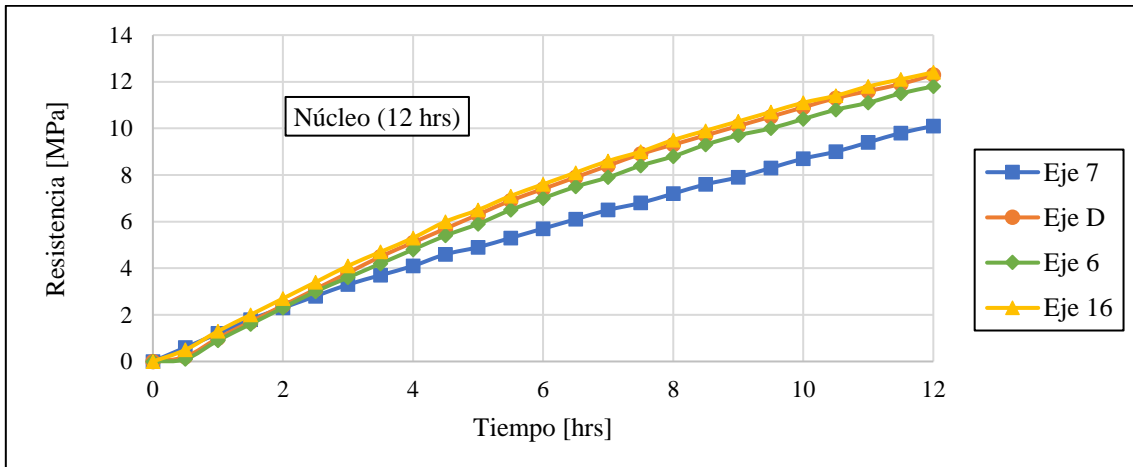
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 25: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (12 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

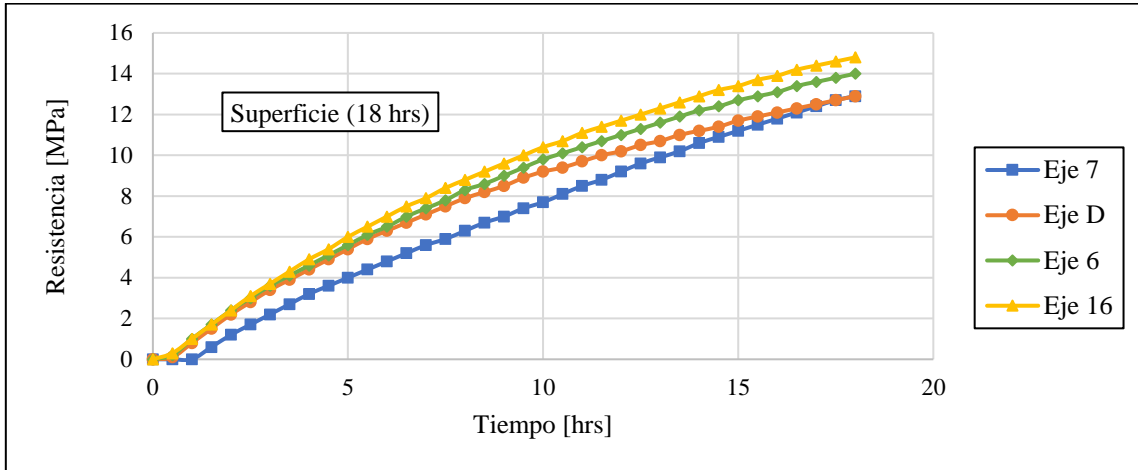
Figura 26: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (12 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

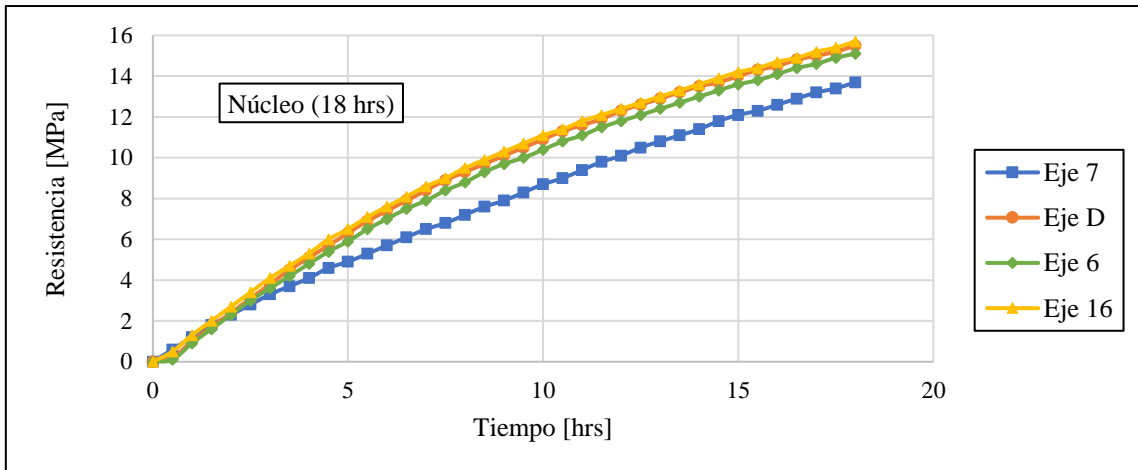


Figura 27: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (18 hrs)



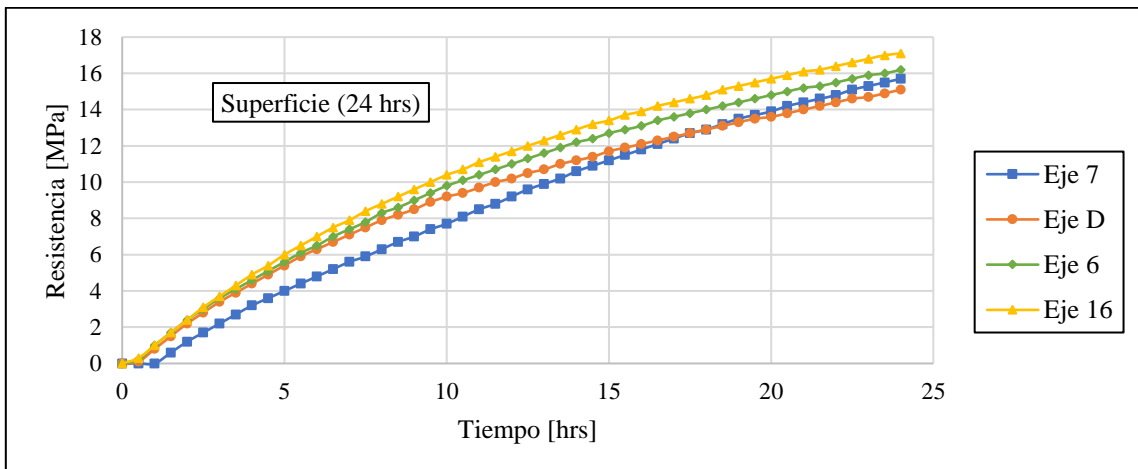
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 28: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (18 hrs)



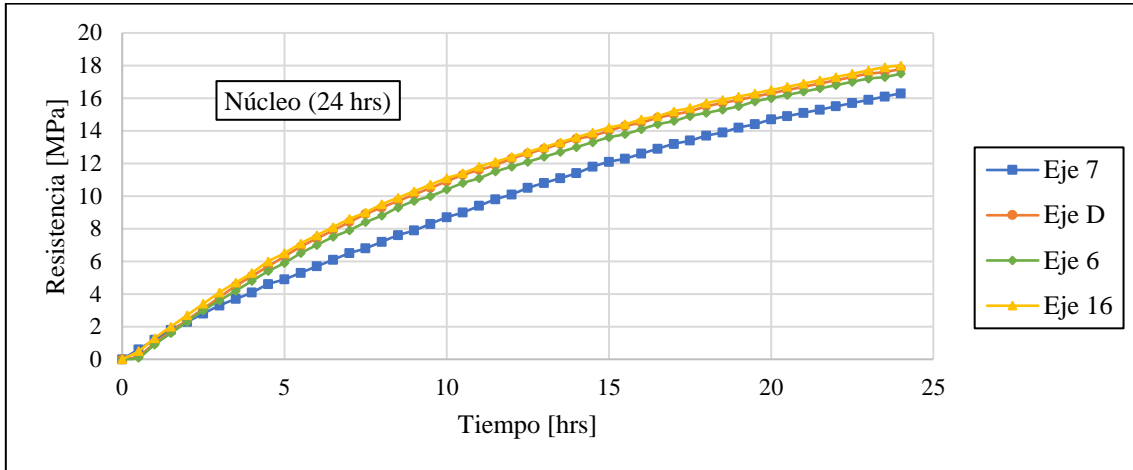
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 29: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (24 hrs)



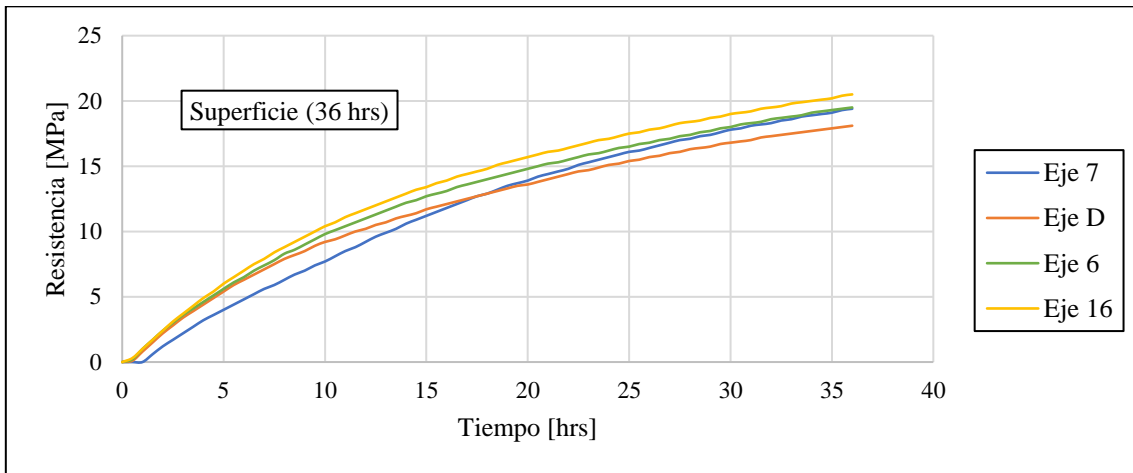
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 30: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (24 hrs)



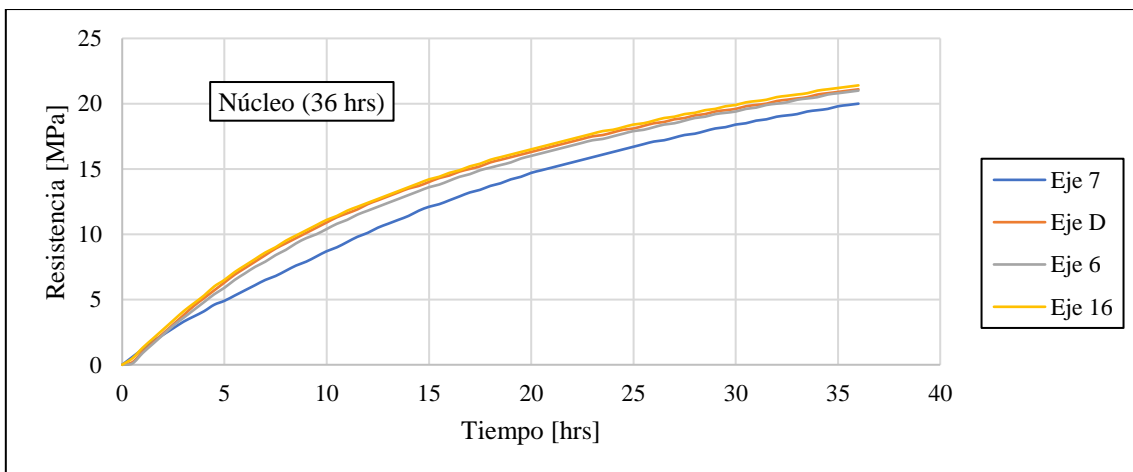
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 31: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor superficie (36 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 32: Desarrollo de resistencias proyecto Infinity, sensor núcleo (36 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

Nuevamente, se presentan los valores para los coeficientes cuadrático 'a', lineal 'b' y de determinación 'R<sup>2</sup>', para los 4 ejes en estudio, en tablas resumen que se presentan a continuación.

Tabla 6: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 7

Infinity						
Eje 7						
Coeficiente Polinomial						
Superficie				Núcleo		
Tiempo [hrs]	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	0,018	0,78	0,9872	-0,0484	1,2286	0,9996
12	-0,0118	0,9467	0,9972	-0,0177	1,0268	0,9989
18	-0,0102	0,9318	0,9989	-0,0128	0,9741	0,9994
24	-0,0113	0,949	0,9994	-0,0128	0,9743	0,9997
36	-0,0108	0,9345	0,9996	-0,0109	0,9267	0,9995

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 7: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje D

Infinity						
Eje D						
Coeficiente Polinomial						
Superficie				Núcleo		
Tiempo [hrs]	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	-0,0314	1,297	0,9965	-0,017	1,3975	0,9978
12	-0,0376	1,3256	0,9991	-0,0394	1,5249	0,9993
18	-0,0279	1,2099	0,9985	-0,0322	1,4381	0,9992
24	-0,02	1,0781	0,9966	-0,0249	1,3171	0,998
36	-0,012	0,8934	0,9937	-0,0155	1,0969	0,9939

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 8: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 6

Infinity						
Eje 6						
Coeficiente Polinomial						
Superficie				Núcleo		
Tiempo [hrs]	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	-0,0424	1,3816	0,9976	-0,0196	1,3439	0,9971
12	-0,032	1,3127	0,9994	-0,0346	1,4272	0,9993
18	-0,0262	1,2439	0,9994	-0,0284	1,3512	0,9993
24	-0,0211	1,1582	0,9987	-0,0225	1,2529	0,9986
36	-0,0132	0,9728	0,995	-0,0145	1,0661	0,9956

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 9: Coeficientes regresión polinomial para curva de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 16

Infinity						
Eje 16						
Coeficiente Polinomial						
	Superficie			Núcleo		
Tiempo [hrs]	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
6	-0,0274	1,3763	0,9984	-0,0326	1,491	0,9994
12	-0,035	1,4138	0,9996	-0,0406	1,5314	0,9998
18	-0,029	1,3419	0,9995	-0,0318	1,4241	0,9992
24	-0,0229	1,2407	0,9986	-0,0243	1,3002	0,998
36	-0,0144	1,0421	0,9948	-0,0151	1,0865	0,9943

(Fuente: Elaboración Propia)

En el caso de los valores para ' $R^2$ ', en las líneas de tendencia de este proyecto, todas superan el 99% de representatividad, por lo que se valida el modelo de regresión polinomial para estas gráficas.

Acorde a lo que se indica en la *Tabla 2*, solo el eje D presenta un problema de gradiente por sobre el límite permitido, alcanzando en este caso, los 20,14 [°C] a las 35 horas y media luego del hormigonado.

En cuanto a temperatura ambiente, es el eje 7 quien posee la menor lectura a nivel de superficie (22 [°C]) y también a nivel del núcleo (22,63 [°C]). Coincidentemente, es también el eje que tiene un menor desarrollo de resistencias en ambos casos, excepto pasadas las 17 horas de hormigonado, donde en superficie es desplazado por el eje D como el eje con menor desarrollo de resistencias en el tiempo. La mayor temperatura ambiente en superficie se marca en el eje D (29,69 [°C]), y en núcleo, en el eje 16 (29,13 [°C]). Este último, coincide con ser el eje con mayor resistencia desarrollada en el tiempo, a nivel de núcleo, pero no así el eje D y su desarrollo de resistencia a nivel de superficie, donde es superado por el eje 16 en todo el periodo de estudio.

La diferencia de temperatura ambiente, entre núcleo y superficie, para los cuatro ejes correspondientes al presente proyecto, alcanza valores mucho menores en comparación a los registrados en el proyecto Padre Hurtado, siendo el eje 6 quien presenta la mayor diferencia con 1,64 [°C]. Esto refuta la tendencia sugerida en la sección 4.2.1, sobre la relación inversamente proporcional de la diferencia de temperatura ambiente con la posibilidad de presentar un gradiente fuera del límite propuesto.

Ahora, tomando en cuenta la temperatura de colocación y su efecto en el desarrollo de resistencias, para este caso, el mayor valor se registra en el eje 6 (29, 5 [°C]) al nivel de superficie, y en el eje 16 (30,01 [°C]) para el nivel de núcleo. Este último, coincide en ser el eje con mayor desarrollo de resistencia en el tiempo, a nivel de núcleo, a diferencia de lo que ocurre a nivel de superficie, donde es el eje 16 quien registra el mayor desarrollo de resistencia (esto se asemeja a lo descrito para el efecto de la temperatura ambiente). En el otro extremo, el menor valor de temperatura de mezcla lo posee el eje 7, en superficie (22,17 [°C]) y núcleo (23,59[°C]), coincidiendo con ser el eje con menor desarrollo de resistencia en el periodo estudiado.

Tomando como referencia la diferencia de temperaturas de mezcla, según su registro en superficie y núcleo, el mayor valor está en el eje 7 (1,42 [°C]), y el eje D es quien presenta la menor diferencia captada (0,73 [°C]). Si bien, sugiere pensar que existe una tendencia a que, a menor diferencia de

temperatura de colocación se favorece la formación de un gradiente de temperatura, estos deltas son muy similares entre si (diferencia de menos de 1 [°C] entre el mayor y menor valor), lo que dificultaría poder generalizar esta regla para futuras referencias.

Al igual que en el caso del proyecto Padre Hurtado, se descarta el análisis del comportamiento para desarrollo de resistencias en base a los coeficientes que describen las líneas de tendencia en base al modelo de regresión polinómica, debido a la nuevamente nula presencia de un patrón que estime una relación entre la evolución de estos valores con el desarrollo de un gradiente de temperatura fuera del límite establecido.

Sin embargo, si se puede entregar una observación en base a las gráficas provistas, y que se transformará en la base del análisis por diferencias de resistencias entre el núcleo y la superficie para este proyecto. Esto, debido al notorio cambio en el que incurre la curva correspondiente al eje D, a nivel de superficie, que luego de la hora 17 después del hormigonado disminuye sus valores, incluso por debajo del eje 7.

### **4.3. Curva para diferencia de resistencia acumulativa y por tramo**

Tal como se mencionó anteriormente, existen ciertos aspectos cualitativos dentro de las curvas de desarrollo de resistencia, a simple vista, demuestran cierta tendencia a indicar la presencia de un gradiente excesivo de temperatura, en su comportamiento a través del tiempo. Sin embargo, realizar un análisis en base a curvas de resistencia a nivel de superficie y núcleo, por separado, no arroja valores concluyentes que puedan definir cuantitativamente estos fenómenos.

Es por esto por lo que, como método comparativo adicional, se agrega el análisis de los valores de la diferencia de resistencias alcanzadas entre la superficie y el núcleo de la estructura, para un mismo instante, entre el momento de hormigonado y a lo largo del período de monitoreo (tal como se explica en la sección 3.2).

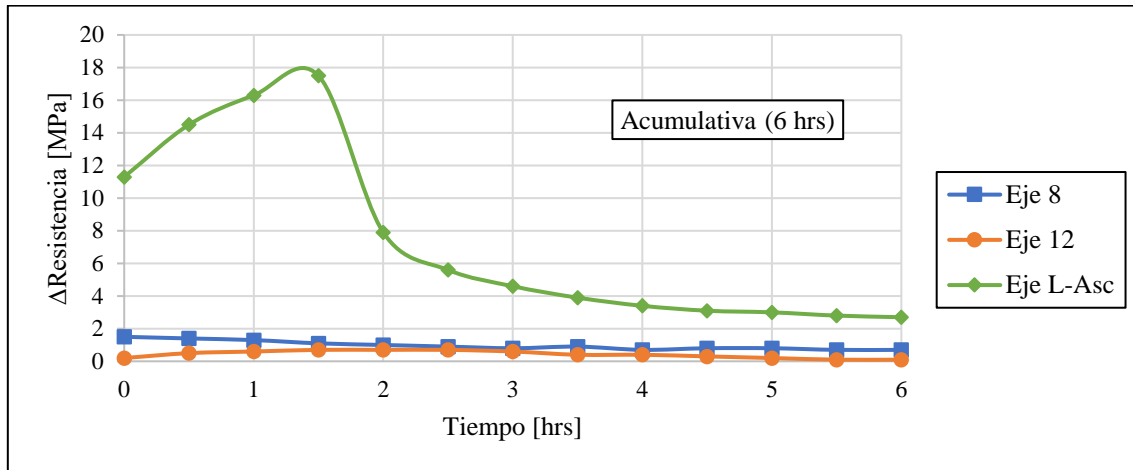
El objetivo de este nuevo valor está en poder relacionar el análisis de las resistencias a nivel de superficie y núcleo en un único valor, presentado en una gráfica versus el avance del tiempo de fraguado. Con esto, se podrá cuantificar la evolución de estas curvas, e indicar con mayor claridad un parámetro indicador de un posible problema de gradiente de temperatura, y que pueda ser utilizado como referencia para proyectos futuros.

A continuación, se presentarán estos valores de dos maneras distintas, pero relacionadas entre sí. Primero, se indican los valores por tramo de estudio para cada proyecto, de forma acumulativa en el tiempo, para luego entregar las curvas por cada tramo de forma individual, a modo de explicitar, de la forma más clara posible, como se comportan las curvas en el tiempo de análisis.

#### **4.3.1. Diferencia de resistencia acumulativa. Proyecto Padre Hurtado.**

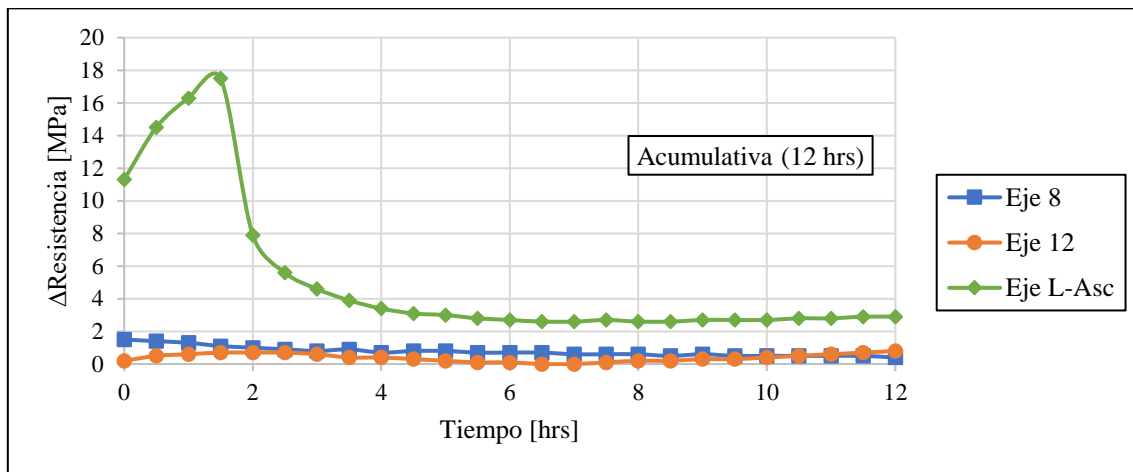
Se presentan a continuación, los valores obtenidos para la diferencia de resistencias desarrolladas entre superficie y núcleo, de manera acumulativa, para el proyecto Padre Hurtado y sus 3 ejes en estudio, en tramos de 6, 12, 18, 24 y 48 horas.

Figura 33: Diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



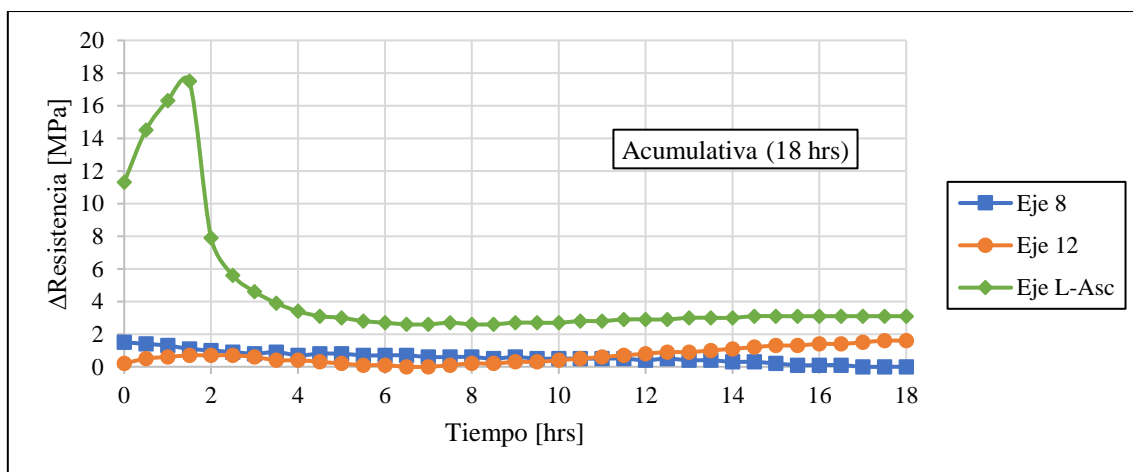
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 34: Diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



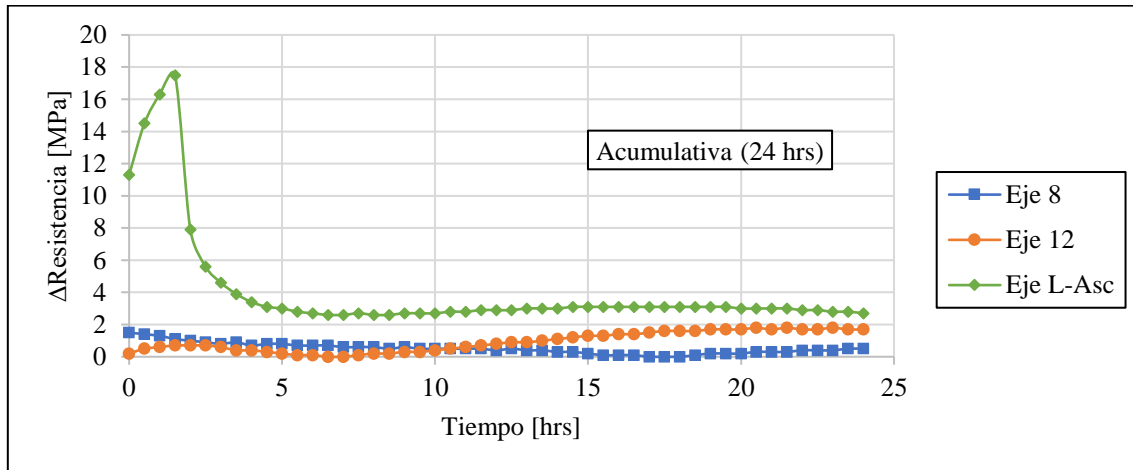
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 35: Diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



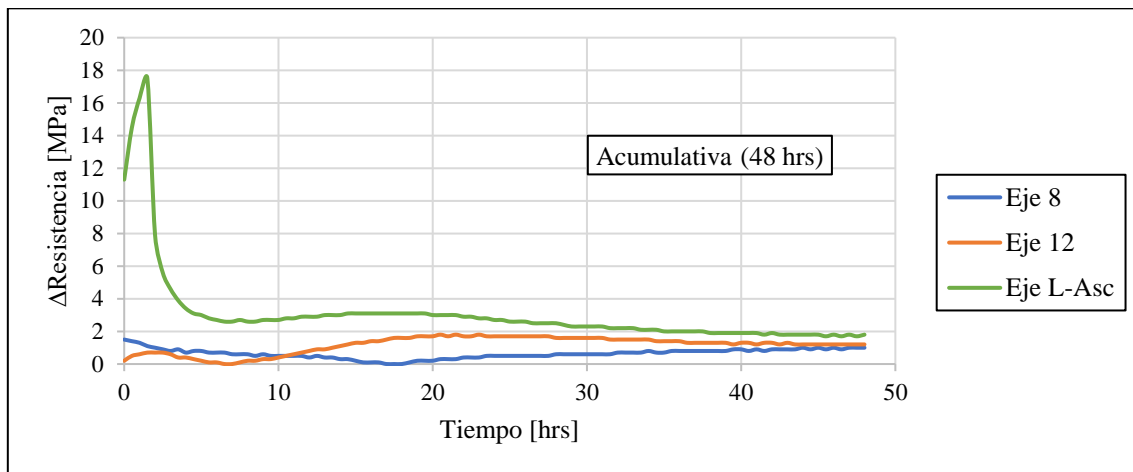
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 36: Diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 37: Diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



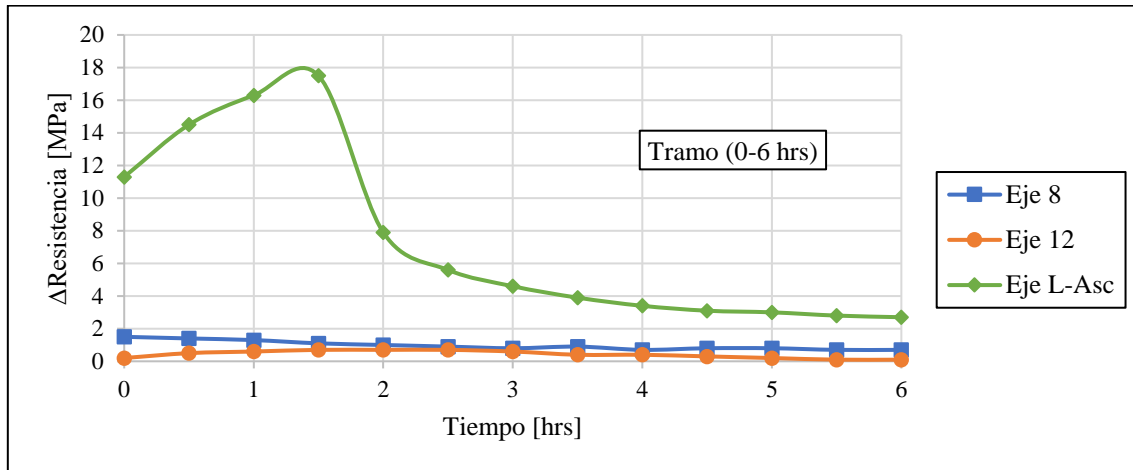
(Fuente: Elaboración Propia)

Como comentario adicional, y tal como se mencionó en la sección 4.2.1, el eje L-Asc tiene un desfase de 2 horas entre el contacto del hormigón en el núcleo y la superficie, lo que implica que la diferencia de resistencia, en su magnitud, corresponda a la resistencia que se estimó en el núcleo en este período de tiempo, mientras que la superficie aún no comenzaba el desarrollo de su curva. Esto explica la extraña forma de la curva en sus momentos iniciales, por lo que se considera válido para su análisis comparativo después del período señalado.

### 4.3.2. Diferencia de resistencia por tramo. Proyecto Padre Hurtado.

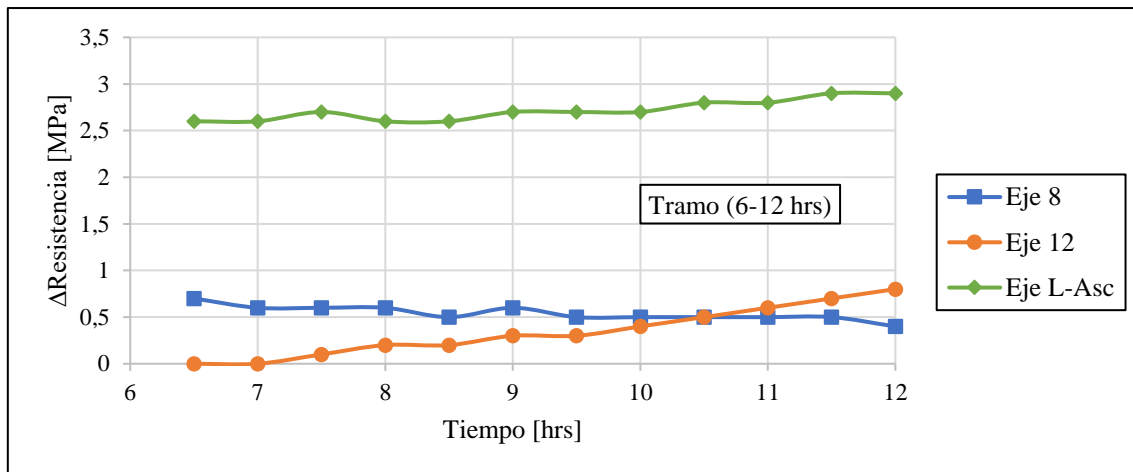
A modo de obtener una respuesta gráfica más precisa del período de monitoreo, se entregan a continuación las gráficas correspondientes al análisis por diferencia de resistencia en cada tramo de estudio, para para el proyecto Padre Hurtado y sus 3 ejes en estudio, en tramos de (0-6) horas, (6-12) horas, (12-18) horas, (18-24) horas y (24-48) horas.

Figura 38: Diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



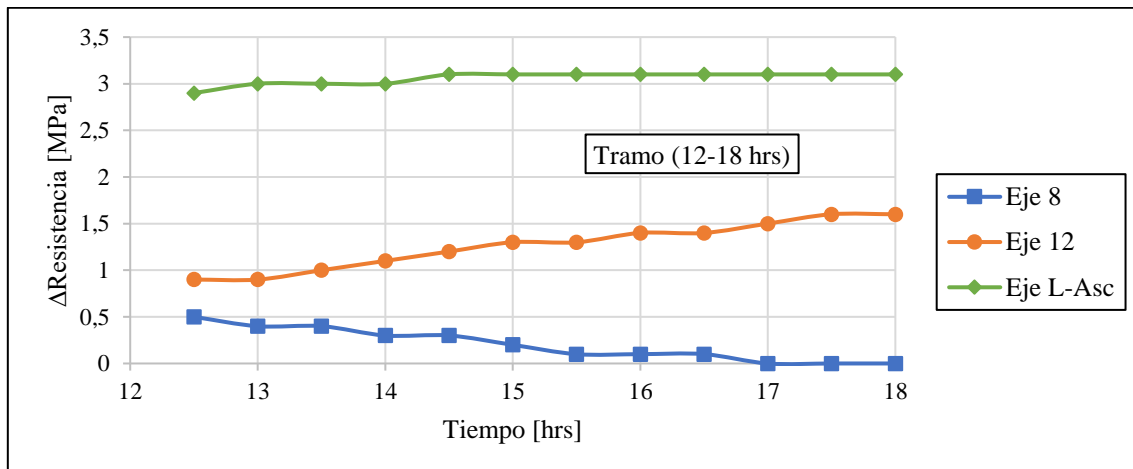
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 39: Diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



(Fuente: Elaboración Propia)

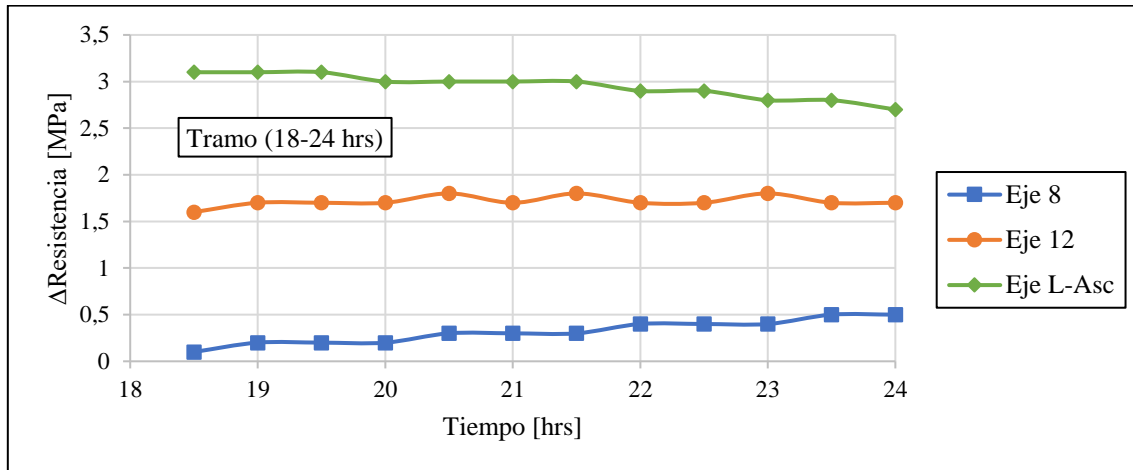
Figura 40: Diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



(Fuente: Elaboración Propia)

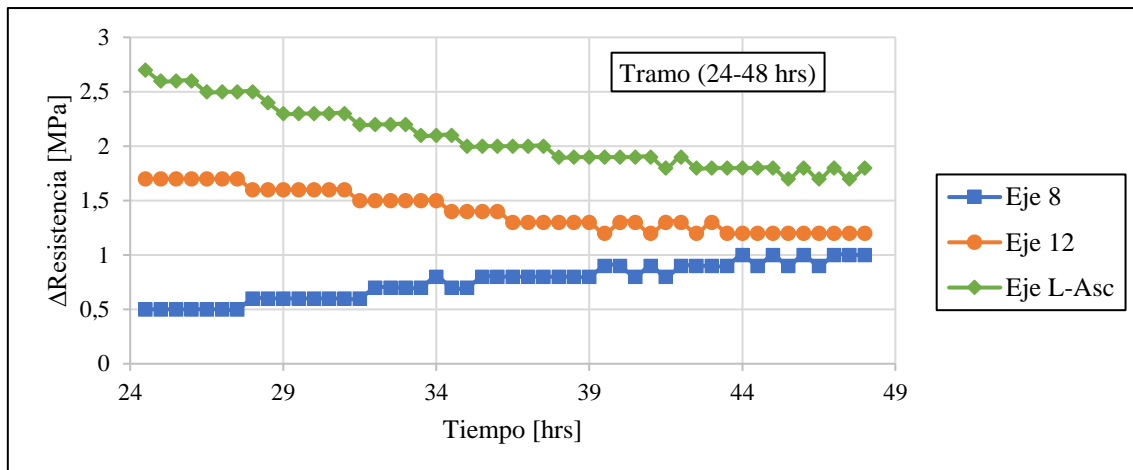


Figura 41: Diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 42: Diferencia de resistencia por tramo (24-48 hrs) entre superficie y núcleo, p. Padre Hurtado



(Fuente: Elaboración Propia)

Tal como se realizó para las curvas de resistencia entregadas en la sección 4.2.1, estas curvas también fueron sometidas a un modelo de regresión polinomial, en busca de entregar una línea de tendencia que pueda ser descrita bajo sus propios coeficientes polinómicos (coeficiente cuadrático ' $a'$ ', lineal ' $b'$ ' y de determinación ' $R^2'$ '), todo esto, con el fin de buscar una posible tendencia en estos valores (ver *Tabla 10*, *Tabla 11* y *Tabla 12*).

Tabla 10: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 8

Padre Hurtado						
Eje 8						
Coeficiente Regresión Polinomial						
Tiempo [hrs]	Acumulativa			Tramo		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	0,0292	-0,3047	0,9602	0,0292	-0,3047	0,9602
12	0,0082	-0,1721	0,9402	0,0029	-0,0921	0,7747
18	0,0016	-0,0945	0,9252	0,009	-0,3693	0,9709
24	0,0039	-0,1323	0,9014	-0,0004	0,0855	0,9505
48	0,0013	-0,0589	0,6802	-0,0003	0,045	0,9462

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 11: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 12

Padre Hurtado						
Eje 12						
Coeficiente Regresión Polinomial						
Tiempo [hrs]	Acumulativa			Tramo		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	-0,048	0,2173	0,8079	-0,0478	0,2173	0,8079
12	0,014	-0,1713	0,4614	0,0119	-0,0752	0,9892
18	0,0108	-0,1273	0,879	-0,0064	0,3321	0,983
24	0,0034	-0,0045	0,8318	-0,0104	0,4545	0,9826
48	-0,002	0,1097	0,7392	0,0007	-0,0761	0,9546

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 12: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje L-Asc

Padre Hurtado						
Eje L-Asc						
Coeficiente Regresión Polinomial						
Tiempo [hrs]	Acumulativa			Tramo		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	0,2657	-3,9812	0,7294	0,2657	-3,9812	0,7294
12	0,1986	-3,2772	0,7748	0,011	-0,1474	0,8924
18	0,0867	-1,9855	0,6828	-0,0085	0,2903	0,9525
24	0,041	-1,2364	0,5698	-0,009	0,3122	0,9556
48	0,0056	-0,3678	0,4243	0,0015	-0,1486	0,9837

(Fuente: Elaboración Propia)

Como inicio del análisis, y al conocerse que los ejes 12 y L-Asc poseen problemas por desarrollo de gradiente de temperatura, se abre la puerta para una comparativa entre curvas de diferencia de

resistencia, que en un principio puede ser bastante intuitivo, pero que entrega patrones claros de comportamiento que pueden indicar una falla:

- La curva correspondiente al eje L-Asc siempre alcanza valores mayores a los dos ejes restantes, lo cual indica que esto puede ser un parámetro que indique un posible exceso de gradiente de temperatura. Además, debido a la razón entregada para las diferencias excesivas en las primeras dos horas de monitoreo, es que se abre de posibilidad de definir una causa que implique una mayor probabilidad de presentar problemas por exceso de gradiente en el desarrollo del fraguado, y que tiene relación al intervalo de tiempo que tome el proceso de hormigonado (este punto será incluido dentro de las conclusiones generales del trabajo).
- La curva correspondiente al eje 12, si bien comienza por debajo de los valores obtenidos para el eje 8, esto cambia pasado las 10 horas desde el comienzo del hormigonado, pasando a invertirse este orden inicial (ver *Figura 39*). Coincidentemente, como dato inicial, se conoce que, pasadas las 13 horas desde la colocación, el eje 12 reportó un gradiente por sobre el límite, lo cual entrega un indicio hacia la definición del comportamiento de una curva de diferencia de resistencias que pueda alertar de un problema.

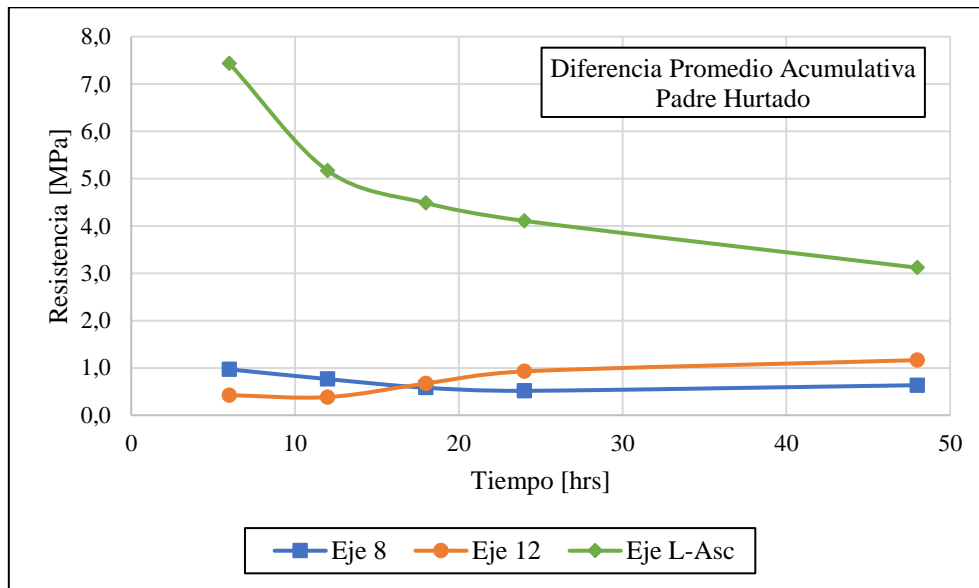
Sin embargo, aún no existe un valor que cuantifique estos hechos. Para esto, se procede a calcular un promedio simple de las diferencias de resistencias por tramos, con el fin de evaluar como varía la diferencia de resistencia por tramos, en un dato que represente a la media aritmética de sus integrantes. Los valores obtenidos se entregan en la *Tabla 13*. Además, como apoyo gráfico, se entrega la gráfica correspondiente a estos valores promedio en función del tiempo, en su manera acumulada y por tramo (ver

Tabla 13: Valor promedio de diferencia de resistencias entre superficie y núcleo, para ejes correspondientes al proyecto Padre Hurtado

Padre Hurtado						
Dif. Resistencia Promedio [Mpa]						
Tiempo [hrs]	Eje 8		Eje 12		Eje L - Asc	
	Acumulativa	Tramo	Acumulativa	Tramo	Acumulativa	Tramo
6	0,97	0,97	0,42	0,42	7,43	7,43
12	0,76	0,54	0,38	0,34	5,17	2,72
18	0,58	0,20	0,67	1,27	4,48	3,06
24	0,52	0,32	0,93	1,72	4,11	2,95
48	0,64	0,76	1,16	1,41	3,12	2,08

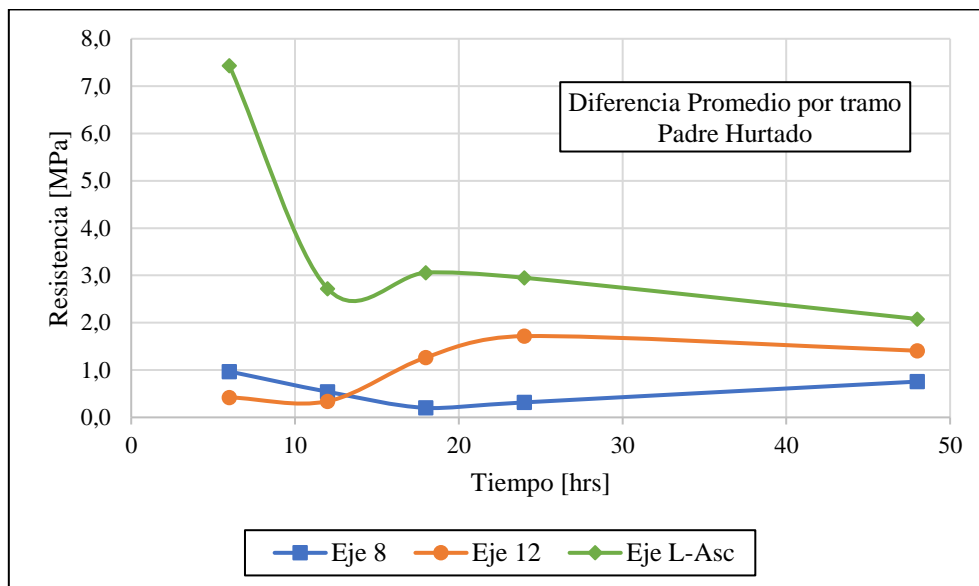
(Fuente: Elaboración propia)

Figura 43: Diferencia de resistencia acumulativa promedio, para ejes correspondientes al proyecto Padre Hurtado



(Fuente: Elaboración propia)

Figura 44: Diferencia de resistencia por tramo promedio, para ejes correspondientes al proyecto Padre Hurtado



(Fuente: Elaboración propia)

Continuando con la comparativa planteada anteriormente, los valores promedio arrojan los siguientes resultados:

- Al conocer el momento donde se origina el problema de gradiente de temperatura, para el eje L-Asc (8 horas después del hormigonado, ver *Tabla 1*), se puede sugerir que para valores de diferencia de resistencia promedio mayores a 7,4 [MPa] en el tramo de las primeras 6 horas luego de la colocación, existe una posibilidad clara de sufrir un problema por gradiente de temperatura.

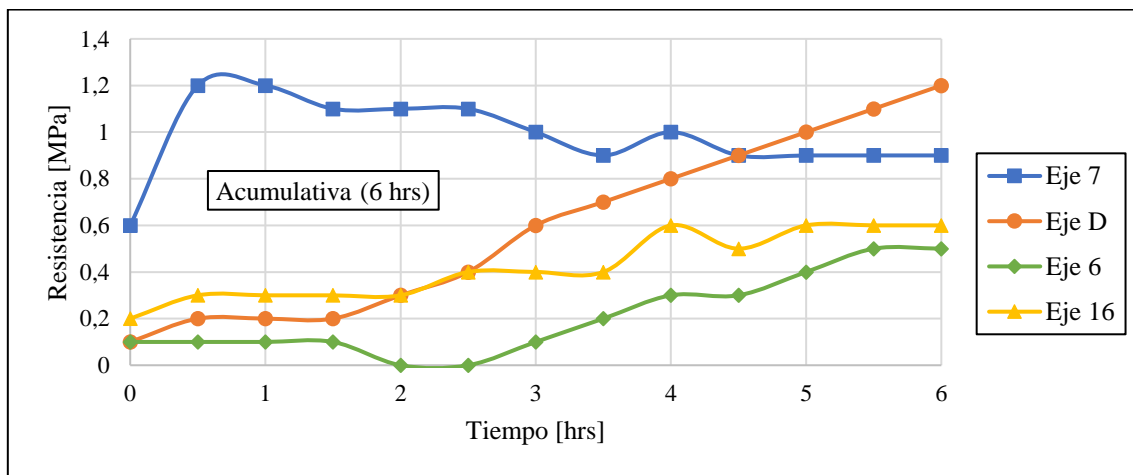
- Para el caso del eje 12, cuyo problema de gradiente se origina a las 13 horas desde el hormigonado, se puede sugerir que, si el valor de la diferencia promedio acumulada supera los 0,67 [MPa], puede ser indicio de un problema de gradiente de temperatura. Esto además se confirma, adicionalmente, con el eje 8, que, según los datos obtenidos para el gradiente de temperatura, está muy cerca de los 20 [°C] a las 48 horas después del hormigonado, lo que coincide con un valor promedio de diferencia de resistencia de 0,64 [MPa], muy cercano al límite recién estimado.

Estas sugerencias tienen el carácter de preliminar, ya que deberán complementarse con lo que pueda obtenerse para el proyecto Infinity, que sigue a continuación.

### 4.3.3. Diferencia de resistencia acumulativa. Proyecto Infinity.

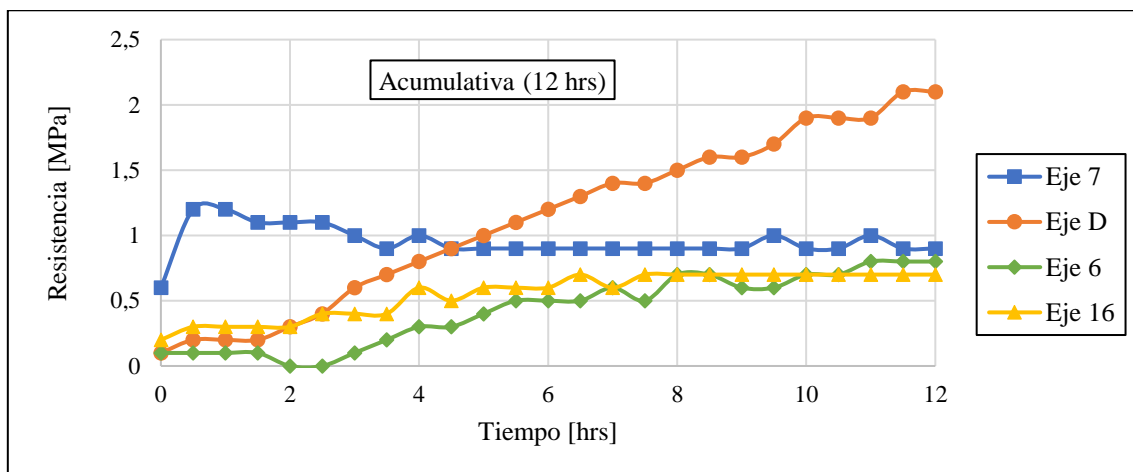
Se presentan a continuación, los valores obtenidos para la diferencia de resistencias desarrolladas entre superficie y núcleo, de manera acumulativa, para el proyecto Infinity y sus 4 ejes en estudio, en tramos de 6, 12, 18, 24 y 36 horas.

Figura 45: Diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



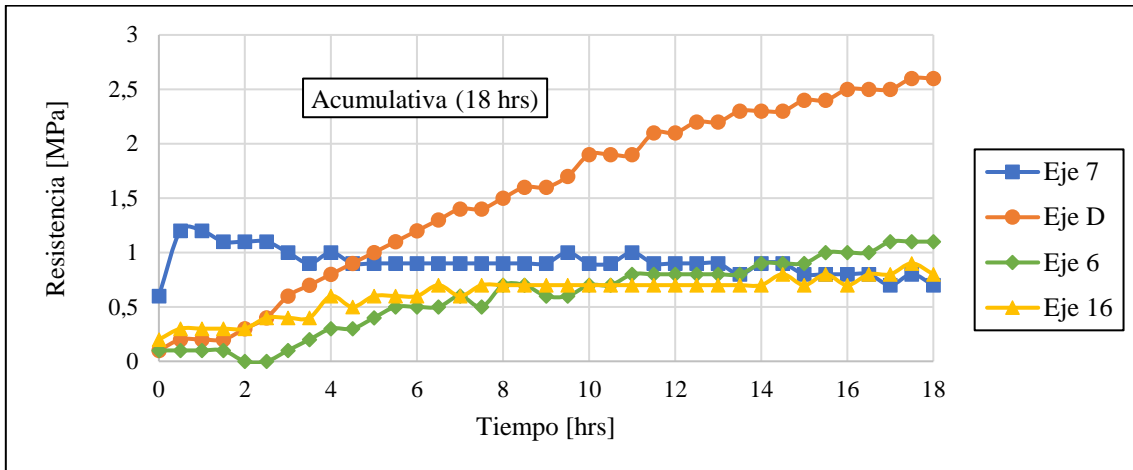
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 46: Diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



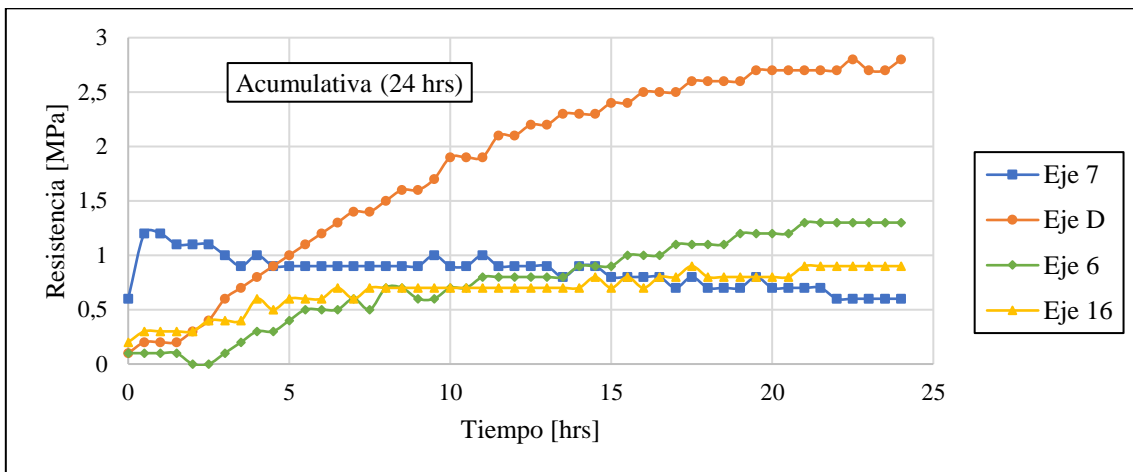
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 47: Diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



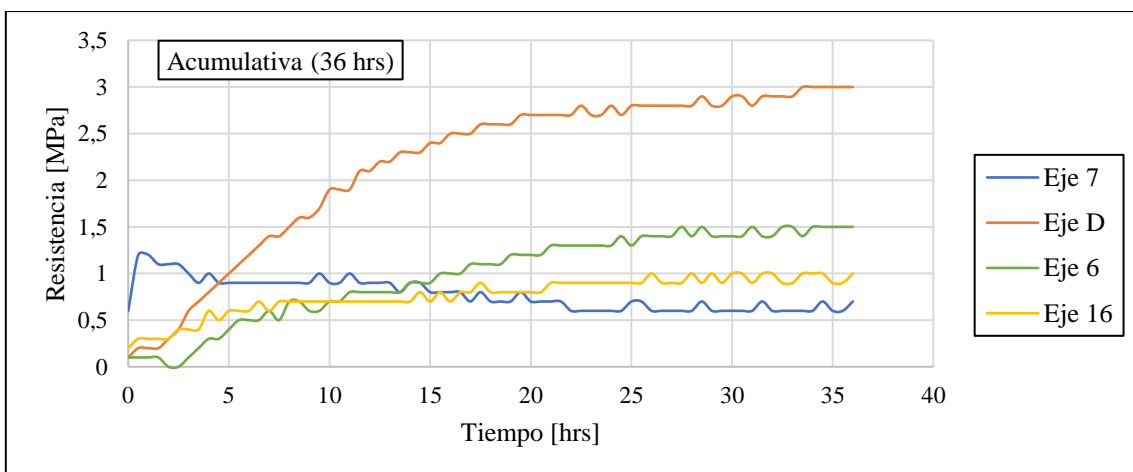
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 48: Diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 49: Diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



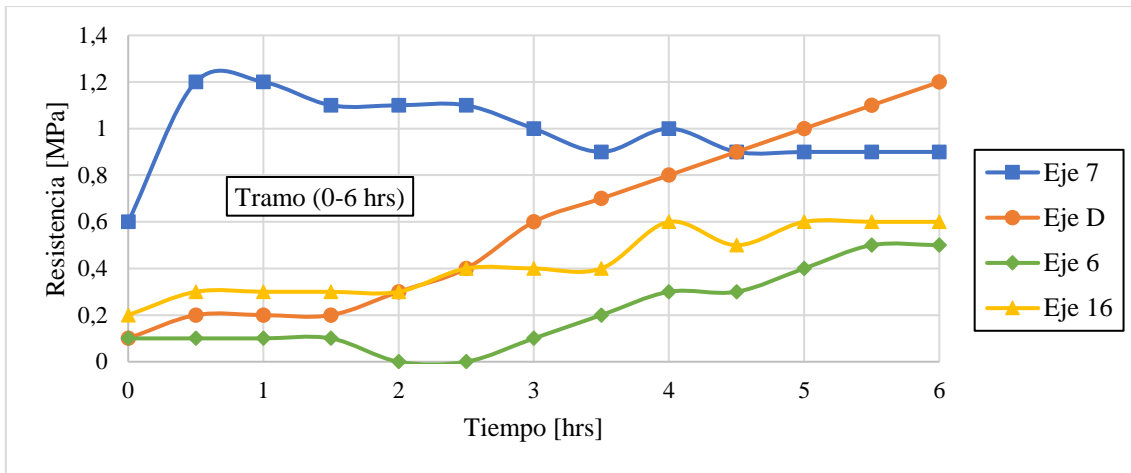
(Fuente: Elaboración Propia)

Cabe mencionar que, para el eje 7, se observa una diferencia de 2 horas desde que el hormigón toma contacto con el sensor del núcleo, hasta el momento de término de colocación en superficie. Por esto, los datos obtenidos para este caso en particular tienen validez luego de finalizado el periodo señalado.

#### 4.3.4. Diferencia de resistencia por tramo. Proyecto Infinity.

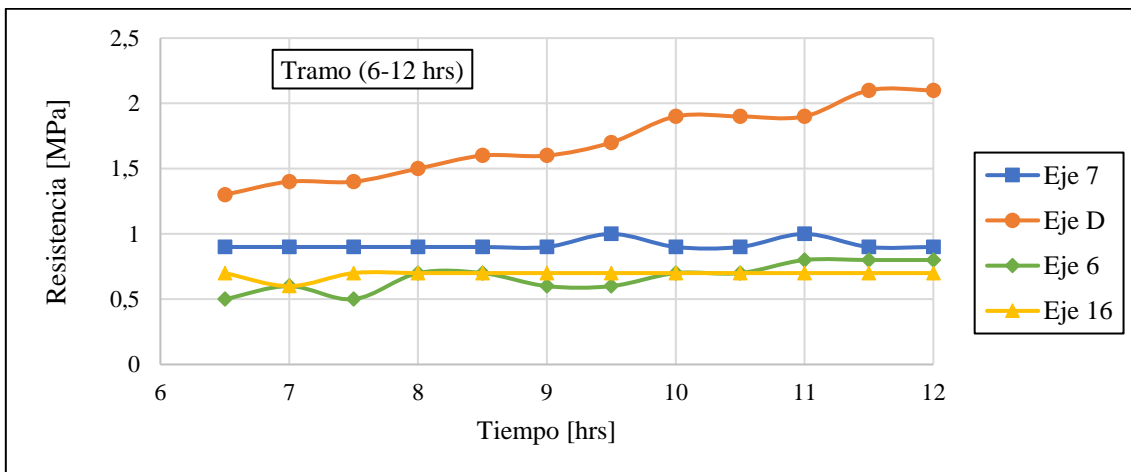
A modo de obtener una respuesta gráfica más precisa del período de monitoreo, se entregan a continuación las gráficas correspondientes al análisis por diferencia de resistencia en cada tramo de estudio, para para el proyecto Infinity y sus 4 ejes en estudio, en tramos de (0-6) horas, (6-12) horas, (12-18) horas, (18-24) horas y (24-36) horas.

Figura 50: Diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



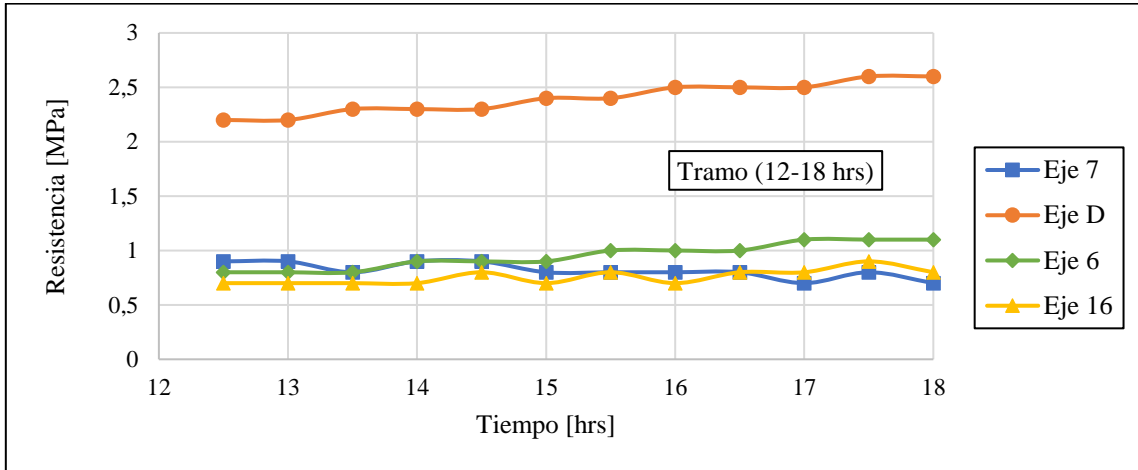
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 51: Diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



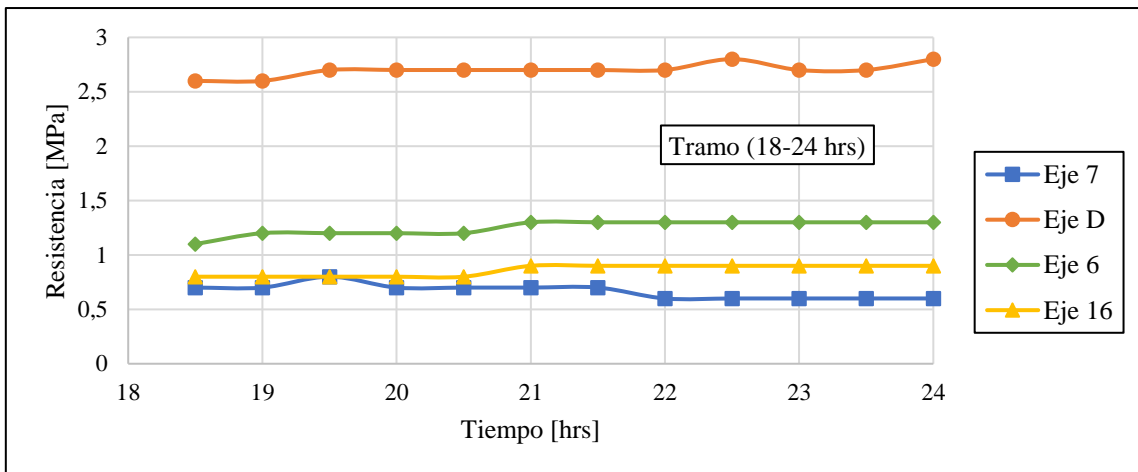
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 52: Diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



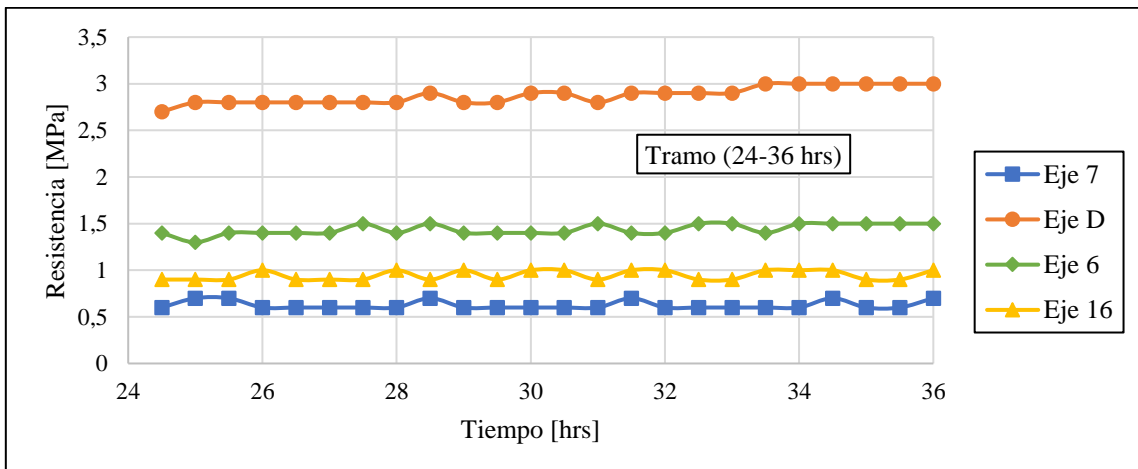
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 53: Diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 54: Diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, p. Infinity



(Fuente: Elaboración Propia)



Tal como se realizó para las curvas de resistencia entregadas en la sección 4.2.1, estas curvas también fueron sometidas a un modelo de regresión polinomial, en busca de entregar una línea de tendencia que pueda ser descrita bajo sus propios coeficientes polinómicos (coeficiente cuadrático ' $a$ ', lineal ' $b$ ' y de determinación ' $R^2$ '), todo esto, con el fin de buscar una posible tendencia en estos valores (ver *Tabla 14* hasta *Tabla 17*).

Tabla 14: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 7

Infinity						
Eje 7						
Coeficiente Regresión Polinomial						
Acumulativa				Tramo		
Tiempo [hrs]	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	-0,0214	0,1074	0,243	-0,0214	0,1074	0,243
12	0,0011	-0,0233	0,1088	-0,0034	0,0684	0,1249
18	-0,0005	-0,0045	0,3726	-0,0022	0,0349	0,6599
24	-0,0006	-0,0037	0,6746	-0,0034	0,115	0,6815
48	0,0003	-0,0225	0,7506	0,0012	-0,0752	0,0939

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 15: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje D

Infinity						
Eje D						
Coeficiente Regresión Polinomial						
Acumulativa				Tramo		
Tiempo [hrs]	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	0,0122	0,1214	0,9835	0,0122	0,1214	0,9835
12	-0,0027	0,209	0,9916	0,003	0,0956	0,9719
18	-0,0047	0,2319	0,9951	~ 0	0,0769	0,9615
24	-0,005	0,2377	0,9962	-0,0042	0,2035	0,6031
48	-0,0034	0,1979	0,9849	0,0009	-0,0289	0,8299

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 16: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 6

Infinity						
Eje 6						
Coeficiente Regresión Polinomial						
Acumulativa				Tramo		
Tiempo [hrs]	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	0,0236	-0,0645	0,9175	0,0236	-0,0645	0,9175
12	-0,001	0,083	0,9165	0,0014	0,0245	0,7168
18	-0,0012	0,0834	0,9578	0	0,0629	0,9441
24	-0,001	0,0796	0,9761	-0,009	0,4143	0,8747
48	-0,0012	0,0844	0,9841	0,0001	0,0022	0,4181

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 17: Coeficientes regresión polinomial para curva diferencia de resistencia en superficie y núcleo, para Eje 16

Infinity						
Eje 16						
Coeficiente Regresión Polinomial						
Acumulativa				Tramo		
Tiempo [hrs]	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
6	0,0006	0,0656	0,8973	0,0006	0,0656	0,8973
12	-0,0047	0,0991	0,9463	-0,0025	0,0525	0,2112
18	-0,0022	0,0685	0,9006	0,0025	-0,0489	0,5514
24	-0,0011	0,0501	0,9	-0,0035	0,1731	0,7692
48	-0,0006	0,0393	0,9149	-0,001	0,0629	0,1309

(Fuente: Elaboración Propia)

De este proyecto, y como parte de la información inicial, se conoce que solo el eje D registró problemas de gradiente excesivo de temperatura, lo que será la base de la comparativa entre estos ejes monitoreados.

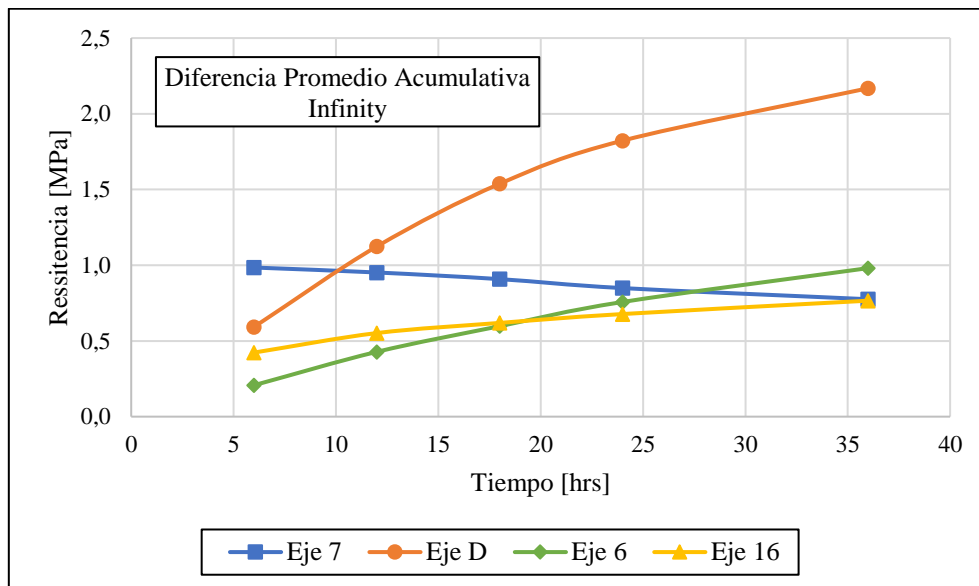
Al igual que para el caso del proyecto Padre Hurtado, se agregarán los resultados correspondientes a las diferencias de resistencia promedio para cada eje, en su versión acumulativa y por tramos, que se presentan en la

Tabla 18: Valor promedio de diferencia de resistencias entre superficie y núcleo, para ejes correspondientes al proyecto Infinity

Infinity								
Dif. Resistencia Promedio [Mpa]								
Tiempo [hrs]	Eje 7		Eje D		Eje 6		Eje 16	
	Acumulativa	Tramo	Acumulativa	Tramo	Acumulativa	Tramo	Acumulativ	Tramo
6	0,98	0,98	0,59	0,59	0,21	0,21	0,42	0,42
12	0,95	0,92	1,12	1,70	0,43	0,67	0,55	0,69
18	0,91	0,82	1,54	2,40	0,60	0,95	0,62	0,76
24	0,85	0,67	1,82	2,70	0,76	1,25	0,68	0,86
36	0,78	0,63	2,17	2,88	0,98	1,44	0,77	0,95

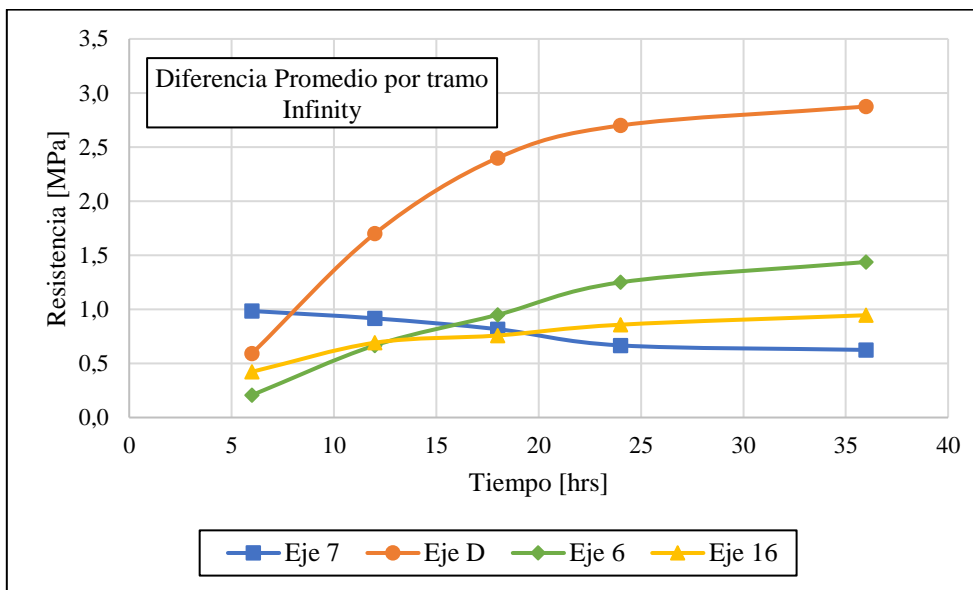
(Fuente: Elaboración propia)

Figura 55: Diferencia de resistencia acumulativa promedio, para ejes correspondientes al proyecto Infinity



(Fuente: Elaboración propia)

Figura 56: Diferencia de resistencia por tramo promedio, para ejes correspondientes al proyecto Infinity



(Fuente: Elaboración propia)

En este caso, el análisis se centra en el eje D, el cual excede el gradiente máximo propuesto, luego de 35 horas desde el hormigonado (ver *Tabla 2*). En las gráficas acumulativas, se identifica un crecimiento evidente del valor de la diferencia de resistencia a lo largo del tiempo, notablemente mayor a lo que se desarrolla en los demás ejes, comenzando en valores inferiores a 0,2 [MPa], y llegando hasta los 3 [MPa] al momento cuando se cruza el límite del gradiente de temperatura. Además, en las gráficas por tramo, se hace más notoria esta diferencia entre el eje en cuestión con aquellos que cumplen mantener un gradiente menor a 20 [°C].

En cuanto a diferencias de resistencia promedio, para el caso acumulativo, se sugiere que si dicho valor excede los 2,17 [MPa] puede ser considerado como un indicador de un futuro problema de gradiente, al corto plazo.

#### 4.4. Diferencia de resistencias: Análisis global para ambos proyectos

Si bien se expresó un análisis individual para cada proyecto en estudio, la diferencia de resistencias puede ser utilizada como una medida que pueda describir a todos los ejes disponibles, como una herramienta global por sobre algo puntual de un proyecto.

- Se descarta el análisis por coeficientes polinomiales que describan las líneas de tendencia por tramo, ya que no se encuentra un patrón que describa un comportamiento sistematizado para aquellos ejes que registraron problemas por desarrollo de gradientes de temperatura por fuera del límite.
- En cuanto al análisis por valores de diferencia de resistencia entre núcleo y superficie, se puede observar que aquellos proyectos que, en algún punto del periodo de estudio, superaron una diferencia de resistencias de 1 [MPa], fueron los que presentaron problemas por gradiente de temperatura (eje 12 y L-Asc en proyecto Padre Hurtado; eje D en proyecto Infinity). Para esto, basta con analizar las gráficas entregadas para ambos proyectos, en su formato acumulativo, pero por sobre todo en la muestra por tramos.
- Para el caso del estudio de diferencias de resistencias promedio, el eje D (correspondiente al proyecto Infinity) y el eje L-Asc (proyecto Padre Hurtado) concuerdan en sus valores por sobre los 2 [MPa] para sus promedios acumulativos y

por tramos, lo que podría entregar un nuevo parámetro de comportamiento límite para futuras referencias. Sin embargo, esto no se cumple en el caso del eje 12 (proyecto Padre Hurtado), donde a pesar de presentar problemas por gradiente de temperatura, el promedio de la diferencia de resistencias no supera los 2 [MPa], en el período de análisis. Sin embargo, coincidentemente es este eje el que menor temperatura ambiente registró al momento de su colocación (13, 85 [°C] para el núcleo), siendo también el que fue hormigonado más temprano de los tres ejes en comparación (alrededor de las 8:00 am). Esto coincide con lo expuesto en la sección 4.2.1, donde esta sección del eje 12 fue la que menor resistencia desarrolló en el tiempo, para el caso del proyecto Padre Hurtado. Si bien están presentes todas estas singularidades ya mencionadas, no se puede indicar con seguridad la relación entre ellas y los valores desarrollados en cuanto a diferencia de resistencia promedio para el eje 12.

Cabe mencionar que este análisis se considera válido para el periodo estudiado en el presente trabajo, y exime de ello a valores obtenidos fuera de este rango, por ejemplo, para después de 36 horas desde el hormigonado.

## 5. Conclusiones

El estudio se dividió, de manera inicial, diferenciando el desarrollo de resistencias entre superficie y núcleo, además de incluir una división por tramos temporales que diferían en su extensión para cada proyecto. Esto, con el objetivo de abarcar los casos más representativos de cada edificación monitoreada. Junto con esto, se optó por tomar un modelo de regresión lineal como base comparativa entre curvas de resistencia y sus líneas de tendencia, lo que fue reemplazado por un modelo de regresión polinómica que se ajustó de mejor manera al comportamiento de las resistencias en el tiempo, adicionando un término cuadrático a la ecuación característica.

Debido a la diferencia en la tasa de desarrollo de resistencias entre superficie y núcleo, la necesidad de poder aunar ambos registros para un mismo eje, en este caso, fue suplida bajo el concepto de “diferencia de resistencia”, que podía, además, ayudar a cuantificar las diferencias y tendencias que se apreciaban en las gráficas. Este nuevo concepto, también fue sometido a un modelo de regresión polinómica, el cual se ajustó correctamente en la mayoría de los casos estudiados. Este punto se menciona, ya que, en estudios posteriores, podría surgir una nueva idea para relacionar ambos niveles de datos, y que entregue nuevas apreciaciones en cuanto a resistencias y su comportamiento para estimación de gradientes de temperatura.

Sin embargo, el mismo concepto de diferencia de resistencias surge ya que, al disponer de todas las ecuaciones de curvas de tendencias, no se pudo encontrar un patrón de comportamiento solo en la evolución de los coeficientes, que, si bien demostraban ciertas tendencias crecientes/decrecientes para algunos casos, sus magnitudes estaban muy dispersas, lo que impedía llegar a un resultado concluyente.

En su defecto, la diferencia de resistencias si fue concluyente en sus resultados, entregando una expresión cuantificable de lo que se demostraba a nivel de las gráficas. No obstante, a aquello, la idea de generalizar un poco más este parámetro en base a un promedio simple no fue tan efectivo, por razones que se explicitarán más adelante.

Si bien, uno de los objetivos tenía como base determinar las patologías que se presentan a nivel del hormigón masivo, sin tener que obtener nada en base a los datos de los proyectos disponibles, su identificación e información es vital para dar la importancia necesaria al estudio y control de las problemáticas por gradientes de temperatura en estas estructuras, aspecto que por costos, logística o mera displicencia, no se toma en cuenta como un proceso fundamental para asegurar el éxito de un proyecto. Además, el identificar como se expresan los gradientes de temperatura a nivel de unidad de concreto, aportó un cierre muy completo al resto del marco teórico entregado.

Para el caso del efecto de las temperaturas ambiente y de colocación, se esperaba, tal como se indicó en la sección 2.4 Control de Gradiente de Temperatura en Hormigones Masivos, que la relación directamente proporcional entre temperaturas ambientes y desarrollo de temperaturas a nivel de estructura de hormigón masivo se mantuviera, lo que podría ser llevado de cierta manera al campo de las resistencias en la misma dirección. Esto si se cumplió para todos los casos a nivel de núcleo, pero a nivel de superficie, los resultados no siguen una regla definida. Esto implica que, si bien en el desarrollo de temperaturas luego del hormigonado la relación es directamente proporcional en toda la unidad masiva, las resistencias solo cumplen esta máxima en el núcleo. Esto abre la opción de que, para la resistencia, el clima externo tiene mucho más que decir a nivel de desarrollo de resistencias que a nivel de registro de temperaturas dentro del hormigón.

En el caso del análisis por diferencias de resistencias, se puede observar que aquellos proyectos que, en algún punto del periodo de estudio, superaron una diferencia de resistencias de 1 [MPa], fueron los que presentaron problemas por gradiente de temperatura (eje 12 y L-Asc en proyecto Padre Hurtado; eje D en proyecto Infinity). Para esto, basta con analizar las gráficas entregadas para ambos proyectos, en su formato acumulativo, pero por sobre todo en la muestra por tramos.

Además, Para el caso del estudio de diferencias de resistencias promedio, el eje D (correspondiente al proyecto Infinity) y el eje L-Asc (proyecto Padre Hurtado) concuerdan en sus valores por sobre los 2 [MPa] para sus promedios acumulativos y por tramos, lo que podría entregar un nuevo parámetro de comportamiento límite para futuras referencias. Sin embargo, esto no se cumple en el caso del eje 12 (proyecto Padre Hurtado), donde a pesar de presentar problemas por gradiente de temperatura, el promedio de la diferencia de resistencias no supera los 2 [MPa], en el período de análisis. Sin embargo, coincidentemente es este eje el que menor temperatura ambiente registró al momento de su colocación (13, 85 [°C] para el núcleo), siendo también el que fue hormigonado más temprano de los tres ejes en comparación (alrededor de las 8:00 am). Esto coincide con lo expuesto en la sección 4.2.1, donde esta sección del eje 12 fue la que menor resistencia desarrolló en el tiempo, para el caso del proyecto Padre Hurtado. Si bien están presentes todas estas singularidades ya mencionadas, no se puede indicar con seguridad la relación entre ellas y los valores desarrollados en cuanto a diferencia de resistencia promedio para el eje 12.

# Bibliografía

- ACI116.1R. (2000). *Cement and Concrete Terminology (ACI 116R-00)*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- ACI207.1R. (2005). *Guide to Mass Concrete*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- ACI207.2R. (2007). *Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute (ACI).
- ACI224.1R. (1993). *Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute (ACI).
- ACI224.1R. (1994). *Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- ACI224.R. (2001). *Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute (ACI).
- ASTM-C1074. (2004). *Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Gagda, J., & VanGeem, M. (Enero, 2002). *Controlling Temperatures in Mass Concrete*. Concrete Internacional, Vol. 24.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). Chapter 18 - Special types of concrete. En S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Panarese, & J. Tanesi, *Design and Control of Concrete Mixtures* (pág. 459). Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association (PCA).
- NCh170. (2016). *Hormigón - Requisitos Generales*. Chile: Instituto Nacional de Normalización (INN).
- NCh3565. (2018). *Hormigón - Estimación de Resistencia Mecánica - Método de la Madurez*. Chile: Instituto Nacional de Normalización (INN).

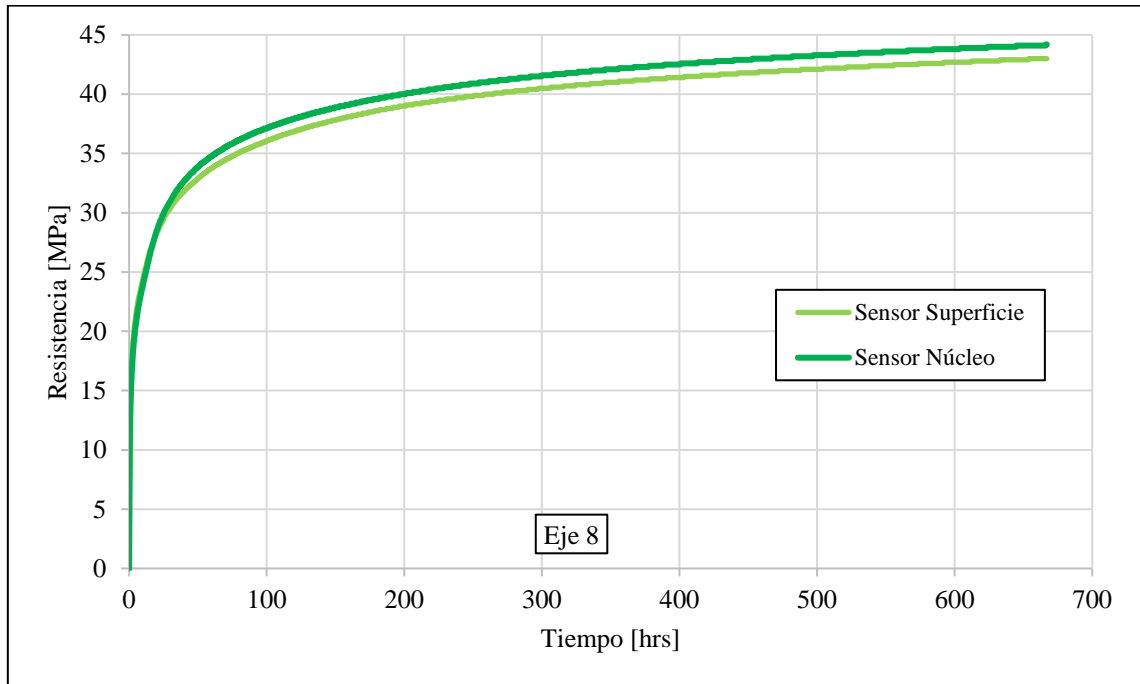


## **ANEXO A**

**Gráficos: Curva de Resistencia (Superficie y Núcleo), curva de Temperaturas y Gradiente.**

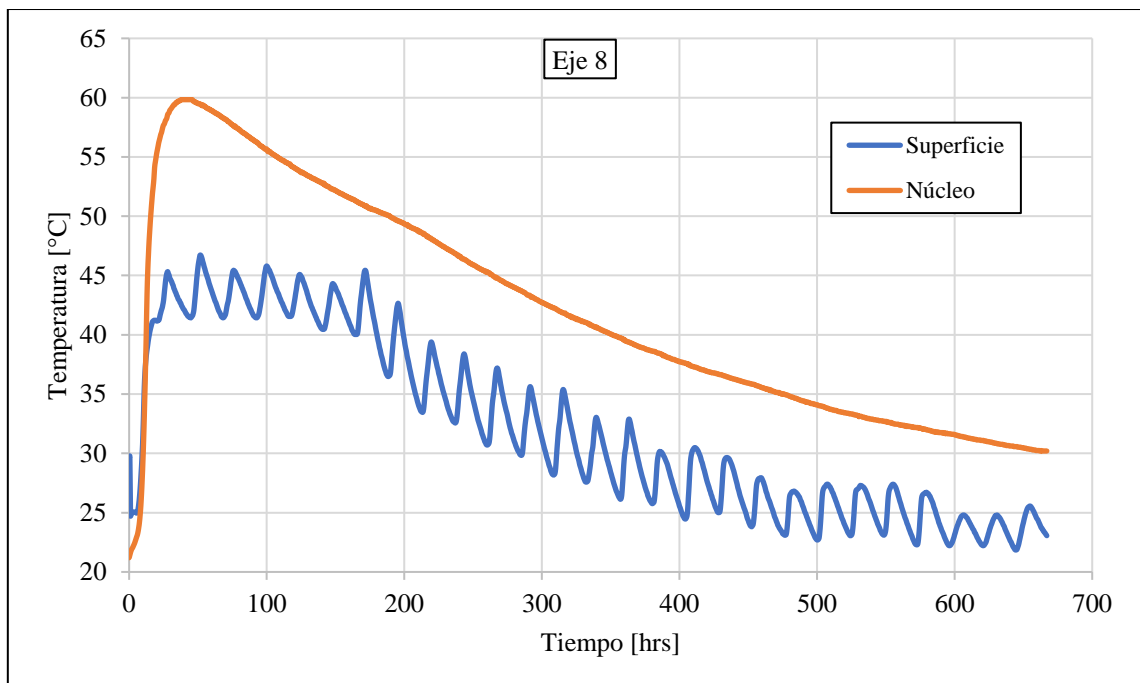
**Proyecto Padre Hurtado / Proyecto Infinity**

Figura 57: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 8



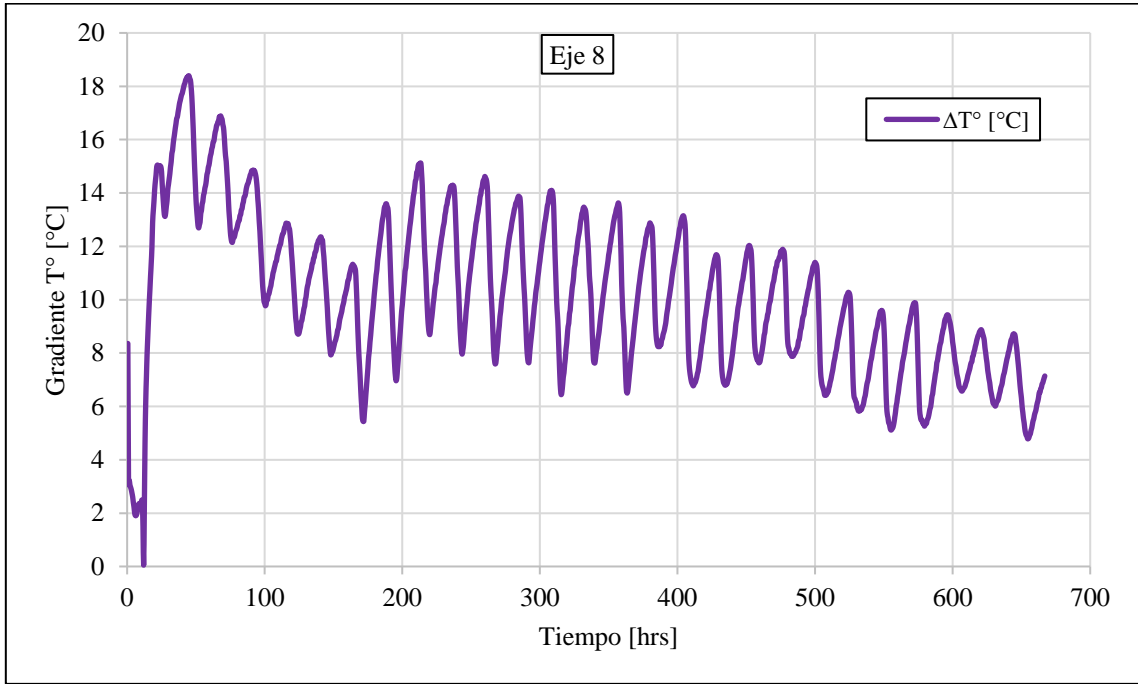
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 58: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 8



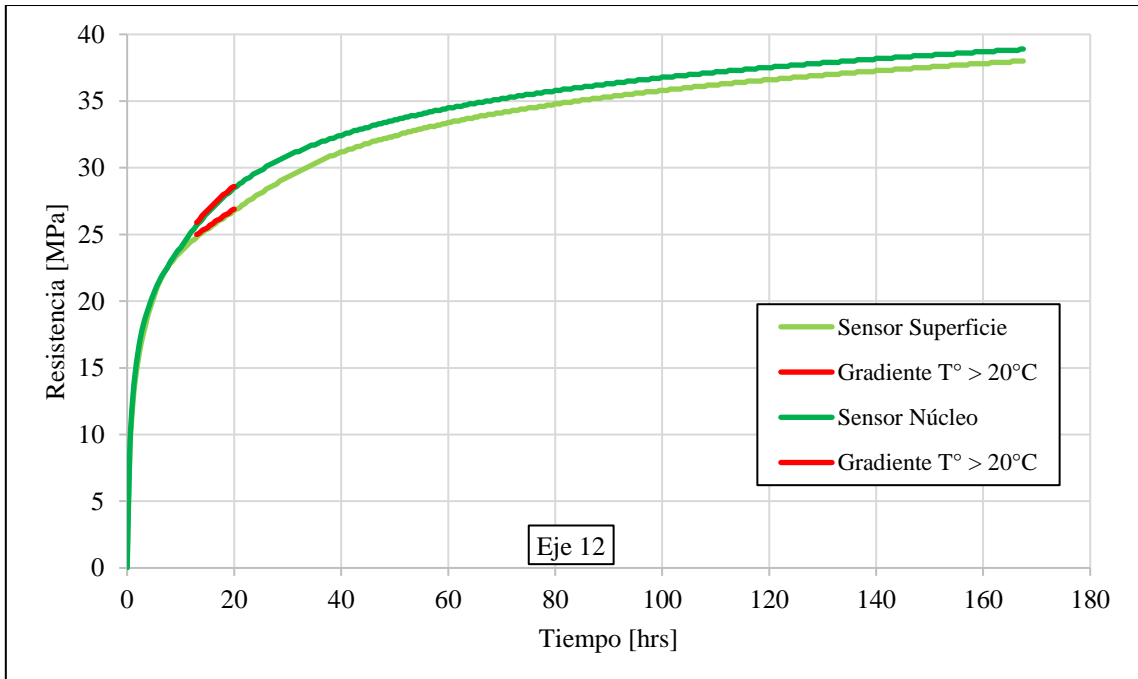
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 59: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 8



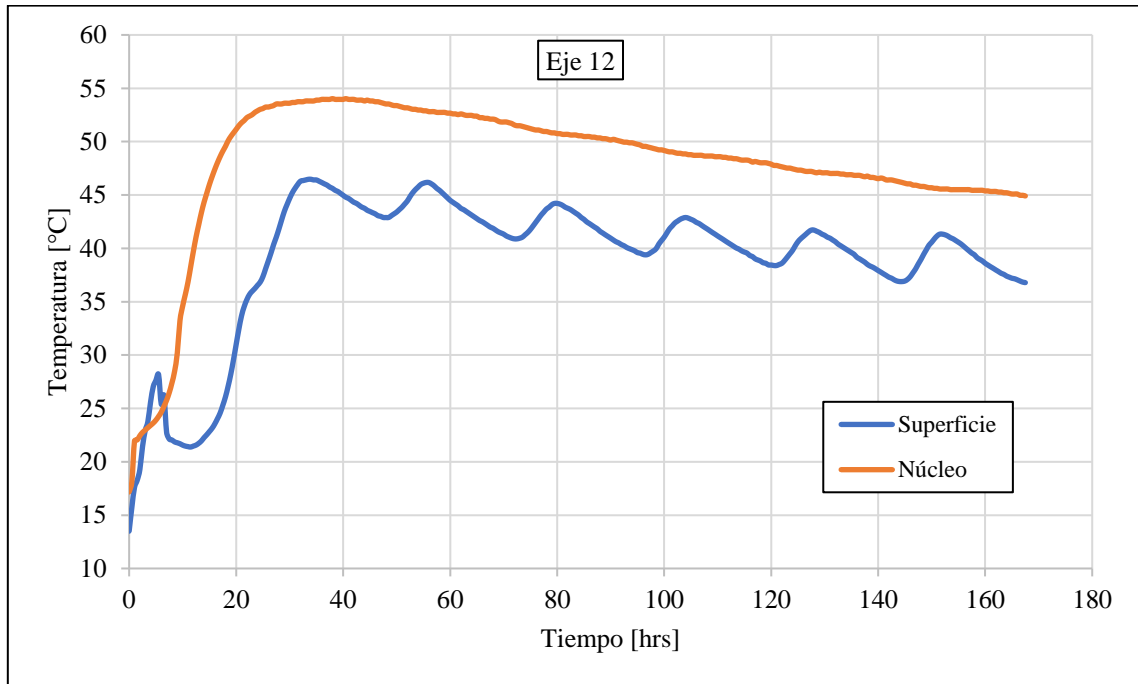
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 60: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 12



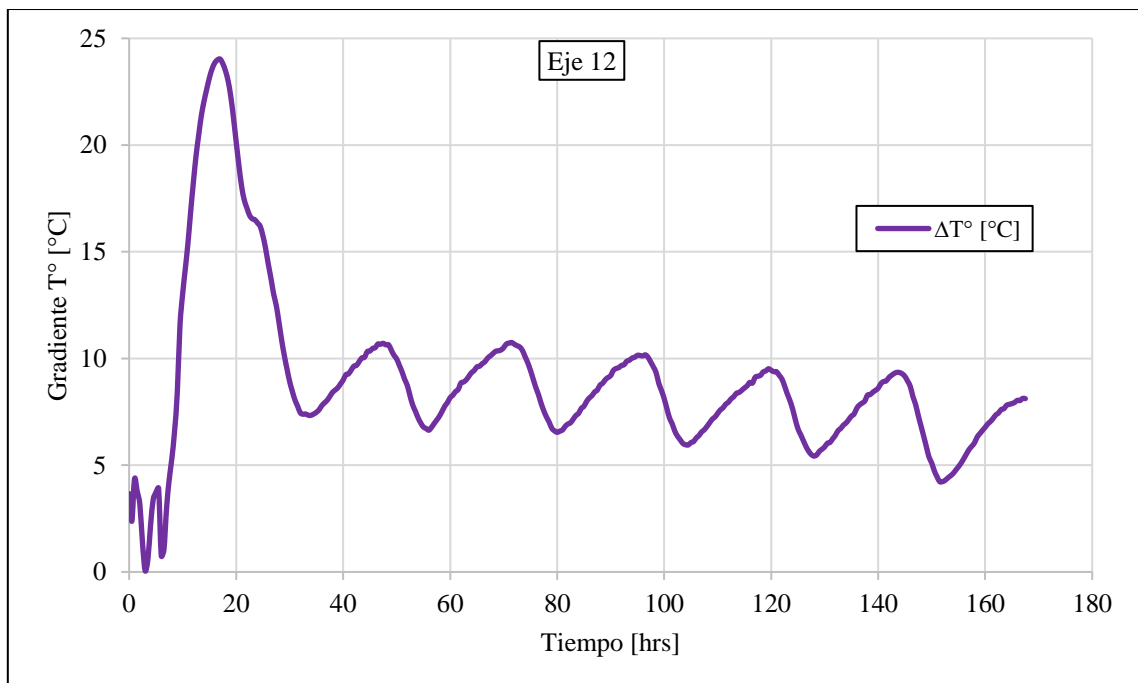
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 61: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 12



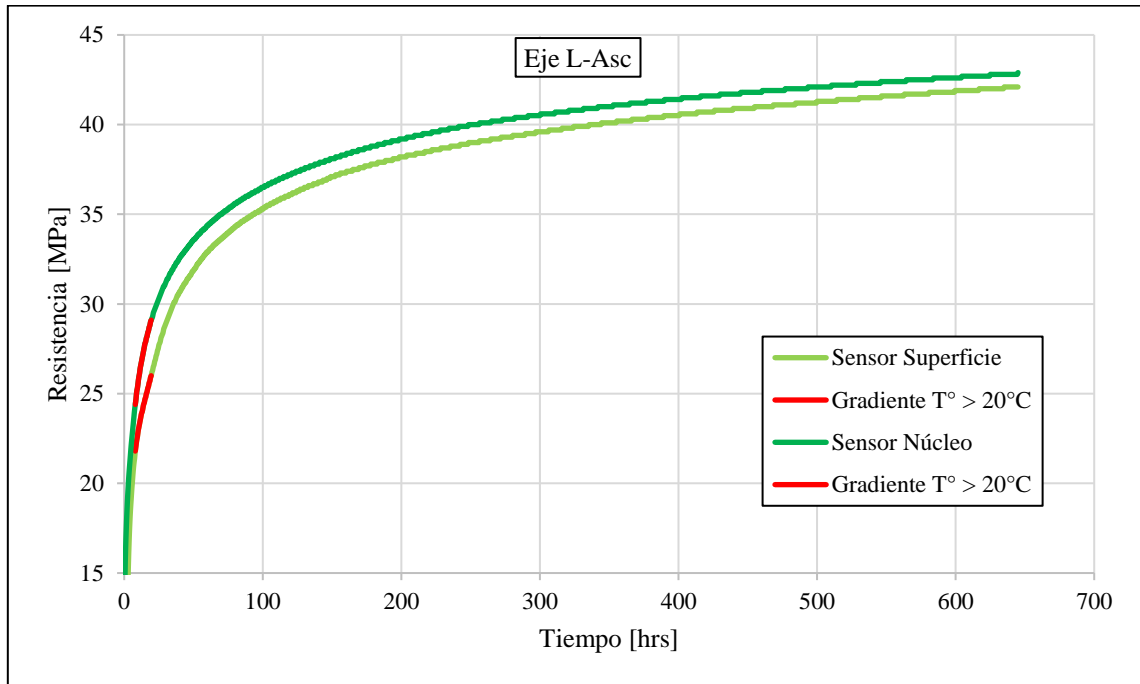
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 62: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 12



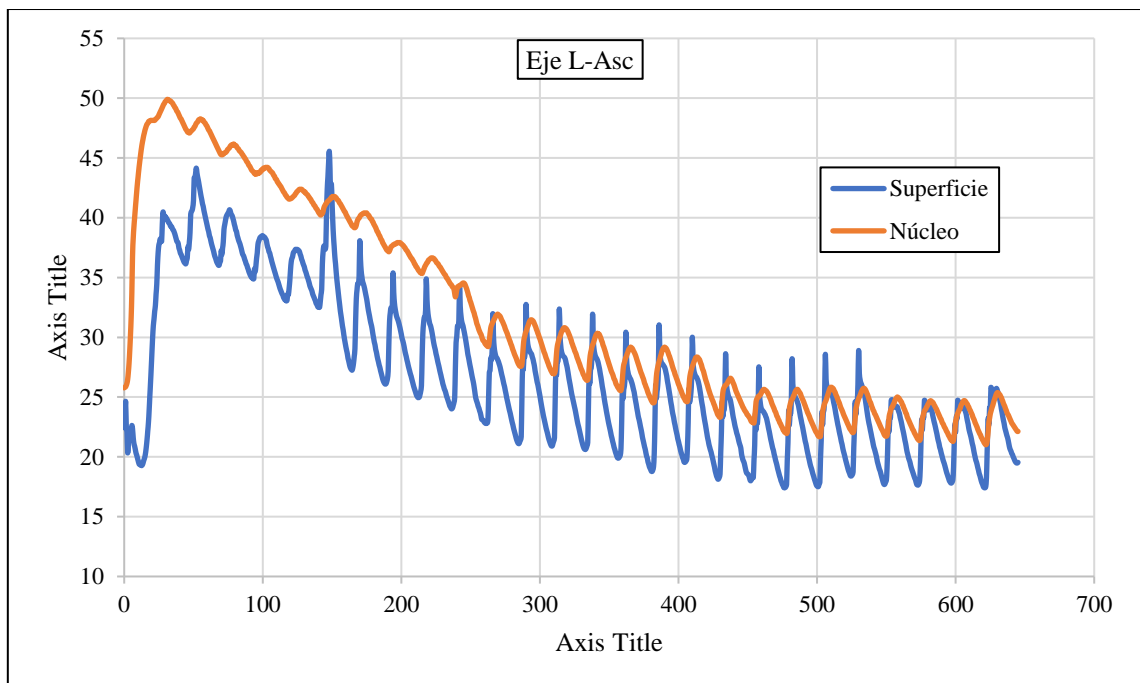
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 63: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje L-Asc



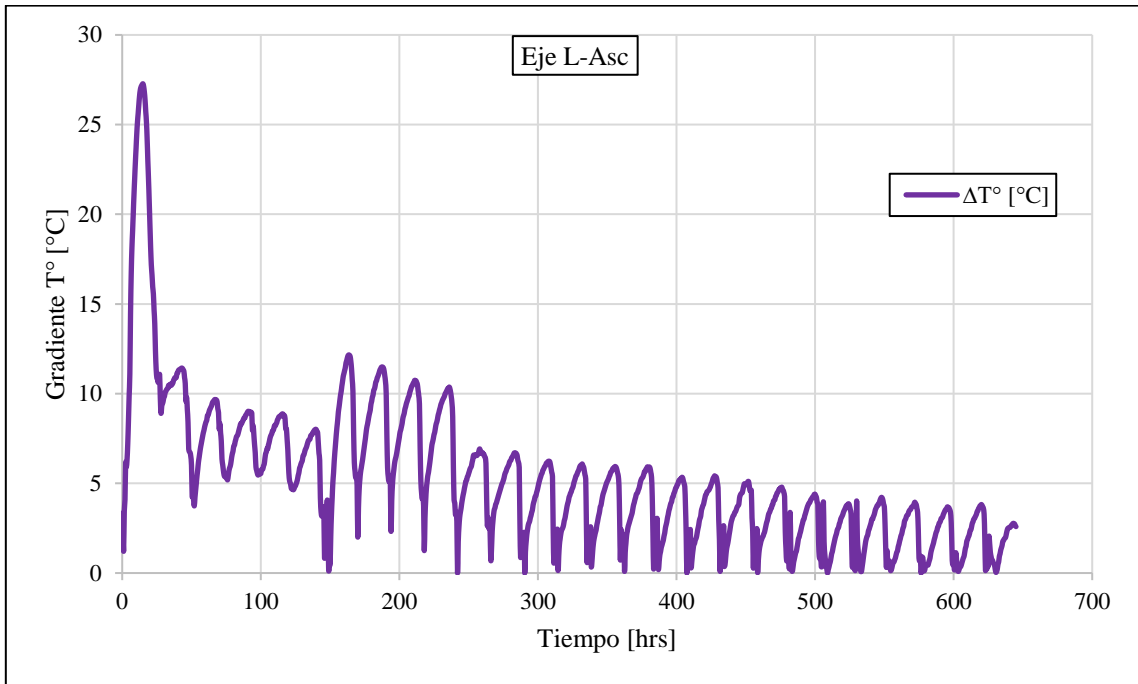
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 64: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje L-Asc



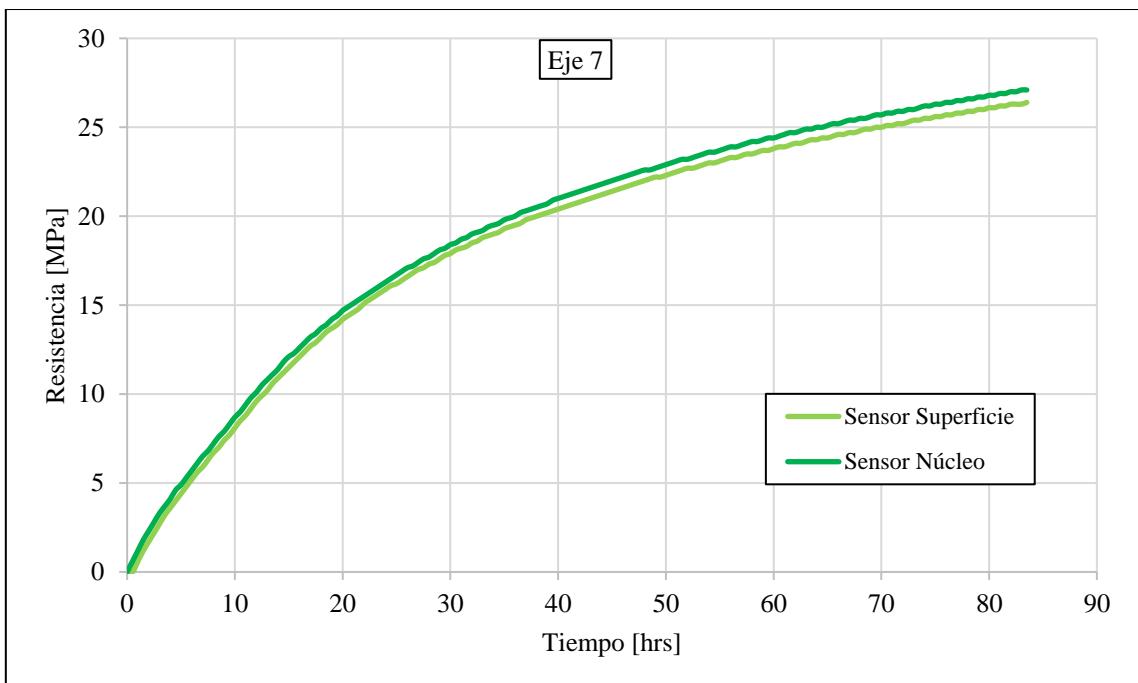
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 65: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



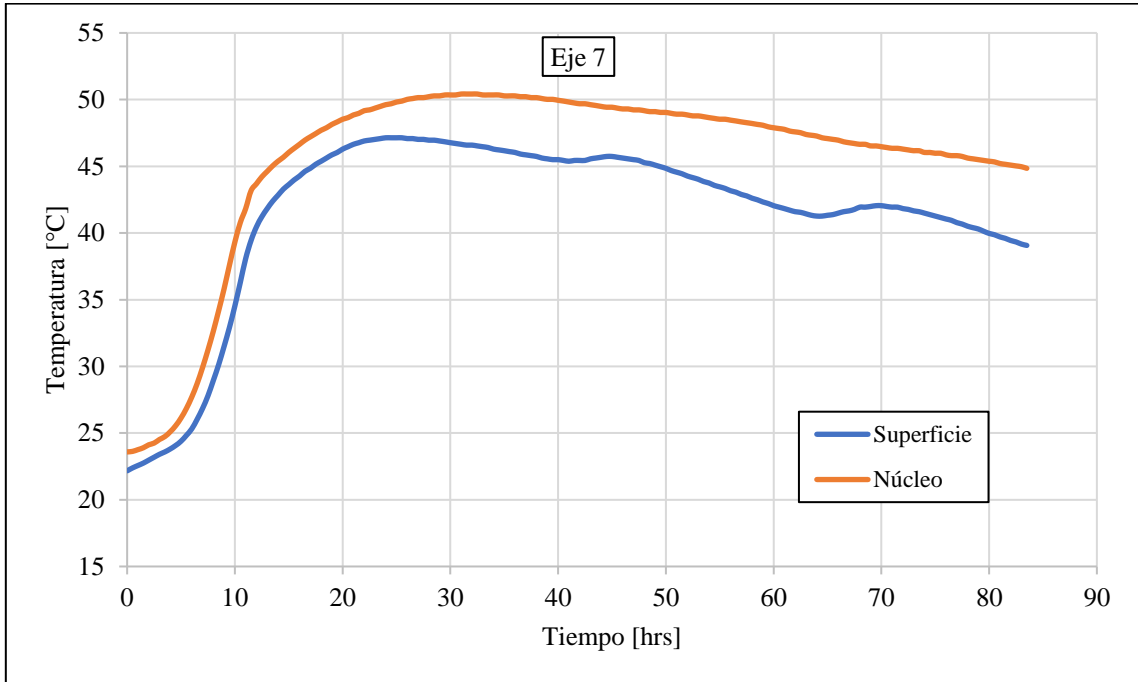
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 66: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 7



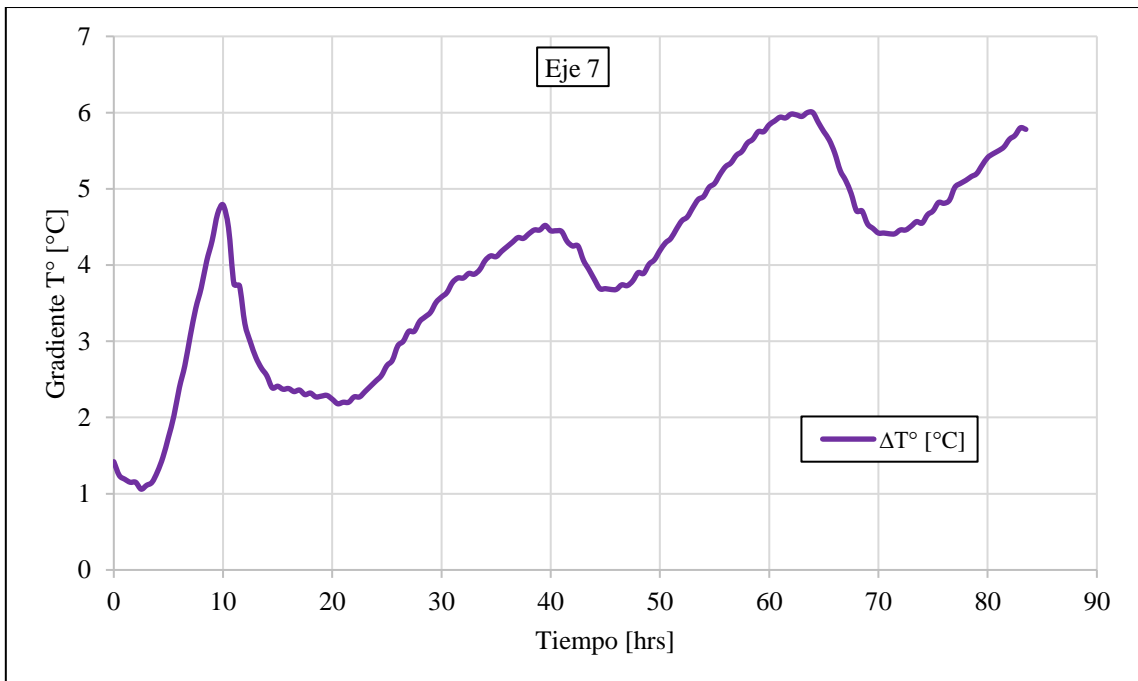
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 67: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 7



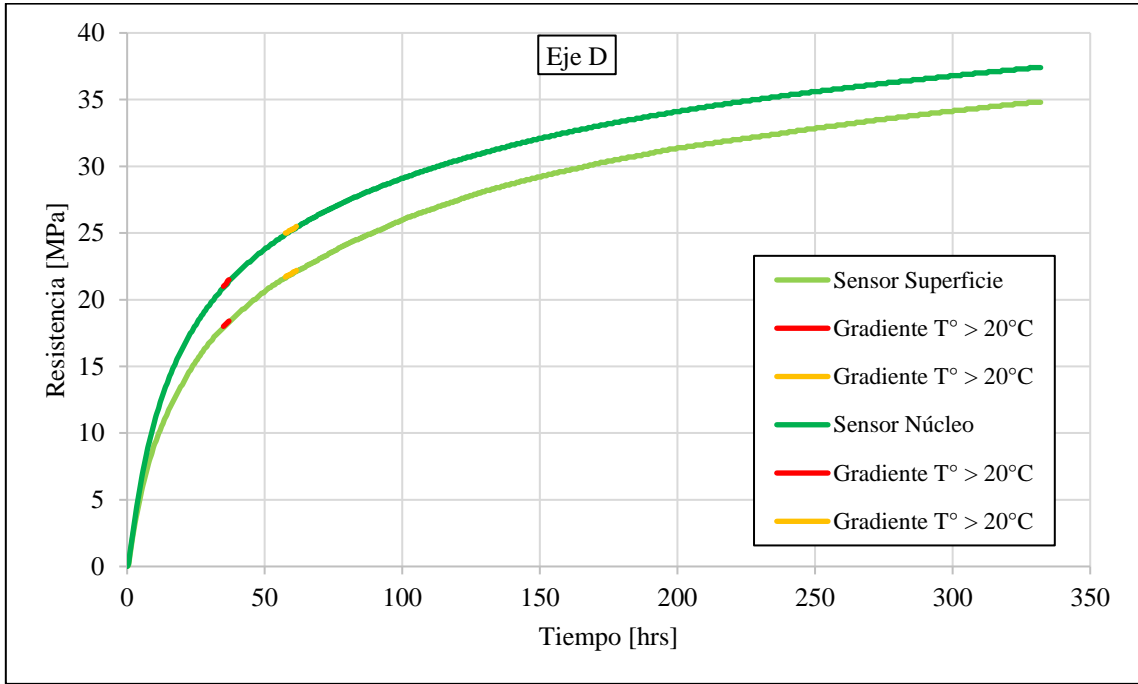
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 68: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 7



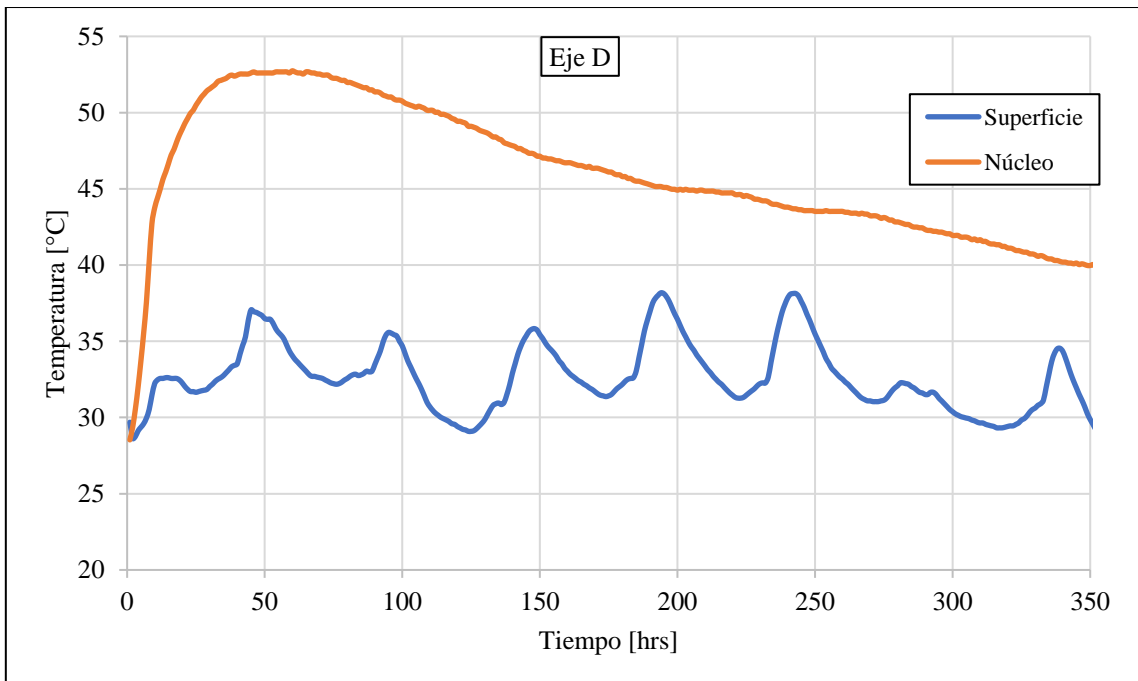
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 69: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje D



(Fuente: Elaboración Propia)

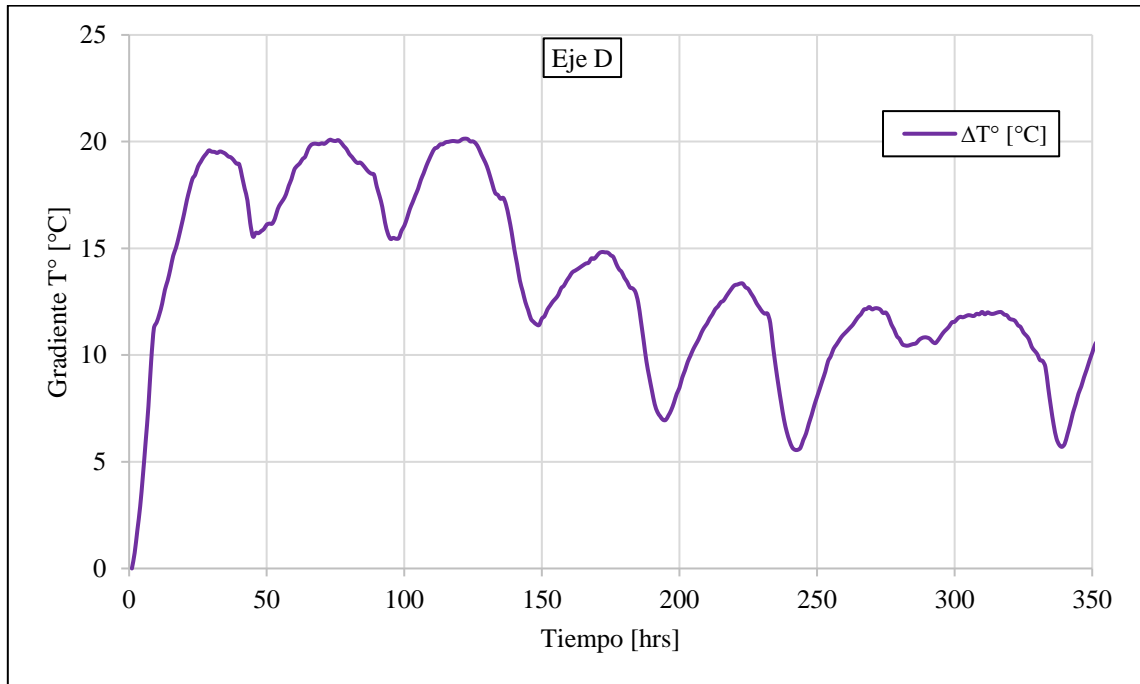
Figura 70: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje D



(Fuente: Elaboración Propia)

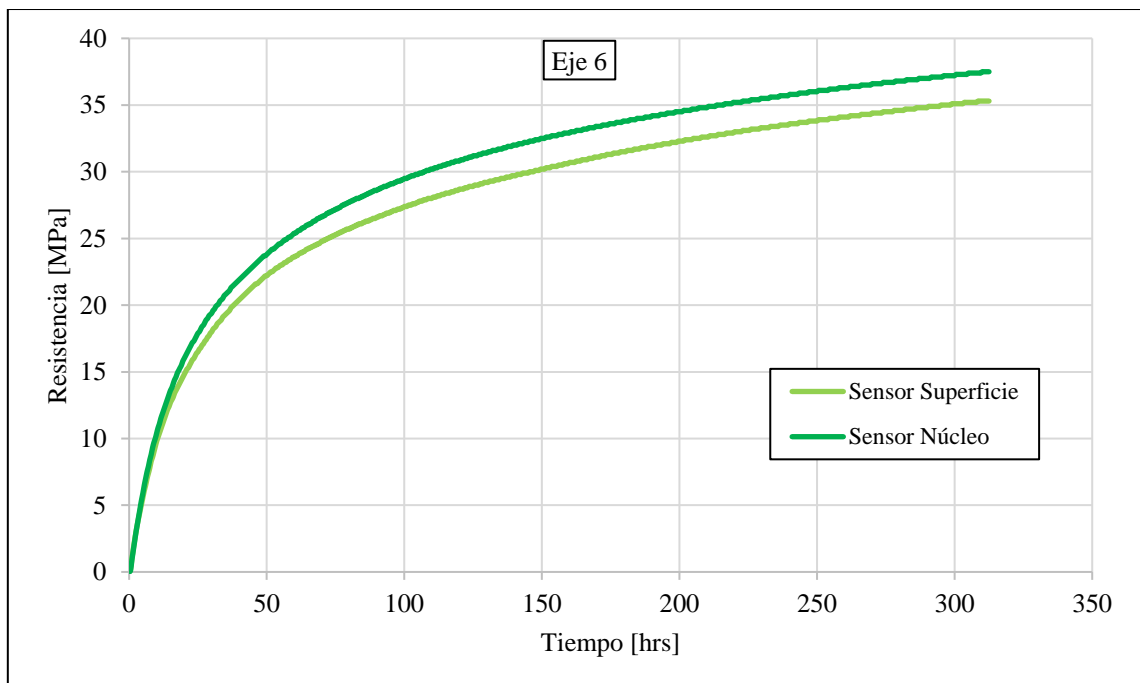


Figura 71: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje D



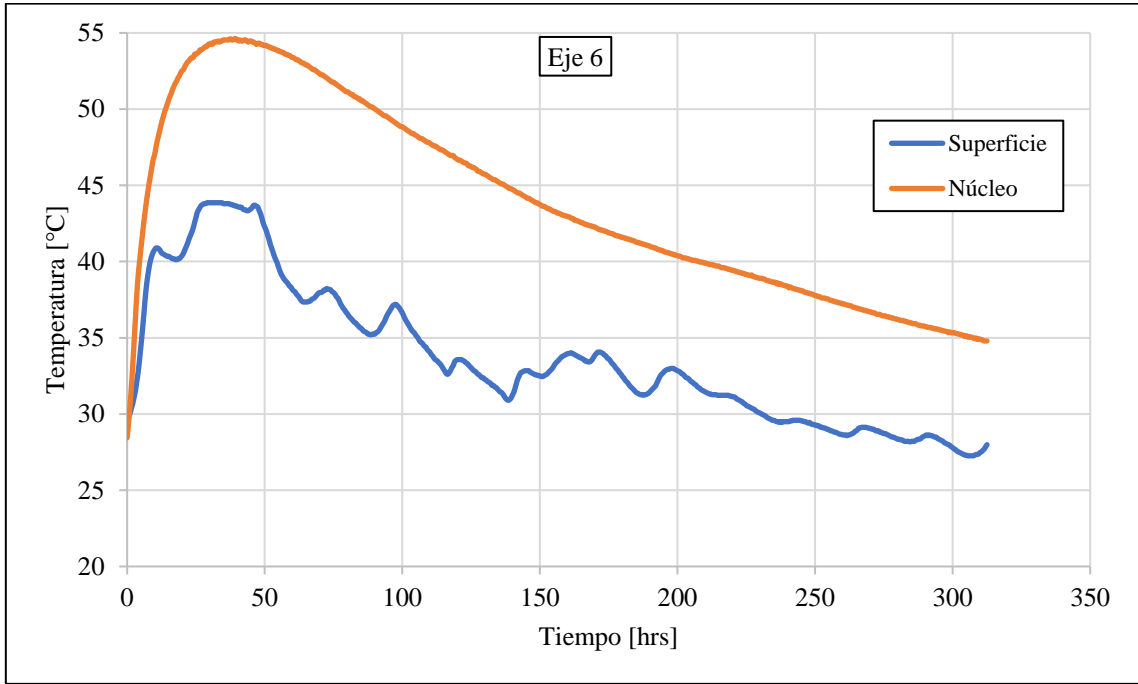
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 72: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 6



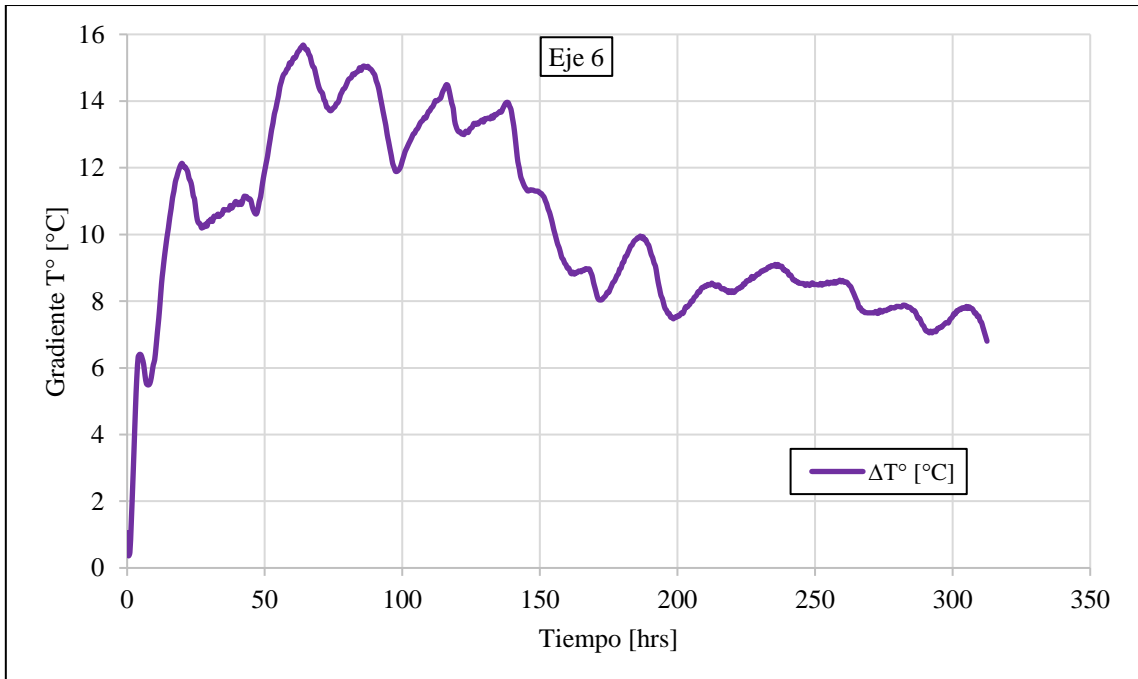
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 73: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 6



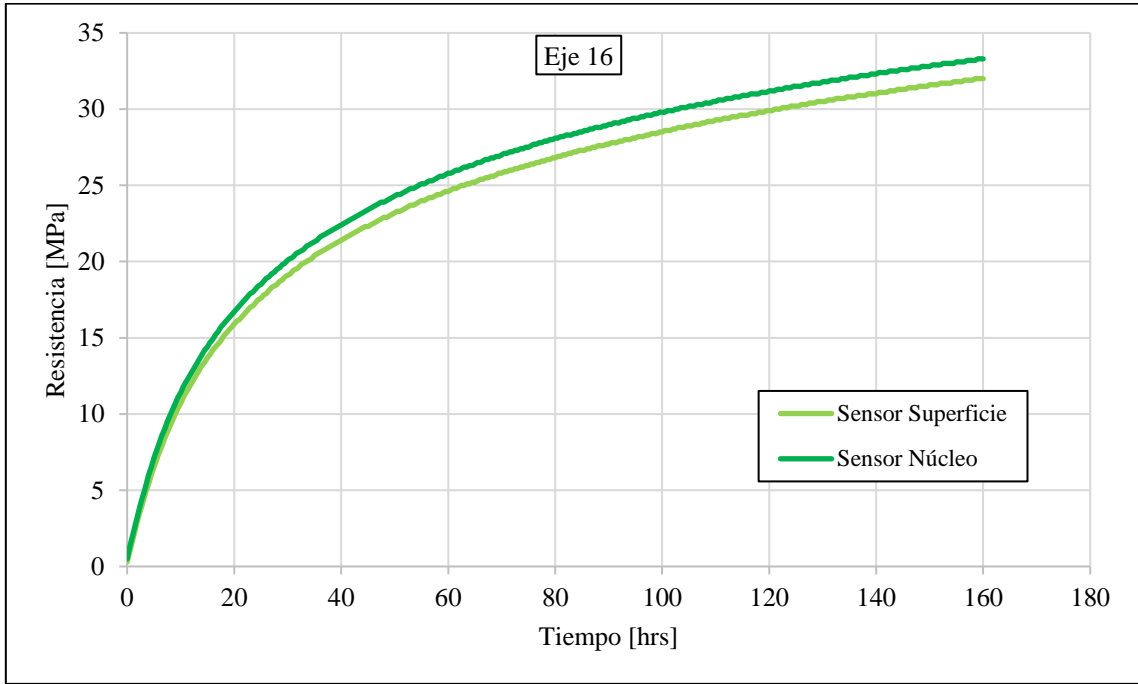
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 74: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 6



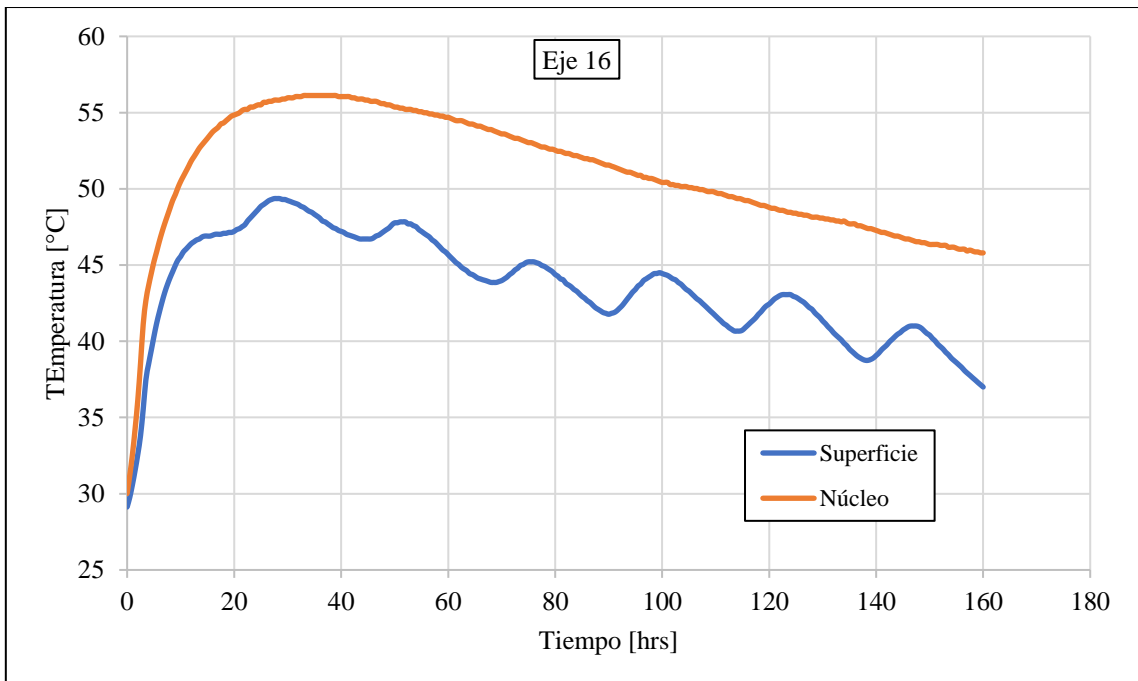
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 75: Curva de resistencia para superficie y núcleo, Eje 16



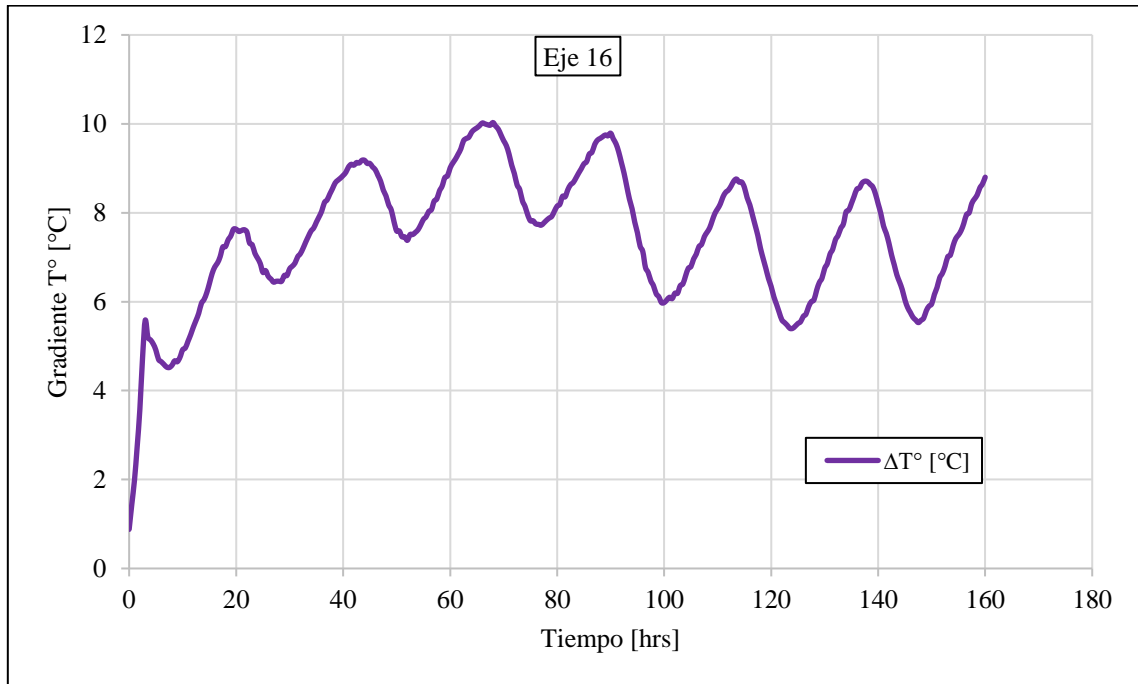
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 76: Curva de temperatura para superficie y núcleo, Eje 16



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 77: Curva de gradiente de temperatura entre superficie y núcleo, Eje 16



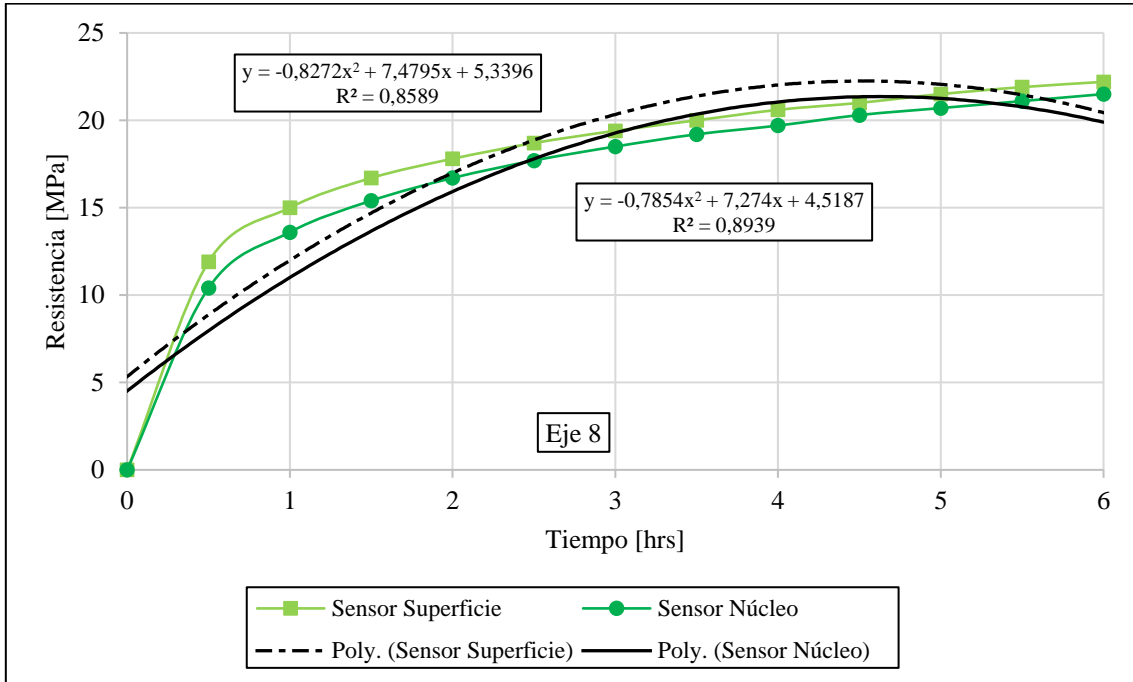
(Fuente: Elaboración Propia)

## **ANEXO B**

**Gráficos: Curva de Resistencia y regresión polinómica por tramos de estudio.**

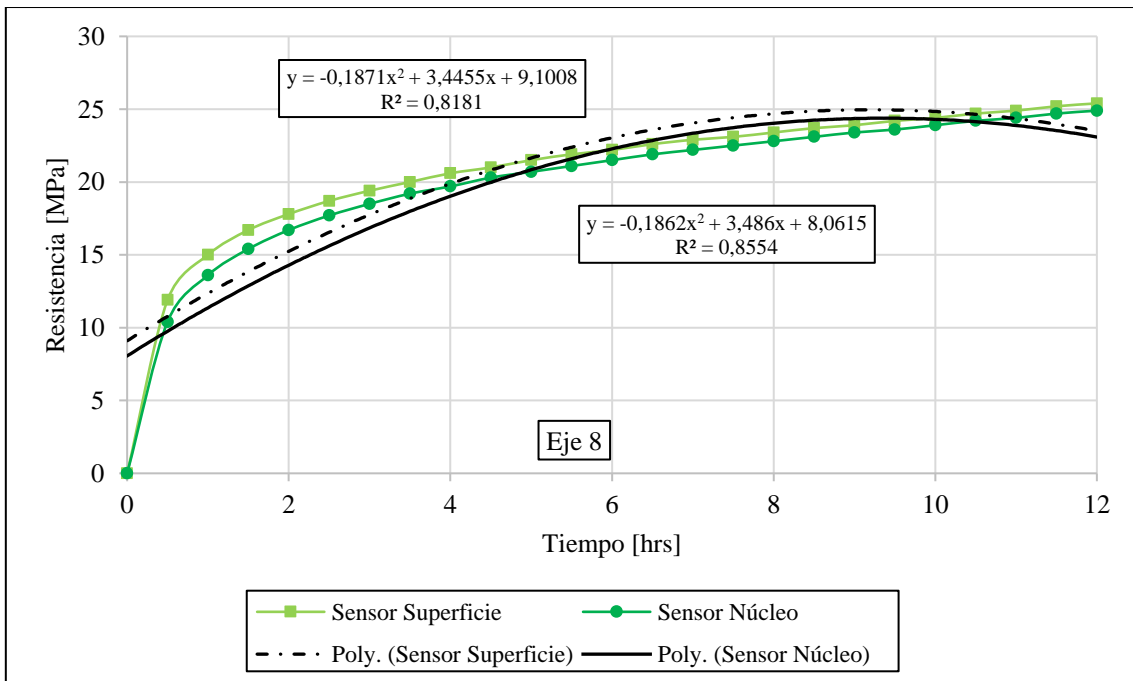
**Proyecto Padre Hurtado / Proyecto Infinity**

Figura 78: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (6 hrs)



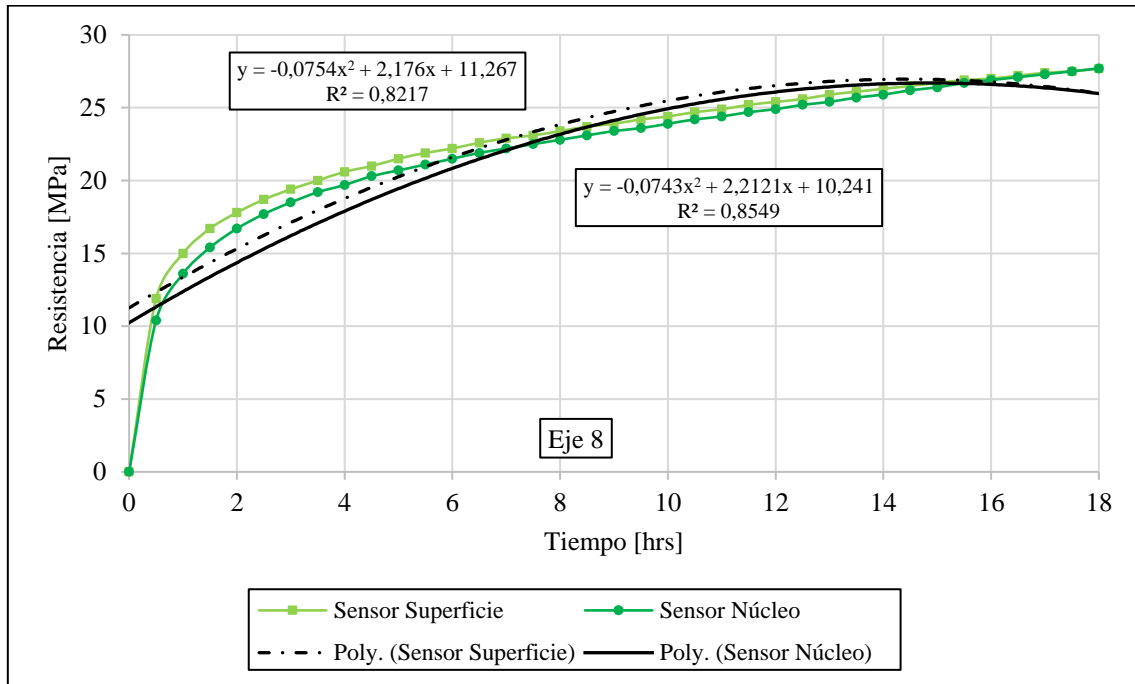
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 79: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (12 hrs)



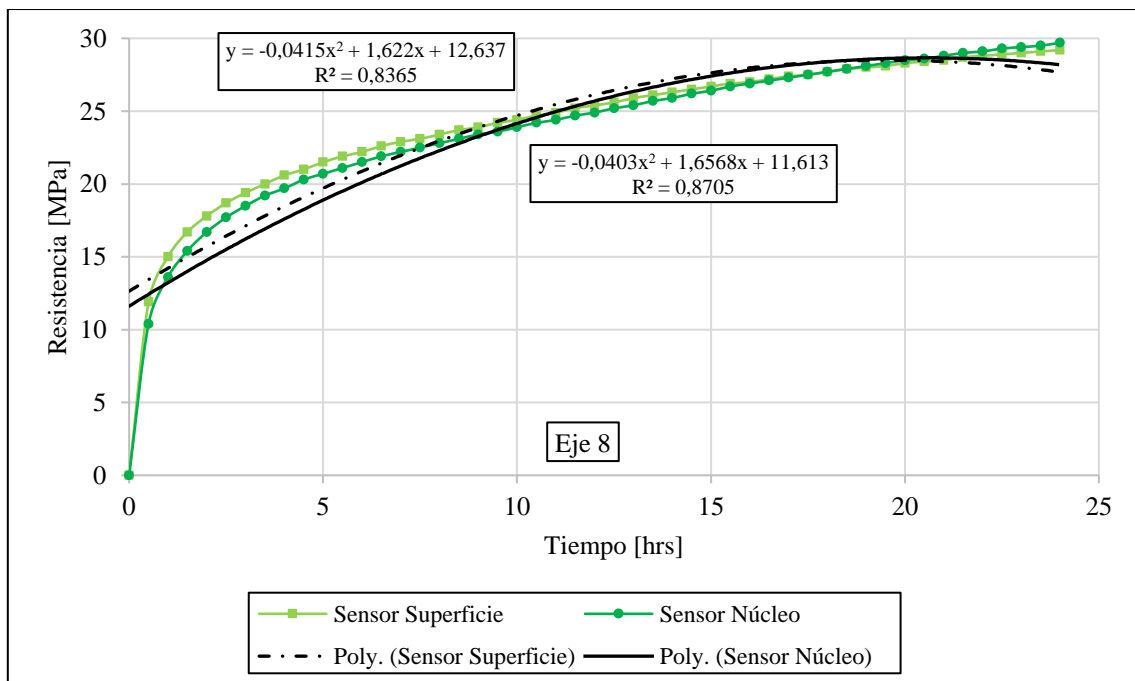
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 80: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (18 hrs)



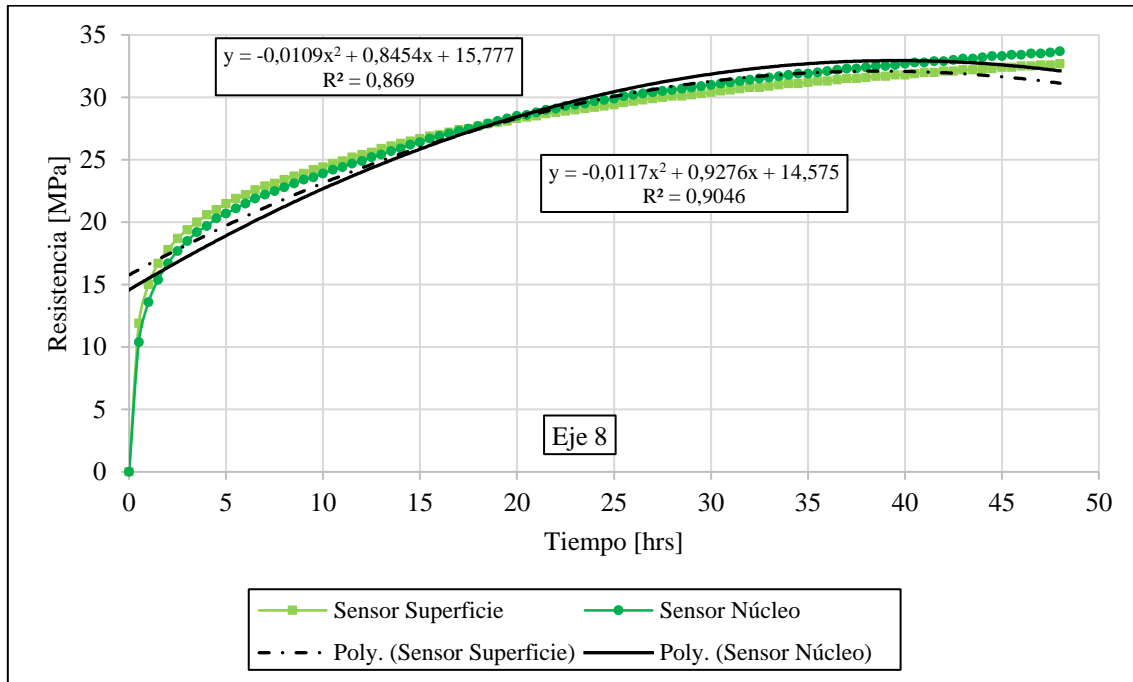
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 81: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (24 hrs)



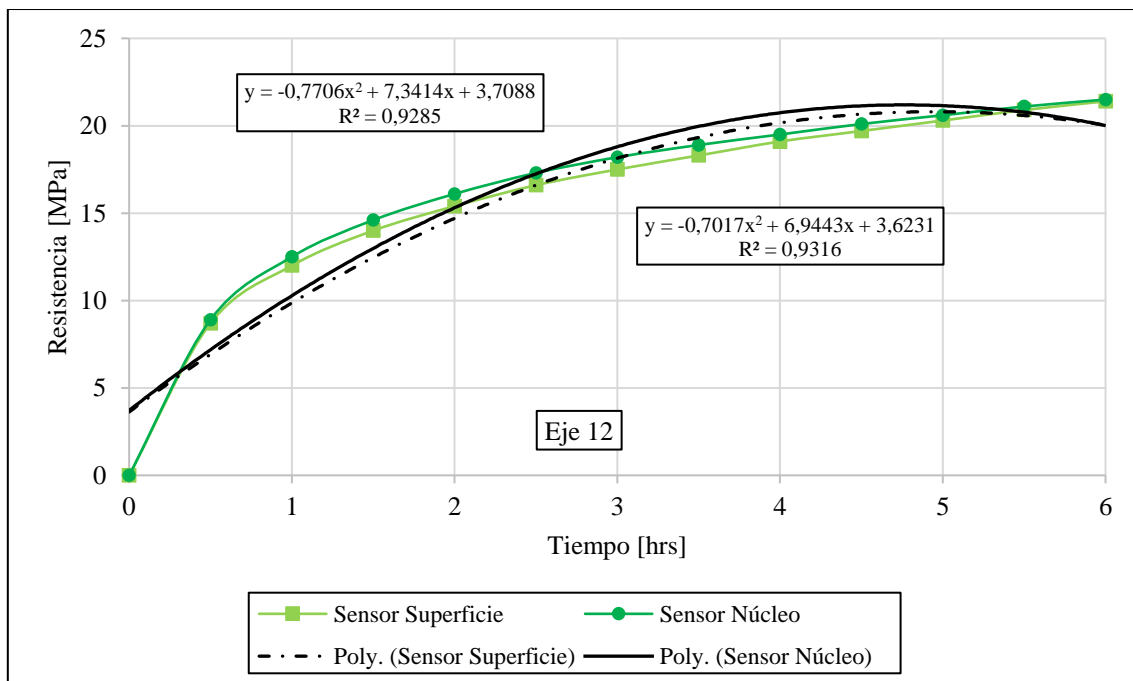
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 82: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 8 (48 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

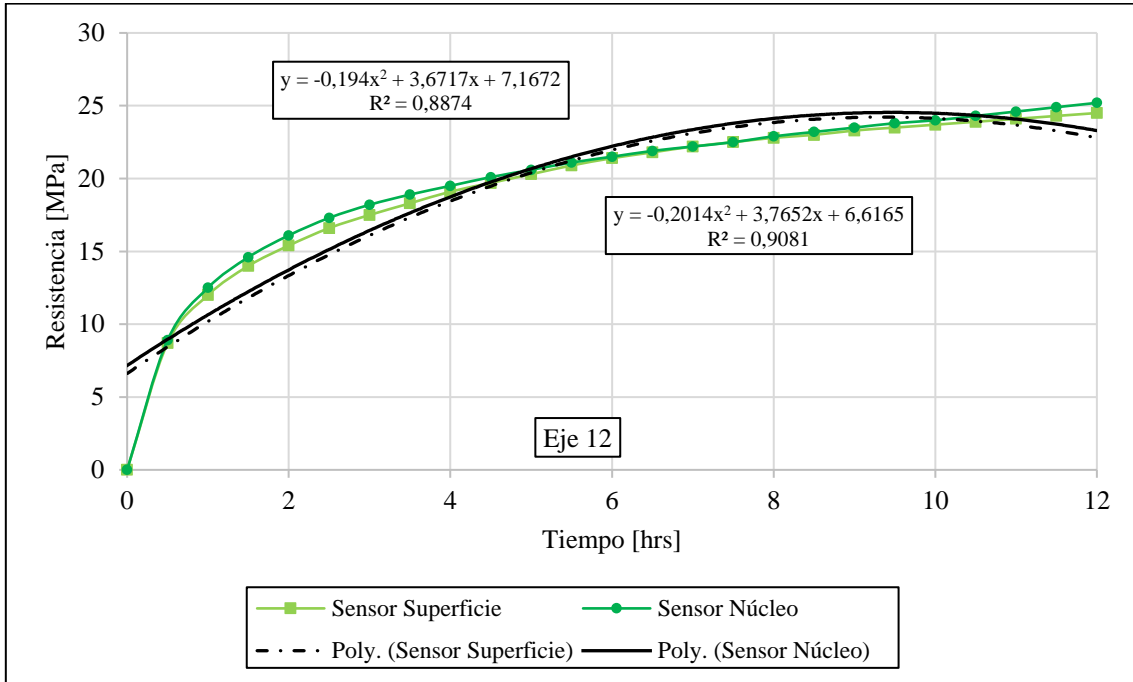
Figura 83: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (6 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

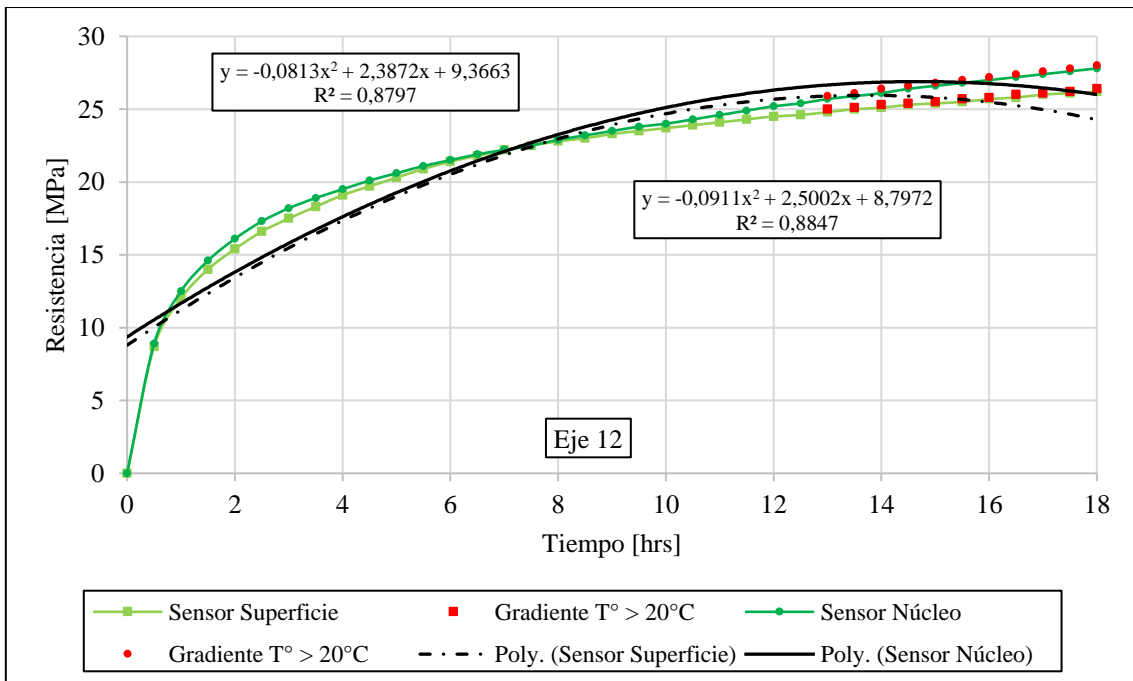


Figura 84: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (12 hrs)



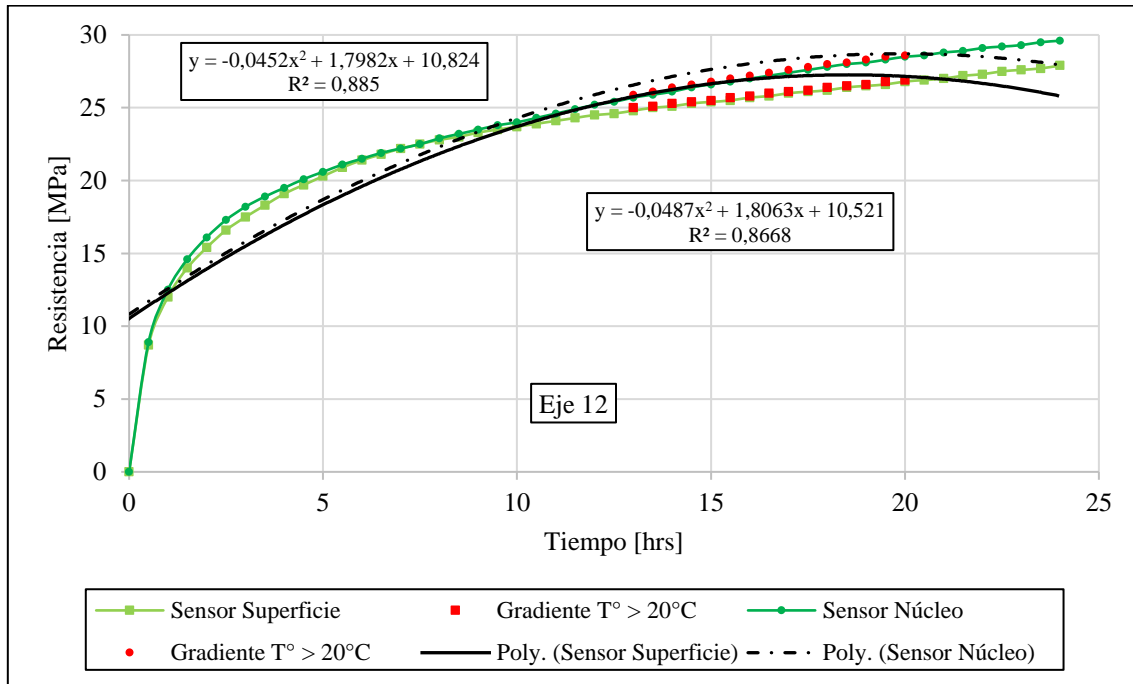
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 85: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (18 hrs)



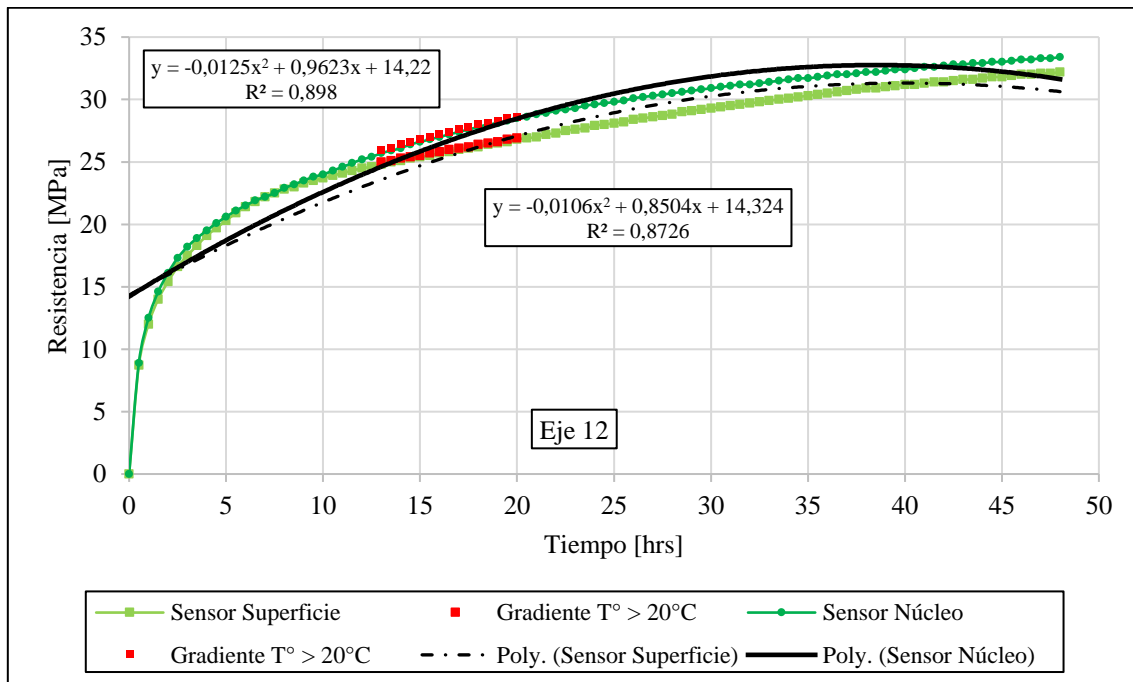
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 86: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (24 hrs)



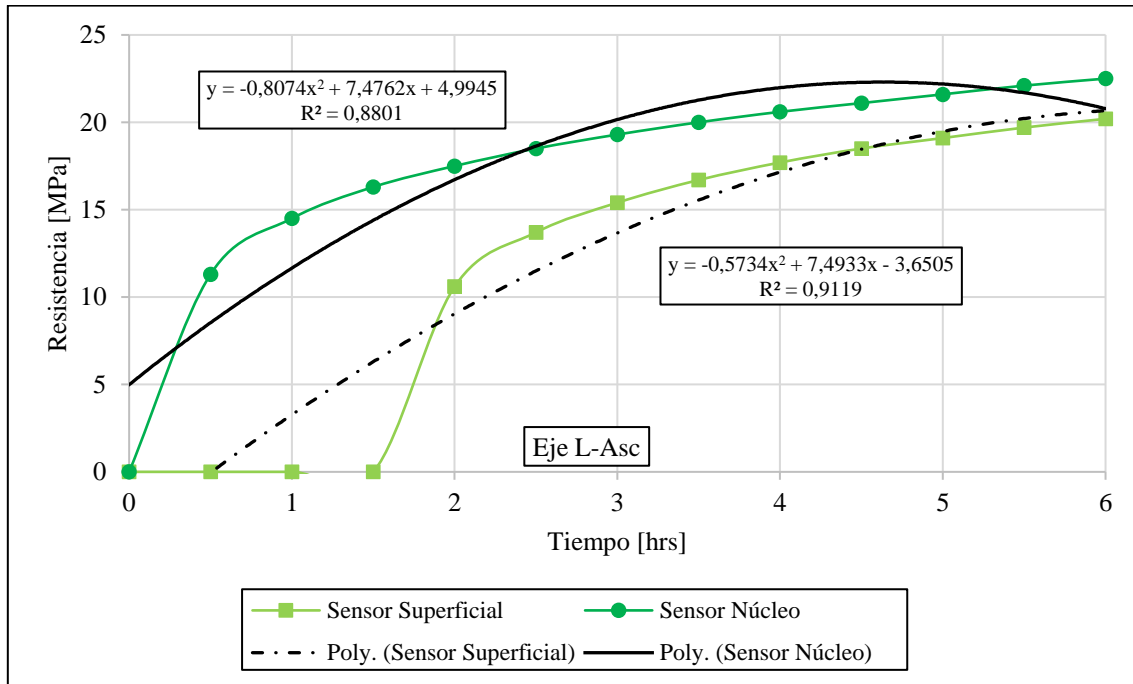
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 87: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 12 (48 hrs)



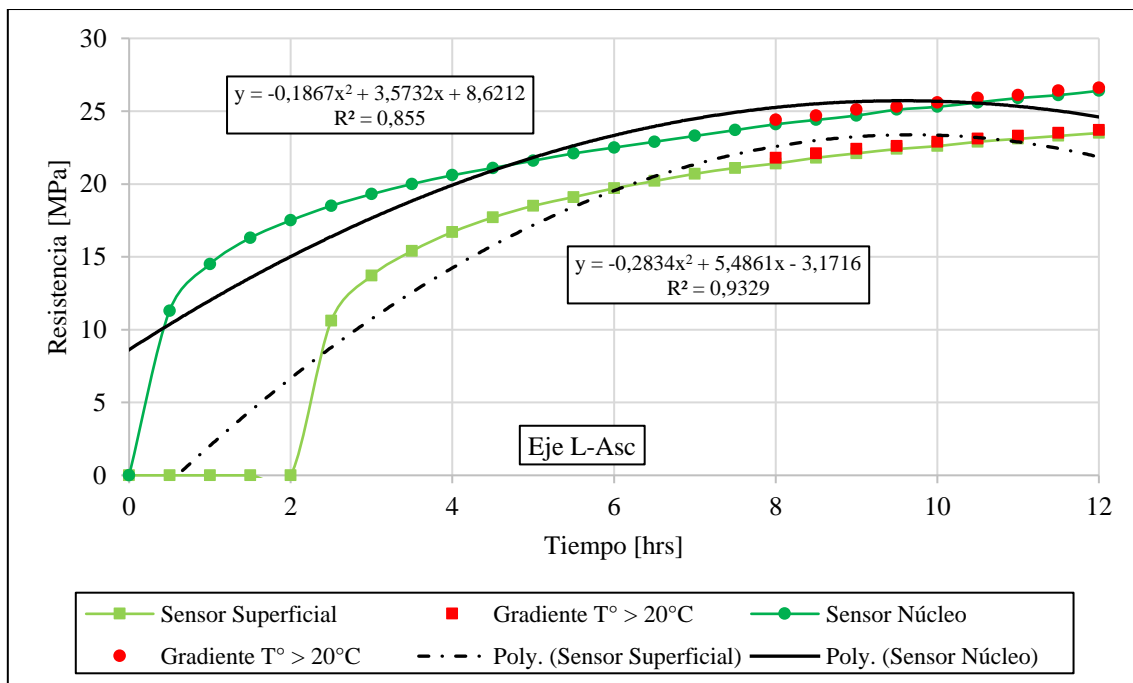
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 88: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (6 hrs)



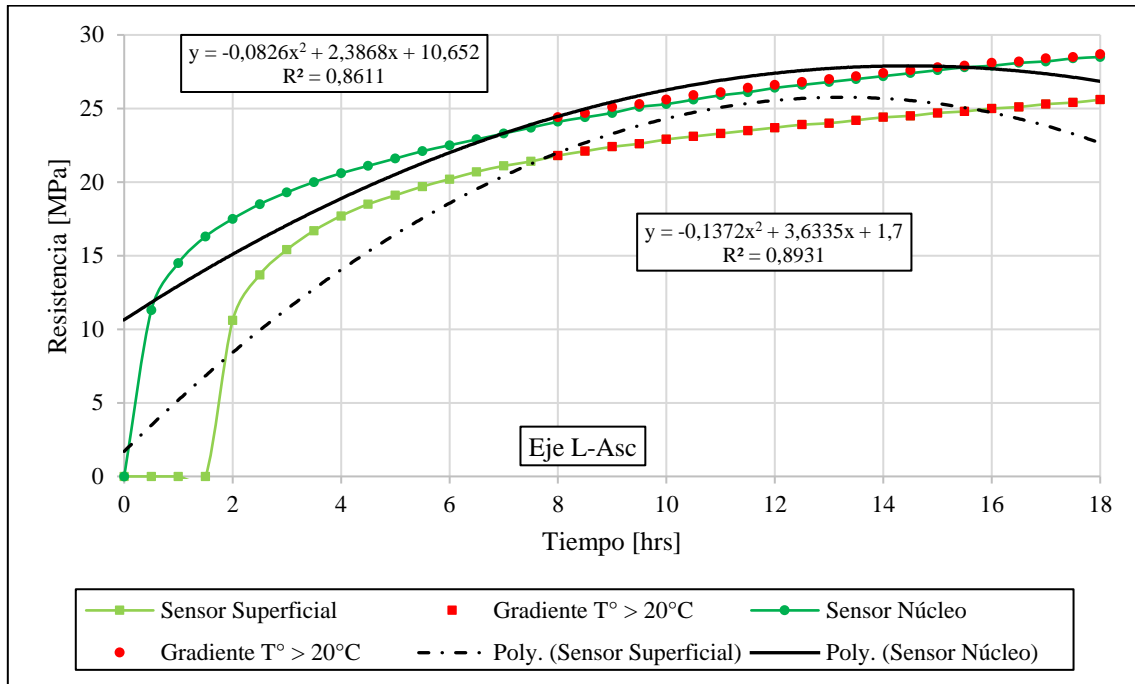
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 89: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (12 hrs)



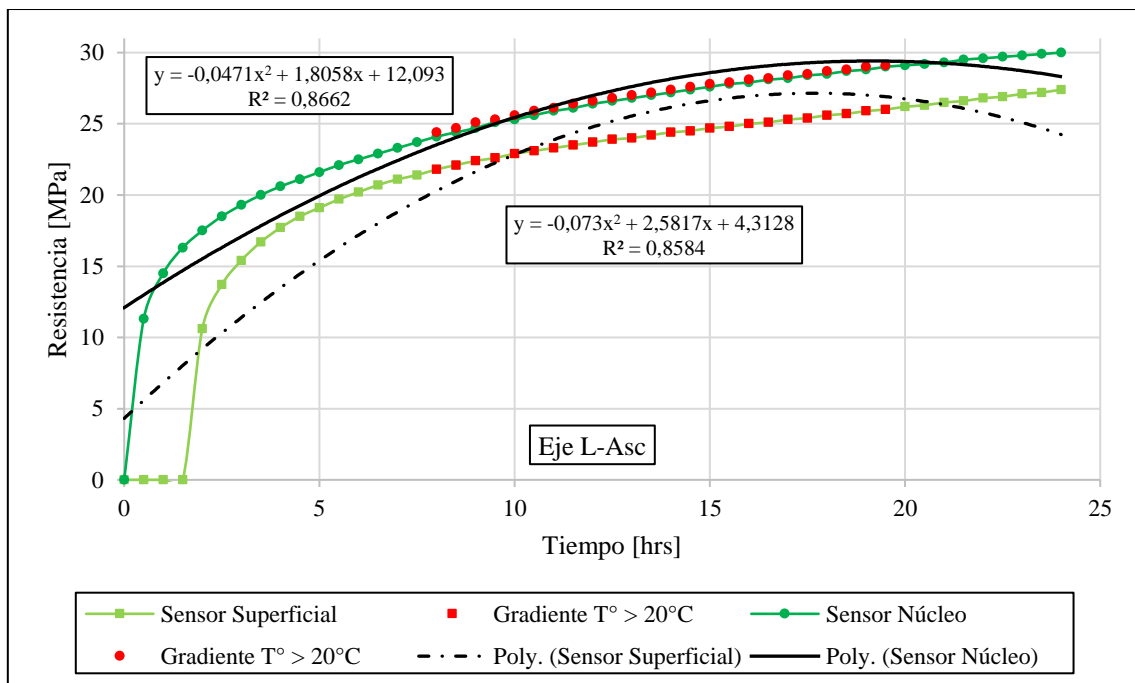
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 90: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (18 hrs)



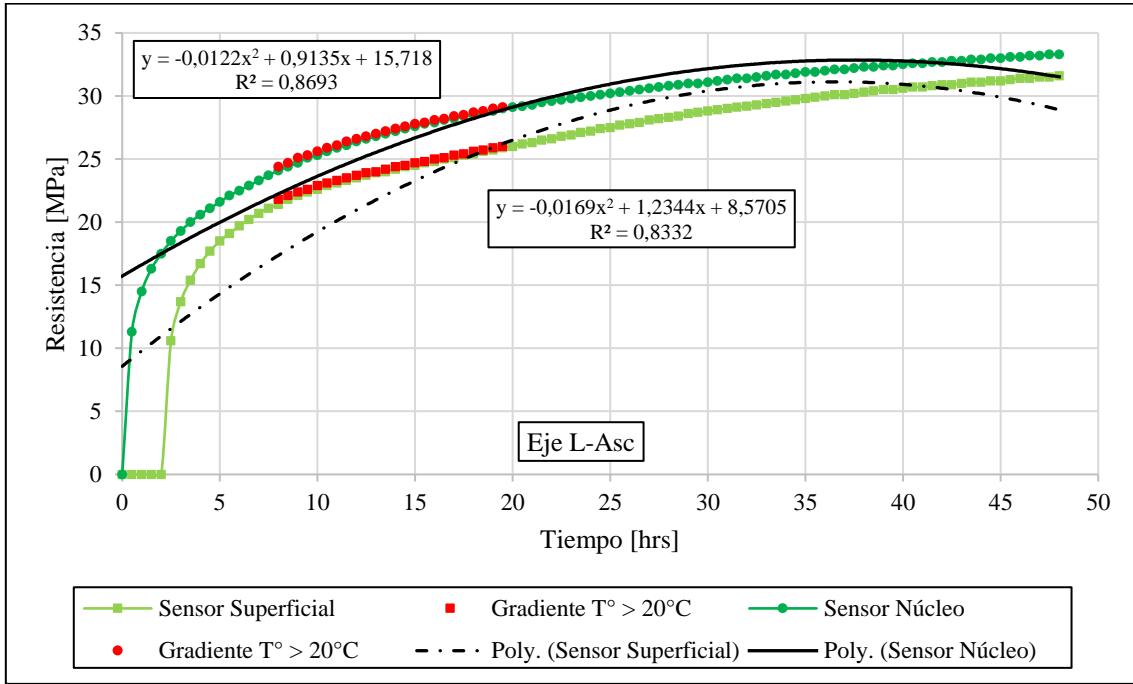
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 91: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (24 hrs)



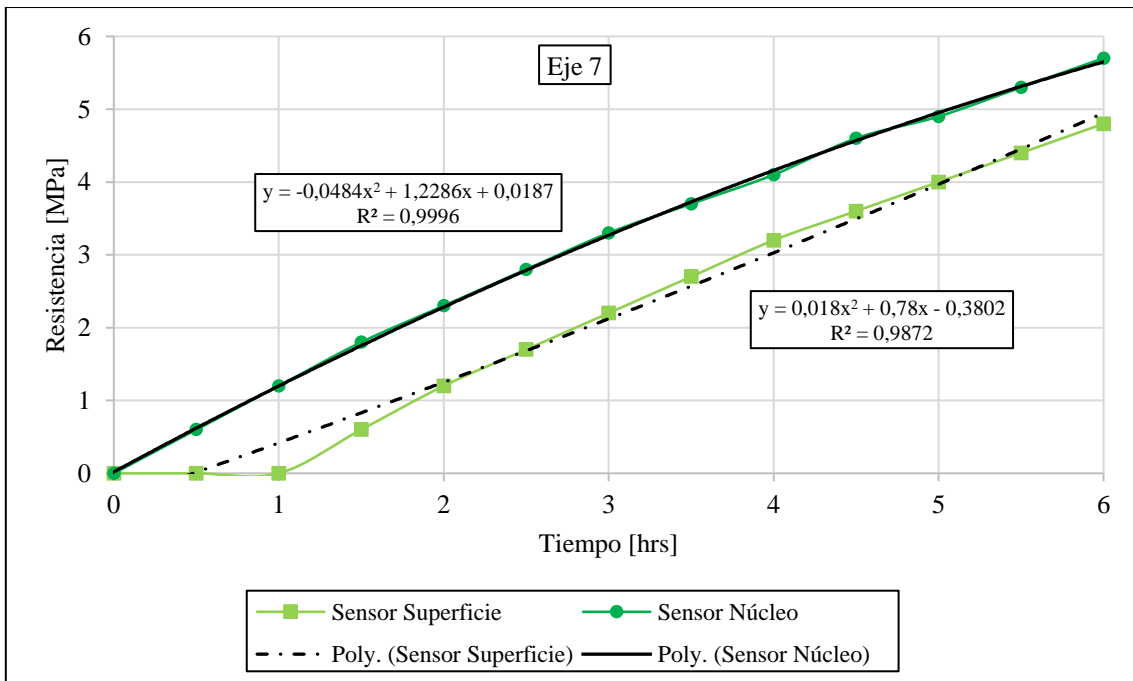
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 92: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje L-Asc (48 hrs)



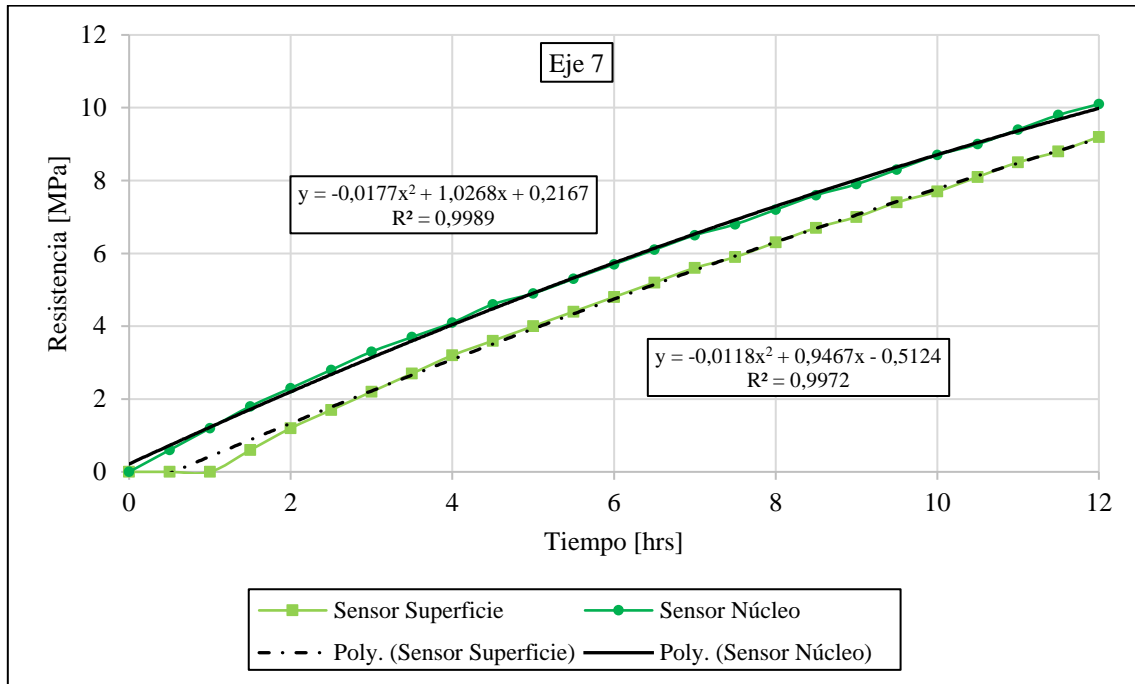
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 93: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (6 hrs)



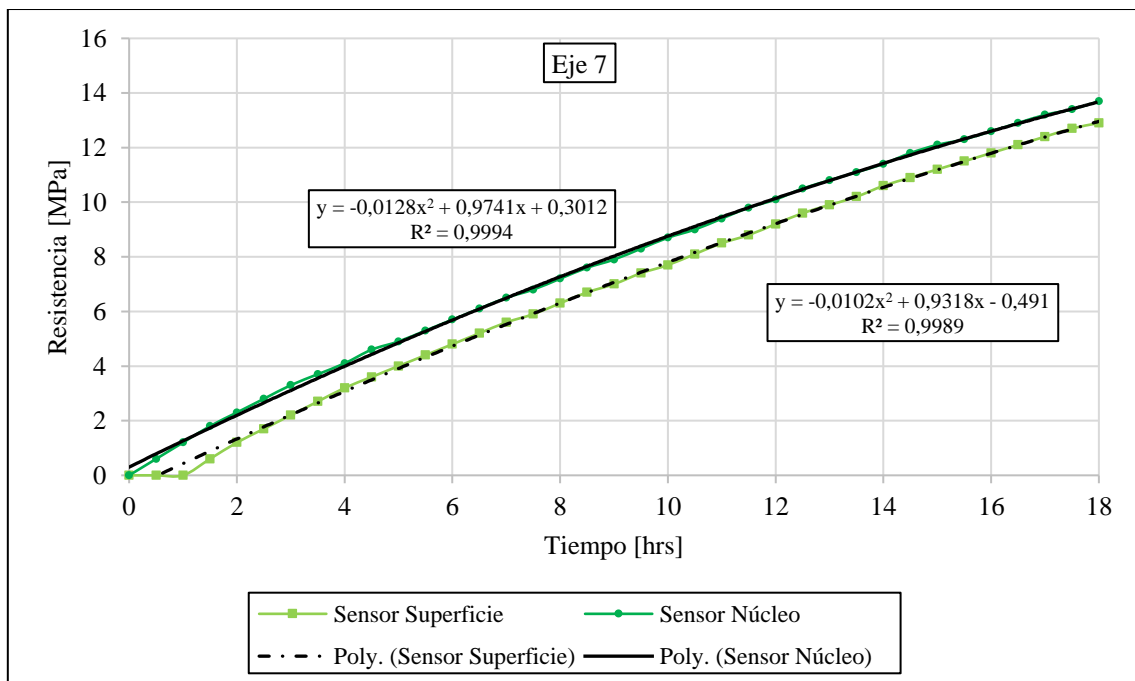
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 94: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (12 hrs)



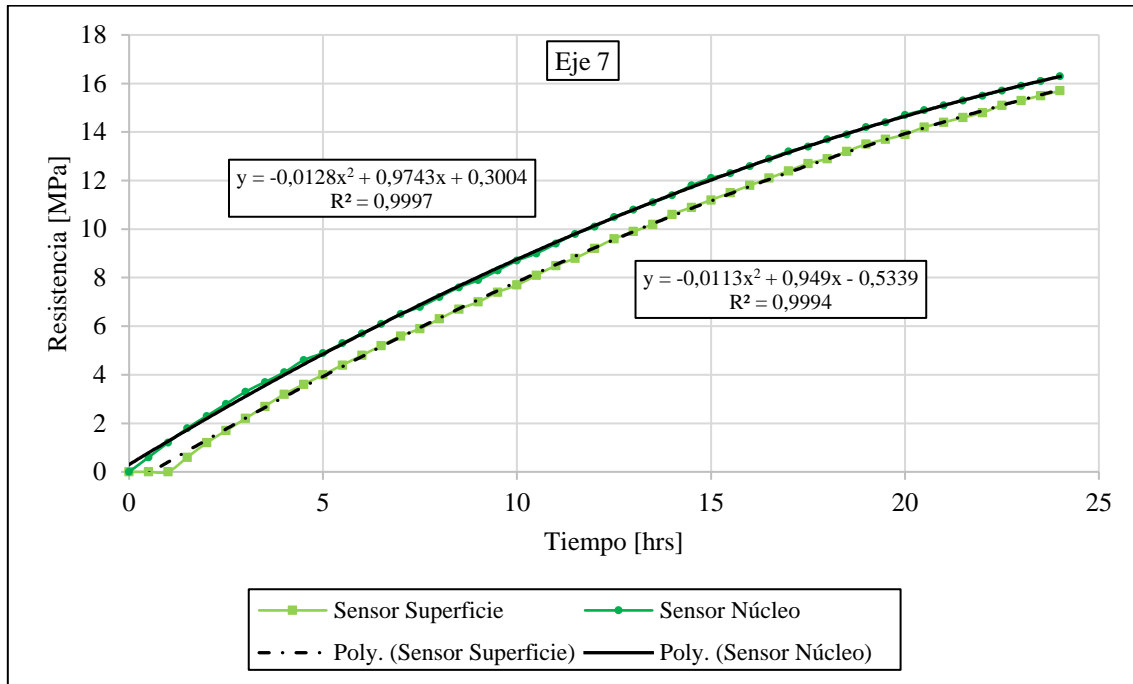
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 95: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (18 hrs)



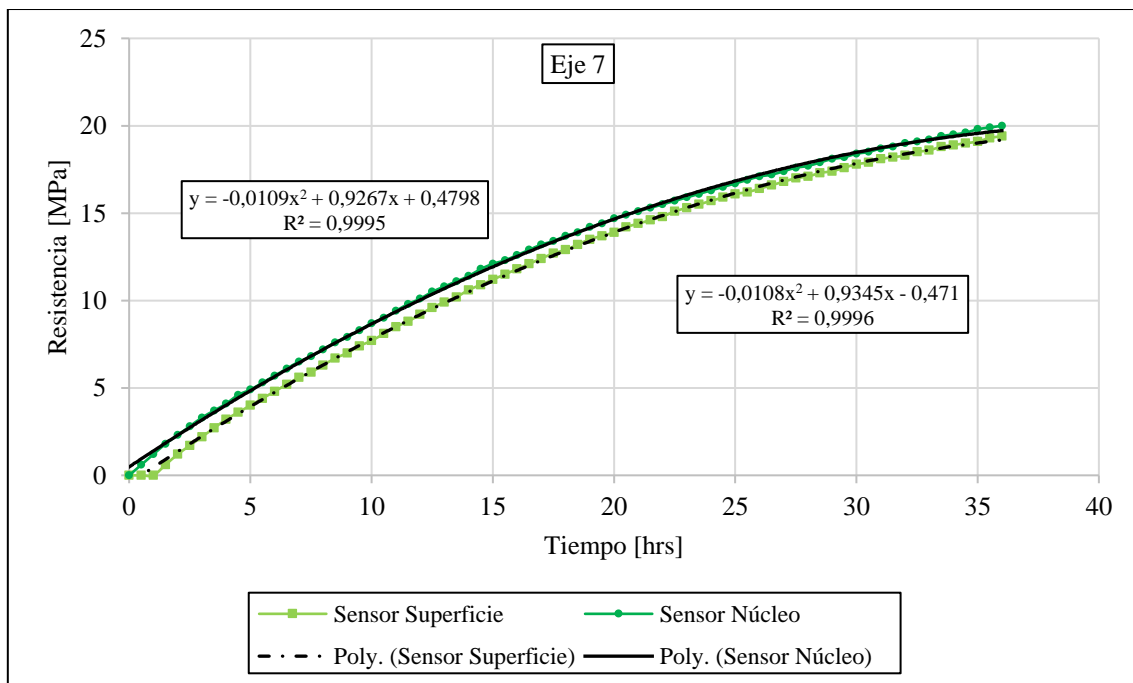
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 96: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (24 hrs)



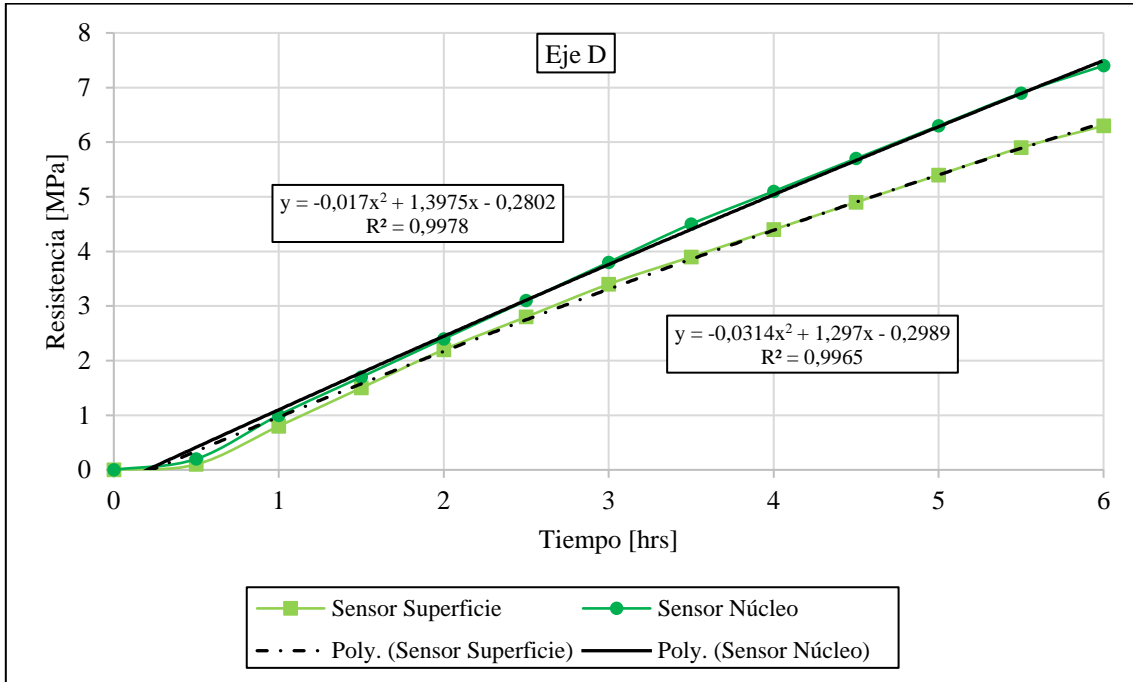
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 97: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 7 (36 hrs)



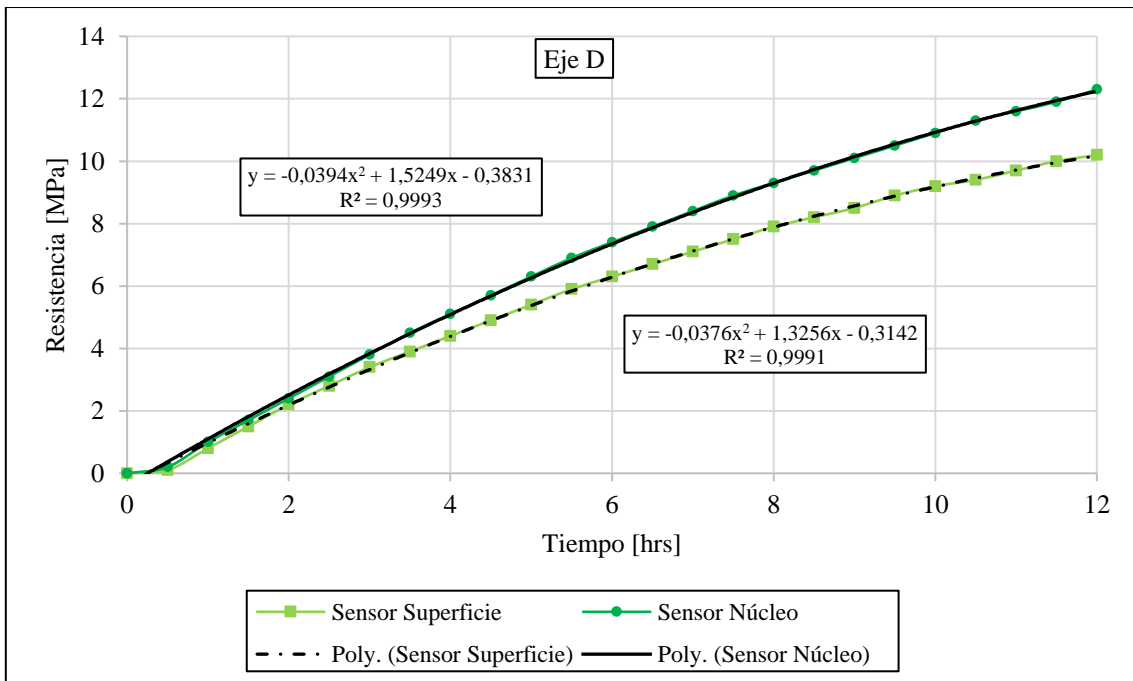
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 98: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (6 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

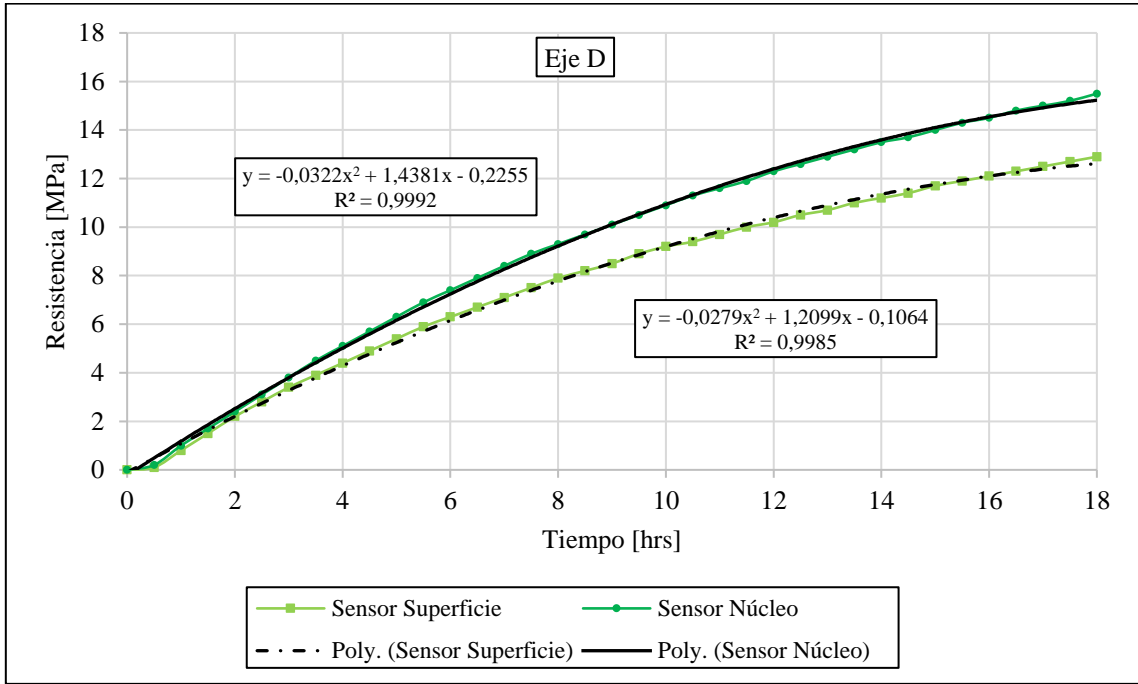
Figura 99: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (12 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

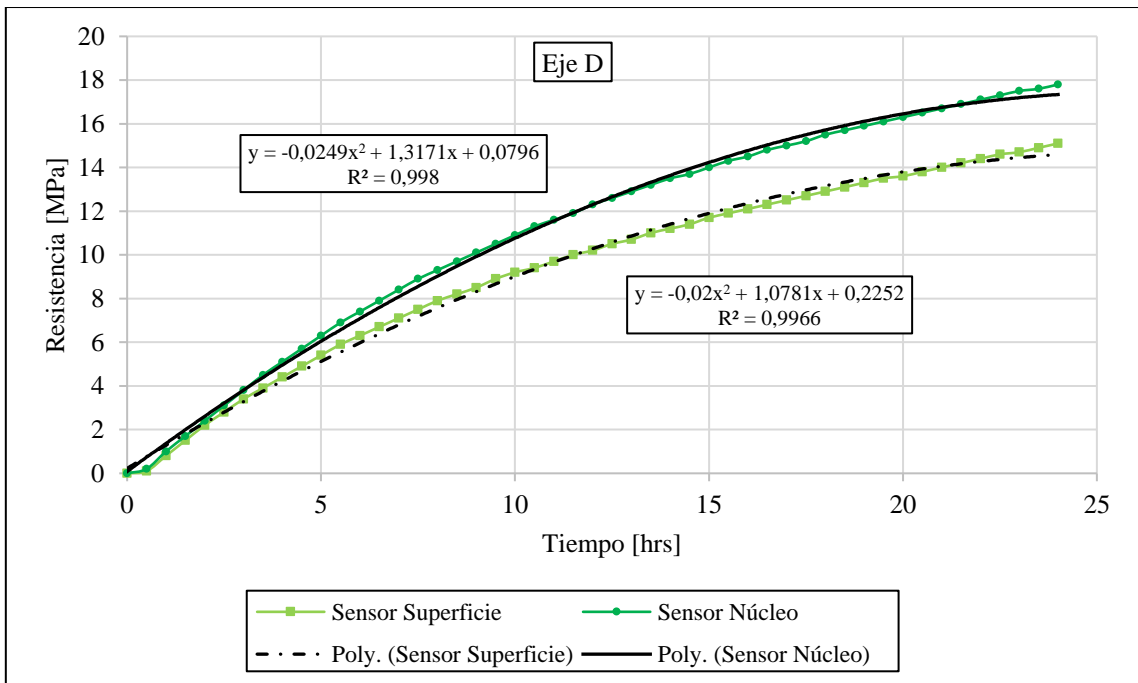


Figura 100: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (18 hrs)



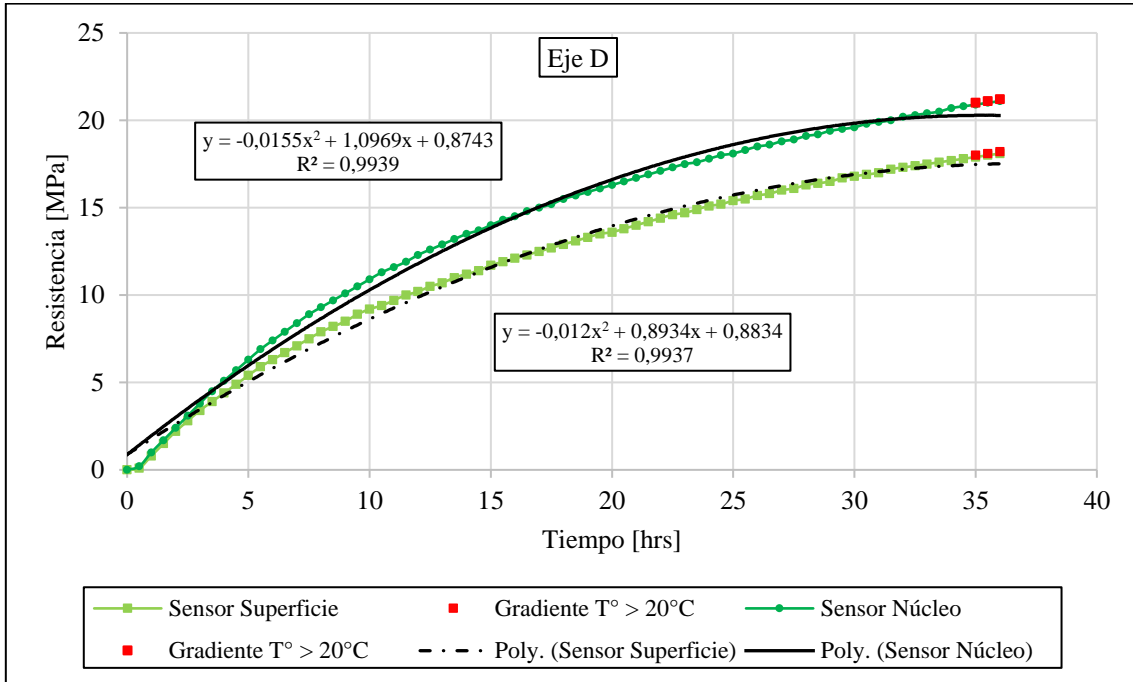
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 101: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (24 hrs)



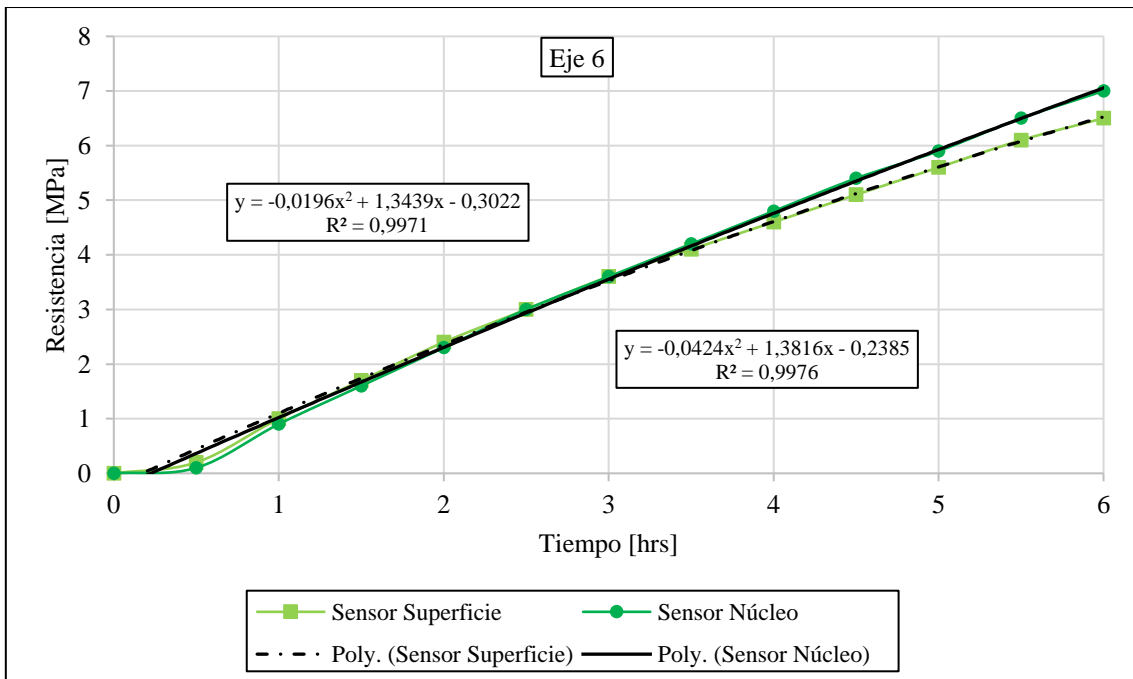
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 102: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje D (36 hrs)



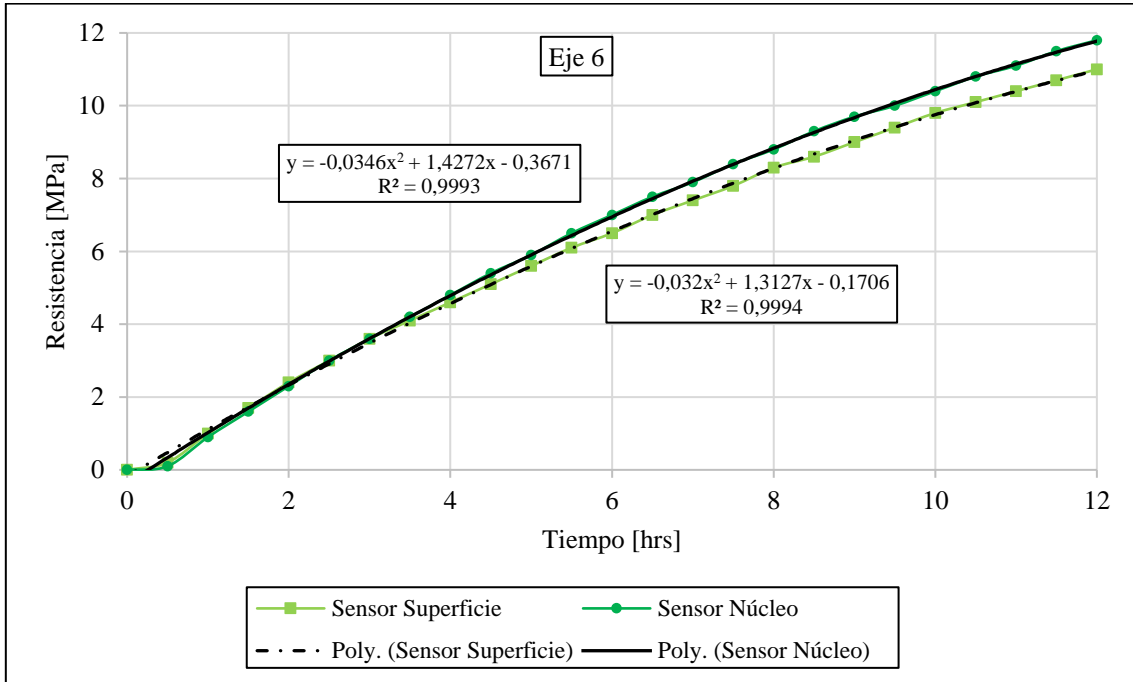
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 103: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (6 hrs)



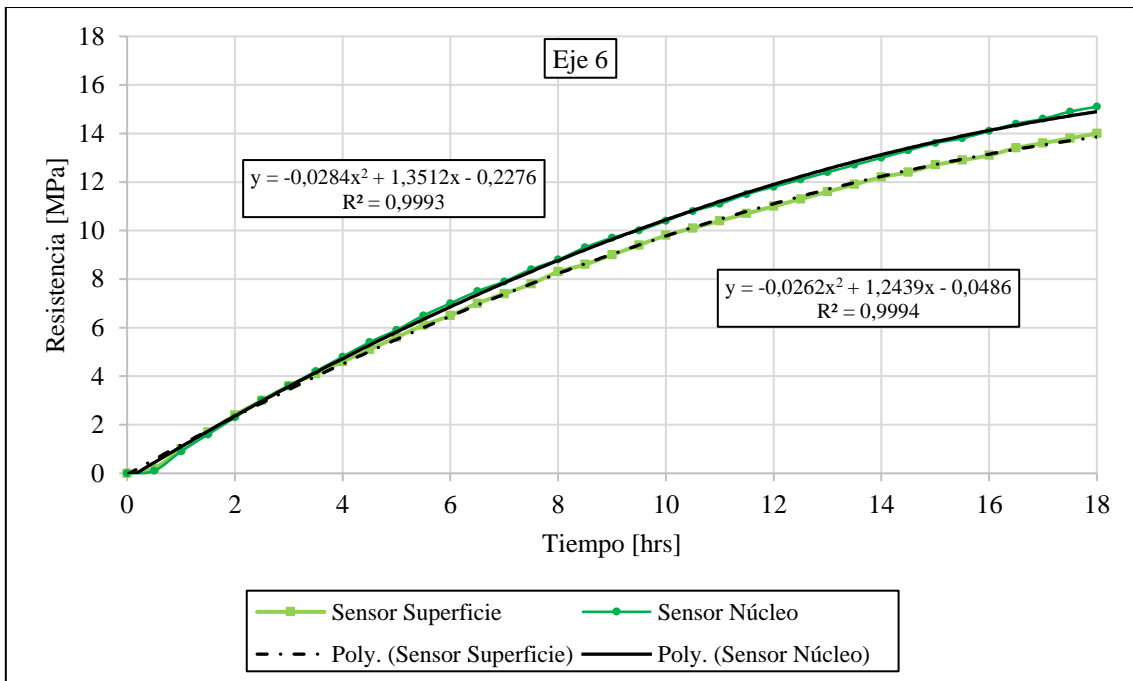
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 104: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (12 hrs)



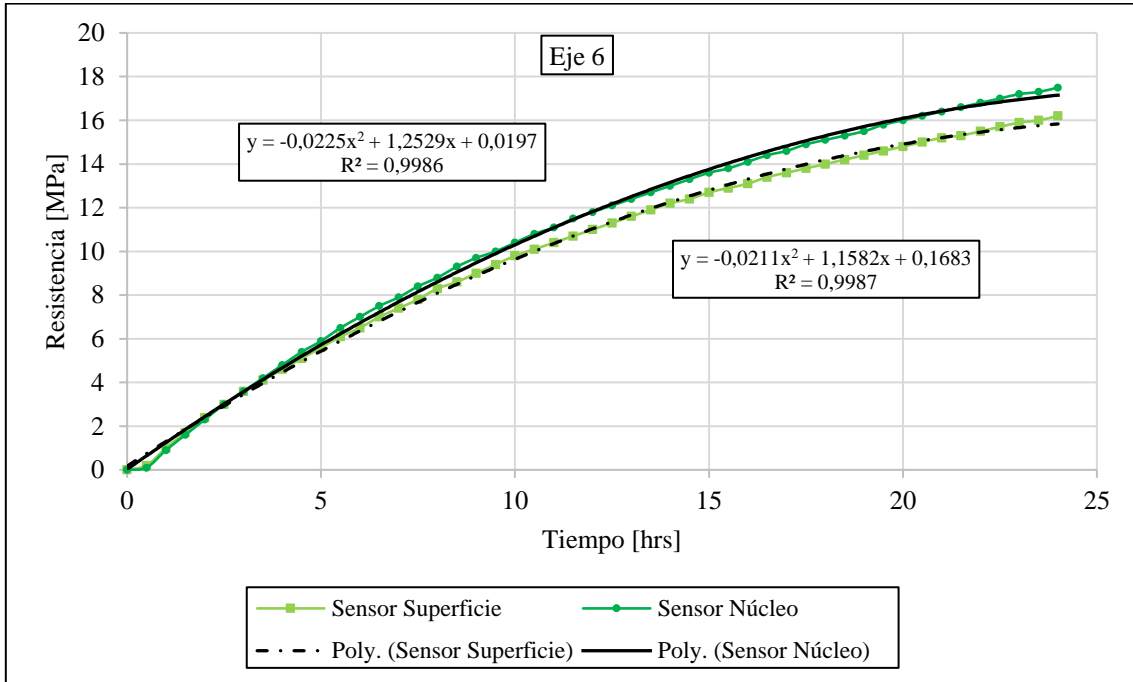
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 105: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (18 hrs)



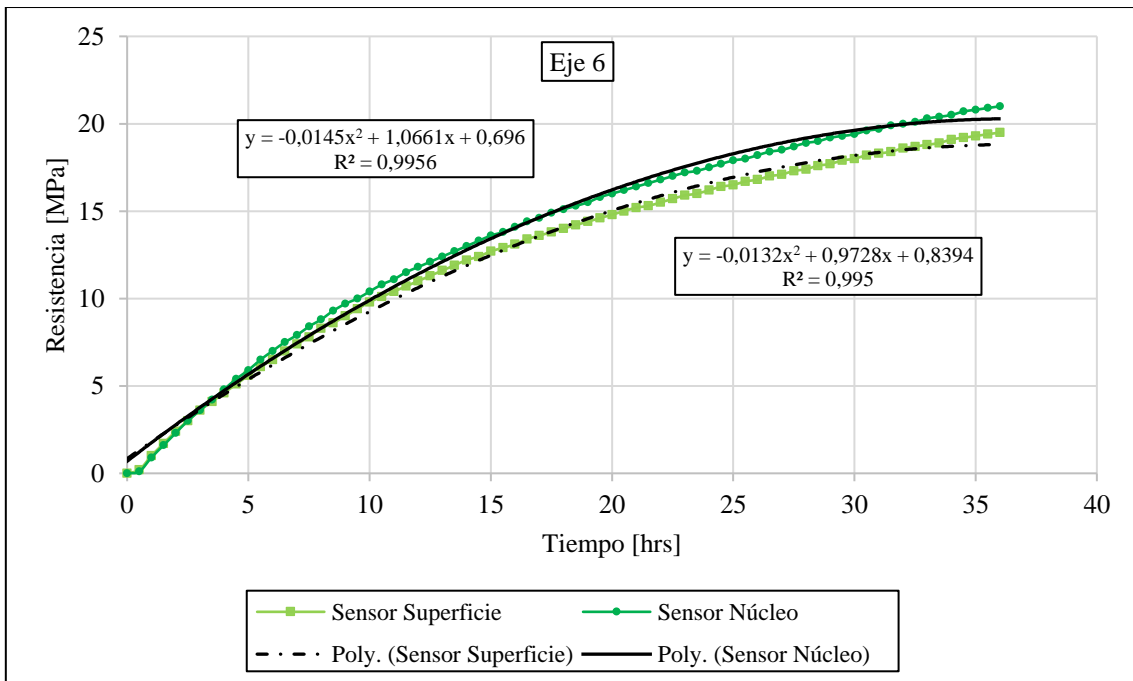
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 106: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (24 hrs)



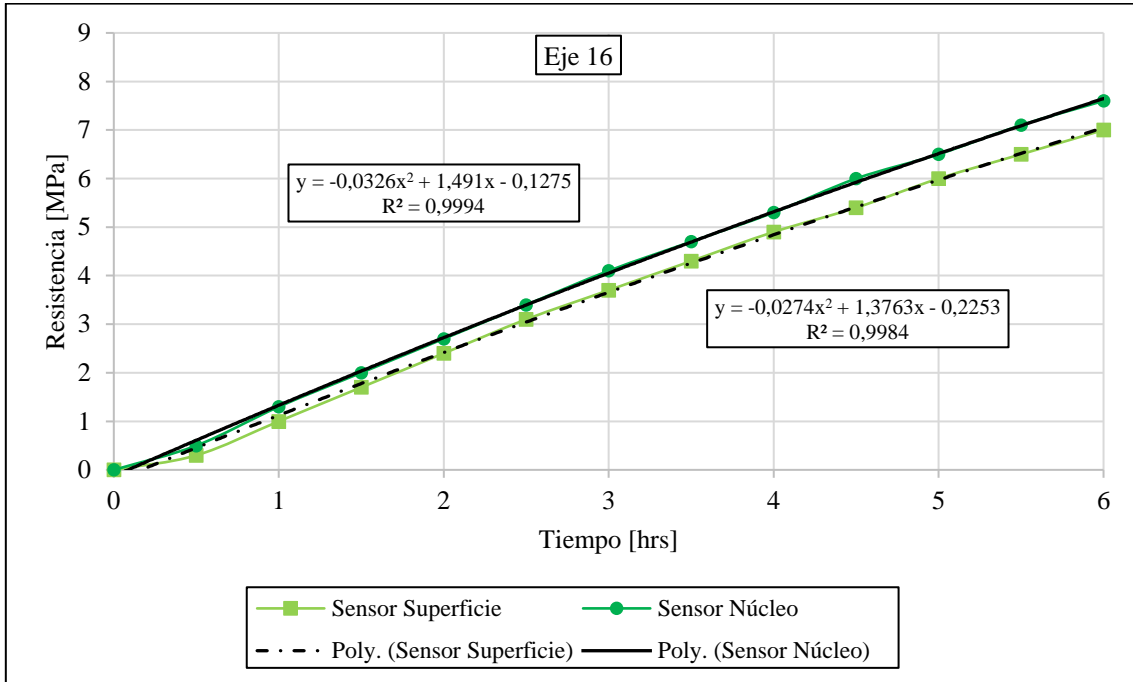
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 107: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 6 (36 hrs)



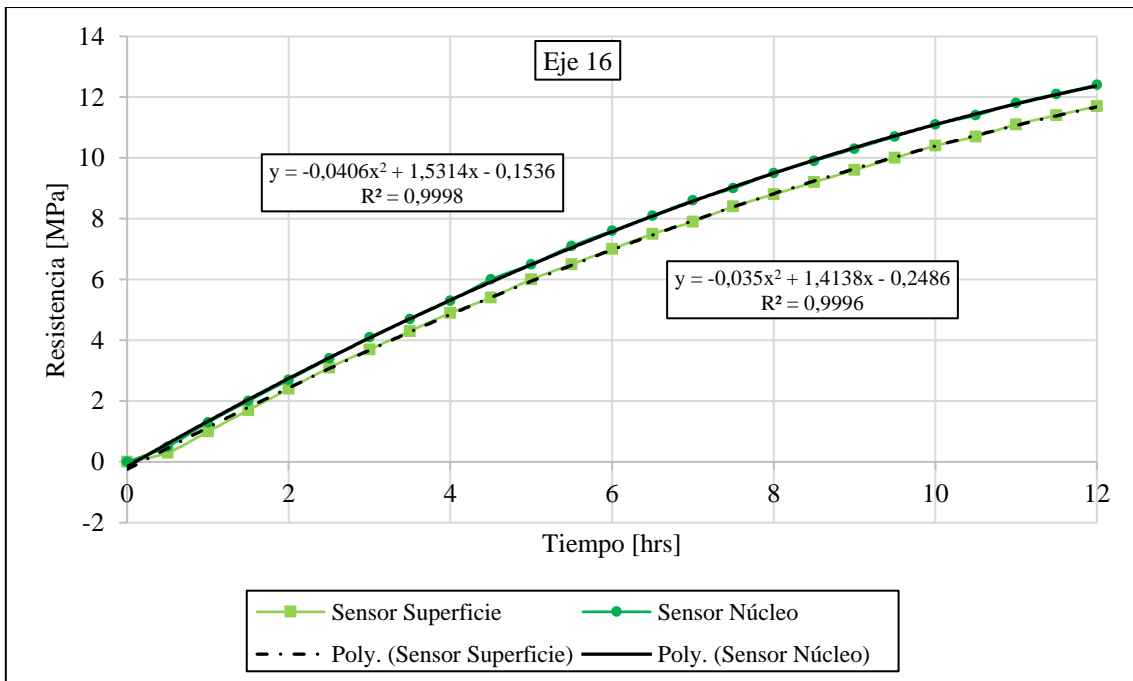
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 108: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (6 hrs)



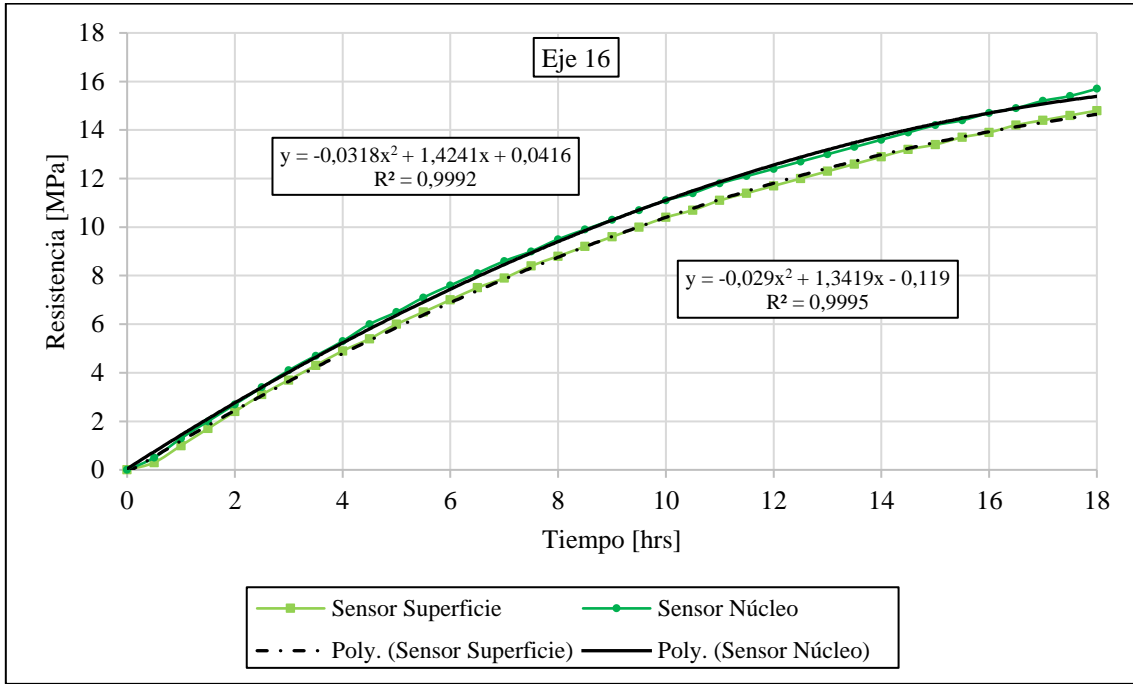
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 109: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (12 hrs)



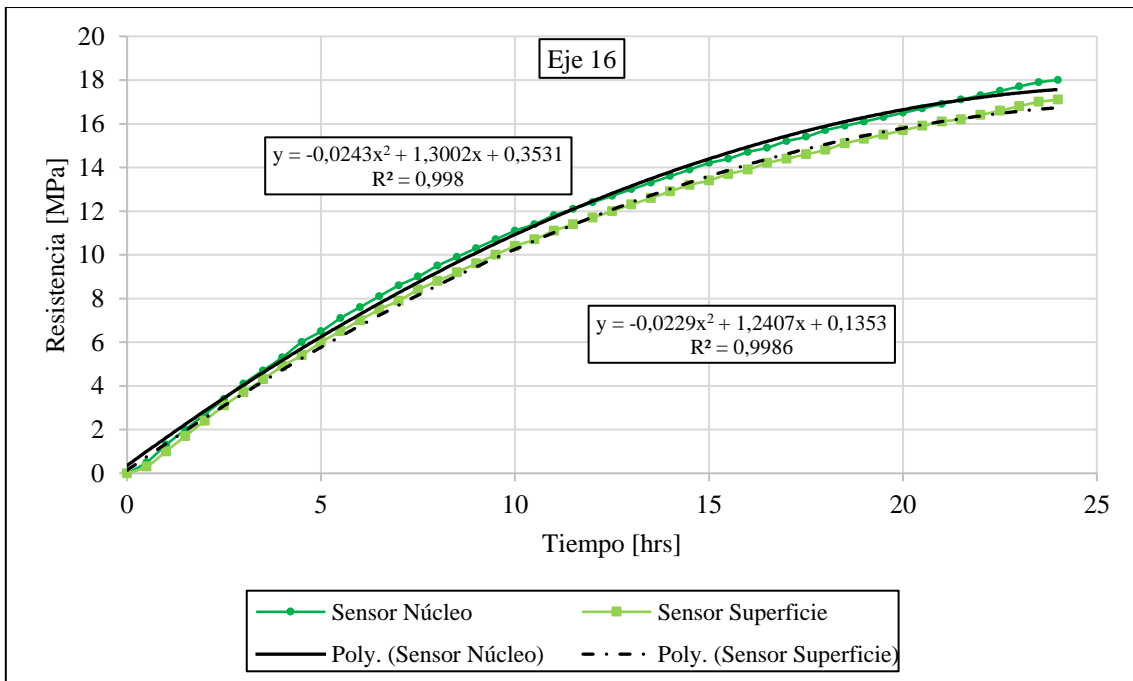
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 110: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (18 hrs)



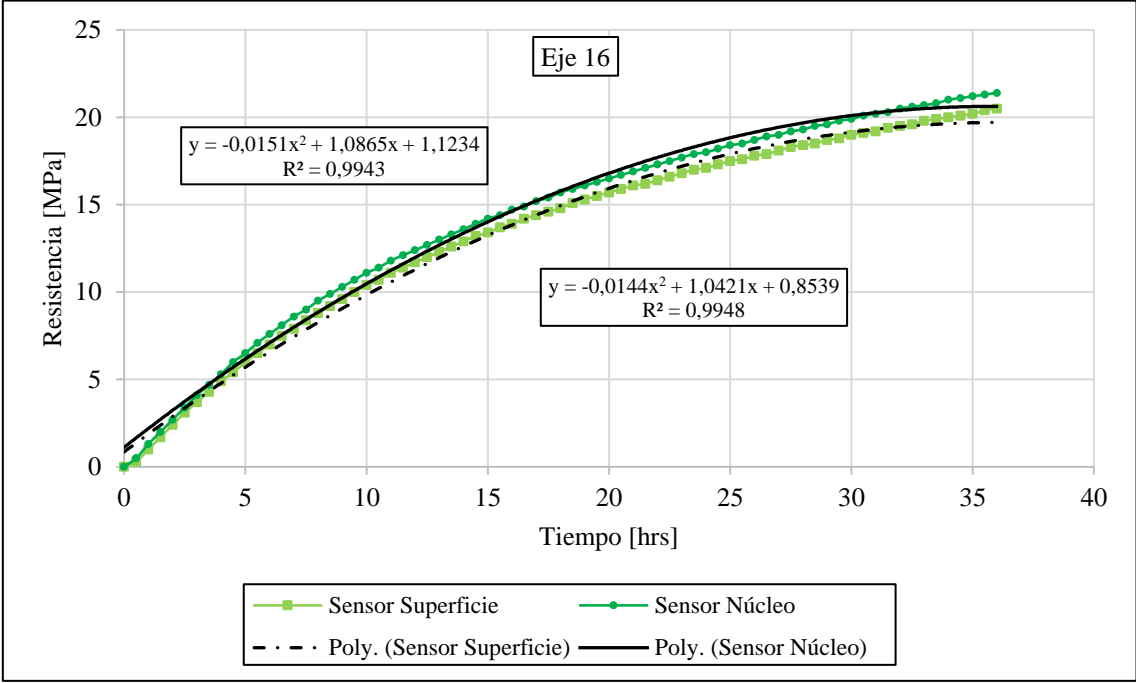
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 111: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (24 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 112: Curva de resistencia y regresión polinómica para superficie y núcleo, Eje 16 (36 hrs)



(Fuente: Elaboración Propia)

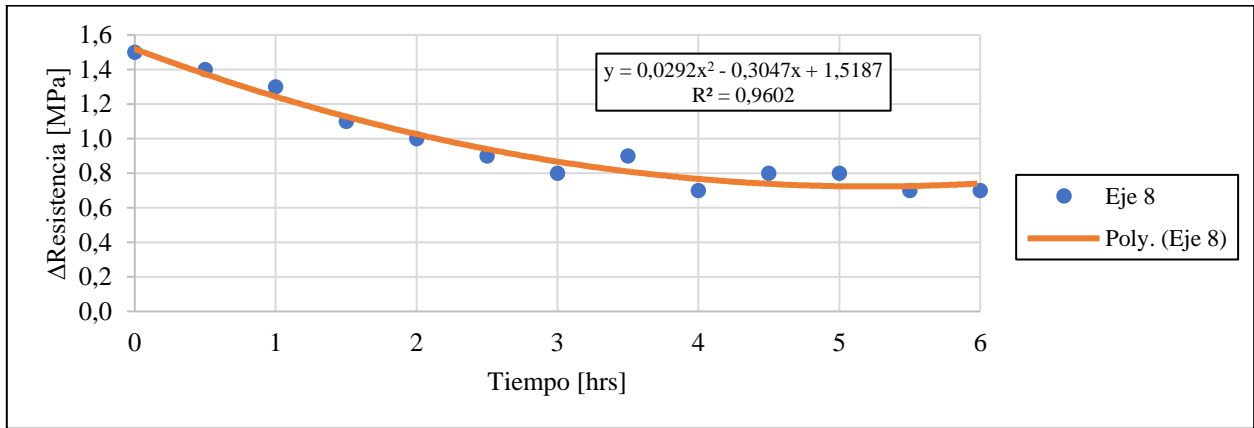
## **ANEXO C**

**Gráficos: Diferencia de Resistencia Acumulativa entre Superficie y Núcleo, por tramos de estudio.**

**Proyecto Padre Hurtado / Proyecto Infinity**

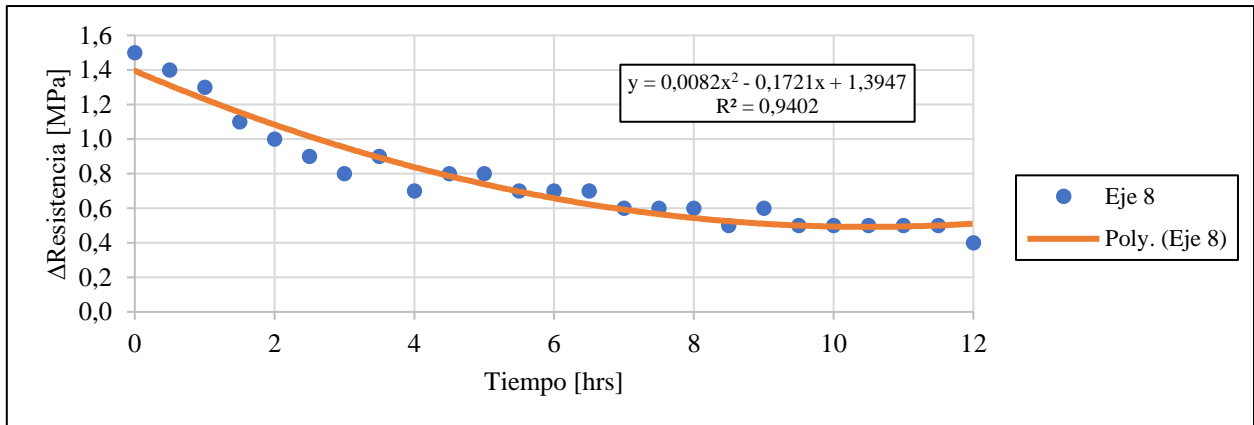


Figura 113: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



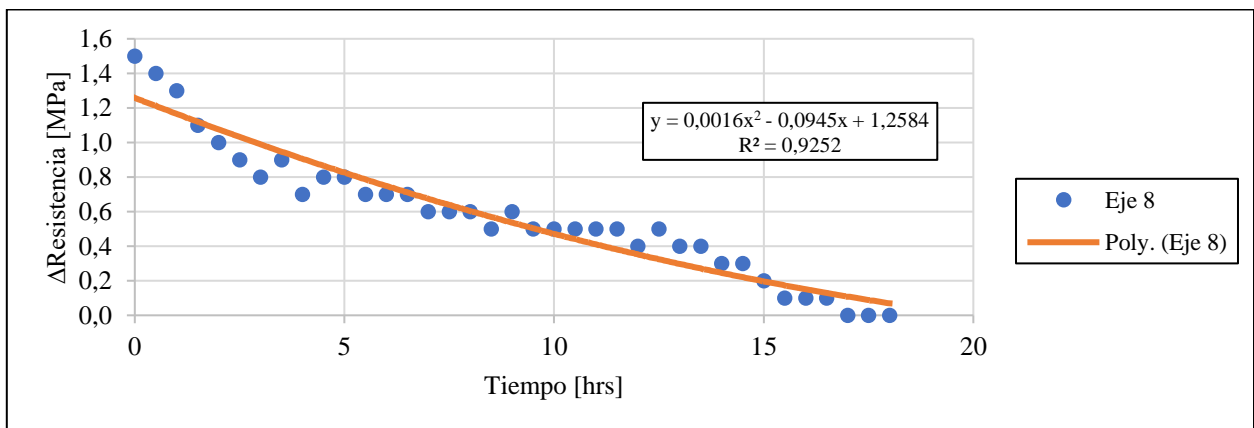
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 114: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



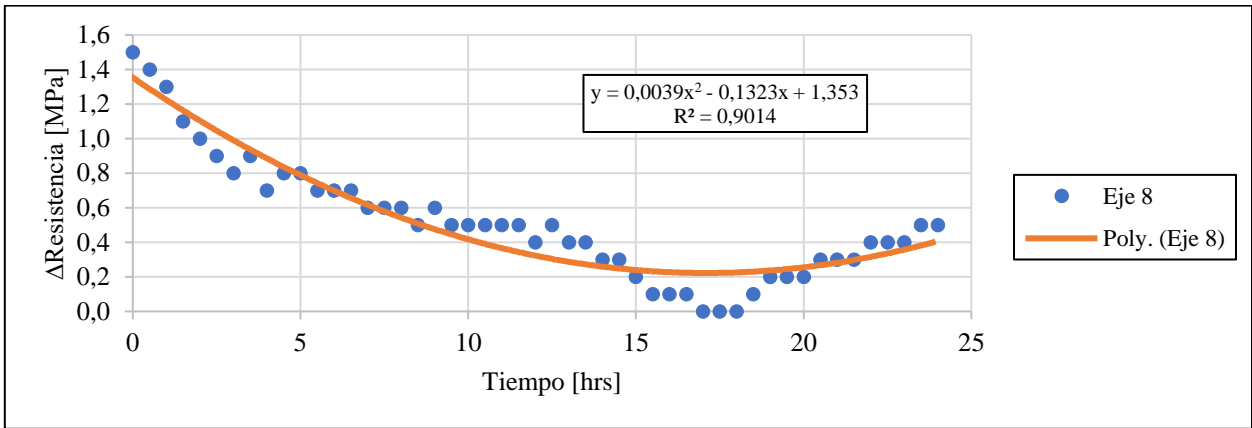
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 115: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



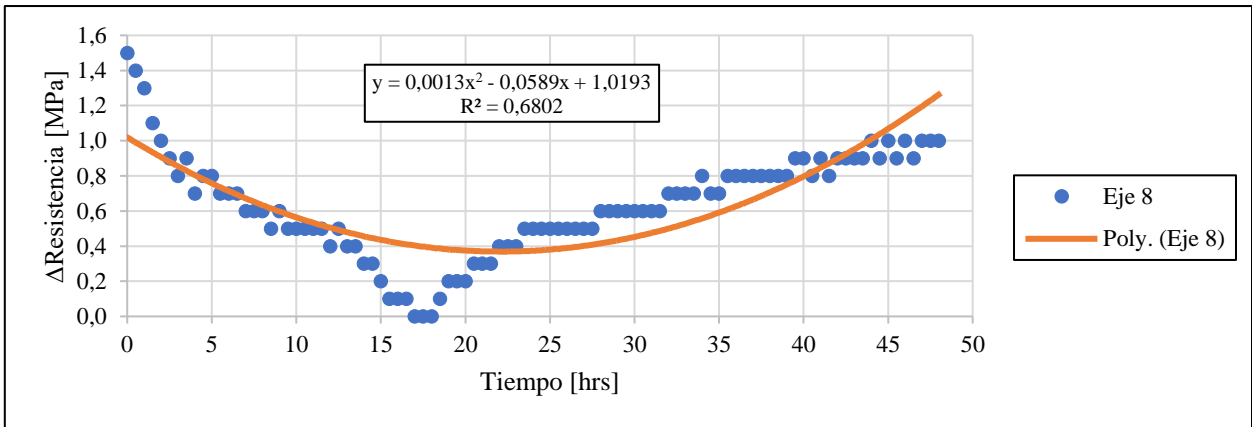
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 116: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



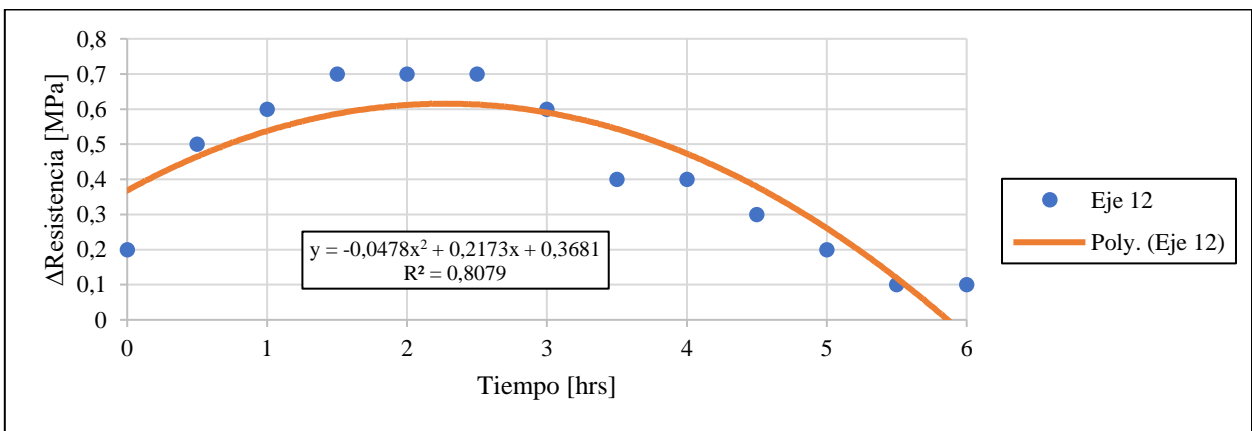
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 117: Curva diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



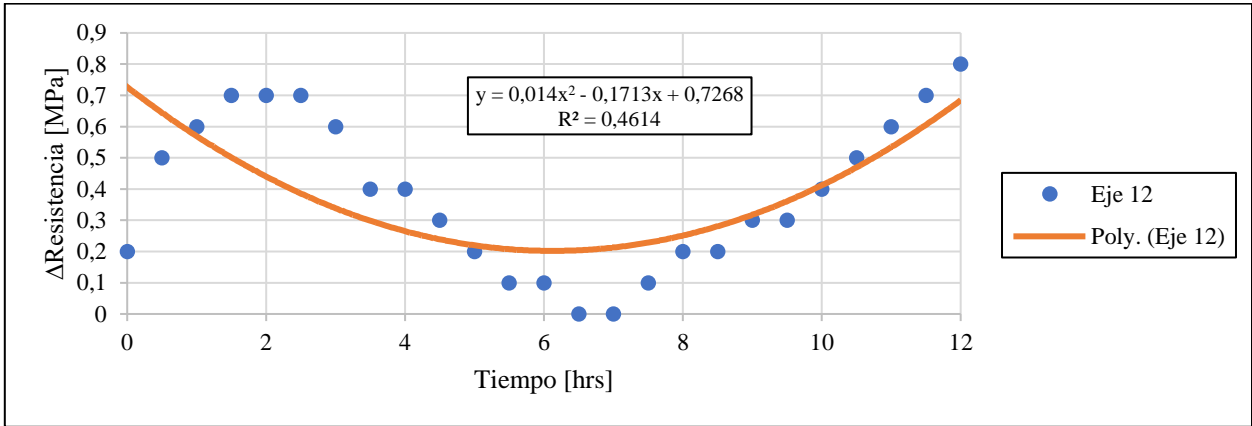
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 118: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



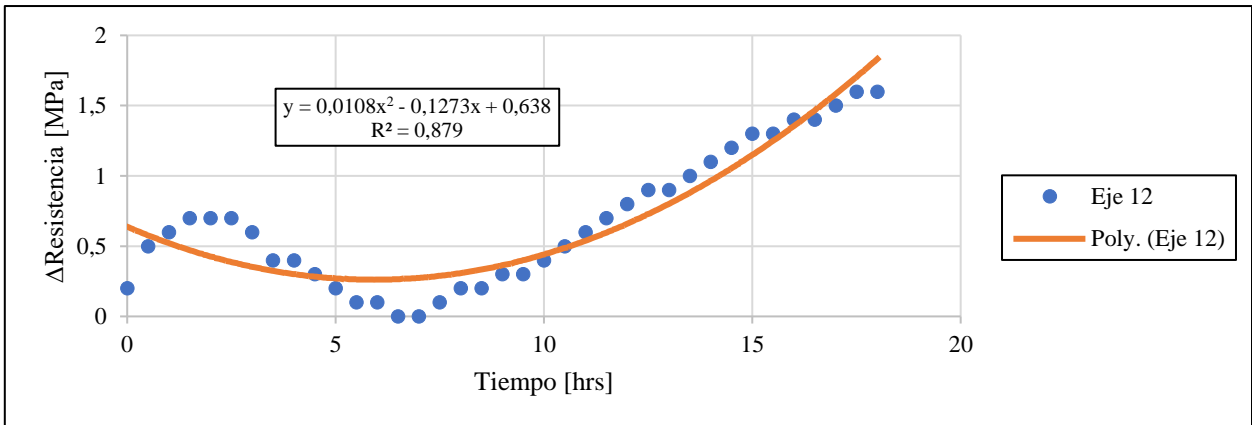
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 119: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



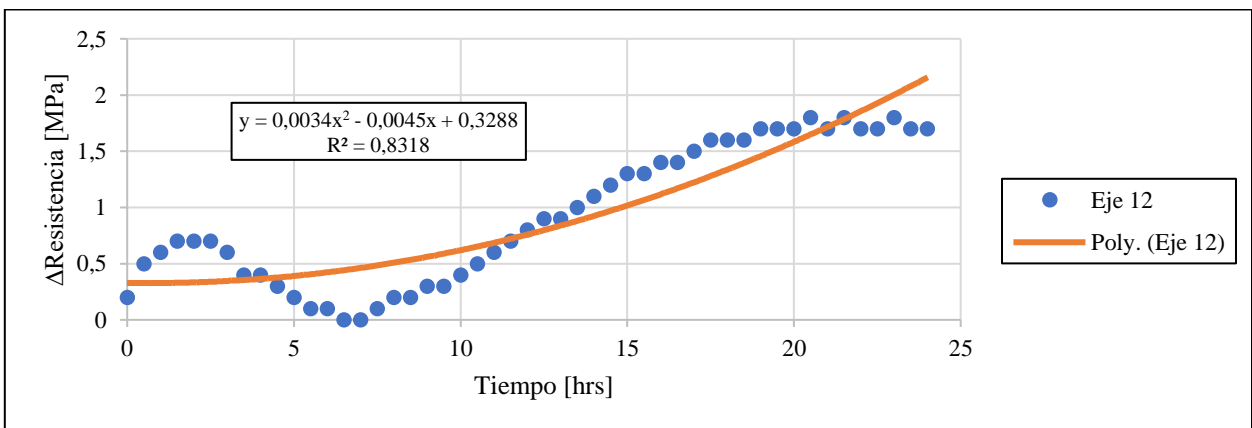
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 120: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



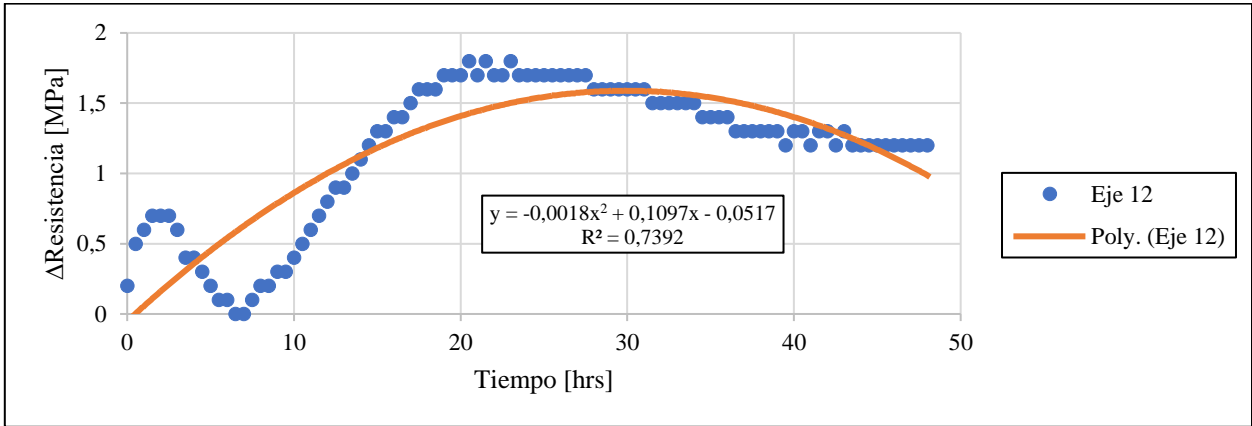
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 121: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



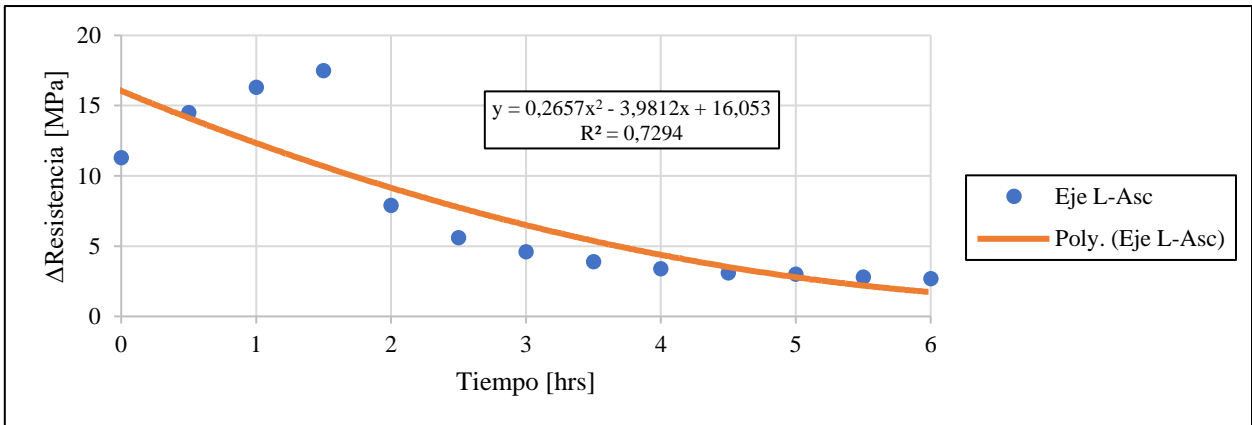
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 122: Curva diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



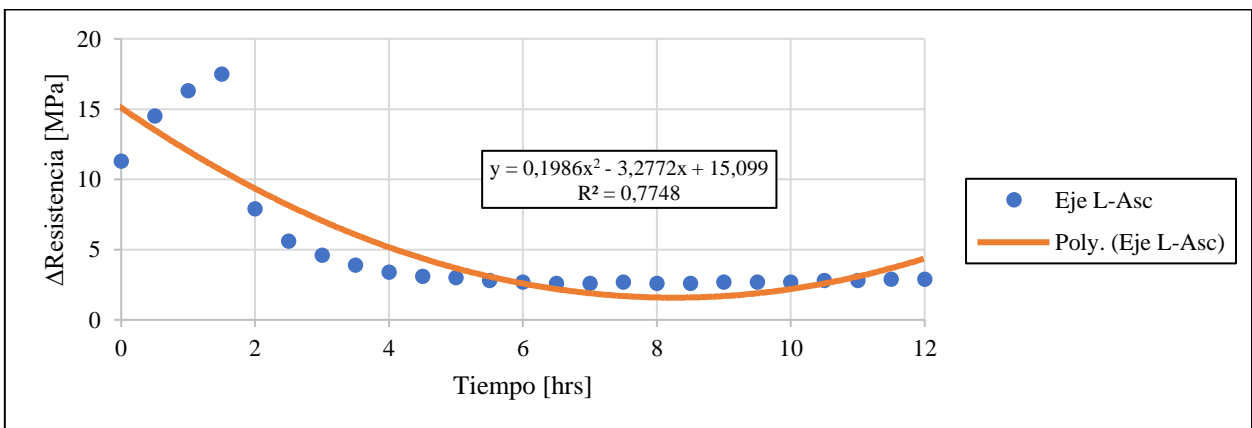
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 123: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



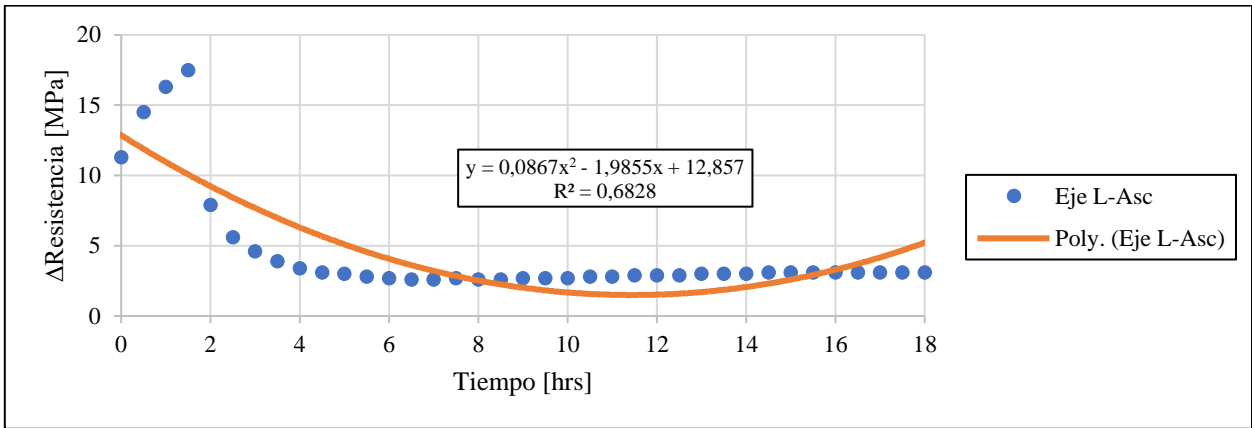
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 124: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



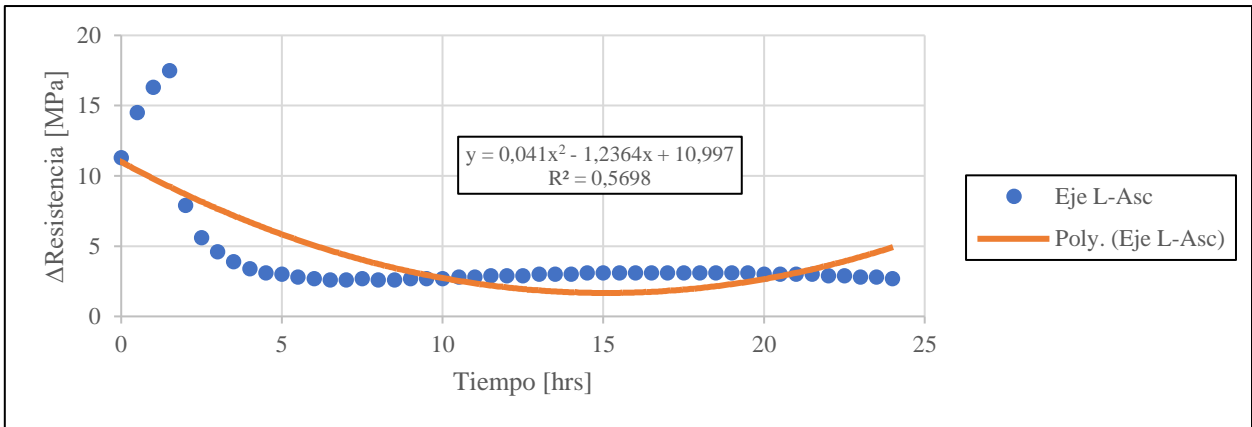
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 125: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



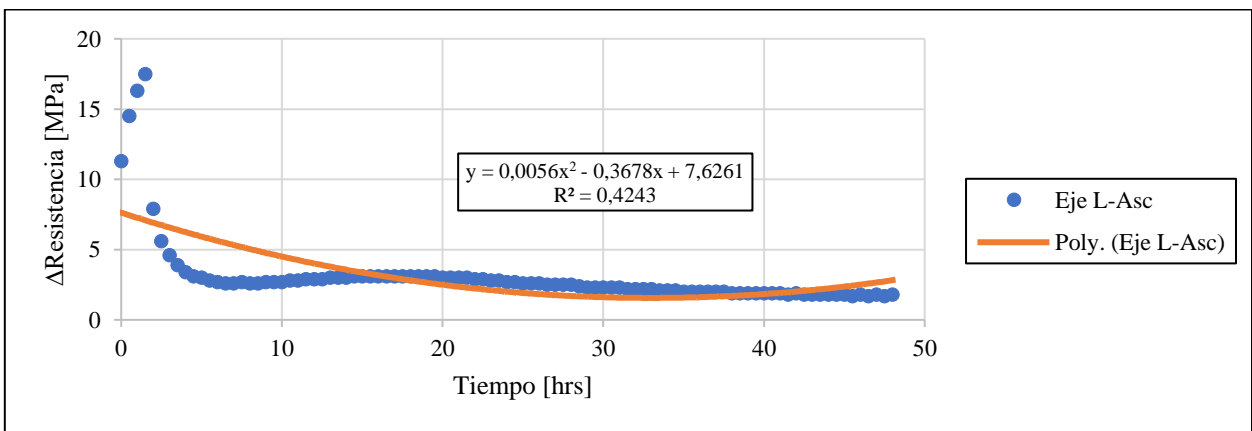
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 126: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



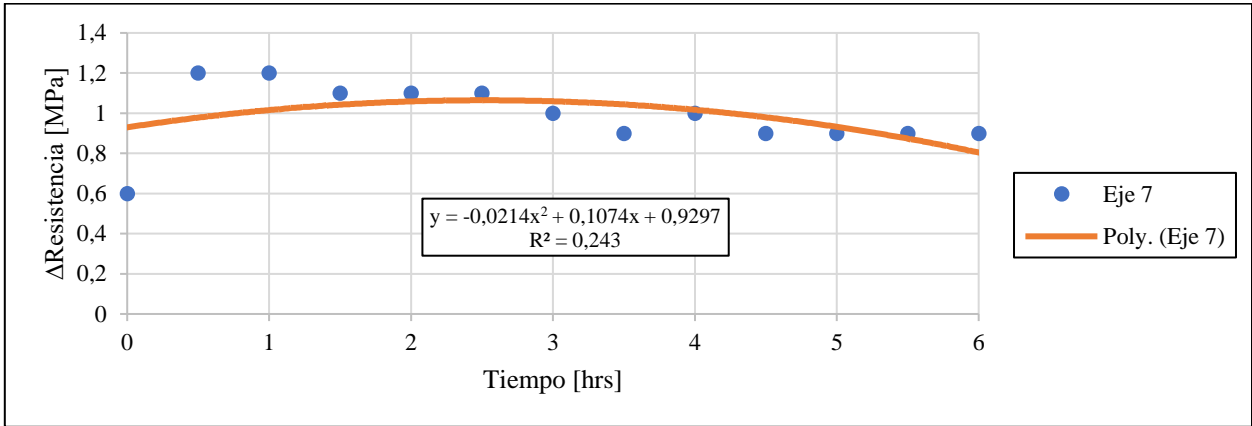
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 127: Curva diferencia de resistencia acumulativa (48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



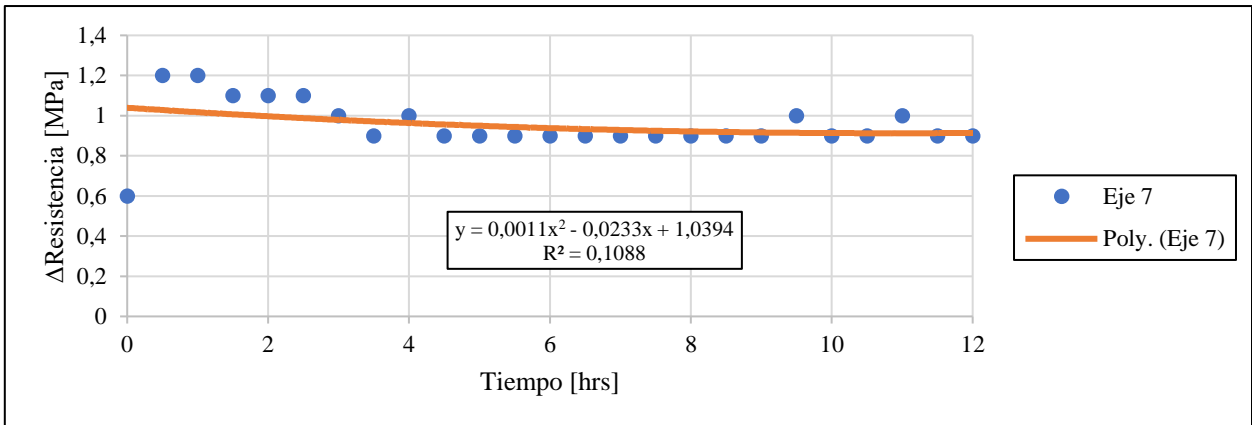
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 128: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



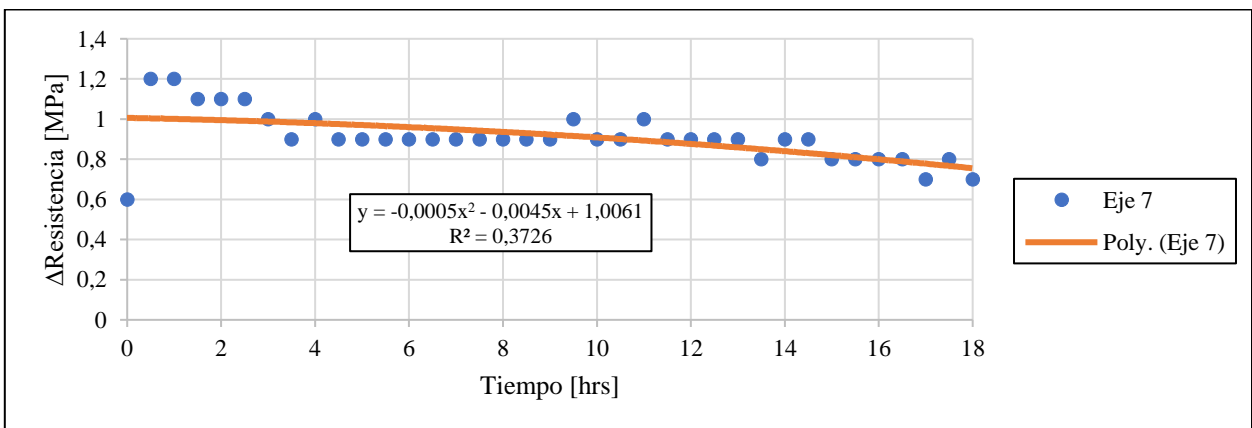
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 129: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



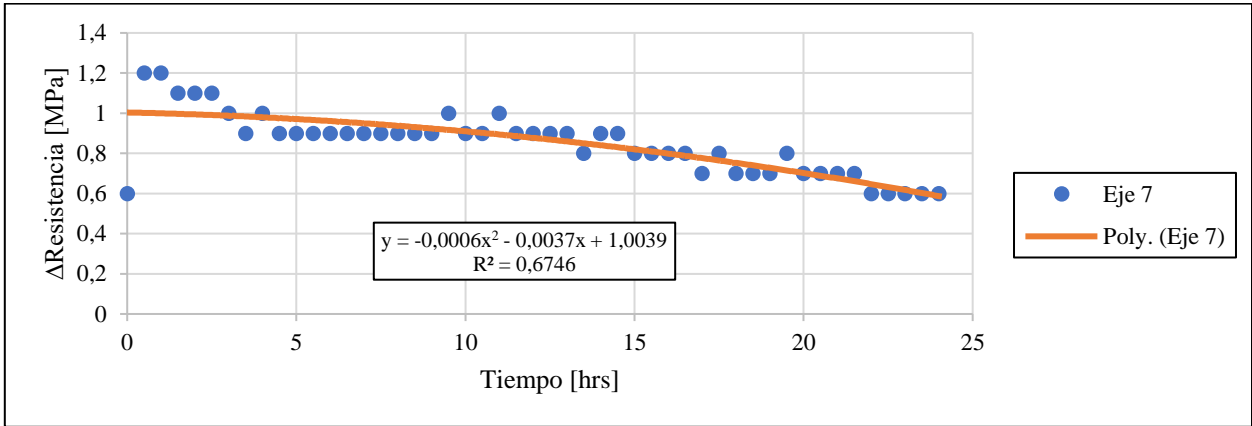
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 130: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



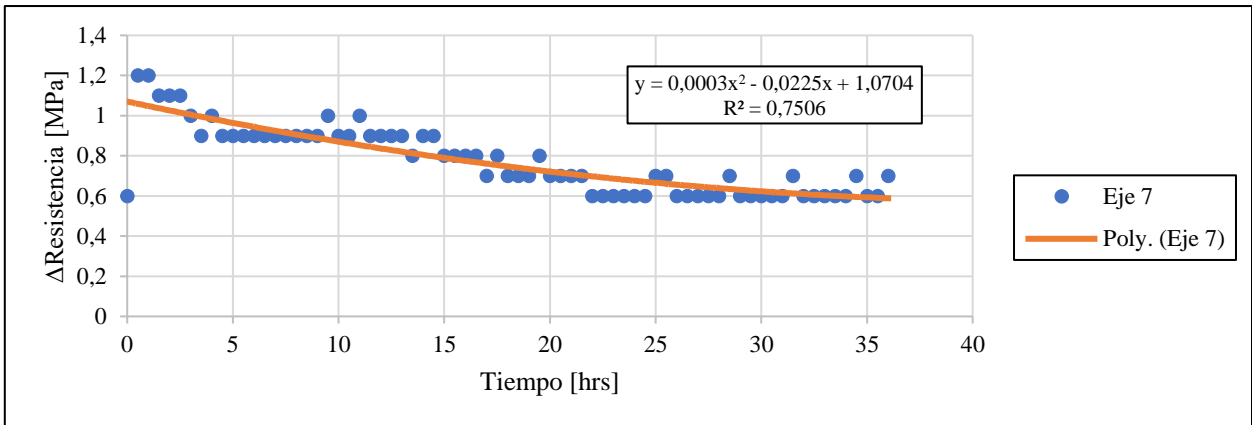
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 131: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



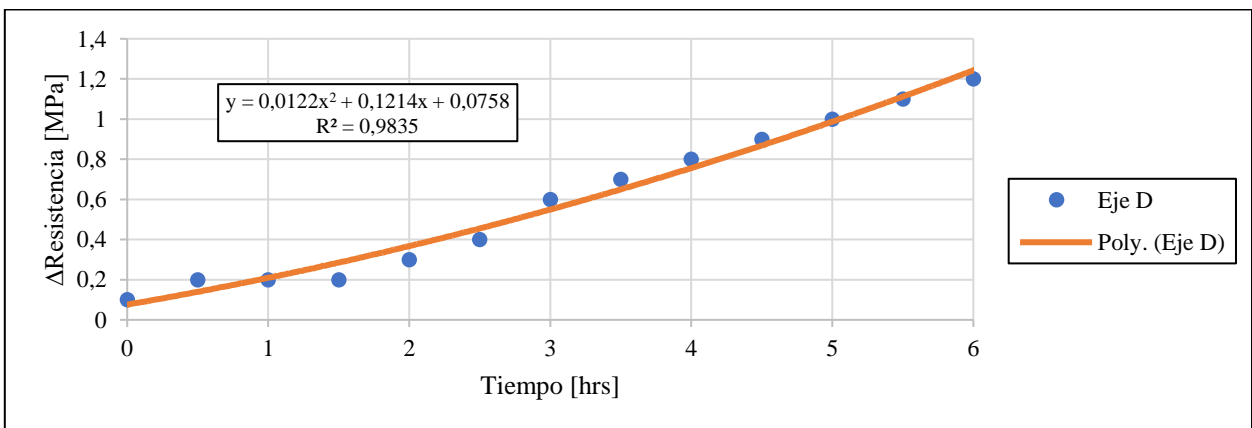
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 132: Curva diferencia de resistencia acumulativa (36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



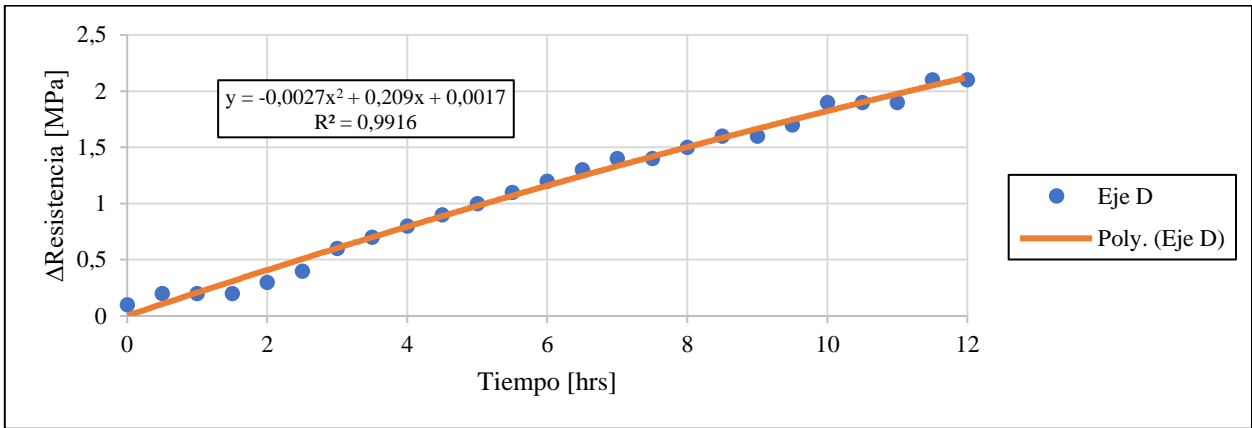
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 133: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



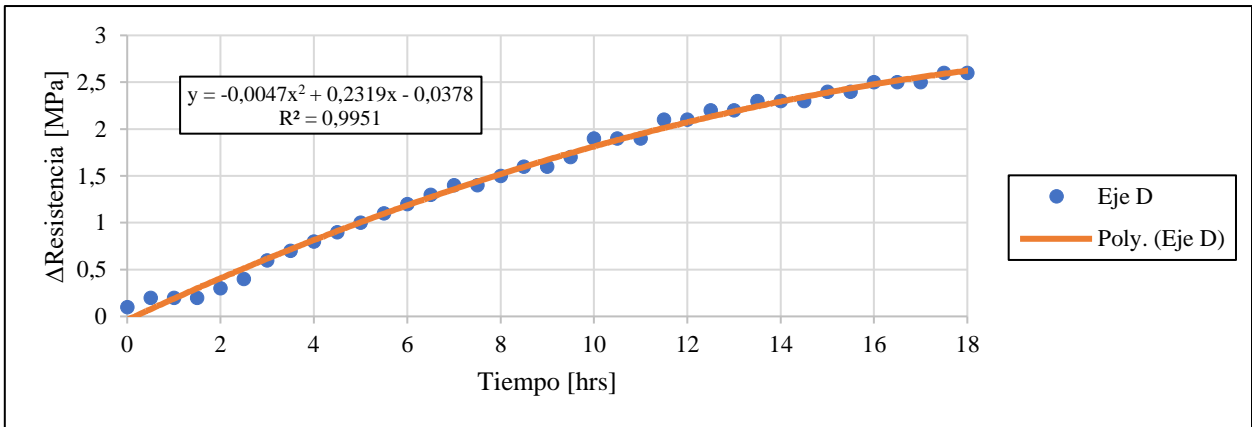
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 134: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



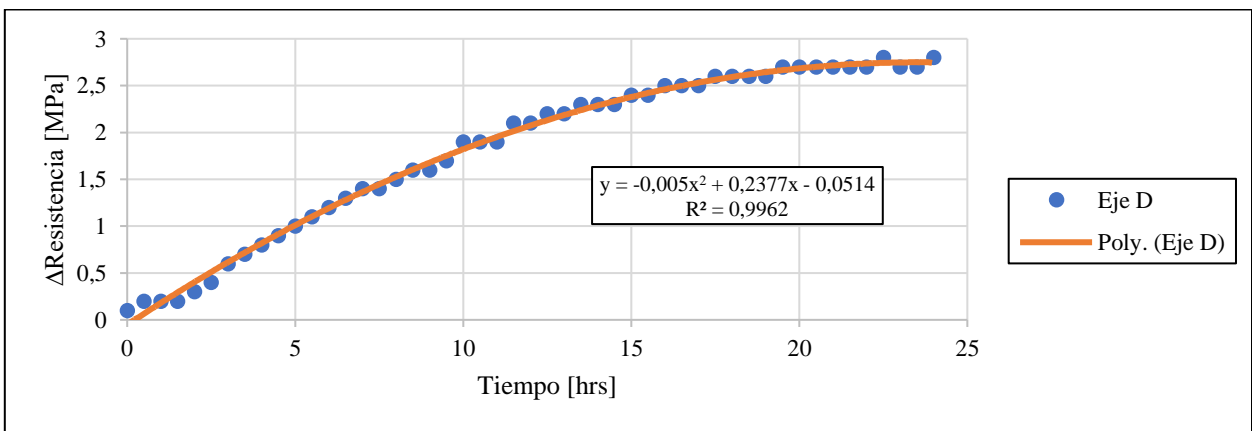
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 135: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



(Fuente: Elaboración Propia)

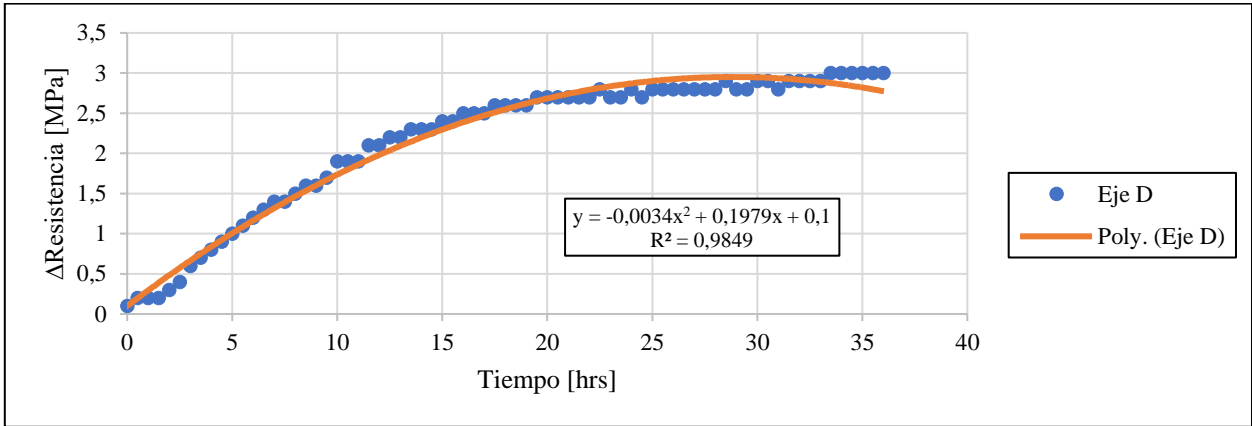
Figura 136: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



(Fuente: Elaboración Propia)

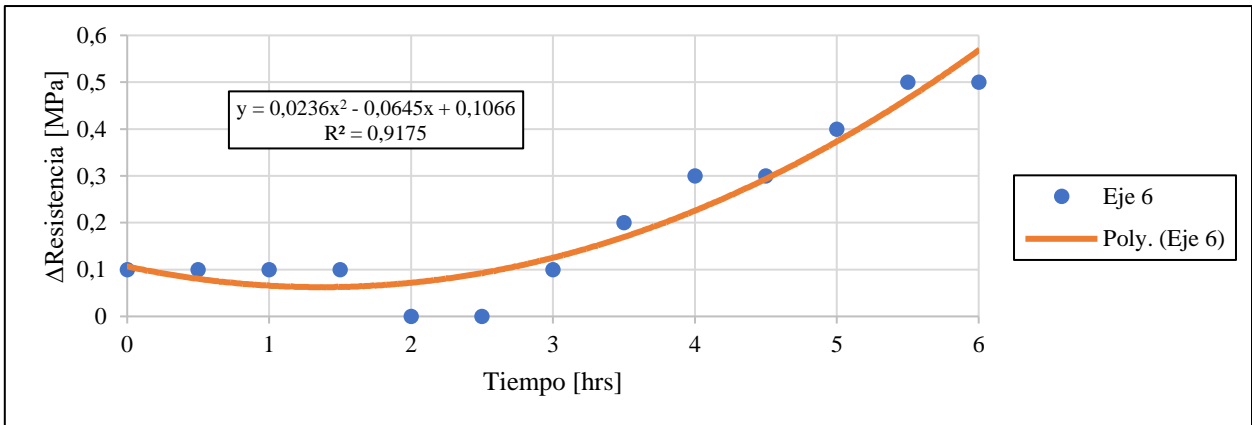


Figura 137: Curva diferencia de resistencia acumulativa (36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



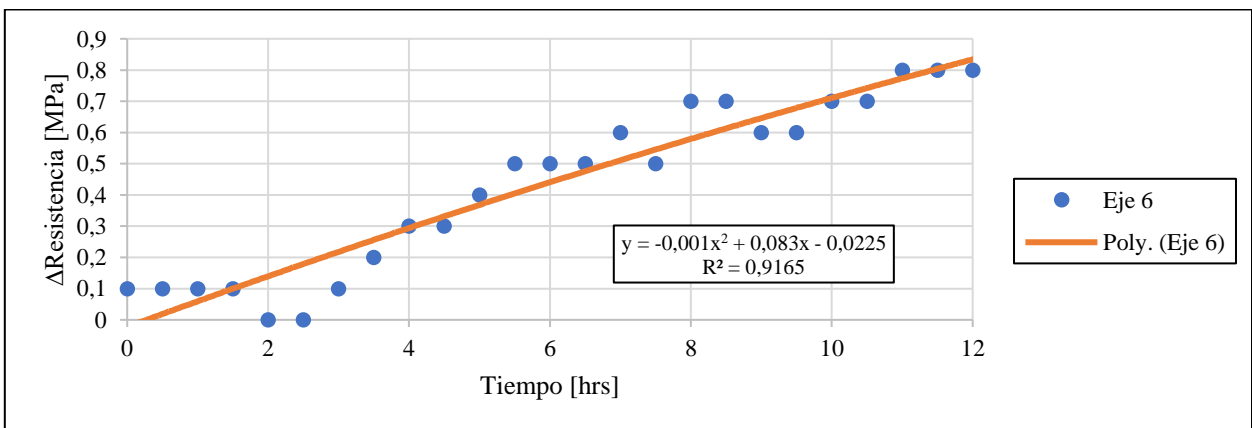
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 138: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



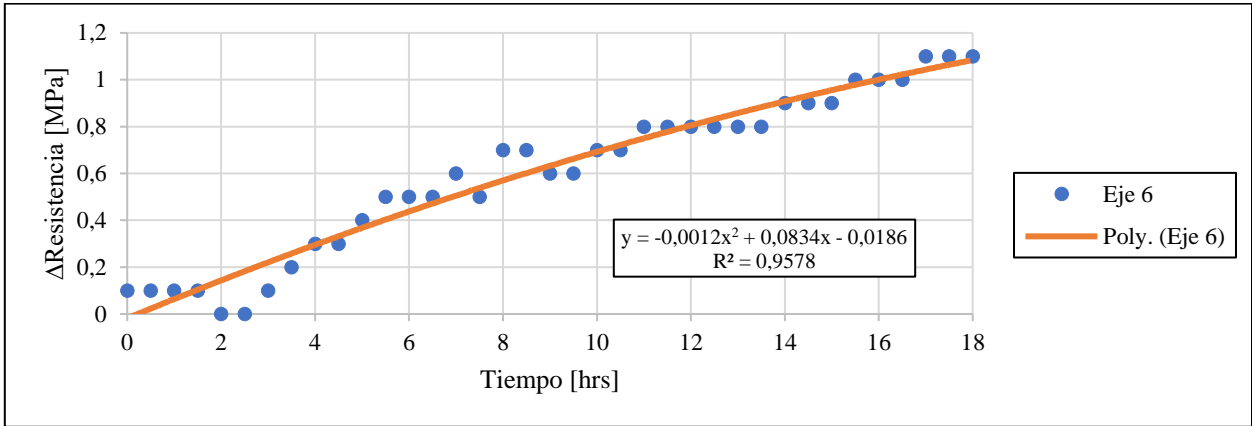
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 139: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



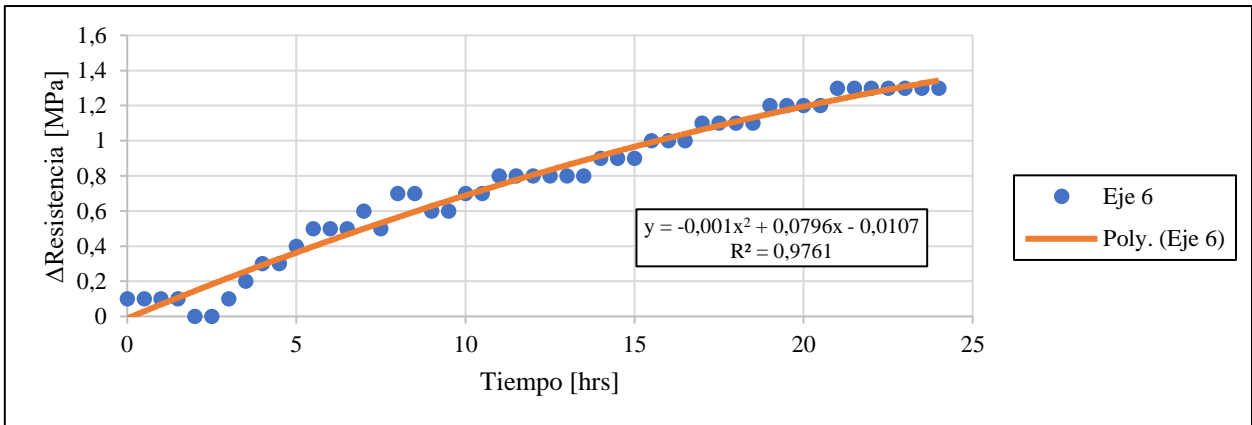
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 140: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



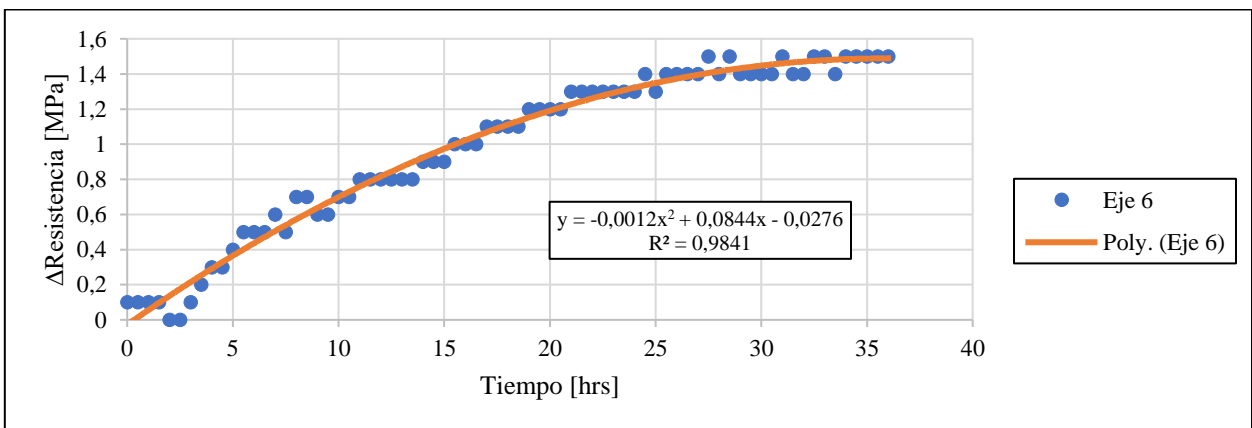
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 141: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



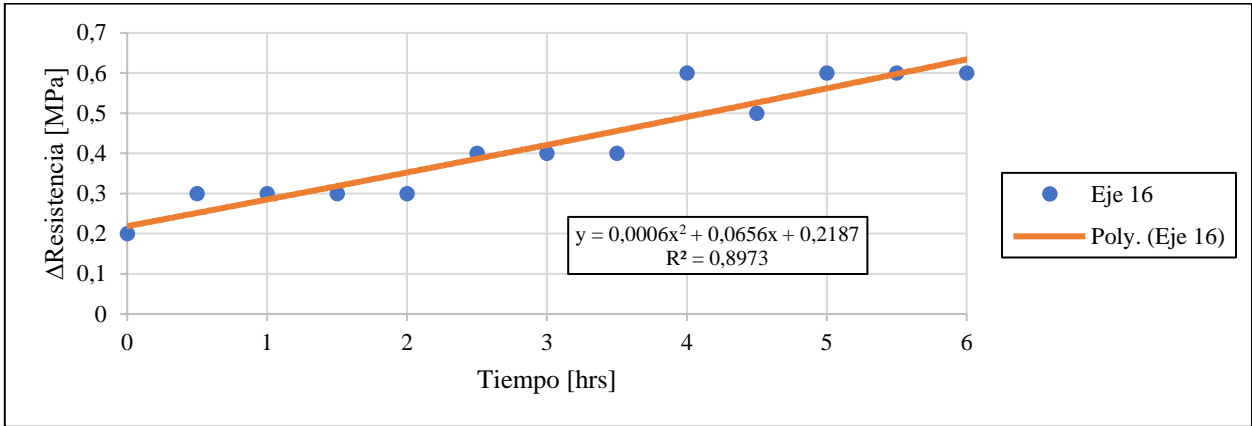
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 142: Curva diferencia de resistencia acumulativa (36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



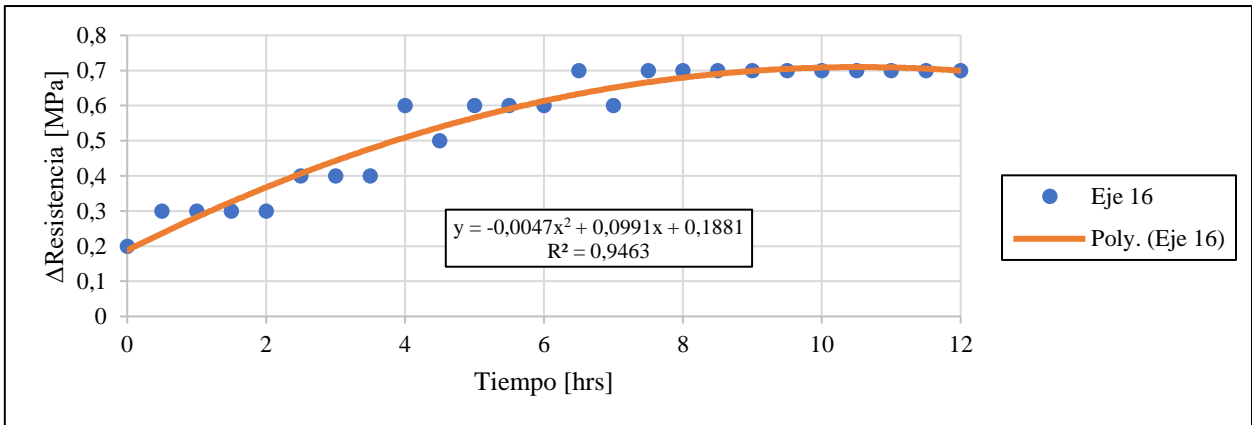
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 143: Curva diferencia de resistencia acumulativa (6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



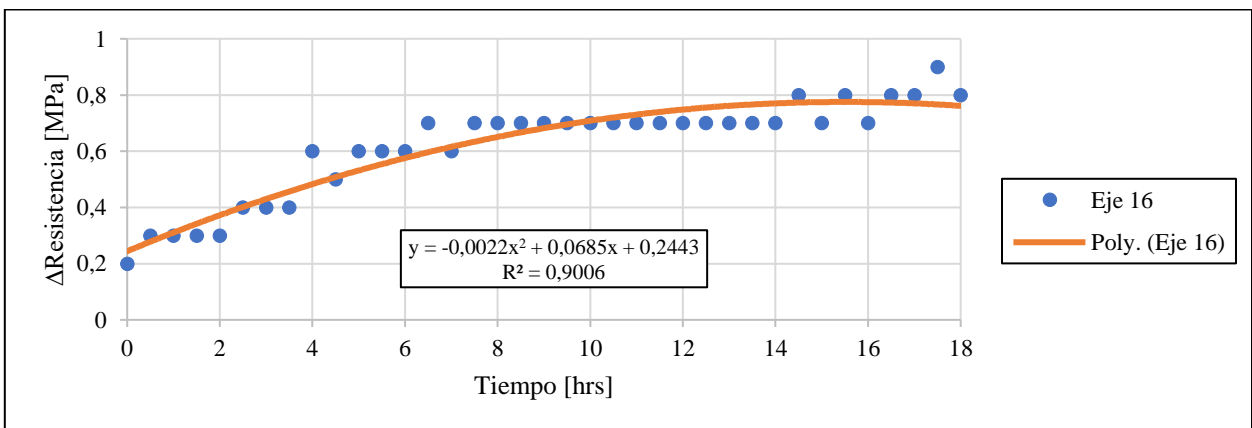
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 144: Curva diferencia de resistencia acumulativa (12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



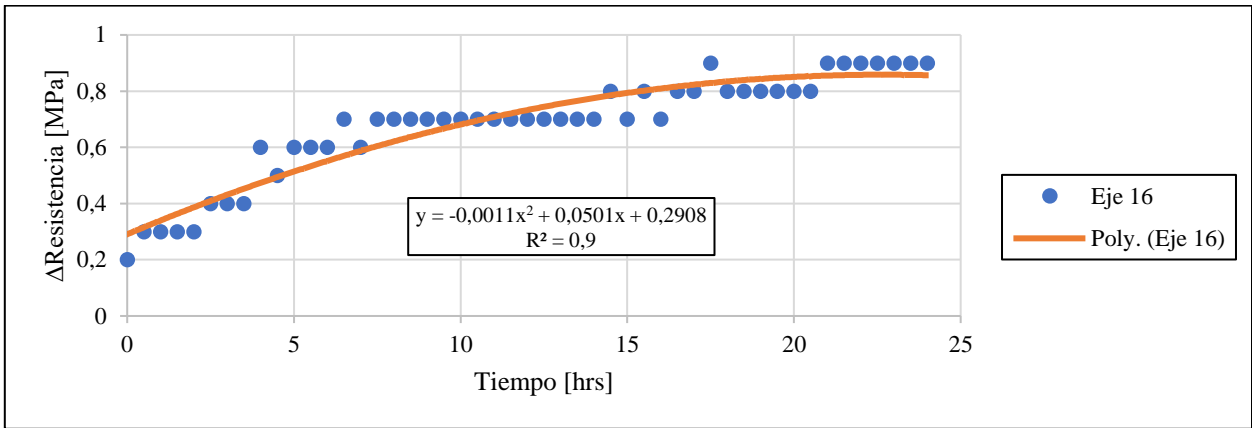
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 145: Curva diferencia de resistencia acumulativa (18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



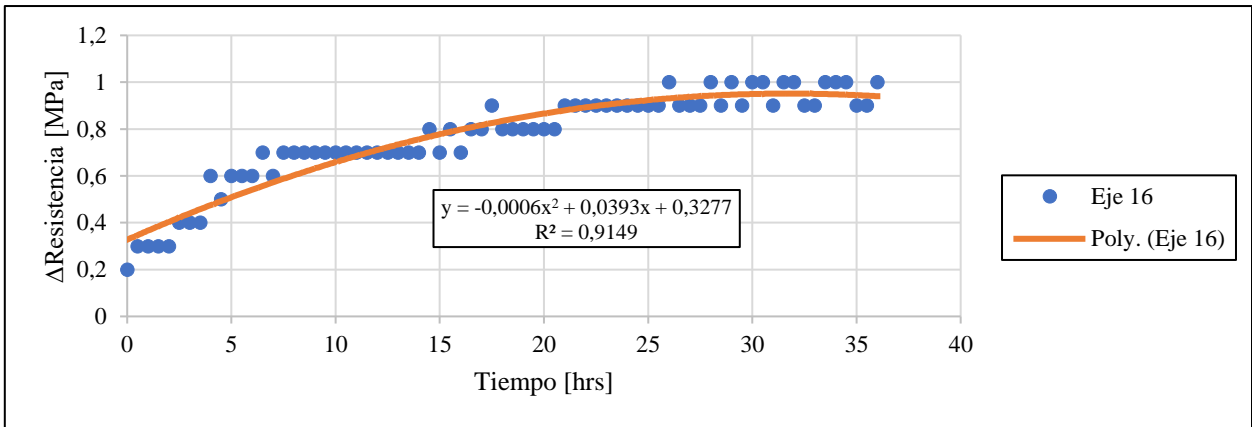
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 146: Curva diferencia de resistencia acumulativa (24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 147: Curva diferencia de resistencia acumulativa (36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



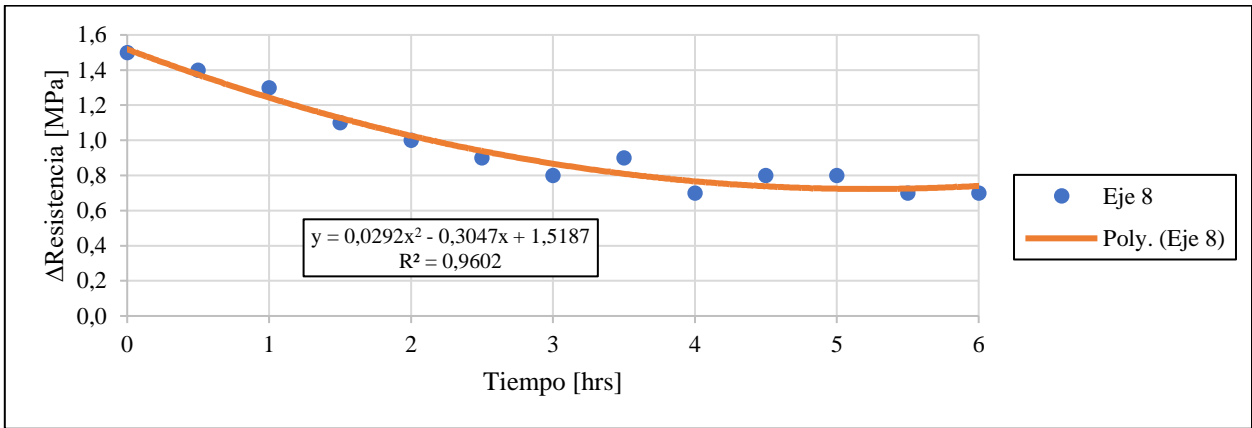
(Fuente: Elaboración Propia)

## **ANEXO D**

**Gráficos: Diferencia de Resistencia entre Superficie y Núcleo, por tramo de estudio.**

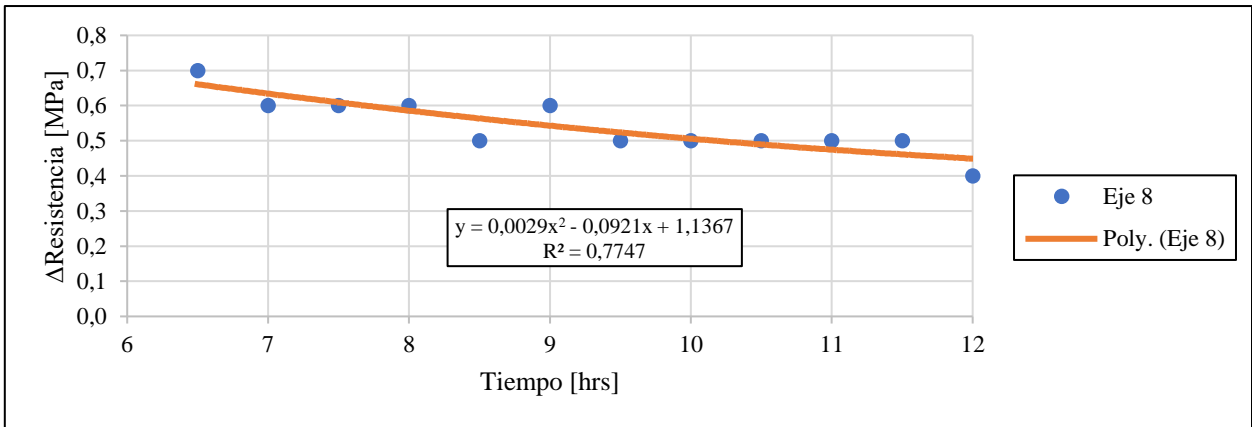
**Proyecto Padre Hurtado / Proyecto Infinity**

Figura 148: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



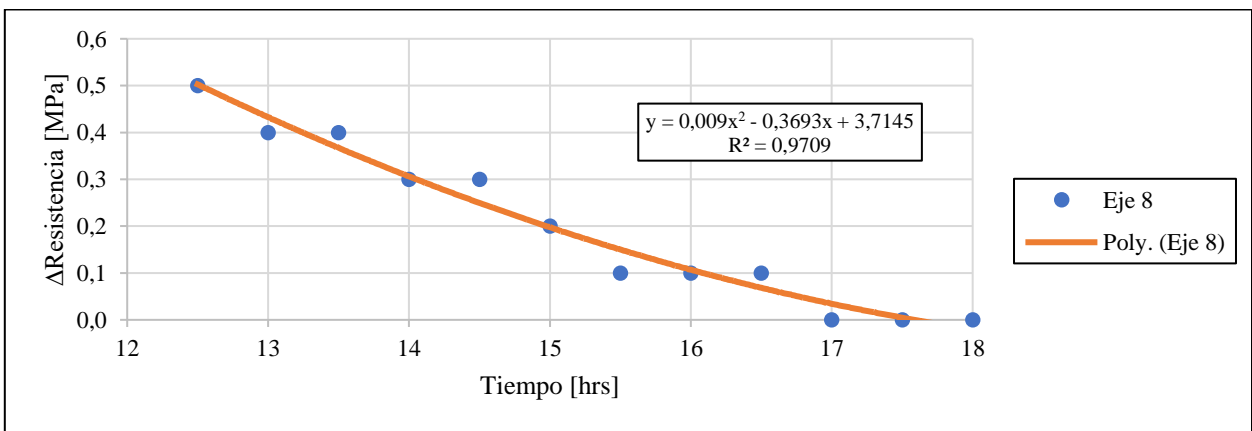
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 149: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



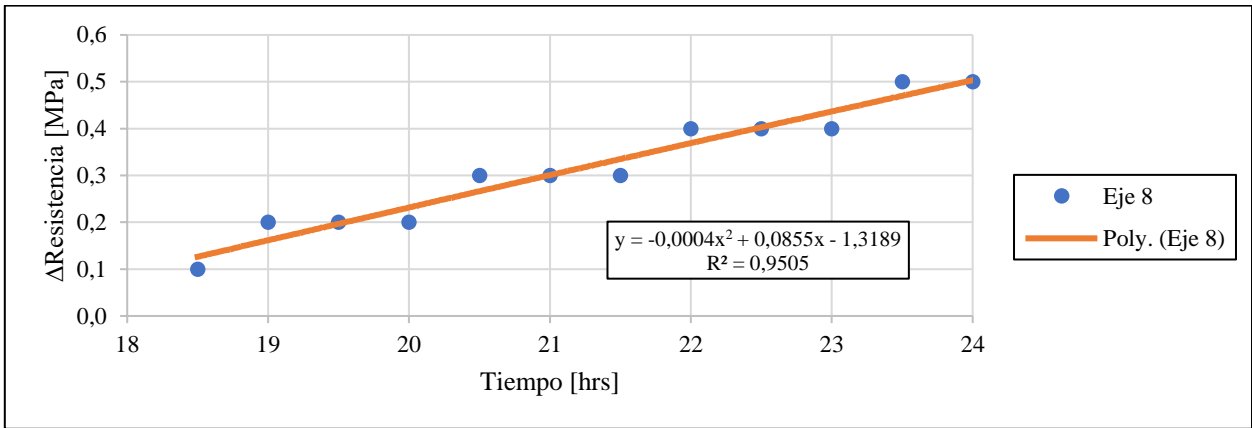
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 150: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



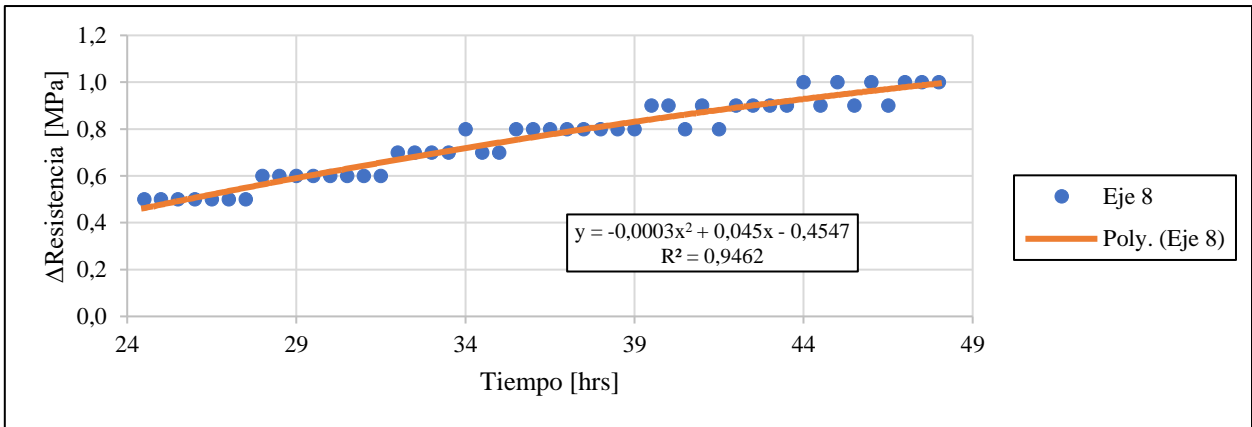
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 151: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



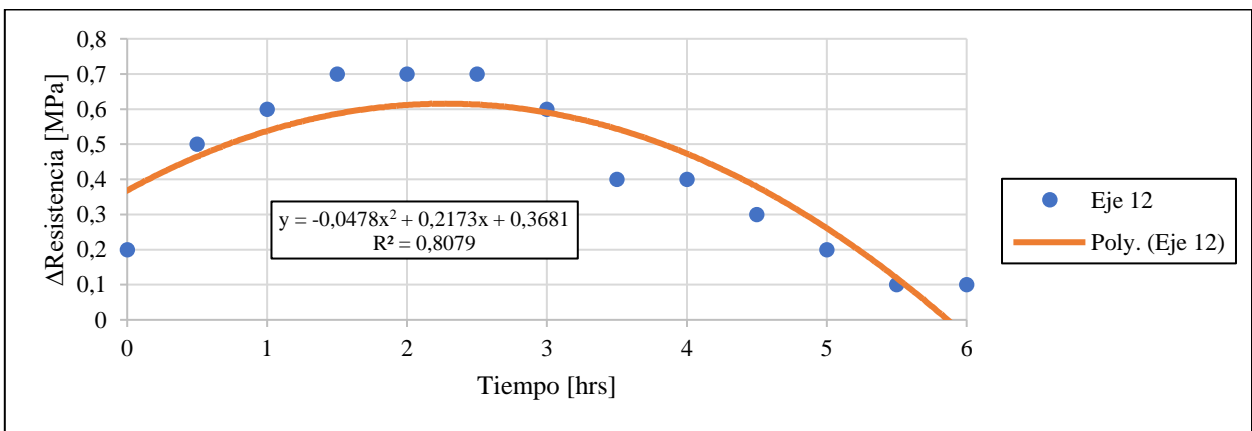
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 152: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 8



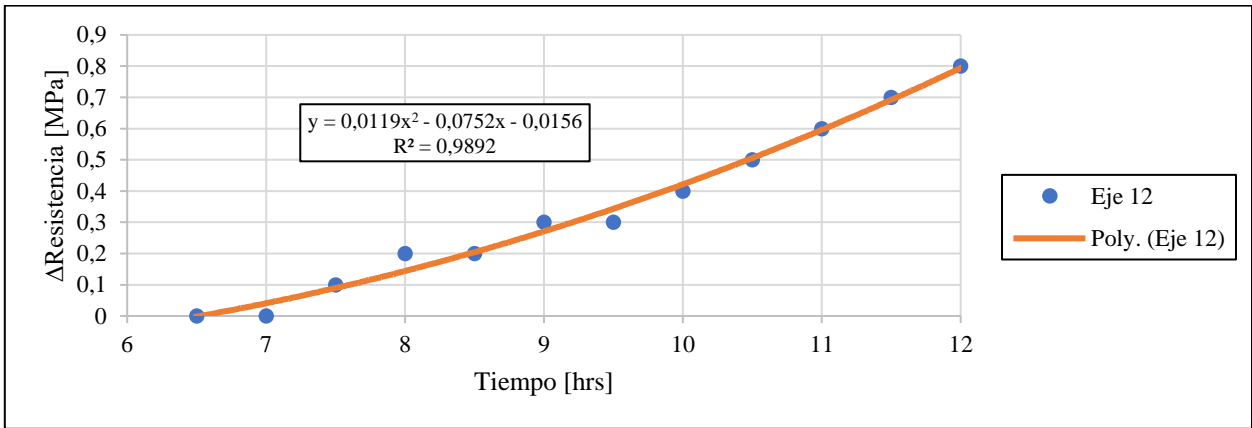
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 153: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



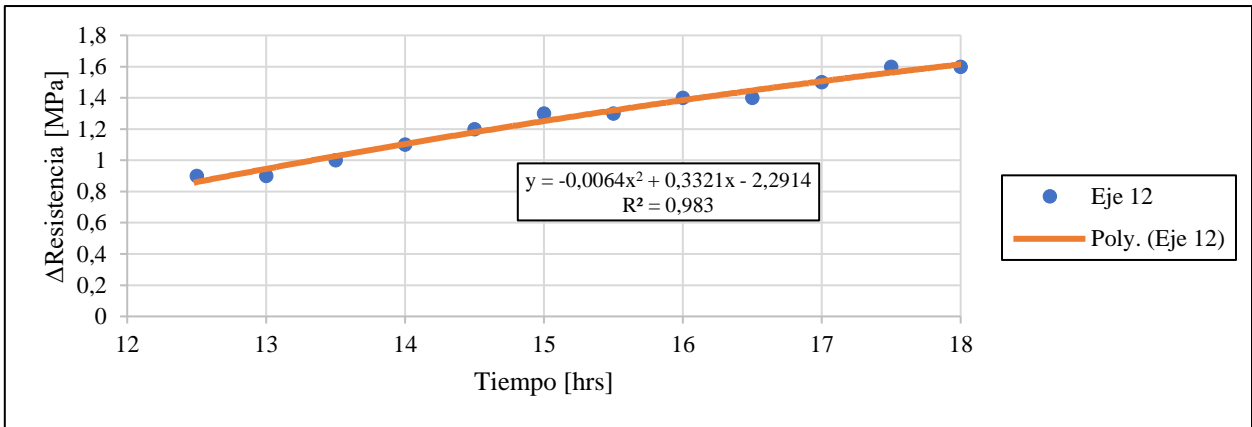
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 154: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



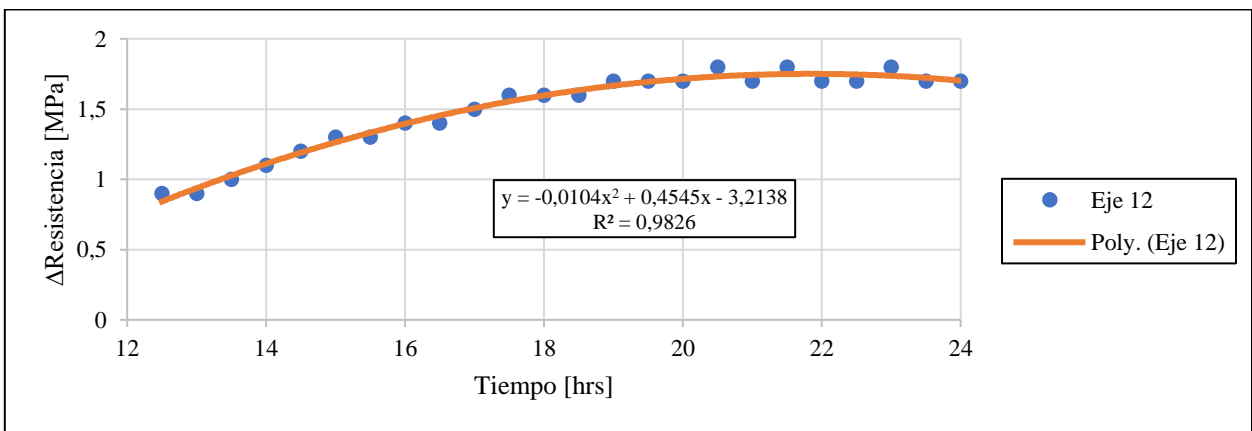
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 155: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



(Fuente: Elaboración Propia)

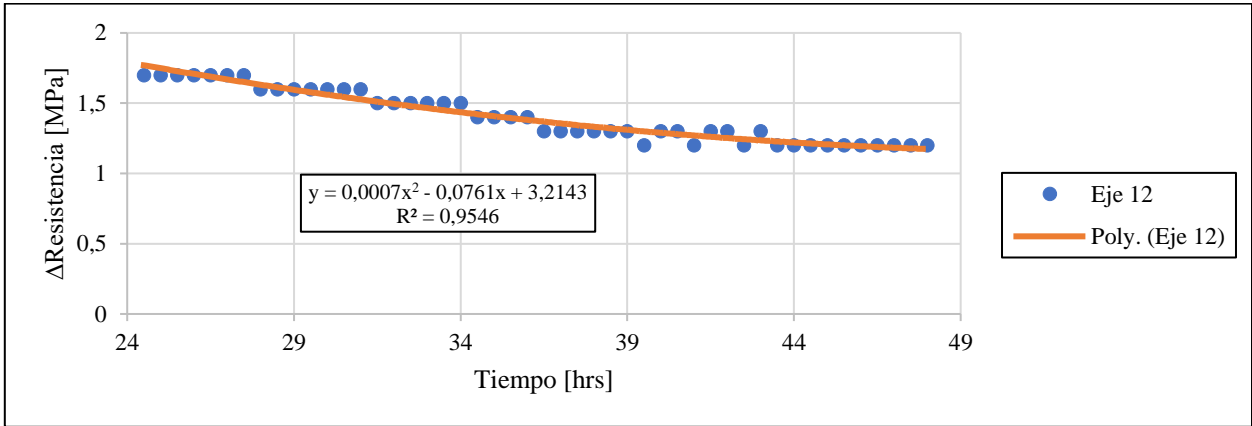
Figura 156: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



(Fuente: Elaboración Propia)

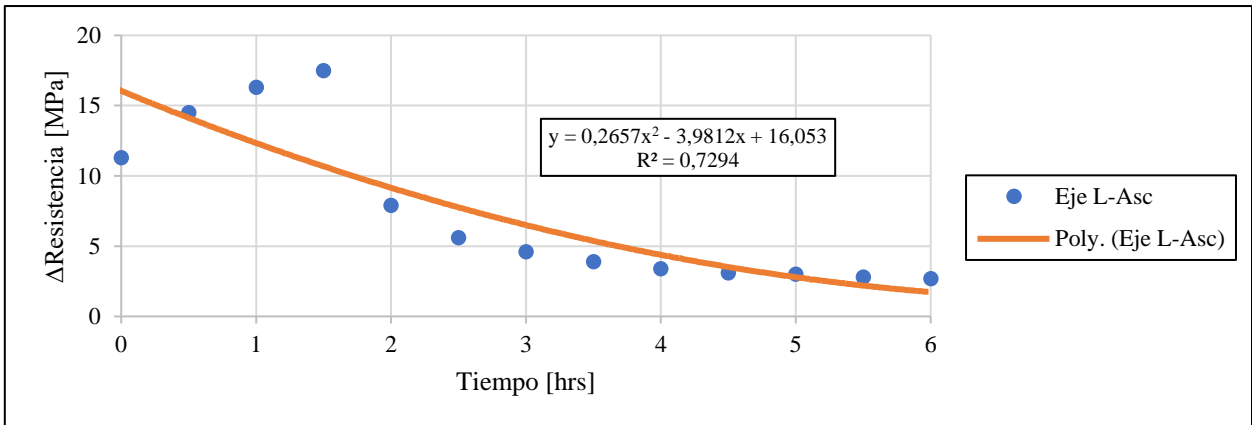


Figura 157: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 12



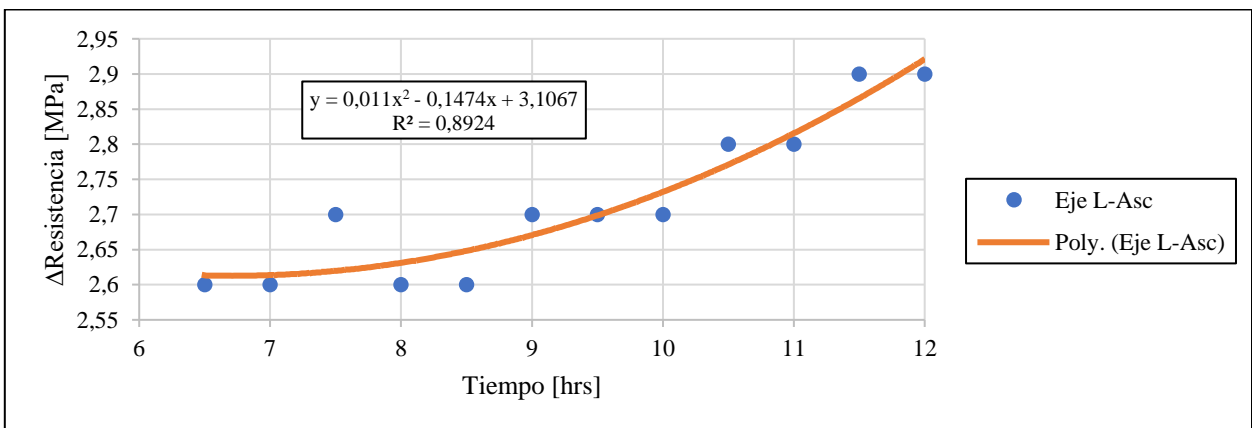
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 158: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



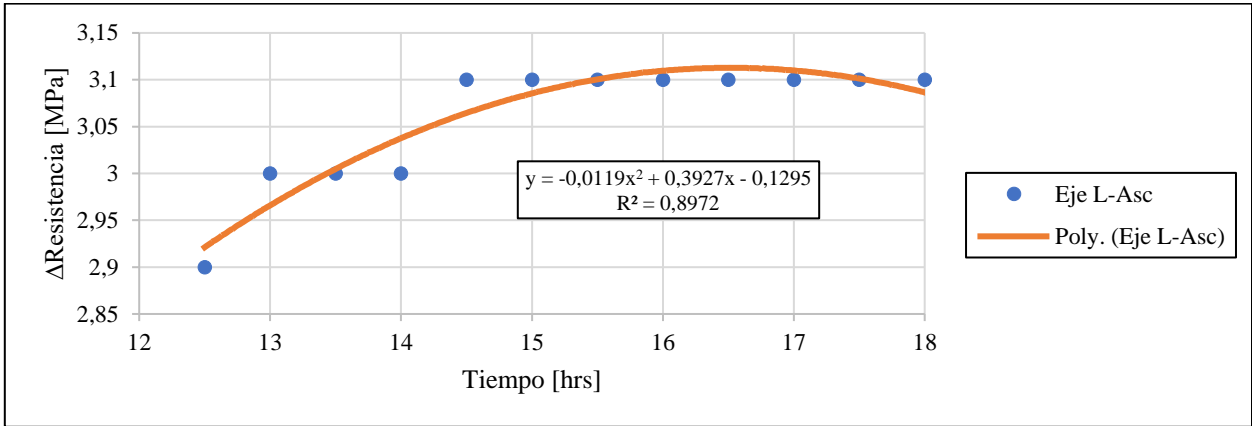
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 159: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



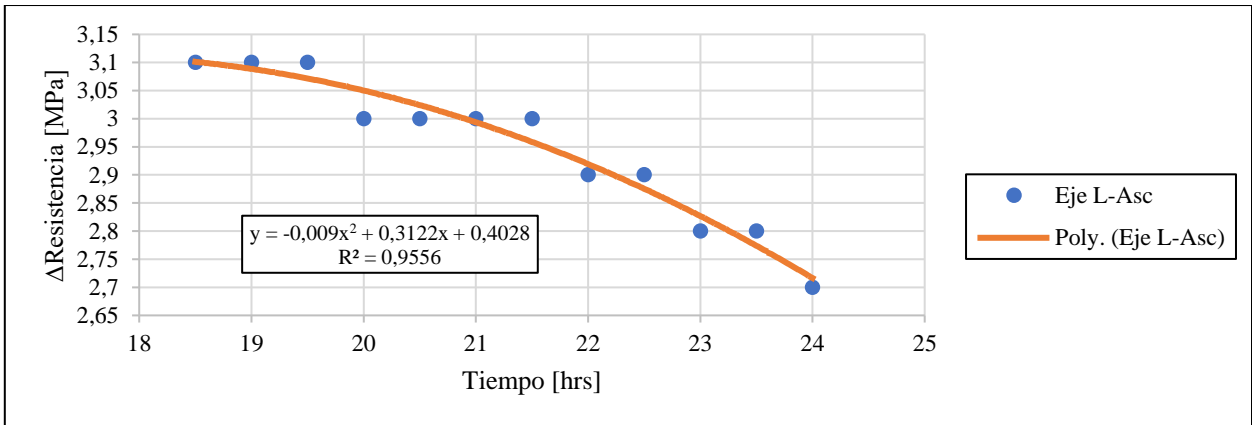
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 160: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



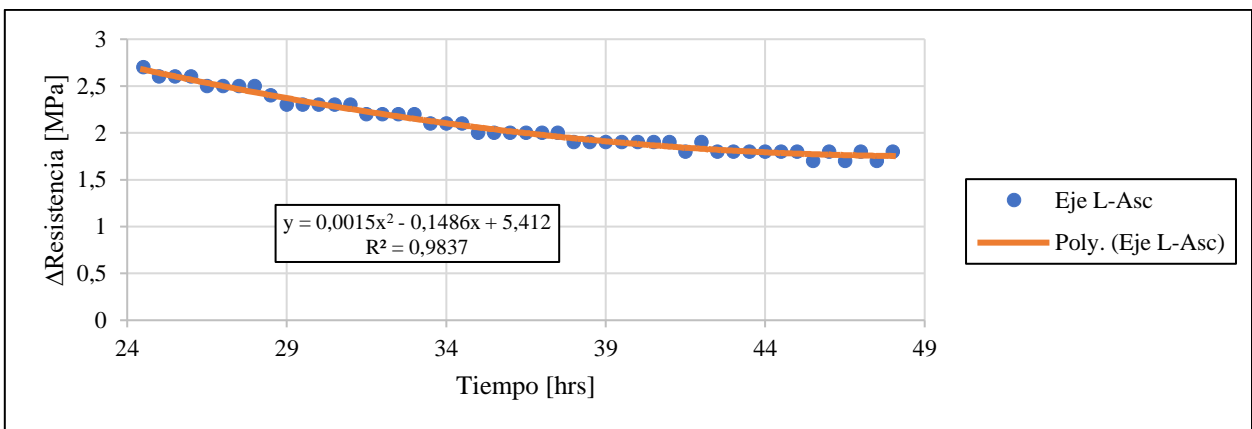
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 161: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



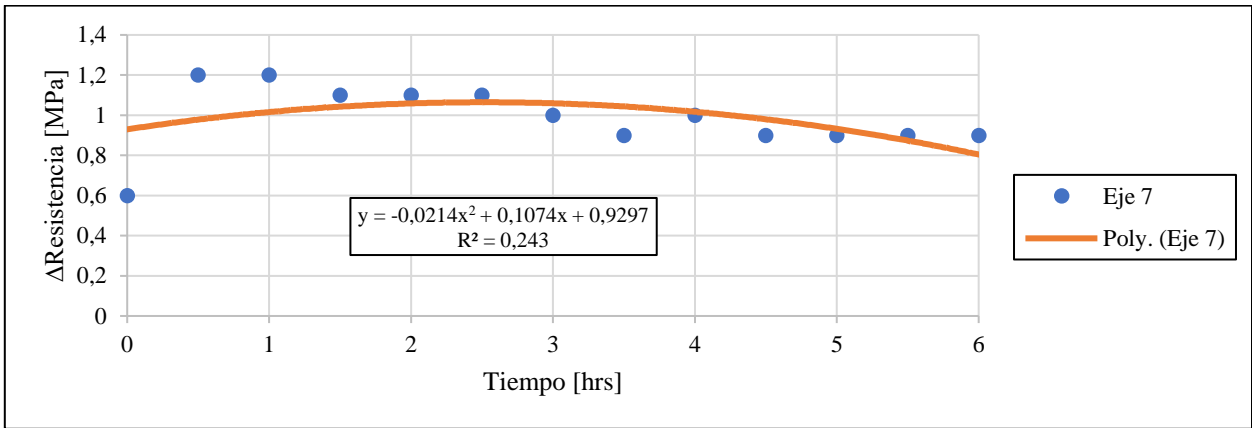
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 162: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-48 hrs) entre superficie y núcleo, Eje L-Asc



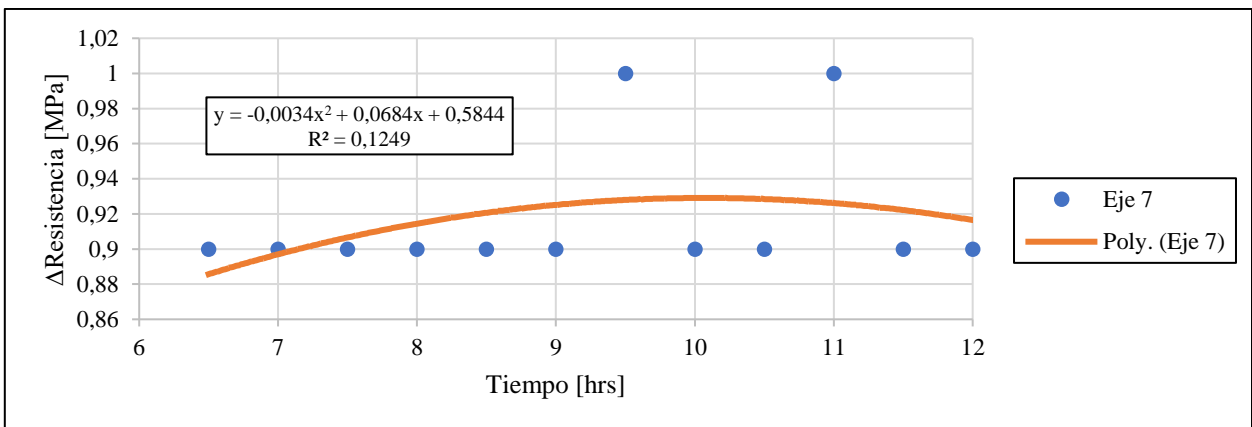
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 163: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



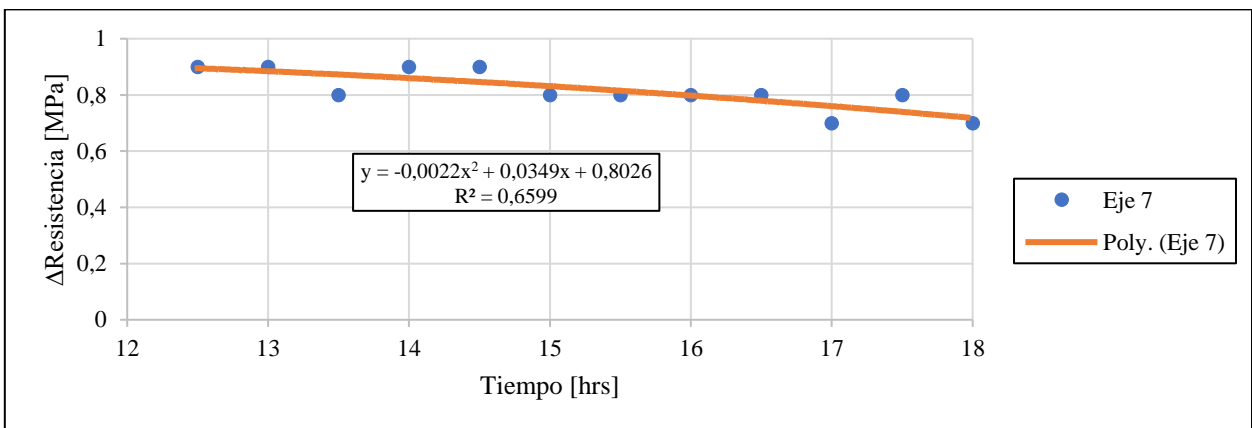
(Fuente: elaboración propia)

Figura 164: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



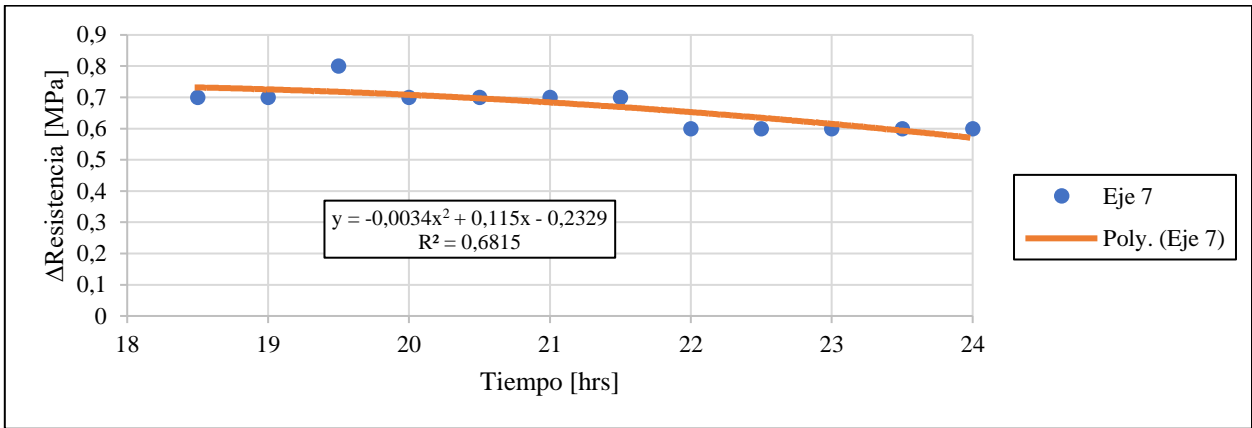
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 165: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



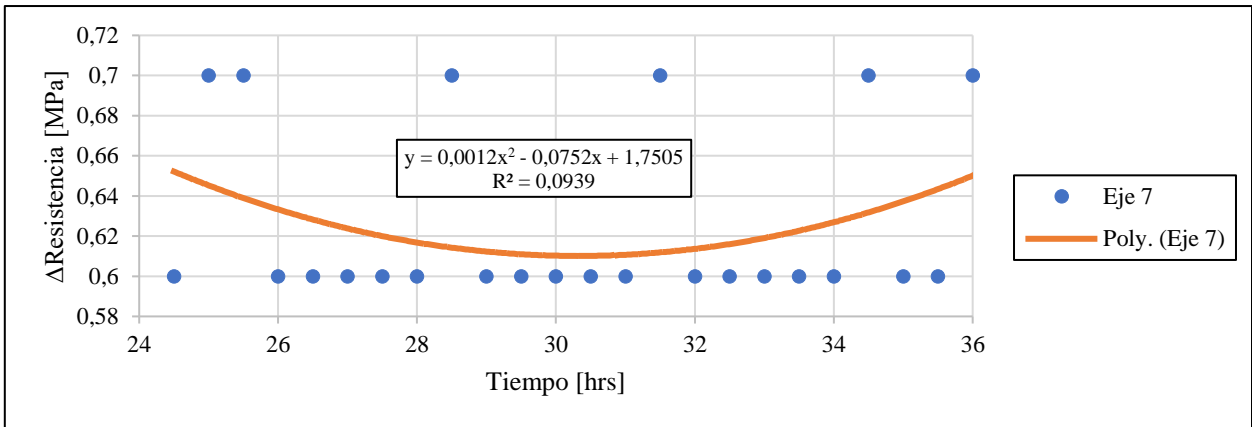
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 166: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



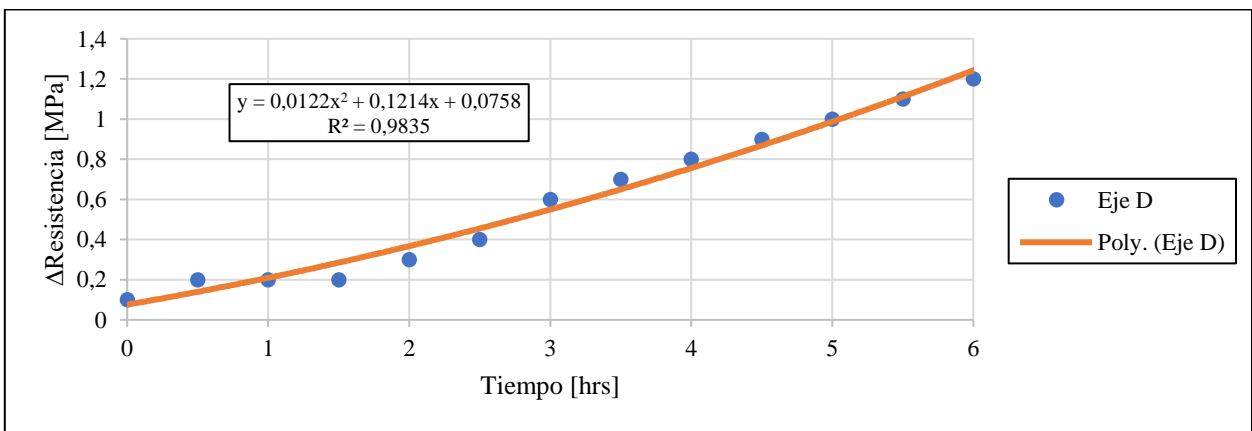
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 167: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 7



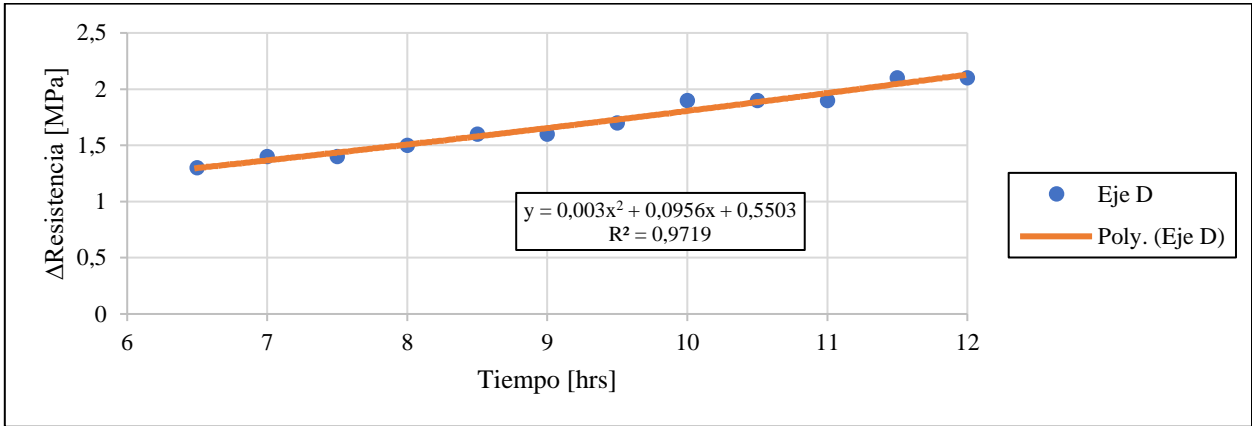
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 168: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



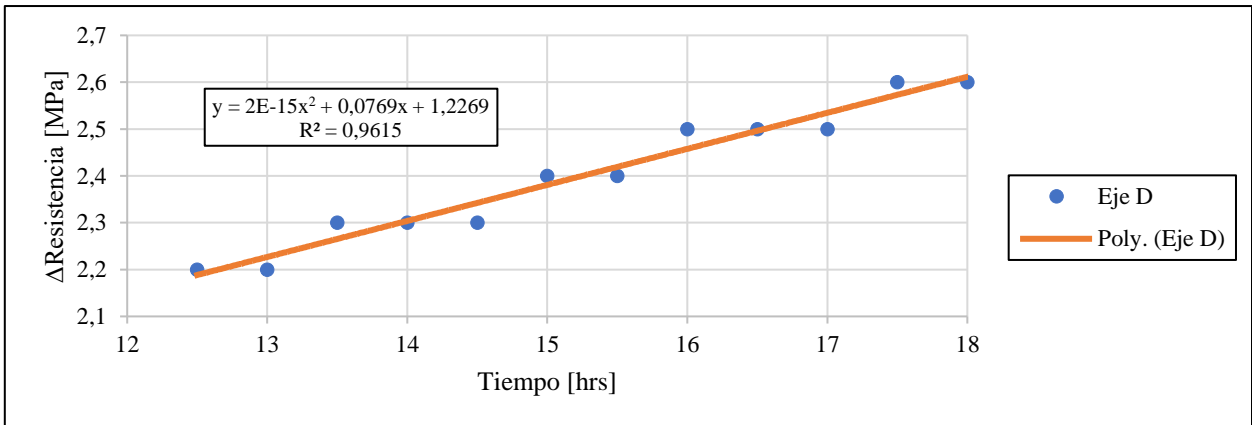
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 169: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



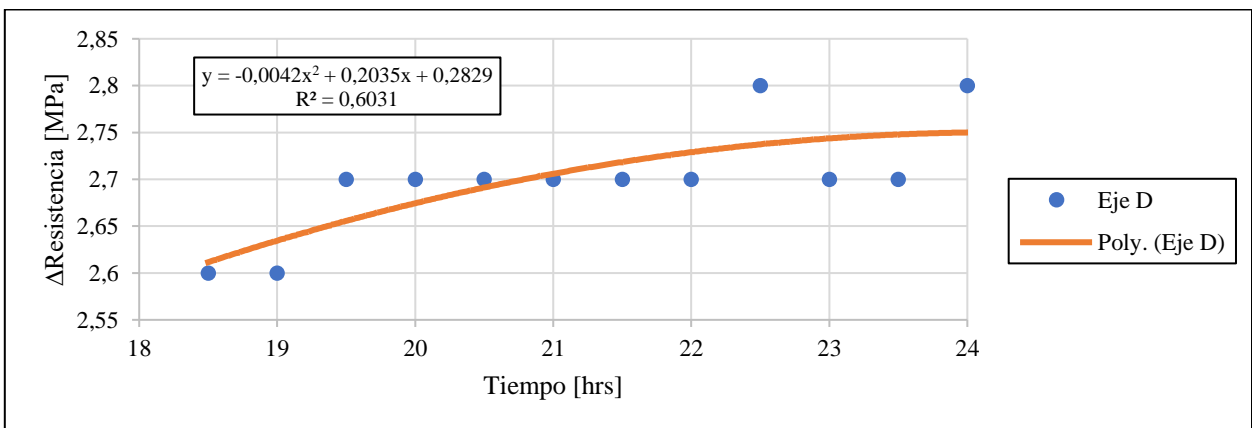
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 170: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



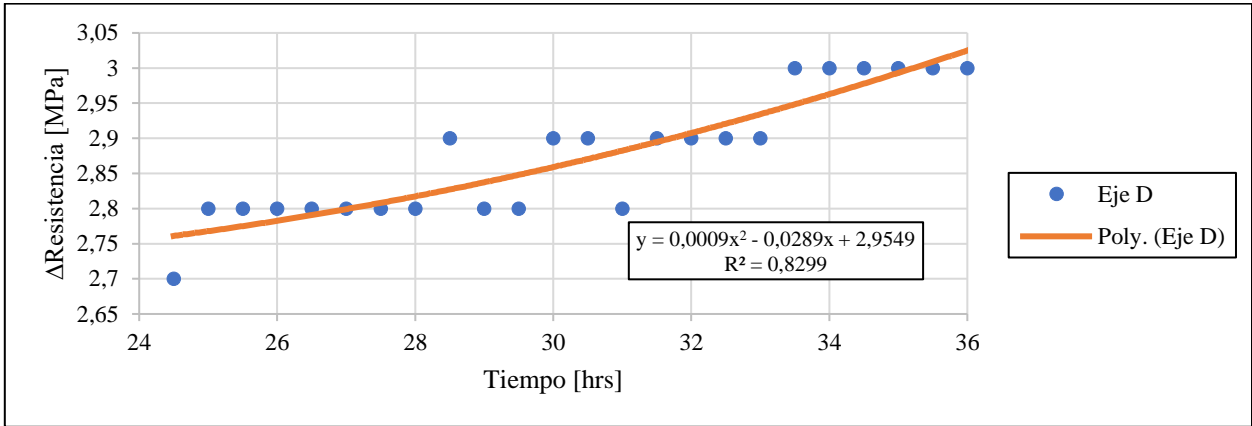
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 171: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



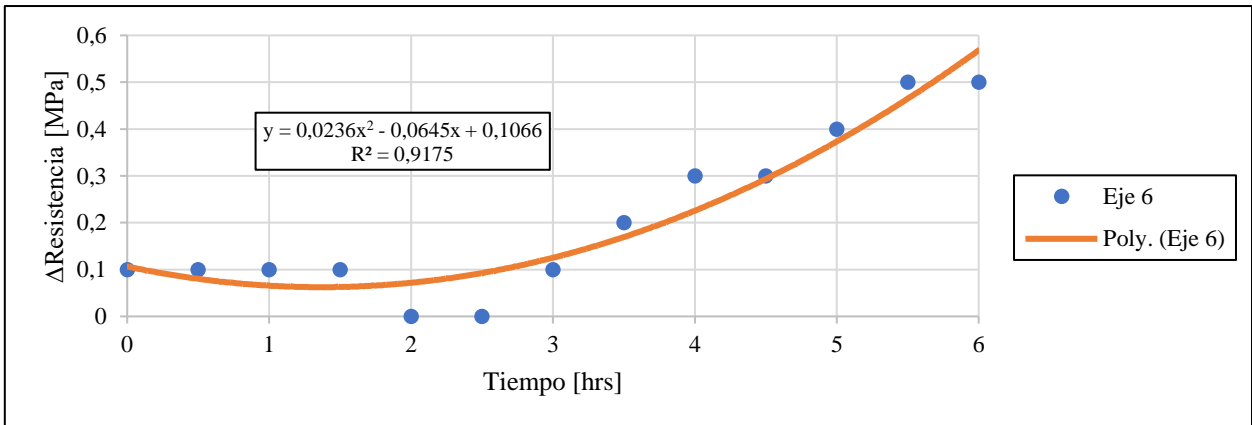
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 172: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje D



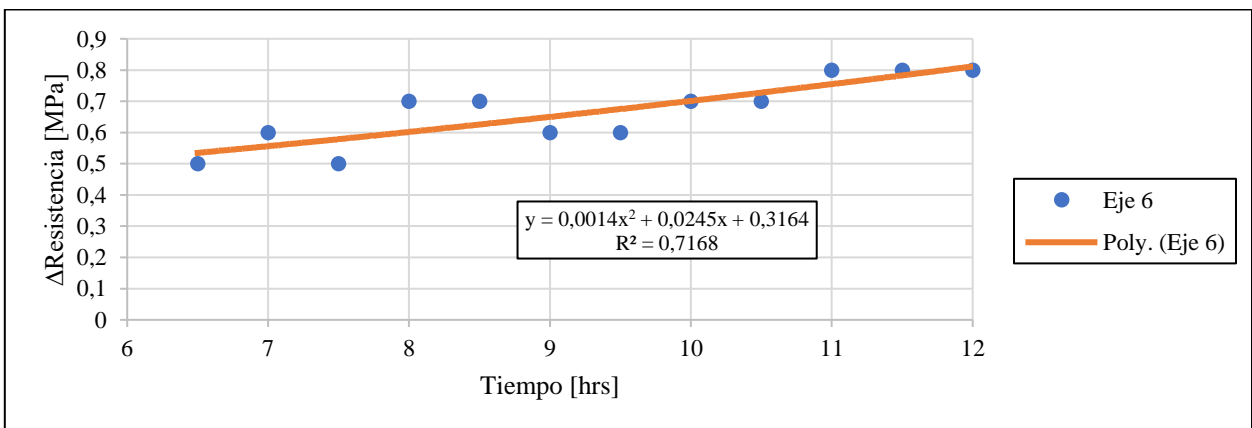
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 173: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



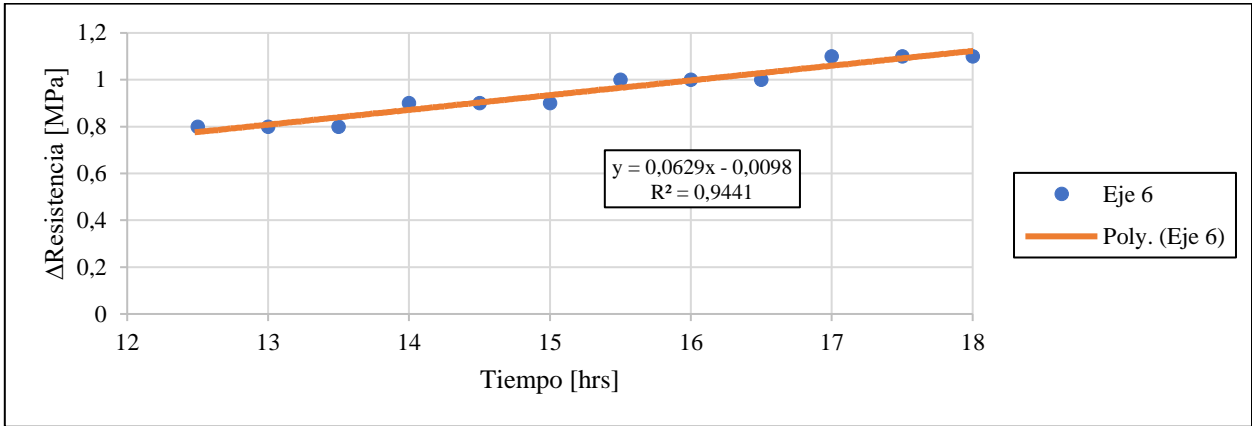
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 174: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



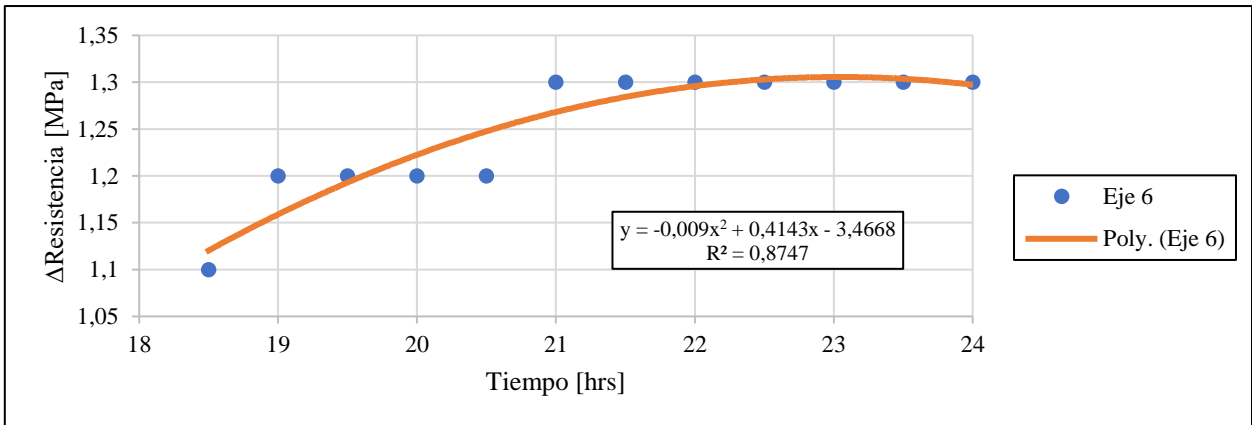
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 175: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



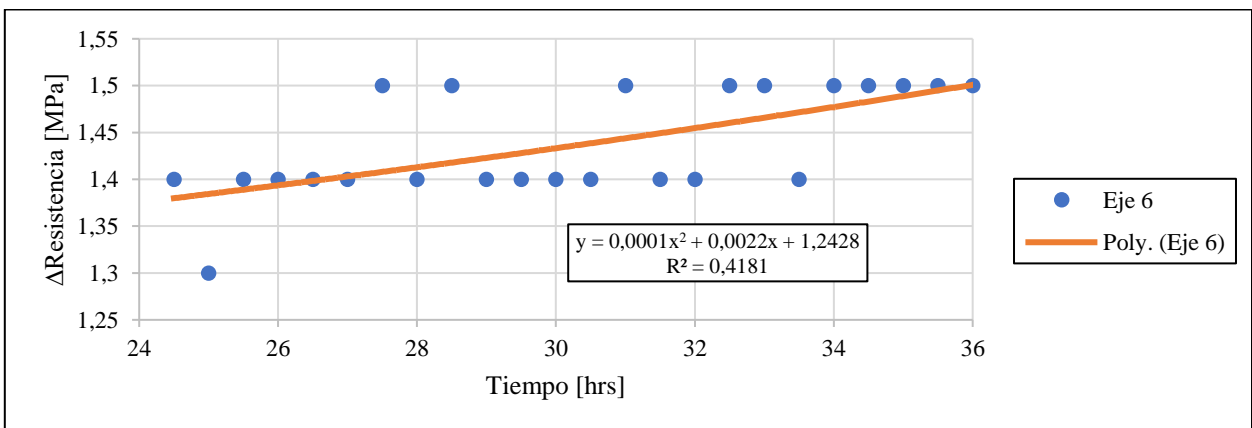
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 176: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



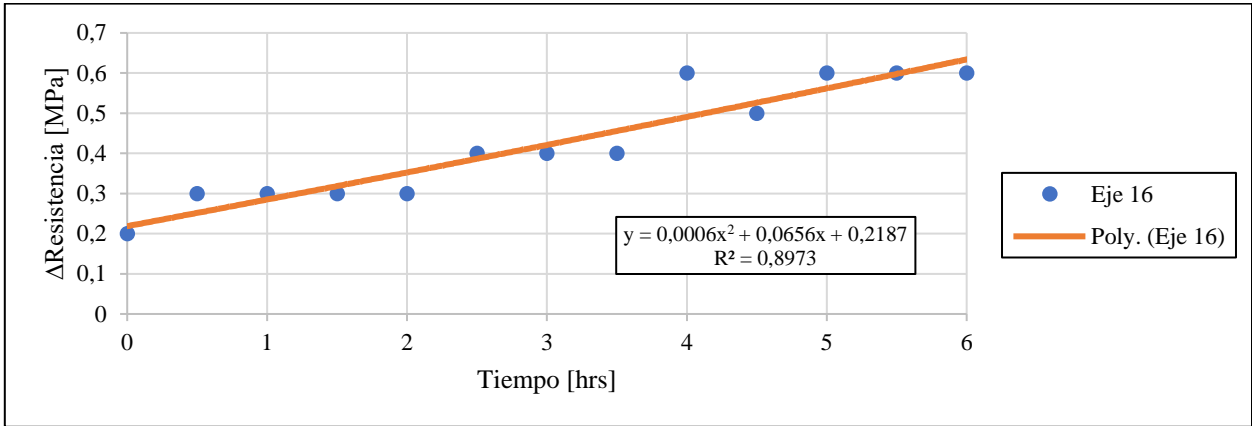
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 177: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 6



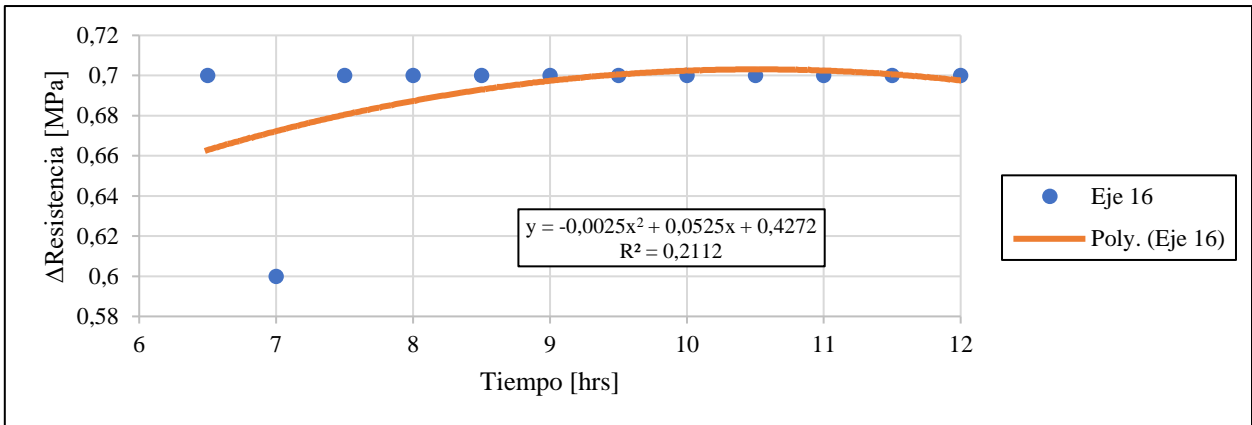
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 178: Curva diferencia de resistencia por tramo (0-6 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



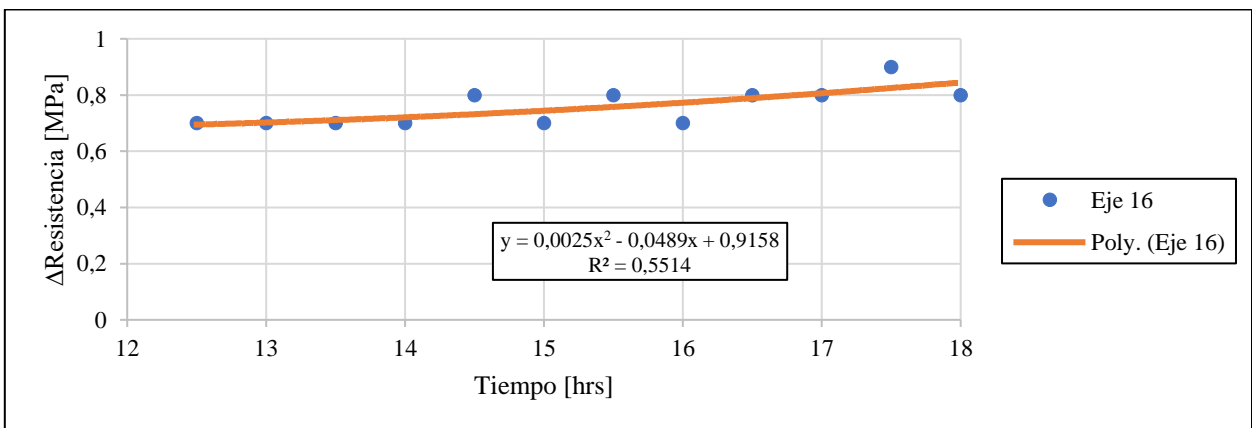
(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 179: Curva diferencia de resistencia por tramo (6-12 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



(Fuente: Elaboración Propia)

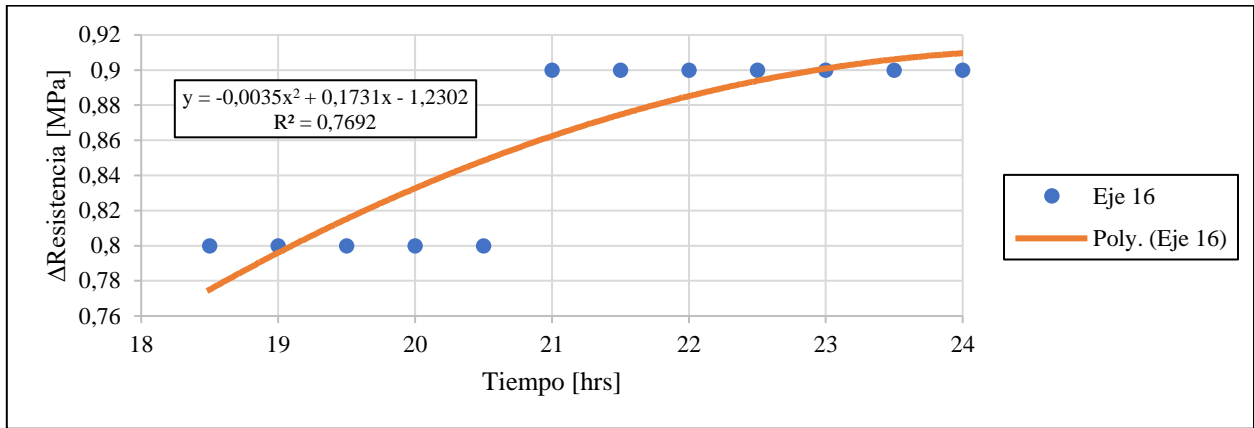
Figura 180: Curva diferencia de resistencia por tramo (12-18 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



(Fuente: Elaboración Propia)

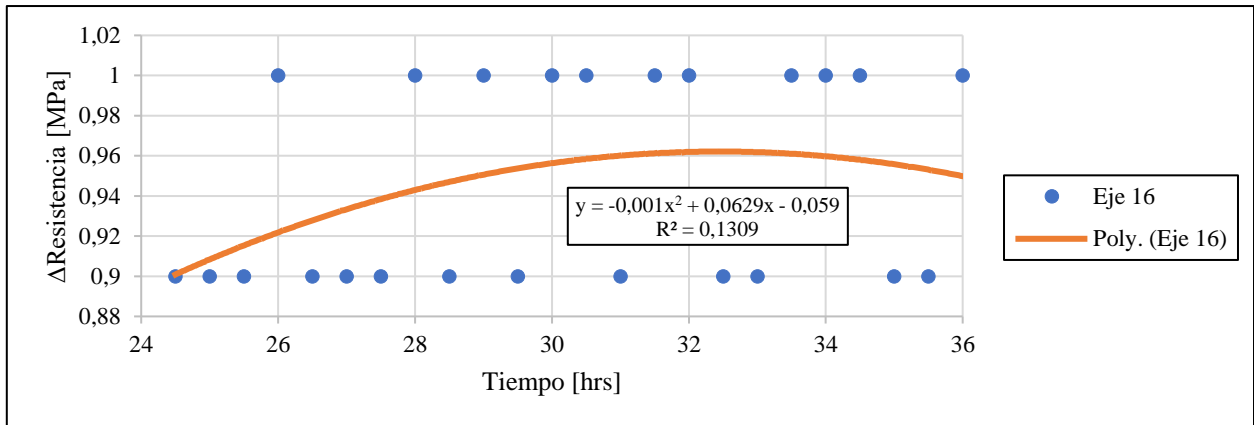


Figura 181: Curva diferencia de resistencia por tramo (18-24 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



(Fuente: Elaboración Propia)

Figura 182: Curva diferencia de resistencia por tramo (24-36 hrs) entre superficie y núcleo, Eje 16



(Fuente: Elaboración Propia)